

MagicMap – Kooperative Positionsbestimmung über WLAN

Peter Ibach Tobias Hübner

Martin Schweigert

Humboldt-Universität zu Berlin

Institut für Informatik*

www.informatik.hu-berlin.de/rok/MagicMap

4. Dezember 2004

Zusammenfassung

Mit Hilfe der „Karte des Rumtreibers“ konnte Harry Potter die Positionen aller Personen in und um Schloss Hogwarts überblicken. Wir haben eine solche magische Karte zur Positionsbestimmung mobiler Systeme basierend auf WLAN-Signalstärke-Auswertung entwickelt. MagicMap ist eine reine Softwarelösung, die bei den mobilen Systemen außer einer konventionellen WLAN-Ausstattung keine weitere Hardware erfordert. Die WLAN Access Points können beliebig verteilt sein und es sind weder Eingriffe an der AP-Hardware noch an der Software nötig. Unsere Versuche am Uni-Campus Berlin-Adlershof zeigen in typischen Büroumgebungen eine Positionierungsgenauigkeit im einstelligen Meter-Bereich. Die eigene Sichtbarkeit unterliegt dabei der vollen Kontrolle der Peer-Knoten, die den Zugriff auf ihre Positionsinformation individuell festlegen können. Die Software steht zum freien Download zur Verfügung und kann für Experimente oder Anwendungen genutzt werden.

1 Einleitung

Das Internet drängt in den mobilen Bereich. 2005 wird die Milliardengrenze der vernetzten Menschen und Geräte überschritten werden. 2007 werden es 1,5 Milliarden Nutzer sein, wobei dann bereits geschätzte 70% überwiegend drahtlosen Zugang haben werden. Die Anwendungen in einem „drahtlosen und allgegenwärtigen Netz“ werden sich dabei verändern: Typischerweise spielt die Position und die Interaktion mit der räumlich nahen Umgebung bei der mobilen Nutzung eine viel stärkere Rolle. Dies wird eine enge Verzahnung von physikalischen und informatischen Prozessen mit sich bringen. Navigationslösungen weisen uns heute bereits den Weg durch

*Chaos Communication Congress Proceedings, Berlin, 27.-29. Dez., 2004

den Verkehrsdschungel. Geoinformationsdienste und weitere Location Based Services warten auf expandierende Märkte. In wenigen Jahren werden voraussichtlich viele Milliarden mobiler und eingebetteter Systeme – einschließlich durch RFID-Chips bestückte Konsumobjekte – die Grundlage für eine durchdringende drahtlose Vernetzung und Funkortung schaffen.

Eine „magische Karte“, die einen weit gehenden Echtzeitüberblick über Positionen und Zustände von Menschen und Objekten ermöglicht, spiegelt nicht nur den Wunschtraum unzähliger Harry Potter Fans wider, sondern auch den Konflikt zwischen ökonomische Interessen und den Befürchtungen von Datenschutz- und Verbraucherorganisationen. Wir begegnen bei den Entwicklungen, die dramatische Veränderungen unserer Geschäfts- und Alltagsprozesse bedeuten werden, einer Reihe von Zukunftsängsten – aber auch Chancen und technologischen Herausforderungen: präzise Ortung, nahtlose Integration lokationsbezogener Dienste, globales Location Roaming und, nicht zuletzt, Schutz der Privatsphäre. Für einen Überblick über den Stand der Forschung und die Herausforderungen des „location-aware mobile computing“ siehe z.B. [3, 5].

Als Basis für weitere Untersuchungen in diesem Umfeld haben wir am Institut für Informatik der HU-Berlin das System „MagicMap“ zur WLAN-Positionsbestimmung entwickelt. Jeder Peer-Knoten wertet dabei die Signalstärke der empfangbaren Access Points und Peers aus und schließt daraus auf die eigene Position. Durch eine präzise Justierung der Map lassen sich für jede Position Geokoordinaten berechnen, so dass Anwendungen, die sonst eine GPS-Satellitenortung voraussetzen, auch ohne GPS nutzbar werden. Wesentliches Kriterium im Hinblick auf Privacy-Bedenken war, dass die eigene Position vom jeweiligen Peer-Knoten selbst ermittelt wird, statt durch externe Überwachung.

Im vorliegenden Paper gehen wir auf existierende Verfahren der Funkortung ein (Abschnitt 2) – speziell auf Signalstärke-basierte Verfahren (Abschnitt 2.2) – und beschreiben das für unsere Implementation ausgewählte Verfahren (Abschnitt 3). Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem dynamischen Mapping von Signalstärke auf Positionsdaten (Abschnitt 3.2), auf der Kooperation der Peers (Abschnitt 3.3) sowie auf den Mechanismen zum Schutz der personenbezogenen Daten (Abschnitt 3.4).

2 WLAN-basierte Ortungsverfahren

Funkortung ist eine der Schlüsseltechnologien für lokationsbezogene Dienste. Satellitenortung und terrestrische Ortung in GSM-Mobilfunknetzen haben bislang diesen Bereich geprägt. Diese Techniken lassen allerdings einige Wünsche offen. Erwünscht werden vor allem Systeme, die gleichzeitig Outdoor- und Indoor-Ortung bei geringen Kosten, hoher Genauigkeit, globaler Einsatzfähigkeit und problemloser Interoperabilität ermöglichen. Um dies zu erreichen, kommen vermehrt Ortungstechniken auf, die sich auf WLAN-Infrastrukturen im ohne Anmeldung nutzbaren 2,4 GHz Frequenzband stützen und ohne spezielle Hardwareerweiterungen auskommen. Durch ausgeklügelte Algorithmen sind Indoor-Ortungsgenauigkeiten in typischen Bürourgebungen bis zu 1 m erreichbar. Diverse Anbieter treten mit unterschiedlichen Verfahren bereits in dieses Marktsegment, das sich kurz vor dem Sprung in den Massenmarkt befindet.

2.1 Allgemeine Ortungsverfahren

Grundsätzlich gibt es – unabhängig von der verwendeten Radiowellen-Frequenz – die Möglichkeiten, den Winkel zwischen Sender und Empfänger oder aber deren Abstand zur Positionsbestimmung zu verwenden. Winkelbasierte Verfahren setzen

spezielle Antennen mit präziser Richtwirkung voraus, um die Winkel zu erfassen. Abstandbasierte Verfahren kommen dagegen ohne spezielle Hardware aus. Sie verwenden Signal-Laufzeiten oder Signal-Empfangsstärken, um auf die räumliche Distanz zu Bezugspunkten zu schließen. Ab drei Bezugspunkten ist eine zweidimensionale Positionsbestimmung durch Triangulation möglich, ab vier Bezugspunkten eine dreidimensionale Positionsbestimmung. Verfahren, die die Signal-Laufzeit in Bezug zur zurückgelegten Distanz stellen (Time of Arrival bzw. Time Difference of Arrival) setzen allerdings eine hochgenaue Synchronisation von Sende- bzw. Empfangsgeräten voraus. Aufgrund der Geschwindigkeit von $300\text{ m}/\mu\text{s}$ mit der sich Radiowellen ausbreiten, führen dabei bereits wenigen Nanosekunden Ungenauigkeit in der Synchronisation bzw. in der zeitlichen Erfassung der Signale zu unbefriedigenden Positionsschätzungen.

Solche Systeme kommen zur Objektortung beispielsweise im Supply Chain Management zum Einsatz. Eine exakt vermessene und synchronisierte Infrastruktur von Lesegeräten kann dabei die durch RF-Tags markierten Objekte orten. Das INCITS Komitee hat Standards für „Real Time Location Sensing“ im 2,4 GHz und im 433-MHz Frequenzbereich verabschiedet. Firmen wie Ekahau oder WhereNet bieten entsprechende Tags, Reader und Software an. Diese Systeme erreichen eine Genauigkeit von bis zu 1 m , wobei die Genauigkeit üblicherweise als mittlerer Positionierungsfehler angegeben wird.

Um aber genaue Positionsbestimmung unabhängig von spezieller Hardware, präziser Synchronisation und aufwändiger Einmessung der Bezugspunkte zu ermöglichen, finden signalstärkebasierte Verfahren in letzter Zeit erhöhte Aufmerksamkeit.

2.2 Signalstärke-basierte Ortungsverfahren

Das einfachste solche Verfahren ordnet die Position der Zelle mit der höchsten Signalstärke zu (Cell of Origin). Wegen seiner Einfachheit hat sich das COO-Verfahren in Mobilfunknetzen etabliert. Genauere Positionsbestimmung ist möglich, wenn man von quadratischer Abnahme der Signalstärke pro Wegstrecke bei der Ausbreitung der Radiowellen ausgehen kann. In der Praxis stören jedoch Dämpfung, Streuung und Reflektion an Hindernissen diesen theoretischen Zusammenhang [12].

Um den komplexen Zusammenhang zwischen Signalstärke und räumlicher Distanz zu ermitteln, wird üblicherweise eine Radio-Map erstellt, also die Signalcharakteristik durch Stichproben-Messungen an verschiedenen Punkten kartographiert. Typischerweise benötigen die Verfahren daher eine mehr oder minder aufwändige Offline-Lernphase zur Kalibrierung und berücksichtigen selten dynamische Änderungen der Radio-Map.

Ein bekannter Vertreter ist das RADAR System [1] von Microsoft Research, das von einem Raster vorvermessener Referenzpunkte ausgeht. Als Positionsschätzung wird die Position des Referenzpunktes mit der ähnlichsten Signalcharakteristik gewählt. RADAR erreicht einen mittleren Positionierungsfehler von rund 3 m . Verschiedene Verfahren, beispielsweise [2, 8], verbessern die Positionsschätzung, indem sie die Signalstärke zwischen den Referenzpunkten interpolieren und eine probabilistische Zuordnung zu einer dazwischenliegenden Stelle aufgrund einer Maximum-Likelihood-Schätzung vornehmen. Ein solches probabilistisches Verfahren kommt z.B. beim Horus System [10, 13] der University of Maryland zum Einsatz. Falls ein dichtes Raster von Referenzpunkten vermessen wurde, erreichen diese Verfahren einen mittlere Positionierungsfehler von rund 1 m . Liegen nur vereinzelte Referenzpunkte vor, kommen Bayes'sche Verfahren zum Einsatz, die a posteriori Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Aufenthaltsposition berechnen und mit etwa 5 m mittlerem Positionierungsfehler angegeben werden [7]. Um die Vielfalt der Verfahren quantitativ vergleichbar zu machen, existieren analytisch Ansätze [11, 6]. Unter angenommenen Bedingungen bezüglich Dichte und Zahl der Access Points

und Referenzpunkte sowie der Signalstreuung ergeben sich Grenzwerte für die prinzipiell erreichbare Güte der Positionsbestimmung. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass obige probabilistische Verfahren bereits recht nah am möglichen Optimum rangieren. Ein weites Feld bieten Verfahren zur Kooperation der Peers, wobei Lastbalancierung auf die leistungsfähigeren Rechner, hohe Skalierbarkeit sowie Voting- und Konsens-Protokolle gefragt sind [4].

Wesentliches Kriterium bei unserer Auswahl des Verfahrens – neben der Güte der Positionsbestimmung – war vor allem auch die Einfachheit der Nutzung mit minimalem Aufwand bei der Einmessung der Referenzpunkte, kooperativer Update der Radio-Map sowie insbesondere die volle Kontrolle der Peers über ihre Positionsdaten.

3 Positionsbestimmung in MagicMap

Bei unserem System MagicMap wertet jeder teilnehmende Peer-Knoten die Signalstärke der empfangbaren Access Points und Peers aus und schließt daraus auf die eigene Position.

3.1 Umrechnung der Signalstärke in räumliche Abstände

Gängige WLAN-Karten und Treiber können umliegende Access Points und die zugehörigen Signaleigenschaften ermitteln. Diese werden als Received Signal Strength Indication (RSSI) bzw. Signal-to-Noise Ratio (SNR) angegeben. Gegenwärtig verwenden wir nur die RSSI-Information. Je nach WLAN-Karte sind ganze Zahlen zwischen 0 und $maxRSSI$ möglich, wobei herstellerabhängig typischerweise 60 bis 100 Werte aufgelöst werden.

Sei $RSSI_{i,j}$ die Signalstärke des Senders j , gemessen am Empfänger i . Sie ist abhängig von der Distanz $\delta_{i,j}$, von $maxRSSI_i$ des Knotens i , von der Sendeleistung P_j des Knotens j sowie von stochastischen Störgrößen. Zwar sind Hersteller angehalten, den RSSI-Wert entsprechend bestimmter Dezibel zu kalibrieren, in der Praxis halten die Hersteller das aber nur ungefähr ein. Hindernisse sowie Richtwirkungen der Antennen stören die Korrelation von RSSI-Wert und Distanz zum Teil erheblich. Um stochastische Einflüsse auszugleichen, bestimmen wir $\overline{RSSI}_{i,j}$ als Mittelwert über mehrere Messungen. In unseren Experimenten haben sich 5 Messungen innerhalb eines Intervalls von 10 s als sinnvoll erwiesen. Mit einer einfachen Näherung erhielten wir gute Schätzungen der Distanz:

$$\hat{\delta}_{i,j} = \frac{maxRSSI_i - \overline{RSSI}_{i,j}}{P_j}$$

Wir haben für verschiedene WLAN-Hardwareausstattungen die Werte $maxRSSI_i$ und P_j gemessen. Für davon abweichende Hardware müssen zunächst einige Referenzmessungen vorgenommen werden, um die Parameter zu bestimmen.

Durch Mapping dieser Abstände auf eine Karte (siehe Abschnitt 3.2) sind grobe Ortungen bereits ohne Radio-Map möglich. Erste Tests am Uni-Campus Berlin-Adlershof zeigen in typischen Büroumgebungen einen mittleren Positionierungsfehler von etwa 10 m. Von einer Peer-to-Peer-Signalstärkeauswertung versprechen wir uns eine deutliche Verbesserung, wobei aussagekräftige Experimente hierzu aufgrund von Treiber-Problemen noch ausstehen. Problematisch ist dabei, dass manche WLAN-Karten bzw. Treiber keinen Zugriff auf RSSI-Informationen für Peer-to-Peer-Empfang unterstützen, während dies für Kommunikation mit Access Points zum IEEE 802.11 Standard gehört.

3.2 Mapping der Abstände auf Positionen

Wie vorausgehend beschrieben, lässt sich mittels der Signalstärke die räumliche Distanz zwischen jeweils zwei Knoten i und j schätzen. Zwischen den Knoten erhalten wir somit Kanten der Länge $\hat{\delta}_{i,j}$. Falls einem Knoten bereits eine Position zugeordnet ist, wird der Knoten in einer Karte fixiert. Unter der Bedingung, dass sich alle Objekte auf einer Ebene befinden, kann der sich ergebende Graph planar auf die Karte projiziert werden (siehe Abb. 1).

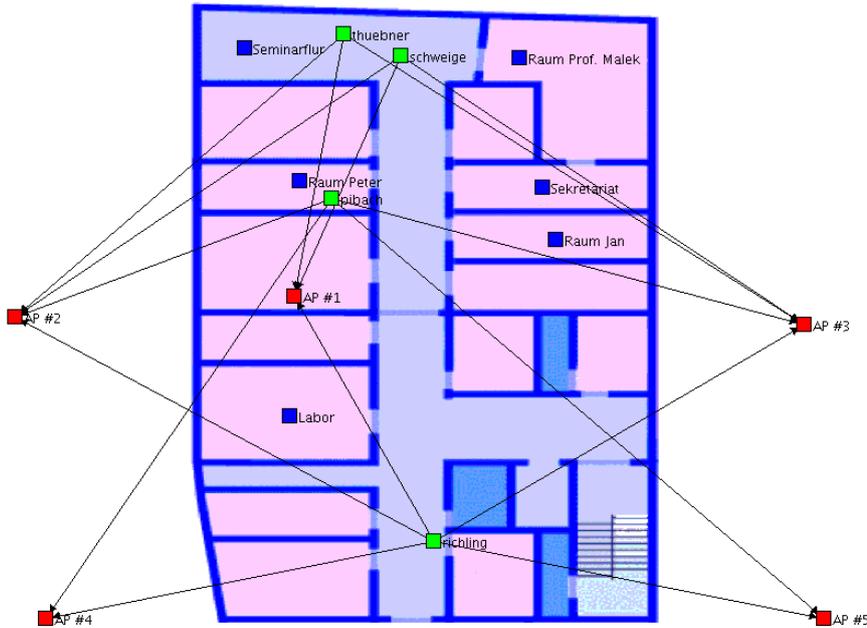


Abbildung 1: Access Points, Peer-Knoten und Referenzmesspunkte werden durch Kanten verbunden und bilden einen Graph. Die Kantenlänge wird aus den Signalstärken ermittelt. In diesem Beispiel wurde der Graph auf den Raumplan unseres Bürogebäudes projiziert.

Wir arbeiten noch an der Erweiterung auf dreidimensionale Visualisierung für mehrgeschossige Gebäude bzw. bergiges Terrain mit großen Höhenunterschieden. Unterstützt werden z.Zt. Karten im TIFF-, GIF- oder JPG-Format. Eine Justierung der Map erfolgt durch Angabe von absoluten Referenzpunkten, für die Geokoordinaten bekannt sind. Alternativ lassen sich Karten, die bereits solche Geo-Referenzen enthalten in den Formaten GeoTiff oder GeoJpeg nutzen.

Kanten müssen bei dieser planaren Projektion in ihre Länge angepasst werden – einige Kanten werden gestaucht, andere gedehnt. Wir bezeichnen die Kantenlänge nach der Projektion als $\tilde{\delta}_{i,j}$. Nicht fixierte Knoten wandern nun schrittweise an ihre wahrscheinlichste Position. Ein Peer ermittelt dabei seine wahrscheinlichste Position so, dass die Summe der quadrierten Abweichungen der Kantenlängen $\sum(\tilde{\delta}_{i,j} - \hat{\delta}_{i,j})^2$ minimal wird. Insgesamt ergibt sich eine weitgehende Übereinstimmung mit den realen Positionen.

Da die Knoten des Graphen mobil sind, erfolgen ständig Updates der Signalstärk-einformationen sowie erneute Projektion und Optimierung. Dazu nutzen wir eine modifizierte Version des Jung-Frameworks [9]. Das Framework implementiert ein „SpringLayout“, welches versucht, den Graph möglichst „spannungsfrei“ darzustellen, indem Knoten in die Richtung der bestmöglichen Entspannung wandern.

Weil Signalstärken aber prinzipiell nur symmetrische Positionierung um die

Sende-Knoten erlauben, führt dieser Algorithmus zu unerwünschter Mittelung, insbesondere wenn Knoten weniger als drei andere Bezugsknoten empfangen. Sieht ein Peer-Knoten beispielsweise nur einen Access Point, würden um den Access Point liegende Referenzmessungen den Peer-Knoten in Richtung des Mittelpunkts zwingen, da diese Position natürlich dem Zentrum aller wahrscheinlichen Aufenthaltsorte entspricht. Dies ist ein Problem, das generell für Ortungsverfahren besteht. Sie können daher nur gute Positionsschätzungen liefern, wenn symmetrische Positionen ausgeschlossen werden können. Dies ist z.B. der Fall, wenn die Access Points an den Außenwänden eines Gebäudes stehen und Peer-Knoten sich daher immer auf der Innenseite zu den Access Points befinden. Unsere Modifikation des Jung-Framework erlaubt es daher dem User, bei Positionierungsmehrdeutigkeit einzugreifen und Knoten per Drag-and-Drop zu verschieben. Eine stärkere Gewichtung kurzer Kanten sorgt dafür, dass der Graph zu einem lokalen Maximum konvergiert. Bewegen sich die Peers nicht zu dynamisch, stabilisiert sich der Graph nach kurzer Zeit und man erhält in der Karte einen Überblick über die eigene Position sowie die Positionen der anderen Peers (falls diese Ihre Daten freigeben).

3.3 Kooperativer Austausch von Referenzpunkten

Um die Genauigkeit zu verbessern lassen sich beliebig Referenzpunkte mit Positionsangabe und zugehöriger Signalstärkemessung setzen. Die Schätzung der Distanz zwischen Knoten i und einem Referenzpunkt r bei gegebener Menge SQ der Signalquellen ergibt sich als:

$$\hat{\delta}_{i,r} = \sum_{\forall k \in SQ} \left| \hat{\delta}_{i,k} - \hat{\delta}_{r,k} \right|$$

So lange mehrere Signalquellen parallel beobachtbar sind und ausreichend viele, dicht liegende Referenzpunkte vermessen sind, lassen sich die Effekte der Signalstreuung statistisch ausgleichen, so dass sich überraschend gute Positionsschätzungen ergeben – wie unsere Experimente bestätigen. Die Genauigkeit steigt dabei mit der Zahl der vermessenen Referenzpunkte. Schon wenige mit ihrer Signalcharakteristik erfasste Referenzpunkte reichen aus (in unserem Gebäude etwa 10 je Etage), um in typischen Büroumgebungen Positionsgenauigkeiten auf Raumgranularität, d.h. mit einer Genauigkeit von etwa 1-5 m zu erreichen.

Referenzpunkte erhält man dadurch, dass die Nutzer per Point-and-Click innerhalb einer auf ihren mobilen Geräten dargestellten Karte ihre aktuelle Position angeben. Wir gehen gegenwärtig davon aus, dass alle Nutzer in der Lage sind, die Position akkurat einzugeben. Aber wir denken bereits über Erweiterungen nach, ob und wie sich eine Fehleingabe ggf. erkennen und tolerieren lässt. Der Nutzer kann Access Points, falls er ihre Position kennt, per Drag-and-Drop an die richtige Stelle verschieben. Für diese Ortsangabe werden dann die aktuellen Signalstärkemessungen incl. eines Zeitstempels archiviert. Sukzessive wächst so die Information zur Positionsbestimmung (Radio-Map). Alte oder schlechte Referenzmessungen können gegebenenfalls entfernt werden. Das Archiv wird in der gegenwärtigen prototypischen Implementation auf einem Server verwaltet. Zu Testzwecken ohne Verfügbarkeitsgarantie kann dazu unser Server von der HU-Berlin genutzt werden (ph1.informatik.hu-berlin.de). Die Software ist in Java geschrieben und ist denkbar einfach über Java-Webstart aufzurufen. Auch die Server-Software ist frei zum Download verfügbar, so dass eigene Server aufgesetzt werden können. Die Client-Server-Kommunikation wird aber in Zukunft durch eine reine Peer-to-Peer-Lösung ersetzt.

Durch den kooperativen Austausch von vermessenen Referenzpunkten können Peers Ihre Position auch dann bestimmen, wenn sie selbst noch nicht an diesem Ort waren. Damit ist eine Positionierung auch in unbekanntem Umgebungen möglich

– was für die meisten Positions-basierten Anwendungen unerlässlich ist. Die Positionsbestimmung funktioniert aber ansonsten auch gut Stand-alone, ohne weitere Peer-Teilnehmer oder den Zugriff zu einem Server. Eine Korrelationsanalyse erlaubt es dabei, die von den Peers mit oft sehr unterschiedlicher Hardware (verschiedene WLAN-Karten oder Antennen) ermittelten Signalstärke-Messdaten, so aufeinander umzurechnen, dass Peers wechselseitig durch den Austausch von Messdaten ihre Positionierungsgenauigkeit verbessern.

Dabei gehen die Signaleigenschaften der remoten Hardware über die gelernten Parameter $maxRSSI_i$ bzw. P_j ein. „Alterung“ der Messwerte und schwankende Korrelationen zu bestimmten Referenzzeiträumen erlauben es ferner, sich auch ohne manuelle Eingriffe in bestimmten Grenzen an sich verändernde Bedingungen der Infrastruktur anzupassen – etwa an den Ausfall von Access Points oder an die Veränderung der Signalbedingungen durch Wettereinflüsse.

3.4 Schutz der personenbezogenen Daten

Peers können beliebig zwischen den Modi „unsichtbar“ und „sichtbar“ umschalten. Im Unsichtbar-Modus leitet ein Peer keinerlei Daten weiter. Solange keine sonstigen Anwendungen WLAN-Traffic erzeugen, erhalten andere Knoten keine Signale und es ist auch keine Ortung möglich. In vielen Szenarien, in denen Personen gerne geortet werden möchten – z.B. Anbieter in Bahnhof-, Flughafen- oder Messehallen – ist es anzunehmen, dass der Sichtbar-Modus häufige Nutzung findet.

Dennoch ist für zahlreiche andere Anwendungsszenarien ein personen- und situationsabhängiges Feintuning der Sichtbarkeit wünschenswert und entscheidend für die Nutzer-Akzeptanz. Da die eigene Position vom jeweiligen Peer-Knoten selbst ermittelt wird, statt durch die Infrastruktur, hat jeder Peer die volle Hoheit über seine Positionsdaten und kann festlegen, unter welchen Bedingungen und an wen die Daten weitergeleitet werden und ob dies anonym, unter einem Pseudonym oder voll identifizierbar stattfindet. Peer-to-Peer-Kommunikation mit einer speziellen Access Control Policy, die dazu nach bestimmten Regeln die Freigabe von Positionsdaten organisiert (z.B. Freigabe nur zu den Arbeitszeiten an autorisierte Kollegen) ist Gegenstand zukünftiger Arbeiten.

4 Fazit

Unser System MagicMap demonstriert die Möglichkeiten und Grenzen von WLAN-Positionsbestimmung. Das Tool erlaubt komfortable Point-and-Click-Bedienung. Damit eignet es sich als Ersatz bzw. Ergänzung für GPS-Positionsbestimmung. Attraktiv ist es besonders in Fällen, bei denen GPS-Lesegeräte nicht verfügbar sind, keinen Empfang haben oder unzureichende Genauigkeit liefern. Typischerweise gilt dies insbesondere in Indoor-Bereichen.

Die Ortung funktioniert in beliebigen WLAN-Infrastrukturen, wobei die Genauigkeit mit größerer Dichte und Zahl von Access Points, teilnehmenden Peer-Systemen und Referenzpunkten steigt. In Büroumgebungen ist eine Positionierungsgenauigkeit von rund 5 m typisch. Die Kalibrierungsphase wird durch den kooperativen Austausch von Positionsdaten und Signalstärkemessungen deutlich verkürzt, wodurch das System praktisch on-the-fly Einsatzbereit ist. Peers können so Ihre Positionsbestimmung auch dann durchführen, wenn sie selbst noch nicht an diesem Ort waren. Die kurze Bereitschaftszeit und der gegenseitige Austausch von Daten prädestinieren das Verfahren für Anwendungen, die auf räumlicher Nähe basierende Ad-hoc-Teambildung und Zusammenarbeit in offenen Benutzergruppen erfordern. Für Experimente zum Zusammenspiel mit verschiedenen Anwendungen steht die Software zum freien Download auf www.informatik.hu-berlin.de/rok/MagicMap zur

Verfügung. Durch den unmittelbaren Aufruf über Java-Webstart, durch die Plattformunabhängigkeit bei minimalen Hardware-Voraussetzung – und nicht zuletzt durch klare Privacy Schutzmechanismen – reduziert das System Berührungsbarrieren.

Literatur

- [1] P. Bahl and V. N. Padmanabhan. Radar: An in-building rf-based user location and tracking system. In *IEEE Infocom 2000*, volume 2, pages 775–784, March 2000.
- [2] Paul Castro, Patrick Chiu, Ted Kremenek, and Richard Muntz. A probabilistic room location service for wireless networked environments. *Lecture Notes in Computer Science*, 2201:18–26, 2001.
- [3] Guanling Chen and David Kotz. A survey of context-aware mobile computing research. Technical Report TR2000-381, Dept. of Computer Science, Dartmouth College, November 2000.
- [4] Charalampos Fretzagias and Maria Papadopouli. Cooperative Location Sensing for Wireless Networks. In *Second IEEE International conference on Pervasive Computing and Communications*, Orlando, Florida, March 2004.
- [5] M. Hazas and J. Scott. Location-aware computing comes of age. *IEEE Computer*, 37(2):95–97, 2004.
- [6] A.S. Krishnakumar and P. Krishnan. On the accuracy of signal strength-based location estimation techniques. In *IEEE Infocom 2005*, March 2005.
- [7] David Madigan, Eiman Elnahrawy, Richard P. Martin, Wen-Hua Ju, P.Krishnan, and A.S. Krishnakumar. Bayesian indoor positioning systems. In *IEEE Infocom 2005*, March 2005.
- [8] T. Roos, P. Myllymaki, H. Tirri, P. Misikangas, and J. Sievanen. A probabilistic approach to wlan user location estimation. *International Journal of Wireless Information Networks*, 9(3), July 2002.
- [9] Scott White, Joshua O'Madadhain, Danyel Fisher, and Yan-Biao Boey. Java universal network/graph framework. <http://jung.sourceforge.net>.
- [10] M. Youssef, A. Agrawala, A. U. Shankar, and S. H. Noh. A probabilistic clustering-based indoor location determination system. Technical Report UMIACS-TR 2002-30 and CS-TR 4350, University of Maryland, March 2002.
- [11] Moustafa Youssef and Ashok Agrawala. On the optimality of wlan location determination systems. Technical Report UMIACS-TR 2003-29 and CS-TR 4459, University of Maryland, College Park, March 2003.
- [12] Moustafa Youssef and Ashok Agrawala. Small-scale compensation for wlan location determination systems. In *IEEE WCNC 2003*, March 2003.
- [13] Moustafa Youssef, Ashok Agrawala, and Udaya Shankar. Wlan location determination via clustering and probability distributions. In *IEEE PerCom 2003*, March 2003.