

Lokalisierung mittels WLAN

Mobile Anwendungen, die auf die aktuelle Position des mobilen Gerätes zugreifen können, erlauben eine grosse Bandbreite von interessanten Anwendungen. Oftmals ist ein GPS-Empfänger verfügbar und somit können Positionsdaten über GPS bezogen werden. In Gebäuden und Strassenschluchten sind jedoch GPS-Daten entweder gar nicht verfügbar oder stark fehlerbehaftet. Daher stossen GPS-freie Lokalisierungsansätze auf grosses Interesse. Wir haben einen Ansatz basierend auf vorgängig gemessenen Referenzdaten (WLAN Fingerprints) genauer untersucht¹ und präsentieren hier Resultate, die zeigen, mit welcher Lokalisierungsgenauigkeit gerechnet werden kann und von welchen Faktoren diese abhängt. Für den Fall, dass die Referenzdaten eine Auflösung von etwa 10 m haben, liegen die mittleren Lokalisierungsfehler zwischen 5 und 15 m.

Christoph Stamm, Beat Walti, christoph.stamm@fhnw.ch

Mobile Anwendungen werden üblicherweise stark personenbezogen und ortsunabhängig betrieben. Dieser Umstand lässt sich programmtechnisch dahingehend ausschöpfen, dass Kontextinformationen mit einbezogen werden und der Benutzerin der mobilen Anwendung dadurch ein minimales Gefühl von künstlicher Intelligenz vermitteln. Eine der wichtigsten Kontextinformationen ist die geographische Position des mobilen Gerätes bzw. deren Benutzerin. Die Verfügbarkeit von Positionsdaten in mobilen Systemen ist heute im Allgemeinen recht gut, vor allem dort wo auf das *Global Positioning System* (GPS) zugegriffen werden kann, denn immer mehr mobile Geräte enthalten einen eingebauten GPS-Empfänger. Der grosse Nachteil von GPS ist hauptsächlich der ungenügende Empfang der Satellitendaten innerhalb oder entlang von Gebäuden oder in engen Strassenschluchten, die zu einer Abschattung führen (siehe Abb. 1 links). Glücklicherweise sind jedoch in solchen Situationen sehr oft drahtlose Netzwerke (WLANs) vorhanden.

Ein WLAN-Zugriffspunkt (*Access Point*, AP) sendet in regelmässigen Abständen ein Signal aus, um es allfälligen Clients zu ermöglichen, den AP zu finden, sowie eine Verbindung mit ihm aufzubauen. Dieses Signal sendet ein AP auch dann aus, wenn er sich im „versteckten“ Modus befindet, das heisst, wenn der Service Set Identifier (SSID) nicht öffentlich ist. Die Identifikation eines Netzwerkadapters des APs (MAC-Adresse) ist immer zugänglich, unabhängig davon ob der AP passwortgeschützt ist oder nicht. Dies ermöglicht einem Client stets eine aktuelle Liste der erreichbaren APs zur Verfügung zu haben und sich rasch mit einem zu verbinden, falls eine Datenverbindung erwünscht wird. In den meisten Fällen kann neben der MAC-Adresse auch die vorhandene Signalstärke ermittelt werden.

In diesem Artikel beschreiben wir zuerst verschiedene Ansätze zur GPS-freien Lokalisierung, stellen dann unseren eigenen genauer vor, welcher sich stark am Wi-Fi Positioning System von Skyhook-Wireless orientiert [SHW] und präsentieren schliesslich unsere Testresultate.

Ansätze zur Lokalisierung ohne GPS

Eine sehr grobe Lokalisierung eines Mobiltelefons ist ohne GPS anhand der aktuell zugeordneten Basisstation und deren Koordinaten möglich (Cell-of-Origin-Verfahren). Üblicherweise geben die Betreiber der GSM-Netze diese Koordinaten jedoch nicht frei, sondern stellen sie der Polizei und den Rettungsdiensten zur Verfügung oder nutzen sie allenfalls für eigene Anwendungen. Trotzdem sind heute verschiedene private und öffentliche Datenbanken (z.B. Sitefinder in Grossbritannien [SF]) mit den wichtigsten Angaben zu GSM-Basisstationen verfügbar und können für die Lokalisierung verwendet werden. Falls für das mobile Gerät mehrere Basisstationen „sichtbar“ sind, so können die Koordinaten aller sichtbaren Basisstationen zu einer groben Triangulierung bzw. Einmittung der aktuellen Position herangezogen werden. Die typische Positionierungsgenauigkeit liegt bei diesem Ansatz zwischen 200 und 1000 m.

Eine Umsetzung und Erweiterung des Cell-of-Origin-Ansatzes wird im Place Lab Projekt verfolgt [PL]. Neben den GSM-Antennen werden WLAN-Zugriffspunkte und fixe Bluetooth-Geräte mit ihrer Geräteidentifikation, Position und Reichweite in einer frei verfügbaren Datenbank abgelegt. Zur Bestimmung der unbekanntenen Position eines mobilen Gerätes werden die an der aktuellen Position vorhandenen Zugriffspunkte ermittelt und deren Koordinaten in der Datenbank nachgeschlagen. Aus diesen Koordinaten wird schliesslich durch Distanzschätzung oder Einmittung auf die eigene Position geschlossen.

¹ Mit freundlicher finanzieller Unterstützung des Fördervereins Fachhochschule Nordwestschweiz Solothurn FVFS.

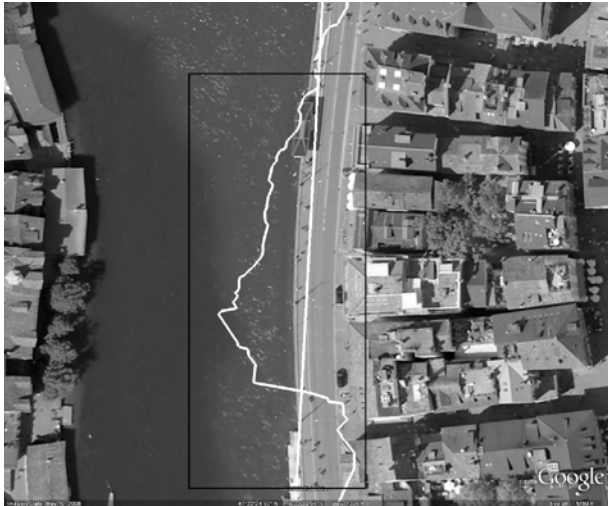


Abbildung 1: GPS-Positionen können von den wirklichen Positionen massiv abweichen (links) und nicht weit davon entfernt wieder sehr gut der Realität entsprechen (rechts)

Das Cell-of-Origin-Verfahren funktioniert nur, wenn die Positionen der Basisstationen bzw. APs bekannt sind und vom mobilen Gerät in irgendeiner Form abgefragt werden können. Während die Erfassung der Koordinaten von Basisstationen noch realistisch anmutet, kann dies bei der enormen Anzahl von WLAN APs nur schwer in Betracht gezogen werden. Daher sind Ansätze gefragt, bei denen auf die Positionen der Zugriffspunkte verzichtet werden kann. Der nachfolgende Ansatz ist ein solcher, wobei natürlich auch hier die Erfassung von gewissen Referenzkoordinaten ein wichtiger Teil des Verfahrens darstellt.

Das hybride Lokalisierungssystem XPS der Firma Skyhook-Wireless [SHW], welches in Apple's iPhone zum Einsatz kommt, verwendet neben GPS und dem Cell-of-Origin-Verfahren noch einen dritten Ansatz: das Wi-Fi Positioning System (WPS). Auch bei diesem Ansatz kommt eine (ständig zu aktualisierende) Datenbank zum Einsatz. In dieser Datenbank werden aber nicht die Positionen der Zugriffspunkte gespeichert, sondern es werden entlang der wichtigsten Strassen Referenzmessungen durchgeführt und erfasst. Eine solche Erfassung ist oft einfacher als die Bestimmung der Koordinaten der privaten Zugriffspunkte, da sie im öffentlichen Raum erfolgen kann. An einer erfassten Position können alle verfügbaren Mobilfunksignale (WLAN, GSM usw.) zusammen mit ihrer Signalstärke und einer Identifikation des Zugriffspunktes (z.B. MAC-Adresse) als „Fingerabdruck“ ermittelt werden. Ein solcher „Fingerabdruck“ ist beinahe eindeutig für eine Geländedeposition und wird darum als charakteristisch bezeichnet. Eine Referenzmessung besteht nun aus dem charakteristischen „Fingerabdruck“ und der zugehörigen Geländedeposition, welche zum Beispiel mittels GPS erfasst werden kann. Zur Lokalisierung der aktuell zu bestimmenden Position wird wiederum der „Fingerabdruck“ ermittelt und dieser mit denjenigen der Datenbank verg-

lichen. Die relevantesten Referenzmessungen liefern dann eine Menge von Geländedepositionen, die schliesslich zur Bestimmung der aktuellen Position verwendet werden. Somit ist eine vernünftige Bestimmung der Position nur möglich, wenn genügend Referenzdaten zum Vergleichen vorhanden sind. Die Firma Skyhook-Wireless spricht auf ihrer Website von einer Positionierungsgenauigkeit von 10 bis 20 m. Die Erfassung der Referenzdaten erfolgt vor allem in den USA und Europa. Es sind allerdings erst die grösseren Ballungszentren (z.B. Grossraum Zürich) und teilweise die wichtigsten Autobahnen erfasst worden.

In [DZ02] geben die Autoren einen guten Überblick über die verschiedenen Lokalisierungsansätze im Zusammenhang mit WLANs und beschreiben auch die zuvor skizzierten drei Techniken. Sind die Positionen der APs bekannt, so kann je nach der Anzahl der „sichtbaren“ APs der rudimentäre Cell-of-Origin-Ansatz oder die genauere Triangulierung verwendet werden. Im ersten Fall liegt die Positionierungsgenauigkeit bei maximal 25 m, im zweiten ist eine Genauigkeit von 15 m erreichbar, unter der Restriktion einer hohen Zelldichte, was bedeutet, dass die APs einen ungefähren Abstand von 10 m haben. Werden jedoch analog zum WPS-Ansatz von Skyhook-Wireless vorgängig Referenzmessungen an bekannten Positionen durchgeführt, so erhöht sich die durchschnittliche Positionierungsgenauigkeit von 15 auf 10 m.

Auch im verallgemeinerten Kontext der drahtlosen (Ad-hoc) Sensornetzwerke spielt Lokalisierung eine wichtige Rolle. Sensornetzwerke können zum Beispiel zur Temperatur-, Licht-, Gas- oder Radioaktivitätsmessung verwendet werden. Solche Messungen machen oft nur dann Sinn, wenn die Position der Messung bekannt ist. Während für einzelne Sensoren die Positionen gegeben oder bekannt sind (Ankerpunkte), so müssen sie für die anderen möglichst genau bestimmt werden. Dazu

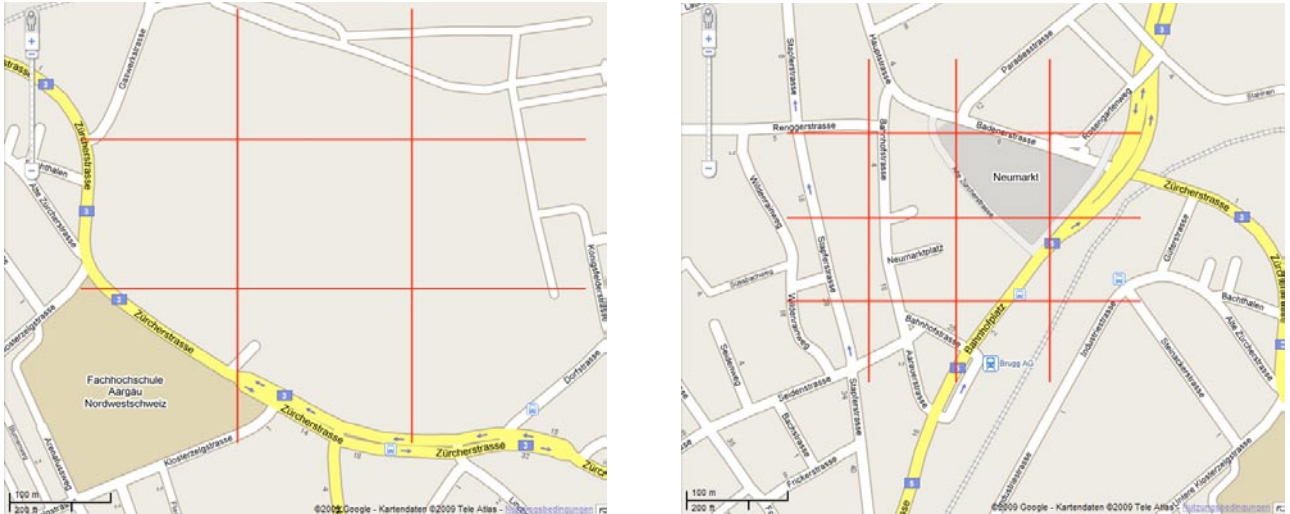


Abbildung 2: Verschiedene Kachelgrößen bei gleichem Kartenmassstab

bedarf es einer Metrik zur Approximation der Distanzen zwischen den Sensoren. Sind die Approximation zu genau drei Ankerpunkten vorhanden, so kann die Position exakt bestimmt werden, bei mehr als drei Distanzen wird üblicherweise versucht der quadratische Fehler zu minimieren [CYC06]. Die Distanzschätzungen erfolgen zum Beispiel über die Signallaufzeiten oder die Signalstärken. Im Fall von einer Line-of-Sight (LOS) Verbindung sind solche Näherungen meistens akkurat, im NLOS-Fall jedoch fast unbrauchbar. Daher sind unterschiedliche Ansätze bekannt, welche versuchen, NLOS-Verbindungen zu identifizieren, um sie für die Distanzmessung ausschliessen zu können [WH96]. Sollte dies aus ganz verschiedenen Gründen nicht möglich sein, so bleiben noch Ansätze, den Einfluss von vermeintlichen NLOS-Verbindungen auf die Positionierungsgenauigkeit zu mindern [JXZ07a, JXZ07b].

Verwaltung der Referenzdaten

Auf dem mobilen Gerät bietet sich eine API an, die alle verfügbaren Lokalisierungstechniken kapselt und jeweils die bestmögliche Lokalisierungstechnik verwendet. Ein Beispiel, wie eine solche API aussehen und realisiert werden kann, wird in [HM09] aufgezeigt.

Während bei einer Lokalisierung mittels GPS die Positionsbestimmung im mobilen Gerät ohne Zugriff auf einen Datenserver möglich ist, braucht das Wi-Fi Positioning System umfangreiche Referenzdaten. Diese Referenzdaten können auf einem zentralen Server gehalten oder zumindest teilweise lokal auf dem Gerät verwaltet werden. Im Fall des zentralen Servers würde ein Lokalisierungsservice Sinn machen, der nach der Übertragung des lokalen „Fingerabdrucks“ die berechnete, aktuelle Position zurückliefert. Selbstverständlich sind Referenzdaten von Hamburg wenig hilfreich, wenn die Lokalisierung in Zürich geschehen soll, da WLANs eine eng begrenzte Reichweite haben. Das Gleiche gilt auch im grösseren Mass-

stab: Referenzdaten vom Zürcher Limmatquai sind nur dann verwendbar, wenn man sich in der Nähe des Limmatquais aufhält und nicht im drei Kilometer entfernten Stadtteil Oerlikon. Da sich eine Person jedoch in kürzester Zeit und mit wenig Aufwand vom Limmatquai nach Oerlikon bewegen kann, macht es Sinn, dass naheliegende Referenzdaten schnell verfügbar sind. Einschlägige effiziente Datenstrukturen für Externspeicher, welche Bereichsabfragen gut unterstützen, versuchen solche Nachbarschaften gebührend zu berücksichtigen [KNRW97]. Verschiedene dieser Datenstrukturen verwenden eine Kachelstruktur, wobei die Kachelgrösse in Abhängigkeit der Anwendung und der Datendichte gewählt werden sollte.

Eine geeignete Kachelgrösse berücksichtigt in unserem Fall sowohl den maximalen Abstrahlungsradius eines APs als auch die Dichte der APs im Gelände (siehe Abb. 2). Das bedeutet, dass die Kachelgrösse im Stadtzentrum kleiner ist als am Stadtrand, dass sie aber mindestens so gross ist, dass eine kleine Anzahl davon ausreicht, um die notwendige, lokale Umgebung für eine Lokalisierung zur Verfügung zu stellen.

Speicherbedarf

Um abschätzen zu können, ob eine WLAN-basierte Lokalisierung direkt auf dem mobilen Gerät durchgeführt werden kann, ist es hilfreich den Arbeitsspeicherbedarf abzuschätzen, denn nach wie vor ist der schnellere Arbeitsspeicher eines mobilen Gerätes eng begrenzt. Ein ökonomischer Umgang mit dem Arbeitsspeicher ist somit unumgänglich.

Auf die Referenzdaten bezogen heisst das, dass nur die wirklich erforderlichen Referenzdaten vom langsamen Externspeicher in den Arbeitsspeicher geladen werden sollen. Um ein Gefühl für die Datenmenge der Referenzdaten zu entwickeln, betrachten wir ein lokales Datenset von 100 km². Bei einer räumlichen Auflösung von 10 m in x- und

y-Richtung liegen in diesem lokalen Datenset bereits eine Million Referenzpunkte. Da ein grosser Teil davon an nicht öffentlich zugänglichen Orten liegen wird, reduzieren wir die Menge der Referenzpunkte auf 10%, d.h. auf 100'000 in unserer Beispielsrechnung. Pro Referenzpunkt brauchen wir die Geländeposition (geografische Länge und Breite, evtl. auch die Höhe über Meer) und einen WLAN „Fingerabdruck“, d.h. eine Menge „sichtbarer“ APs mit ihren Identifikationen und Signalstärken. Die Geländekoordinaten zusammen mit dem „Fingerabdruck“ am Referenzpunkt nennen wir eine Referenzmessung. In einem städtischen Gebiet wie Zürich sind im Mittel gut zwanzig APs pro Referenzmessung zugreifbar. Jeder AP wird durch seine eindeutige, sechs Bytes lange MAC-Adresse identifiziert. Die Signalstärke eines APs ist oft nur ganzzahlig in Dezibel-Milliwatt (dBm) abrufbar und benötigt daher nur ein Byte. Unter der Annahme, dass eine geographische Position mit zwölf Bytes ausreichend genau gespeichert werden kann, kommen wir auf einen Speicherbedarf von $100000 \cdot (12 + 20 \cdot (6 + 1))$ Byte, also etwa 14.5 MiByte. Dieser Wert ist als untere Grösse zu verstehen, da in der Praxis noch Speicher für die dynamische Verwaltung der Daten notwendig ist. Für ein aktuelles mobiles Gerät sind 14.5 MiByte Arbeitsspeicher, die permanent für die Lokalisierung zur Verfügung stehen müssen und somit von anderen Anwendungen nicht genutzt werden können, nicht wenig, aber dennoch realisierbar. Dennoch wäre es eine unnötige Speicherverschwendung, das ganze lokale Datenset permanent im Hauptspeicher zu haben, wie das einsichtige Beispiel mit Zürich Limmatquai und Oerlikon gezeigt hat.

Positionsbestimmung

Im Zentrum steht die Positionsbestimmung, welche möglichst genau erfolgen soll und nur so viel Ressourcen verwendet, dass die Lokalisierung ohne negative Auswirkungen in anderen mobilen Anwendungen eingesetzt werden kann. Wir gehen davon aus, dass ein lokales Set von Referenzmessungen, die Referenzdaten, und der aktuelle „Fingerabdruck“ verfügbar sind. Ein „Fingerabdruck“ F besteht aus einer Menge von Paaren (ID_j, P_j) , wobei ID_j eine eindeutige Identifikation für den Zugriffspunkt AP_j ist, z.B. seine MAC-Adresse, und P_j die am Erfassungspunkt des „Fingerabdrucks“ festgestellte Signalstärke des AP_j darstellt. Eine Referenzmessung R besteht aus einer geographischen Position (x,y,z) und einem „Fingerabdruck“ F .

Das Problem der Positionsbestimmung besteht nun aus zwei Teilproblemen: In einem ersten Schritt sollen n möglichst relevante Referenzmessungen $R_{i \in \{1..n\}}$ aus den Referenzdaten ausgewählt und in einem zweiten Schritt daraus dann die gesuchte Position berechnet werden. Damit die Posi-

tionsberechnung zu einem vernünftigen Resultat führt, ist es entscheidend, dass die verwendeten Referenzmessungen R_i in nächster Umgebung der zu bestimmenden Position liegen und diese wenn möglich umgeben. Je besser dieses Ziel erreicht wird, desto geringer ist der Einfluss des angewandten Verfahrens auf die nachfolgende Positionsberechnung.

Wenden wir uns nun zuerst dem ersten Teilproblem zu. Um die relevanten Referenzmessungen aus den verfügbaren Referenzdaten herauszufiltern benötigen wir ein sinnvolles Ähnlichkeitsmass. Wie auch bei echten Fingerabdrücken sind charakteristische Gemeinsamkeiten gefragt. In unserem Falle sind dies vor allem die gemeinsamen ID_j des aktuellen „Fingerabdrucks“ F_0 und eines beliebig anderen „Fingerabdrucks“ F_i . Ähnliche Referenzmessungen haben folglich möglichst viele gemeinsame ID_j und vorzugsweise keine, die im aktuellen Fingerabdruck F_0 nicht vorhanden sind. Des weitern sollten die Signalstärken P_j der gemeinsamen APs ähnlich gross sein.

Als geeignetes Ähnlichkeitsmass a hat sich nach mehreren Testreihen $a = 0.9 a' + 0.1 a''$ herausgestellt, wobei a' ein Mass für die Übereinstimmung der Zugriffspunkte und a'' ein Mass für ähnlich grosse Signalstärken der gemeinsamen P_j darstellen:

- $a' = \frac{1}{2}(k/m_0 + k/m_i)$ mit k = Anzahl gemeinsamer ID_j , m_0 = Anzahl APs von F_0 und m_i = Anzahl APs von F_i ;
- $a'' = 1/(1 + d/k)$ mit d^2 = Summe der quadratischen Differenzen der Signalstärken der gemeinsamen APs.

Die Gewichtung zwischen a' und a'' zeigt deutlich, dass in erster Linie die Übereinstimmung der MAC-Adressen wichtig ist und erst in zweiter Linie auf die Signalstärken abgestellt werden soll.

Die n Referenzmessungen R_i mit dem höchsten Ähnlichkeitsmass werden nachfolgend *Nearest-Neighbours* genannt, der Hoffnung verleihend, dass diese Referenzmessungen wirklich nahe bei der aktuellen Position liegen. Nur wenn die *NearestNeighbours* in der Nähe der zu bestimmenden Position liegen, kann eine Interpolation der Positionen der Referenzmessungen zu einer guten Schätzung der wirklichen Position führen. In Abbildung 3 sieht man deutlich, dass durch Auswahl der beiden unteren Referenzmessungen als *NearestNeighbours* (als dunkle Kreise dargestellt) fast unmöglich die gesuchte Position (dargestellt durch das Männchen) durch Interpolation gefunden werden kann.

Die eigentliche Bestimmung der Position verwendet nun die n *NearestNeighbours*. Als praktikable Werte für n haben sich 2 und 3 gezeigt. Mehr als drei Referenzmessungen erhöhen im Allgemeinen die Unsicherheit und bringen insbesondere bei einer rasterförmigen Verteilung der Referenzmessungen wenig zusätzlichen Gewinn.

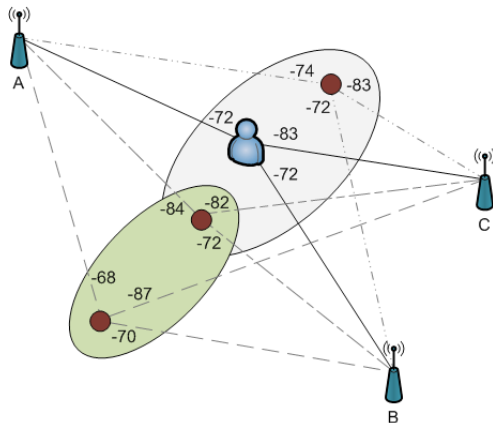


Abbildung 3: Die Auswahl der Referenzmessungen entscheidet darüber, ob eine Positionsabschätzung durch Interpolation erfolgsversprechend ist oder nicht (Signalstärken in dBm)

Ob zwei oder drei geeigneter ist, hängt stark von der Erfassungsart der Referenzdaten ab. Werden die Referenzmessungen in mehr oder weniger regelmässigen Abständen entlang einer Strasse durchgeführt, so haben diese Referenzdaten eine linienförmige Verteilung und daher führt die Interpolation von lediglich zwei Referenzmessungen zum besten Ergebnis. Haben die Referenzdaten dagegen eine flächenförmige Verteilung, so macht eine Interpolation der drei nächsten Referenzmessungen Sinn. Als Interpolationsart dient üblicherweise eine lineare Interpolation der (gewichteten) Positionen. Wird auf Gewichte verzichtet, so wird der Mittelwert der Positionen der *NearestNeighbours* berechnet.

Eine Verwendung von Gewichten kann durchaus sinnvoll sein, wenn die Gewichte erlauben, die zu bestimmende Position im richtigen Mass auf die *NearestNeighbours* auszurichten. Im besten Fall handelt es sich bei den Gewichten um grobe metrische Distanzabschätzungen, die auf Basis einer typischen Sendeleistung eines WLAN-Zugriffspunktes (z.B. 25 mW) und eines Ausbreitungsmodells basieren. Als Ausbreitungsmodelle bieten sich Freiraumdämpfung (nur für Sichtverbindungen zutreffend) oder spezielle empirische Modelle (z.B. modifizierte Version von Okumura-Hata) an [Sta01]. Die Freiraumdämpfung in Dezibel beträgt: $32.44 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d$, wobei f die Trägerfrequenz in MHz und d die Distanz in km sind. Entlang von Strassen besteht jedoch oft eine Fast-Sichtverbindung zwischen dem Empfänger und den stärksten APs in der Umgebung, d.h. eine direkte Sichtverbindung ist meistens durch genau eine Hausmauer unterbrochen, da die APs typischerweise in Gebäuden platziert werden. Die zusätzliche Dämpfung kann durch stärkere Gewichtung der Frequenz und der Distanz berücksichtigt werden. In Anlehnung an das COST231 Hata-Modell [COST] beträgt dann die Signaldämpfung bei 2400 MHz (WLAN 802.11g) ca.: $32.44 + 33.9 \log_{10} 2400 + 38.4 \log_{10} d$ dB. Da die Signaldämpfung mit der Differenz aus Sende- und Empfangslei-

stung (jeweils in dBm gemessen) übereinstimmen muss (etwelche Antennengewinne sind hier vernachlässigt worden), kann daraus die Distanz d grob angenähert werden.

Anstatt die Positionen der *NearestNeighbours* zu interpolieren, könnten auch die Positionen der APs mit Hilfe der angenäherten Distanzen und einer Triangulierung bestimmt werden. Die ermittelten, angenäherten Positionen der APs würden danach in einem zweiten Schritt benutzt, um wiederum mit angenäherten Distanzen und Triangulierung die gesuchte Position zu bestimmen. Wie aber bereits in der Einleitung erwähnt, sollte hierbei, um vernünftige Resultate zu erhalten, mit grosser Treffsicherheit zwischen Sichtverbindungen und Nicht-Sichtverbindungen unterschieden werden können.

Unter der Annahme einer Metrik zur Abschätzung der Distanz $d_i > 0$ zwischen der zu bestimmenden Position und dem *NearestNeighbour* R_i (Details siehe Tests) wählen wir das zur Position von R_i gehörende Gewicht

$$w_i = \left(d_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i} \right)^{-1}. \text{ Dadurch führen kürzere}$$

Distanzen zu höheren Gewichten und gleichzeitig widerspiegeln die Gewichte die Verhältnisse zwischen den Distanzen. Für den Fall, dass $d_i = 0$ ist, setzen wir $w_i = 1$ und alle anderen Gewichte auf null. Die gesuchte Position (x,y,z) berechnen wir schliesslich als gewichtete Interpolation der n Positionen der *NearestNeighbours*: $x = \sum w_i x_i$, $y = \sum w_i y_i$, $z = \sum w_i z_i$.

Abschätzung der Genauigkeit

Um den erwarteten Lokalisierungsfehler abschätzen zu können, gehen wir von einer rasterförmigen Verteilung der Referenzmessungen und einer Koordinatenauflösung in ganzen Metern aus. Sei $2s$ die Gitterlänge in Metern und nehmen wir weiter an, dass an allen Gitterpunkten eine Referenzmessung vorliegt, dass die Testpunkte gleichförmig verteilt sind und dass ein perfekter Lokalisierungsalgorithmus die zu bestimmende Position aus den Positionen der Referenzmessungen durch lineare Interpolation bestimmt. Unter diesen Annahmen lassen sich folgende mittlere Lokalisierungsfehler e_n in Abhängigkeit der n bestgeeigneten Referenzpositionen bestimmen.

Bei $n = 1$ kann die zu bestimmende Position nicht linear interpoliert werden und daher liegt für jeden Testpunkt die optimal bestimmte Position genau an der Stelle der nächstliegenden Referenzmessung, welche maximal $s\sqrt{2}$ entfernt liegt. Betrachtet man eine quadratische Rasterzelle mit Seitenlänge $2s$, so resultiert der folgende mittlere

$$\text{Positionierungsfehler: } e_1 = \frac{1}{4s^2} \sum_{x=-s}^{s-1} \sum_{y=-s}^{s-1} \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Für ein praktisches Beispiel mit Rastergrösse 10

m ($s = 5$) resultiert ein erwarteter mittlerer Positionierungsfehler e_1 von 3.85 m.

Bei $n = 2$ muss für jeden Testpunkt das optimale Paar von Referenzmessungen berücksichtigt werden. Optimal in dem Sinne, dass die Distanz zwischen dem Testpunkt und einer linear interpolierten Position zwischen den beiden Referenzmessungen minimal ist. So können die beiden bestgeeigneten Referenzmessungen horizontal, vertikal oder diagonal zueinander liegen. Aus Symmetriegründen reicht es jedoch aus, von einer vertikalen und diagonalen Ausrichtung auszugehen und die horizontale Distanz mit der diagonalen zu vergleichen. Die minimale Distanz $d(x,y)$ an der relativen Position (x,y) berechnet sich dann wie folgt:

$$d(x,y) = \min\left(x, \sqrt{\left[\frac{s-y-x}{2}\right]^2 + \left[\frac{s-y-x}{2}\right]^2}\right).$$

Wiederum für eine quadratische Rasterzelle mit Seitenlänge $2s$ betrachtet, ergibt sich der folgende mittlere Positionierungsfehler:

$$e_2 = \frac{1}{4s^2} \left(\left(8 \sum_{y=1}^s \sum_{x=0}^{s-y} d(x,y) \right) + 4 \sum_{x=0}^s d(x,0) \right).$$

Bei einer Rastergröße von 10m reduziert sich der erwartete mittlere Positionierungsfehler e_2 auf 0.73m.

Für $n \geq 3$ ist der erwartete mittlere Positionierungsfehler gleich null, weil bei optimaler Bestimmung der Referenzmessungen immer drei umliegende Referenzmessungen vorhanden sind und dadurch jede Position in der Ebene durch lineare Interpolation genau berechnet werden kann.

Metriken

Die Gewichte bei der Interpolation der Positionen der *NearestNeighbours* werden wie bereits erwähnt aus angenäherten „Distanzen“ berechnet. In unseren Tests haben wir diese Distanzen d_i mit drei verschiedenen Metriken berechnet:

M_1 : $d_i = a_i$, wobei a_i dem Ähnlichkeitsmass der Referenzmessung R_i entspricht, welches bereits zur Auswahl der *NearestNeighbours* verwendet worden ist;

M_2 : $d_i = \max_j |d_{ij} - d_{0j}|$, wobei das Maximum über allen k gemeinsamen ID_j des aktuellen (F_0)

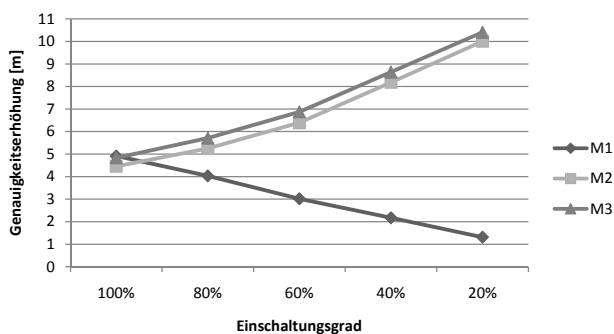


Abbildung 4: Einfluss der Metriken M1 bis M3 auf die Genauigkeitserhöhung durch gewichtete Interpolation im umfangreicheren Datensatz ZH2 für $n = 3$

und des i -ten „Fingerabdrucks“ ermittelt wird, und die Distanzen d_{ij} den metrischen Distanzen (berechnet mit dem Hata-Modell) zwischen R_i und AP_j entsprechen;

$$M_3: d_i = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (d_{ij} - d_{0j})^2}$$
 entspricht der Wurzel

der mittleren quadratischen Abweichung.

Oft wird in ähnlichen Projekten mit künstlichen Testdaten gearbeitet. Wir haben stattdessen eine mobile Applikation zur Testdatenakquisition erstellt, welche in regelmässigen Intervallen alle „sichtbaren“ WLAN-Zugriffspunkte und die aktuelle GPS-Position aufzeichnen kann. In verschiedenen Städten (Zürich, Basel, Brugg) haben wir damit entlang einiger wichtigen Strassen Testdaten erfasst (siehe auch Abb. 1).

Testdaten

Aus den umfangreichen Testdaten präsentieren wir hier die Daten Zürich in zwei Datensätzen:

- ZH1 ist ein kleiner Ausschnitt und entspricht in etwa dem Gebiet aus Abbildung 1 rechts, er enthält etwa 44 verwendete Referenzmessungen;
- ZH2 ist ein wesentlich umfassenderer Datensatz mit ca. 1560 verwendeten Referenzmessungen.

Ein Testlauf besteht aus der zufälligen Datenaufteilung (80% Referenzmessungen, 20% Testdaten), der Reduktion der Referenzmessungen auf ein 10 m Raster und der Durchführung von durchschnittlich k Positionsrechnungen. Um den Realitätsgrad noch zu erhöhen, müssen bei den Testdaten einige APs zufällig ausgeschaltet, d.h. aus dem „Fingerabdruck“ entfernt werden, denn bei WLAN-Zugriffspunkten sollte man nicht davon ausgehen, dass sie ständig in Betrieb sind. Für beide Datensätze werden mit den unterschiedlichen Parametrisierungen die ermittelten Positionierungsfehler und anderen Messwerte über 20 Testläufe gemittelt. Als Parametrisierung verwenden wir die Anzahl *NearestNeighbours* ($n = 1..5$), die Metrik (M_1 bis M_3) und den prozentualen Einschaltungsgrad (100%, 80%, 60%, 40%, 20%).

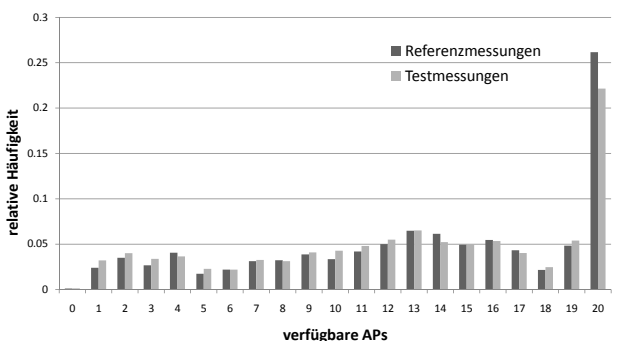


Abbildung 5: Relative Häufigkeit der Anzahl der verfügbaren WLAN-Zugriffspunkte von Referenz- und Testmessungen in der Stadt Zürich

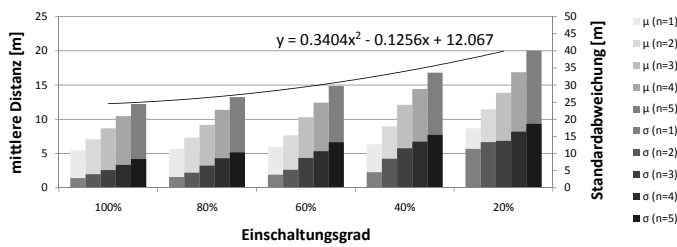


Abbildung 6: Durchschnittliche Entfernungen (und Standardabweichungen) zwischen dem Testpunkt und den n ausgewählten Referenzmessungen

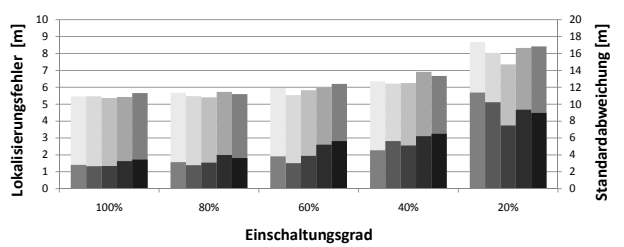


Abbildung 7: Durchschnittliche Lokalisierungsfehler (und Standardabweichungen) in Abhängigkeit der Anzahl n ausgewählter Referenzmessungen und des Einschaltungsgrads

Resultate

Die verschiedenen Tests zeigen, dass der Einfluss der Metriken auf die Lokalisierungsgenauigkeit bei der Interpolation gering ist. In Abbildung 4 ist stellvertretend für alle Messungen der Genauigkeitsunterschied zwischen der gewichteten und der ungewichteten Interpolation für den Datensatz ZH2 mit $n = 3$ in Abhängigkeit der eingeschalteten APs und der verwendeten Metrik ersichtlich. Der mittlere Lokalisierungsfehler reduziert sich bei 100% Einschaltungsgrad von 14.8 um 4.8 m auf 10 m. Die gewichtete Interpolation bringt somit eine deutliche Verbesserung gegenüber der ungewichteten Interpolation; die Wahl der Metrik ist relevant, da der positive Einfluss auf die Lokalisierungsgenauigkeit von M_1 deutlich geringer ausfällt als bei den beiden anderen Metriken. Der Unterschied zwischen M_2 und M_3 ist jedoch gering, wobei in beiden Testsets in allen Testläufen M_3 immer leicht bessere Resultate brachte. Daher werden wir die folgenden Resultate nur für Metrik M_3 zeigen.

Pro Datensatz analysieren wir zuerst die Auswahl der *NearestNeighbours*, ermitteln dann die Lokalisierungsfehler und setzen diese letztlich mit den theoretischen Untergrenzen in Beziehung.

Datensatz ZH1: In diesem kleinen Datensatz werden nur jeweils 44 Referenzmessungen verwendet und durchschnittlich 40 Testmessungen durchgeführt. Zur Beurteilung der Güte der Auswahl der *NearestNeighbours* betrachten wir die durchschnittliche Distanz (und Standardabweichung) der n *NearestNeighbours* von der Testposition (Abb. 6). Für $n = 1$ haben wir an früherer Stelle gesehen, dass in einem 10 m Raster bei perfekter Auswahl des nächsten Nachbarn die Distanzen

zwischen 0 und $5\sqrt{2} \approx 7$ m liegen und die mittlere Distanz 3.85 m beträgt. Unsere Tests zeigen nun, dass die Auswahl der n *NearestNeighbours* nicht allzu schlecht funktioniert, da der nächste Nachbar im Mittel zwischen 5.5 (bei 100%) und 8.7 m (bei 20%) liegt. Die mittlere Distanz nimmt mit n linear und mit abnehmendem Einschaltungsgrad leicht quadratisch zu.

In Abbildung 7 sind schliesslich die mittleren Lokalisierungsfehler in Abhängigkeit des Einschaltungsgrads dargestellt. Die besten Resultate sind bei $n = 2$ oder $n = 3$ je nach Einschaltungsgrad gemessen worden, was nicht weiter überrascht. Dass die mittleren Lokalisierungsfehler bis zum Einschaltungsgrad 40% recht stabil bleiben, zeigt, dass die Auswahl der *NearestNeighbours* gut funktioniert. Vergleicht man die Werte aus Abbildung 7 mit denjenigen aus Abbildung 6, so sieht man für $n > 1$ deutlich, dass durch gewichtete Interpolation eine Position berechnet werden kann, deren Lokalisierungsfehler geringer ist als die mittlere Distanz vom Testpunkt zu den ausgewählten Referenzpunkten. Es ist aber auch ersichtlich, dass die Hinzunahme eines vierten oder fünften nächsten Nachbarn zu einer Verschlechterung der Lokalisierung beiträgt.

Datensatz ZH2: In diesem umfangreicheren Datensatz werden durchschnittlich 1560 Referenzmessungen verwendet und durchschnittlich 1430 Testmessungen durchgeführt. Nicht an allen gewählten Testpunkten kann eine Lokalisierung durchgeführt werden, da vereinzelt keine WLAN-Signale empfangen worden sind. Bei der Erfassung einer Referenz- bzw. Testmessung sind maximal die zwanzig stärksten Signale berücksichtigt

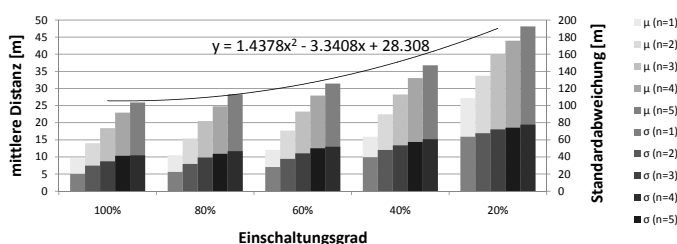


Abbildung 8: Durchschnittliche Entfernungen (und Standardabweichungen) zwischen dem Testpunkt und den n ausgewählten Referenzmessungen

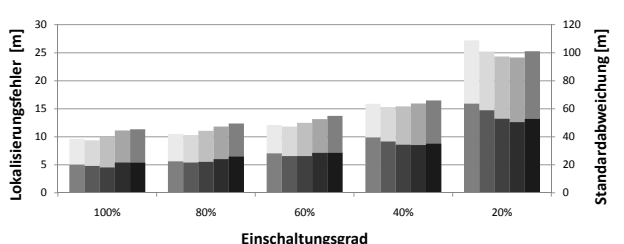


Abbildung 9: Durchschnittliche Lokalisierungsfehler (und Standardabweichungen) in Abhängigkeit der Anzahl n ausgewählter Referenzmessungen und des Einschaltungsgrads

worden (siehe Abb. 5). Zur Beurteilung der Güte der Auswahl der *NearestNeighbours* betrachten wir wiederum die durchschnittliche Distanz (und Standardabweichung) der n *NearestNeighbours* von der Testposition (Abb. 8). Die ausgewählten *NearestNeighbours* liegen nun deutlich weiter entfernt vom Optimum, was damit zusammenhängt, dass etliche Testpunkte nur über ein paar wenige weit entfernte Referenzmessungen verfügen. Der nächste Nachbar liegt im Mittel zwischen 9.6 (bei 100%) und 27.2 m (bei 20%) vom Testpunkt entfernt. Generell nimmt die mittlere Distanz mit n linear und mit abnehmendem Einschaltungsgrad leicht quadratisch zu.

Die dazugehörigen Lokalisierungsfehler sind in Abbildung 9 abgebildet. Wiederum zeigt sich, dass $n = 2$ und $n = 3$ zu den besten Resultaten führen, wenn alle Einschaltungsgrade berücksichtigt werden. Bei einem sehr hohen Einschaltungsgrad würde ein nächster Nachbar ausreichen; umgekehrt bei einem sehr tiefen Einschaltungsgrad hilft die gewichtete Interpolation von 3 oder sogar 4 *NearestNeighbours* deutlich zu einer Verbesserung der Lokalisierungsgenauigkeit.

Fazit und Ausblick

Das Resultat unserer Arbeit ist eine Lokalisierungs-API, die man schnell und einfach in eine bestehende Applikation einbinden und anschliessend darüber Positionsinformationen beziehen kann. Die Güte der zurückgelieferten Positionen hängt im Fall der WLAN-Lokalisierung von der Dichte, der Aktualität der Referenzmessungen, der Anzahl bekannter Zugriffspunkte, die zum Zeitpunkt der Testmessung aktiv sind, und vom Interpolationsverfahren ab. Solange mehr als 40% der bekannten APs bei einer Testmessung aktiv sind, funktioniert die Lokalisierung recht stabil. Während in Gebieten mit ausreichender Anzahl WLAN Zugriffspunkten eine Lokalisierungs-genauigkeit von 5 bis 6 m realistisch ist, sinkt die Genauigkeit in „dünn besiedelten“ Gebieten auf 10 bis 15 m, je nach Einschaltungsgrad. Die geeignete Metrik zur Auswahl der Referenzpunkte, welche für die Interpolation herbeigezogen werden sollen, schätzen wir weitaus wichtiger ein als das gewählte Interpolationsverfahren, da durch gewichtete Interpolation lediglich Verbesserungen von maximal 10 m erzielt wurden.

Das Abfahren der wichtigsten Strassen und der Aufbau der Referenzdatenbank beanspruchen sehr viel Zeit und Ressourcen. Das Google Streetview-Projekt [GSV] wie auch das Skyhook-Wireless-Projekt zeigen aber, dass gewisse Firmen durchaus bereit sind, einen vergleichbaren Aufwand zu leisten. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Benutzer der Lokalisierungs-API, welche auch ein GPS in ihrem mobilen Gerät integriert haben, als freiwillige Datensammler zu rekrutieren.

Um unsere Lokalisierungstechnik zu testen, haben Jugendliche in der Informatik-Projektwoche von „Schweizer Jugend forscht“ eine mobile Applikation entwickelt, mit der sich Wander- und Biketouren sehr einfach aufzeichnen lassen. Eine andere mobile Anwendung liefert Lokalisierungs-informationen in Echtzeit. Dabei übermittelt ein Dienst des Mobiltelefons in regelmässigen Abständen die aktuelle Position an einen Server und verknüpft sie mit zusätzlichen geografischen Informationen. Dadurch werden Anwendungen im Bereich der sozialen Netzwerke ermöglicht, wie z.B. „Wo befindet sich Paul?“ oder „Mit wem könnte ich zu Mittag essen?“.

Momentan portieren wir unsere Technologie nach Android und erfassen Referenzmessungen innerhalb von mehrstöckigen Gebäudekomplexen, um den Einsatz der WLAN-Lokalisierung auch in grossen Business-Centern oder Shopping-Malls zu demonstrieren.

Referenzen

- [COST] COST Hata Model.
http://en.wikipedia.org/wiki/COST_Hata_model
- [CYC06] Chan, Y.T., Yau, C.H., Ching, P.C. Exact and approximate maximum likelihood localization algorithms. IEEE Trans. Veh. Technology. Vol. 55, 2006.
- [DZ02] Dornbusch, P., Zündt, M. Realisierung von Positionsordnungen in WLAN. Proc. ITG-Fachtagung „Technologie und Anwendungen für die mobile Informationsgesellschaft“, 2002.
- [GO07] Gruntz, D., Olloz, S. Erfahrungen mit dem Location API (JSR 179). JavaSPEKTRUM 06, 2007.
- [GSV] Google Street View.
<http://maps.google.com/help/maps/streetview/>
- [HM09] Häfelfinger, M., Marraffino, F. Lokalisierung in drahtlosen Netzwerken ohne GPS. Informatik-Projektarbeit, FHNW, 2009.
<http://www.fhnw.ch/technik/imvs/forschung/projekte/lokalisierung-basierend-auf-wlan>
- [JXZ07a] Xing, J., Zhang, J., Jiao, L., Zhang, X., Zhao, C. A Robust Wireless Sensor Network Localization Algorithm in NLOS Environment. IEEE Int. Conf. Control and Automation, 2007.
- [JXZ07b] Xing, J., Zhang, J., Jiao, L., Zhang, X., Zhao, C. LCC-Rwgh: A NLOS Error Mitigation Algorithm for Localization in Wireless Sensor Network. IEEE Int. Conf. Control and Automation, 2007.
- [KNRW97] Kreveld, M.v., Nievergelt, J., Roos, T., Wiedmayer, P. Algorithmic Foundations of Geographic Information Systems. LNCS 1340, 1997.
- [OS08] Oser, H-P., Stamm, C. HikeTracker – Eine Smartphone-Software zur Unterstützung von Freizeitaktivitäten. IMVS Fokus Report, 2008.
<http://www.fhnw.ch/technik/imvs/publikationen/artikel-2008/hiketracker>
- [PL] Place Lab, a privacy-observant location system.
<http://www.placelab.org>
- [SF] Ofcom, Mobile Phone Base Station Database.
<http://www.sitefinder.ofcom.org.uk/>
- [SHW] Skyhook Wireless, hybrid positioning system XPS.
<http://www.skyhookwireless.com/>
- [Sta01] Stamm, C. Algorithms and Software for Radio Signal Coverage Prediction in Terrains. Diss. ETH Zurich, 2001.
- [WH96] Wylie, M.P., Holtzman, J. The non-light-of-sight problems in mobile location estimation. IEEE Int. Conf. Universal Personal Communications, 1996.