

REIHE INFORMATIK
TR-2005-015

Positionierung mit Wireless-LAN und Bluetooth

Thomas King, Thomas Haenselmann, Stephan Kopf, Wolfgang Effelsberg
University of Mannheim
– Fakultät für Mathematik und Informatik –
Praktische Informatik IV
A5, 6
D-68159 Mannheim, Germany

Positionierung mit Wireless-LAN und Bluetooth

Thomas King, Thomas Haenselmann, Stephan Kopf, Wolfgang Effelsberg

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird ein Überblick über bestehende Wireless-LAN- und Bluetooth-basierte Positionierungssysteme gegeben. Eine detaillierte Identifikation der Merkmale und Eigenschaften der unterschiedlichen Systeme soll helfen, Positionierungsverfahren anhand ihrer Eigenschaften einzuordnen.

1 Einleitung

Die aus den Forschungsbereichen *Location-Based Services* und *Mobile Business* stammenden Anwendungen benötigen die Möglichkeit, ihre Umgebung erfassen zu können, damit sie sich dieser Umgebung anpassen und umgebungsrelevante Informationen an den Benutzer weitergeben können. Hierfür ist vor allem die automatische Positionsbestimmung von Personen und Gütern notwendig. Sodann lassen sich charakteristische Fragen aus diesen Forschungsbereichen beantworten: Wo befinden sich meine Freunde, und was tun sie gerade? Wo ist der nächste Drucker? Wo ist das nächste italienische Restaurant?

In den vergangenen Jahren wurde eine Vielzahl von Positionierungssystemen vorgeschlagen, die sich mit Forschungsfragen auseinandersetzen, die trotz des weltweit verfügbaren und relativ genauen Positionierungssystems *Global Positioning System (GPS)* [16] aufkamen. GPS hat den Nachteil, dass es innerhalb von Gebäuden praktisch nicht nutzbar ist und es auch im Freien oft zu Funktionsstörungen kommt, wenn die Sichtverbindung mit den Satelliten zum Beispiel durch Hindernisse wie Bäume, Laub oder Hochhäuser, blockiert ist. Für den sinnvollen Einsatz von mobilen Anwendungen ist aber ein Positionierungssystem notwendig, das überall zuverlässig funktioniert.

Die in der Vergangenheit vorgeschlagenen Verfahren lassen sich grob in drei Kategorien unterteilen: reine *Positionierungssysteme*, *Ortungssysteme* und Systeme, die zusätzlich die *Orientierung des Endgerätes* erkennen. *Positionen* sind üblicherweise in einem dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem definiert und werden durch Angabe von drei Koordinaten eindeutig beschrieben. *Ortungssysteme* liefern dagegen keine Positionen, sondern können die Umgebung beziehungsweise einen symbolischen Ort bestimmen, an dem sich ein gesuchtes Objekt befindet. Raumnummern oder Gebäude stellen beispielsweise symbolische Orte dar. In der Literatur wird oft nicht präzise zwischen Positionierungs- und Ortungssystemen unterschieden, sondern die Begriffe werden als Synonyme verwendet. Manche Positionierungs- oder Ortungssysteme bieten zusätzliche Informationen über die *Orientierung* beziehungsweise die Neigung eines Objektes an.

Die ersten verfügbaren Positionierungssysteme, wie beispielsweise *Active Badge* [29], *Cricket* [22] und *Easy Living* [5], die für den Einsatz in Gebäuden vorgesehen waren, verwendeten zusätzliche Infrastruktur. Mit der zunehmenden Verbreitung von Wireless-LAN [21] und Bluetooth [27] und der damit vorhandenen Infrastruk-

turen in Firmen, öffentlichen Gebäuden und Privatwohnungen wurde über die Nutzung dieser Infrastruktur zur Positionsbestimmung nachgedacht. Die daraus resultierenden Ansätze bieten den Vorteil, dass keine zusätzlichen Kosten für neue Hardware anfallen.

Wireless-LAN bezeichnet den unter IEEE 802.11 bekannten Industriestandard für drahtlose Kommunikation. Der Standard wurde 1997 vom *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* herausgegeben und definiert sowohl die physikalische Schicht als auch die Kanalschicht. Wireless-LAN ermöglicht eine Kommunikationsreichweite von bis zu 300 Metern und – abhängig vom verwendeten Modulationsverfahren – eine Datentransferrate von bis zu 54 MBit/s.

Auch Bluetooth stellt einen Industriestandard der IEEE zur drahtlosen Kommunikation dar, wurde aber im Vergleich zu Wireless-LAN als Kabelersatztechnologie mit dem Ziel der Vernetzung von Computern und Peripheriegeräten im Nahbereich entwickelt. Aus diesem Grund bietet Bluetooth nur eine Kommunikationsreichweite von 10 bis 100 Metern und eine Datentransferrate von maximal 768 kBit/s.

Um einen Überblick über Wireless-LAN- und Bluetooth-basierte Positionierungssysteme zu bekommen, wird im Folgenden eine Gliederung erarbeitet, die den Anwendungsentwicklern helfen soll, ein Positionierungssystem mit geeigneten Merkmalen auszuwählen. Weiterhin soll diese Gliederung Hinweise auf neue Forschungsrichtungen im Bereich der Wireless-LAN- und Bluetooth-basierten Positionierungssysteme liefern.

In Abschnitt 2 werden wichtige Merkmale von Wireless-LAN- und Bluetooth-basierten Positionierungssystemen im Detail beschreiben. Abschnitt 3 beschreibt vorhandene Ansätze und klassifiziert und ordnet diese anhand der Merkmale aus Abschnitt 2 ein. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick schließen den Überblick über die Positionierungssysteme ab.

2 Eigenschaften zur Beschreibung von Positionierungssystemen

In diesem Abschnitt werden wichtige Eigenschaften von Wireless-LAN- und Bluetooth-basierten Positionierungsverfahren eingeführt und im Detail beschrieben, damit in Abschnitt 3 bestehende Systeme aufgrund dieser Kriterien eingeordnet und klassifiziert werden können.

2.1 Grundlegende Positionierungsverfahren

Bei den im Folgenden vorgestellten grundlegenden Positionierungsverfahren, die bei Wireless-LAN- und Bluetooth-basierten Positionierungssystemen Anwendung finden, steht zunächst die grundlegende Funktionsweise im Vordergrund; auf implementierungsspezifische Details wird dann in Abschnitt 3 eingegangen.

Die nachfolgend präsentierten Verfahren bestimmen die Position eines Objektes (zum Beispiel eines mobilen Endgerätes) anhand

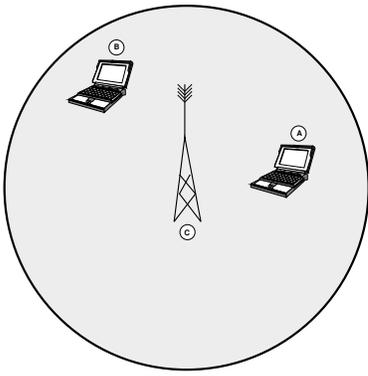


Abbildung 1: Nachbarschaftserkennung

mehrerer Referenzpunkte (beispielsweise Access Points), deren Position bereits bekannt ist.

2.1.1 Nachbarschaftserkennung

Die reine Nachbarschaftserkennung stellt eine der einfachsten Methoden zur Positionsermittlung dar und ist auf sehr wenige Voraussetzungen angewiesen. Dabei wird die zu ermittelnde Position mit der eines anderen Teilnehmers gleichgesetzt, dessen Position bekannt ist. Für diese Art der Positionierung ist als mittlerer Positionierungsfehler die halbe Kommunikationsreichweite zu erwarten.

Im Fall von Wireless-LAN- und Bluetooth-basierten Positionierungssystemen ergibt sich der Vorteil, dass keine zusätzliche komplexe Software zur Positionsbestimmung mobiler Endgeräte benötigt wird. Üblicherweise verwalten Access Points eine Liste der drahtlosen Endgeräte, die sich innerhalb ihrer Kommunikationsreichweite befinden. Die Endgeräte ihrerseits speichern die eindeutige Identifikationsnummer des Access Point, zu dem sie verbunden sind, da diese Information zur Kommunikation benötigt wird. Die Kenntnis der Positionen der Access Points reicht aus, den Ort der mobilen Endgeräte ungefähr zu schätzen.

Abbildung 1 zeigt ein Beispiel, bei dem sich die mobilen Geräte A und B in Kommunikationsreichweite (grau dargestellt) zum Access Point C befinden. Die Positionen von A, B und C werden durch die Tupel (x_A, y_A, z_A) , (x_B, y_B, z_B) beziehungsweise (x_C, y_C, z_C) beschrieben. Angenommen, die Position von C sei $(5, 2, 3)$, so wird bei diesem Verfahren die Position von A und B auf $(5, 2, 3)$ festgelegt. Die realen Positionen der Geräte A und B entsprechen üblicherweise nicht der Position des Access Point C, da aber keine weiteren Informationen vorliegen, ist dies das beste zu ermittelnde Ergebnis.

2.1.2 Entfernungspeilung

Das Entfernungspeilungsverfahren bestimmt die Position eines Objektes anhand mehrerer Referenzpunkte. In einem dreidimensionalen Raum werden zur Bestimmung der Position eines Objektes die Distanzen zu mindestens vier paarweise verschiedenen Referenzpunkten benötigt.

Im folgenden Absatz wird die Funktionsweise der Entfernungspeilung durch den Schnitt von Kugeln um bekannte Referenzpunkte bildhaft dargestellt: Die Distanzen d_i zwischen einem Objekt und den Referenzpunkten $i = 1, \dots, 4$ seien bekannt. Abbildung 2(a) zeigt eine Kugel mit Radius d_1 um den Referenzpunkt 1. Die Position des zu ortenden Objektes liegt folglich auf dem Kugelmann-

tel. Wird um einen zweiten Referenzpunkt eine Kugel mit dem entsprechenden Abstand zum noch unpositionierten Objekt gelegt, so erhält man eine kreisförmige Schnittfläche, die die zulässigen Orte weiter einschränkt (siehe Abbildung 2(b)). Schneiden sich hingegen die Kugeln von drei Referenzpunkten, so verbleiben höchstens zwei Orte, die alle Bedingungen erfüllen. Diese Punkte beschreiben die möglichen Positionen für das zu ortende Objekt. Der Schnittpunkt von Kugeln um vier unterschiedliche Referenzpunkte ergibt eindeutig die gesuchte Position. Abbildung 2(c) stellt dies bildhaft dar.

Das Verfahren zur Positionsbestimmung eines Objektes, bei gegebenen $i = 1, \dots, 4$ Distanzen d_i zwischen dem Objekt und dem i -ten Referenzpunkt, basiert auf dem Theorem von Pythagoras. Seien (x_i, y_i, z_i) die bekannten Koordinaten des i -ten Referenzpunktes in einem kartesischen Koordinatensystem und sei (x, y, z) die gesuchte Position des fraglichen Objektes, dann wird durch Lösen der folgenden i Gleichungen (siehe Ausdruck 1) die Position berechnet:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad \forall i = 1, \dots, 4 \quad (1)$$

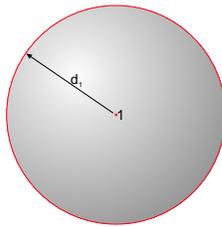
Es existiert eine Vielzahl von Methoden zur Distanzbestimmung [31]. Dennoch wird in diesem Artikel nur auf Methoden eingegangen, die auf der Radio-Signalstärkemessung aufbauen, da diese direkt von der Wireless-LAN- beziehungsweise Bluetooth-Hardware unterstützt werden. Dabei ist die Genauigkeit der Distanzbestimmung für die Entfernungspeilung kritisch, da sonst die Position nicht korrekt bestimmt werden kann beziehungsweise mehrfache Messfehler können sich aufaddieren und somit die Positionsbestimmung völlig verfälschen.

Signaldämpfung In der Nachrichtentechnik bezeichnet der Begriff *Signaldämpfung* das physikalische Phänomen, dass die Feldstärke mit zunehmender Entfernung von der Quelle abnimmt. In einem durch Reflexionen ungestörten Raum (zum Beispiel im Weltall) existiert ein monotoner funktionaler Zusammenhang zwischen der Feldstärke und der Entfernung zwischen Sender und Empfänger. Um diesen Zusammenhang genau zu beschreiben, ist weiteres Wissen über die Sendestärke und die verwendete Hardware notwendig.

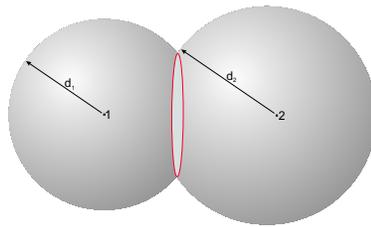
Modelle, wie das so genannte *Free-Space*-Ausbreitungsmodell für Radiowellen, die auf theoretischen Überlegungen und Messungen basieren, gehen von einem quadratischen Abfall der Signalstärke bei zunehmender Entfernung aus [23]. Weiterhin setzen diese Modelle eine unblockierte Sichtverbindung zwischen Quelle und Senke voraus. Die Signalstärke, die von einer Senke mit Abstand d zur Quelle gemessen wird, ist in Formel 2 beschrieben. $P_r(d)$ beschreibt dabei die Signalstärke, die in Distanz d zur Quelle gemessen werden kann. $P_t(d)$ ist die Sendestärke, G_t repräsentiert den Antennengewinn der Quelle und G_r den der Senke. L steht für den Systemverlustfaktor und λ beschreibt die Wellenlänge in Metern für die verwendete Trägerfrequenz. P_r und P_t werden in dBm gemessen; die Größen G_t und G_r sind dimensionslos.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (2)$$

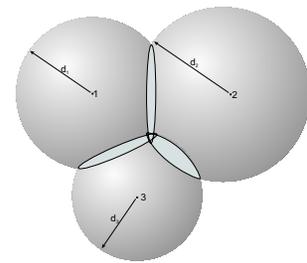
Die obige Formel vernachlässigt die Tatsache, dass die Umgebung die Signalausbreitung beeinflussen kann. Hindernisse wie Pflanzen, Wände oder Möbelstücke dämpfen, streuen oder reflektieren Radiowellen. Messungen an verschiedenen Orten haben gezeigt, dass für jeden Wert von d die Signalstärke zufällig ist und dass die Signalstärke dabei log-normalverteilt um einen distanzabhängigen Mittelwert ist [23].



(a) Kugel mit Distanz d_1 um Referenzpunkt 1.



(b) Der Schnitt von zwei Kugeln bildet einen Kreisring.



(c) Drei Kugeln schneiden sich in zwei möglichen Punkten.

Abbildung 2: Kugelschnitt zur Positionsbestimmung

Aufgrund dieser physikalischen Eigenschaften ist es in Umgebungen, bei denen Quelle und Senke keinen direkten Sichtkontakt haben oder bei denen die Umgebung die Signale streut, oft nicht möglich, die Empfangsstärke an der Senke mit ausreichender Genauigkeit vorherzusagen.

2.1.3 Karten mit Radio-Fingerabdrücken

Positionierungssysteme auf der Basis von Karten mit Radio-Fingerabdrücken sind zweistufige Verfahren. In der ersten Phase, der so genannten *Trainingsphase*, werden elektromagnetische Eigenschaften an zuvor definierten Messpunkten gesammelt und in einer Datenbank mitsamt der physikalischen Koordinaten gespeichert. Die Messpunkte bilden üblicherweise ein Gitter und decken das Operationsgebiet komplett ab. Dabei können die Messpunkte gleichverteilt sein oder sich in Bereichen häufen, in denen eine höhere Genauigkeit notwendig ist. Die elektromagnetischen Eigenschaften an jedem Messpunkt werden als *Radio-Fingerabdruck* bezeichnet, da sie diesen Messpunkt meist eindeutig identifizieren. Somit stellt die Datenbank mit den Radio-Fingerabdrücken eine Karte des Operationsgebietes dar, in der die elektromagnetischen Eigenschaften der Messpunkte bestimmt sind.

In der so genannten *Positionierungsphase* misst der zu positionierende Knoten die elektromagnetischen Eigenschaften an seiner aktuellen Position und vergleicht die so ermittelten Werte mit denen der Datenbank. Für den Fall, dass keine echte Übereinstimmung gefunden werden kann, können unterschiedliche Approximationen eingesetzt werden. Weit verbreitet ist der *K-Nearest Neighbors*-Algorithmus, der die euklidische Distanz zwischen den lokal ermittelten und den in der Karte verzeichneten Werten berechnet. Die Positionen der *K-nächsten* Radio-Fingerabdrücke, die die kleinste Distanz aufweisen, werden gemittelt und als aktuelle Knotenposition interpretiert. In der Literatur wird für *K* üblicherweise ein Wert von 4 oder 5 gewählt. Die Trainingsphase beziehungsweise die Positionierungsphase werden oft auch als *Online-Phase* beziehungsweise *Offline-Phase* bezeichnet [4].

Elektromagnetische Eigenschaften werden durch Referenzpunkte (zum Beispiel Access Points) erzeugt, indem diese wie Leuchttfeuer (engl. *beacons*) regelmäßig Signale verschicken oder indem die ohnehin laufende Kommunikation abgehört wird. Leuchttfeuer werden üblicherweise zur verteilten Synchronisation und zur Konfiguration der Endgeräte genutzt, weshalb die Nachrichten als Broadcast-Pakete verschickt werden.

Der Nachteil dieses Verfahrens ist das zeitaufwändige Erzeugen der Karte mit den Radio-Fingerabdrücken. Dies trifft insbesondere bei großen Operationsgebieten zu. Darüber hinaus muss der Prozess der Kartenerstellung wiederholt werden, wenn sich die Umgebung

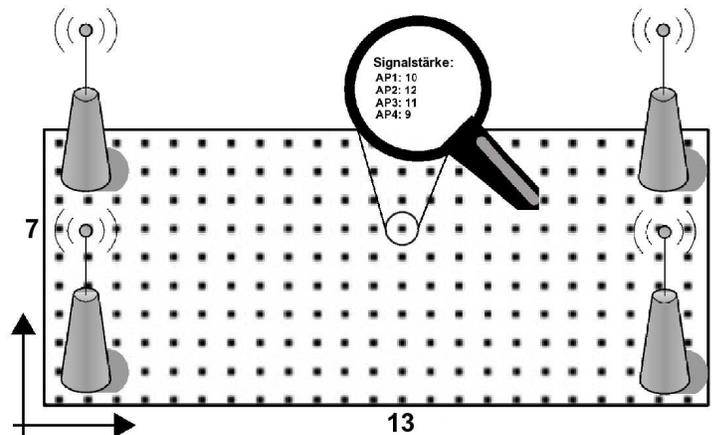


Abbildung 3: Eine Karte mit Radio-Fingerabdrücken. Dieses Bild zeigt ein Operationsgebiet mit vier Access Points und schwarz dargestellten Messpunkten. Für einen Messpunkt sind die Signalstärken der verschiedenen Access Points schematisch dargestellt.

ändert. Das Verschieben von Referenzpunkten oder bauliche Maßnahmen auf dem Operationsgebiet können die Radiowellenausbreitung so stark beeinflussen, dass eine Neuvermessung des gesamten Gebietes notwendig wird. Eine Karte mit Radio-Fingerabdrücken ist in Abbildung 3 skizziert.

Eine Alternative zur oben vorgestellten *empirischen Vermessung* des Operationsgebietes stellt die *mathematische Modellierung* dar. Hierfür werden ein Ausbreitungsmodell für Radiowellen, die Position der Referenzpunkte und andere Umgebungseinflüsse erfasst, um damit die elektromagnetischen Eigenschaften an einem Punkt vorher zu sagen. Aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Radiowellenausbreitung, auf die bereits in Abschnitt 2.1.2 eingegangen wurde, und der sich ändernden Umgebungseinflüsse ist es oft nicht möglich, die elektromagnetischen Eigenschaften exakt zu bestimmen. Deshalb bieten die Verfahren, die auf mathematischer Modellierung aufbauen, oftmals schlechtere Genauigkeitseigenschaften als die Verfahren mit einer Trainingsphase. Dafür haben sie aber den Vorteil, dass die Datenbankerstellung weniger zeitraubend ist.

Es existieren im Wesentlichen zwei Verfahren, um die Radio-Fingerabdrücke zu speichern: Der *deterministische* Ansatz bildet den Durchschnitt aus kurzzeitigen Abweichungen und speichert nur diesen Wert. Das *probabilistische* Verfahren hingegen speichert die Abweichungen als Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Passend zu den Speicherverfahren gibt es entsprechende Abfragealgorithmen, die in Abschnitt 3 detailliert dargestellt werden.

2.1.4 Sensor-Fusion

Unter *Sensor-Fusion* versteht man die Konsolidierung von bruchstückhaften und unter Umständen widersprüchlichen Sensordaten in ein homogenes und zuverlässig Ergebnis [13]. Hierbei kann man zwischen *vertikaler* und *horizontaler* Sensor-Fusion unterscheiden. Die horizontale Sensor-Fusion beschreibt Verfahren, die zur Aufgabenlösung mehrere gleichartige Sensoren verwenden (zum Beispiel mehrere gleichartige Empfangsantennen). Im Gegensatz dazu verwendet die vertikale Sensor-Fusion verschiedenartige Sensoren, um eine Aufgabenstellung zu lösen (zum Beispiel verschiedene Lage- und Drucksensoren zur Flugbahnbestimmung).

Das Konzept der Sensor-Fusion ist schon lange bekannt und wird besonders im Umfeld der Robotik und Prozessautomation angewandt. Dennoch gibt es bisher recht wenig Positionierungssysteme, die dieses Konzept zur Ergebnissteigerung nutzen, obwohl die bisher veröffentlichten Verfahren sehr gute Ergebnisse liefern.

2.2 Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Die wichtigsten Merkmale von Positionierungssystemen sind deren *Genauigkeit* und *Zuverlässigkeit*. Ein Positionierungssystem kann genau und unzuverlässig, zuverlässig und ungenau, beides oder keines von beiden sein. Die Genauigkeit ist definiert als der Positionierungsfehler, der entsteht, wenn die Positionsschätzung nicht mit der realen Position eines Objektes übereinstimmt. Entsprechend beschreibt die Zuverlässigkeit die Verteilungsfunktion der gemessenen Werte im Vergleich zum Soll-Wert. Üblicherweise wird die *Standardabweichung* zur Berechnung der Zuverlässigkeit verwendet.

Die beiden Begriffe sollen an folgendem Beispiel verdeutlicht werden: Angenommen, ein Positionierungssystem kann einen Knoten mit einer Genauigkeit von 2 Metern in 95 Prozent aller Messungen positionieren. Dies bedeutet, dass sich 95 Prozent aller Positionsschätzungen innerhalb eines Kreises befinden, der mit einem Radius von 2 Metern um die reale Position des Objektes liegt. Die verbleibenden 5 Prozent der Positionsschätzungen befinden sich außerhalb dieses Kreises.

2.3 Endgeräte-basierte vs. Infrastruktur-basierte Positionierung

Im Allgemeinen können Positionierungssysteme danach unterschieden werden, wo sie Radiosignale empfangen und die Position berechnen: Man unterscheidet *Endgeräte-basierte* und *Infrastruktur-basierte* Positionierung. Der erste Ansatz benötigt eine Infrastruktur (zum Beispiel Access Points), die regelmäßig Radiowellen aussendet. Empfängt ein Endgerät die Radiowellen, so misst es eine bestimmte Signalcharakteristik (beispielsweise die Signalstärke) und berechnet unter Verwendung weiterer Hilfsmittel (zum Beispiel einer Karte mit Radio-Fingerabdrücken) seine Position. In der zweiten Methode werden Endgeräte von der Infrastruktur lokalisiert. Hierzu belegen die Endgeräte den Kanal regelmäßig; dies kann aufgrund von Datentransfer geschehen, oder es können Beacons verwendet werden. Die Infrastruktur misst eine bestimmte Signalcharakteristik und berechnet anhand dieser die Position des zu positionierenden Endgerätes.

In der Literatur wird Endgeräte-basierte vs. Infrastruktur-basierte Positionierung oftmals auch als *direkte* vs. *indirekte* Positionierung [28], als *eigene* vs. *entfernte* Positionierung [31] oder auch als *Server-* vs. *Client-zentrische* Positionierung [26] bezeichnet.

Neben den oben genannten Systemen, bei denen man klar zwischen Endgeräte-basierter und Infrastruktur-basierter Positionierung unterscheiden kann, gibt es auch noch so genannte hybride Verfahren. Hierbei übernimmt eine Seite die Messung der Signalcharakteristik, und die Gegenseite berechnet die Position. Von *Infrastruktur-assistierter Endgeräte-basierter* Positionierung spricht man, wenn die Infrastruktur die Messungen durchführt und die Daten an das zu positionierende Endgerät zur weiteren Verarbeitung übergibt. Der umgekehrte Fall wird analog als *Endgeräte-assistierte Infrastruktur-basierte* Positionierung bezeichnet [18].

Aus Anwendersicht wird in den meisten Fällen die Endgeräte-basierte Positionierung präferiert, da hier der Anwender direkten Einfluss auf die Geheimhaltung seiner Position hat. Ohne eine Freigabe durch den Benutzer ist es der Infrastruktur bei diesen Verfahren nicht möglich, die Position eines Endgerätes zu bestimmen. Bei der Infrastruktur-basierten Positionierung hat der Anwender hingegen keinen Einfluss darauf, an wen seine Position weitergegeben wird.

Besonders im Umfeld von Location-based Services oder vom Mobile Business ist es aber oft hilfreich, wenn die Position nicht auf dem Endgerät berechnet wird, denn mobile Endgeräte bieten häufig keine ausreichende Rechenleistung und Energie, um komplexe Positionierungsalgorithmen ausführen zu können. Ein Infrastruktur-basiertes Positionierungsverfahren ist hier klar im Vorteil.

2.4 Latenzzeit

Die Zeitspanne, die ein Positionierungssystem benötigt, um auf eine Positionierungsanfrage ein Ergebnis zu liefern, wird als *Latenzzeit* bezeichnet. Während dieser Zeit kann ein Positionierungssystem Daten von seinen Sensoren erfragen, Informationen messen und klassifizieren und schließlich die Position berechnen. Abhängig von der verwendeten Technologie und den angewendeten Algorithmen kann die Latenzzeit wenige bis mehrere tausend Millisekunden betragen.

2.5 Positionierungssysteme vs. Trackingsysteme

Positionierungssysteme sind ein Spezialfall von *Trackingsystemen*. Trackingsysteme bieten die Möglichkeit, Objekte über eine längere Zeit hinweg regelmäßig zu positionieren, auch wenn sich die Objekte dabei bewegen. Positionierungssysteme hingegen bieten die Möglichkeit, Objekte, die sich an festen Orten befinden, zu lokalisieren. In der Literatur wird diese Unterscheidung aber nicht immer getroffen; vielmehr werden die Begriffe oft als Synonyme verwendet.

Ein sich bewegendes Objekt zu verfolgen ist im Allgemeinen anspruchsvoller, als ein statisches nur zu positionieren. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Bewegung des Objektes den Sensordaten ein Rauschen hinzufügt. Neben der Beschleunigung, der Geschwindigkeit und der Richtungsänderung des verfolgten Objektes hat auch die verwendete Sensortechnologie direkten Einfluss auf den Betrag des Messfehlers.

2.6 Skalierbarkeit

Die *Skalierbarkeit* von Positionierungssystemen ist ein multidimensionales Problem. Ein Positionierungssystem sollte zumindest mit der Anzahl der Benutzer, der Größe des Operationsgebietes und der Häufigkeit der Positionsanfragen skalieren. All diese Anforderungen sind relevant, da andernfalls mindestens eine Ressource überlastet

wird und es daraufhin zu einem Anstieg der Latenzzeiten oder zu einer Abnahme der Positionierungsgenauigkeit kommt.

Angenommen, bei einem Positionierungssystem senden die mobilen Endgeräte regelmäßig Leuchtf Feuer-Signale, um die Infrastruktur über ihre Anwesenheit zu informieren. Sobald sich eine ausreichend große Anzahl Knoten an einem Ort befindet, wird der Übertragungskanal überlastet, und es kommt regelmäßig zu Kollisionen. Dadurch kann die Infrastruktur die Informationen, die per Leuchtf Feuer verschickt wurden, nicht dekodieren, und somit werden Positionsanfragen mit ungenauen Positionsschätzungen beantwortet.

2.7 Funktionale Limitierungen

Manche Positionierungssysteme sind für bestimmte Umgebungen optimiert. Ein Positionierungssystem, das für den Einsatz innerhalb von Gebäuden entwickelt wurde, kann unter Umständen sehr schlechte Ergebnisse im Freien liefern [29]. Umgekehrt liefern viele Positionierungssysteme, die für den Einsatz im Freien gebaut wurden, schlechte Ergebnisse innerhalb von Gebäuden [16] [6].

Zusätzlich zu den durch die Umgebung induzierten Nebenbedingungen benötigen viele Positionierungssysteme eine stabile Infrastruktur. Fällt diese teilweise oder komplett aus, so sind manche Positionierungssysteme nicht mehr funktionsfähig. Schwerer wiegt, wenn bereits kleine Veränderungen die Genauigkeit stark beeinflussen. So kann das Verschieben oder Umpositionieren von Access Points (zum Beispiel aufgrund von Baumaßnahmen) die Genauigkeit eines Positionierungssystems so beeinflussen, dass Positionsschätzungen aufgrund ihrer Ungenauigkeit nicht mehr genutzt werden können.

Bei manchen Positionierungssystemen hat der Benutzer maßgeblichen Einfluss auf die Genauigkeit der Positionsangaben. Schirmt er das mobile Endgerät durch seinen Körper ab oder hält er es so ungünstig, dass die Radiowellen nur über Umwege die Antenne erreichen können, kann die Position eventuell gar nicht mehr oder nur noch sehr ungenau bestimmt werden. Der Grund hierfür ist, dass Wireless-LAN und Bluetooth im Wesentlichen für die Datenkommunikation das Frequenzband zwischen 2.400 und 2.483,5 MHz verwenden und dass der menschliche Körper zu 60 bis 70 Prozent aus Wasser besteht und Radiowellen in diesem Frequenzbereich von Wasser reflektiert werden.

2.8 Netzbelastung und Rechenaufwand

Wireless-LAN- und Bluetooth-basierte Positionierungssysteme benötigen zur Positionsbestimmung einen Nachrichtenaustausch, der dafür sorgt, dass die Sensoren ausreichend Daten erhalten, damit eine Messung möglich ist. Sowohl der Nachrichtenversand als auch die Sensordatenauswertung beanspruchen begrenzte Ressourcen, wie zum Beispiel Netzwerkbandbreite oder Prozessorzyklen. Insbesondere für mobile Endgeräte, wie beispielsweise bei PDAs (Personal Digital Assistants) oder Laptops, ist die Geschwindigkeit der Entwicklung der Stromversorgung in den letzten Jahren weit hinter der anderer Ressourcen wie Speicher und Rechenleistung zurück geblieben. Gerade deshalb ist Energieeffizienz auf mobilen Endgeräten nach wie vor ein entscheidendes Designkriterium.

Nachrichten sollten daher nur dann über das Netzwerk übertragen werden, wenn eine Positionsanfrage gestellt wurde. Dies hat nicht nur den Vorteil, dass weniger Energie verbraucht wird und so die Stand-by-Zeiten verlängert werden. Vielmehr wirkt sich eine minimale Anzahl an verschickten Nachrichten positiv auf die Skalierbar-

keit des Systems aus, da dadurch gleichzeitig eine größere Anzahl von Benutzern berücksichtigt werden kann.

Die aktuelle Prozessorgeneration erlaubt durch Stromsparfunktionen die Energieaufnahme in Leerlaufzeiten zu reduzieren. Diese Technik ist im Zusammenhang mit der Positionsbestimmung sehr wichtig, da es dabei um periodische Signalverarbeitung geht; hier gilt es Algorithmen zu entwerfen, die die Stromsparfunktionen optimal ausnutzen.

3 Überblick über bestehende Positionierungssysteme

Im Folgenden wird ein Überblick über bestehende Wireless-LAN- und Bluetooth-basierte Positionierungssysteme gegeben. Hierbei sollen im Wesentlichen Positionierungssysteme betrachtet werden, die für den Einsatz innerhalb von Gebäuden konzipiert wurden. Ist ein Positionierungssystem für den Einsatz im Freien konzeptioniert, so wird explizit darauf hingewiesen.

3.1 Wireless-LAN-basierte Positionierungssysteme

3.1.1 Nachbarschaftserkennung

In diesem Abschnitt werden zwei Positionierungssysteme basierend auf der Nachbarschaftserkennung vorgestellt. Im Gegensatz zu *Guide*, dem ersten Verfahren, das zur absoluten Positionierung genutzt werden kann, bietet *NearMe*, das zweite System, nur symbolische Positionierung.

Guide. Im Rahmen eines Kontext-sensitiven Touristenführers wurde im Jahre 2000 an der Lancaster University (UK) das Positionierungssystem *Guide* entwickelt, das von überlappungsfreien Wireless-LAN-Zellen ausgeht [9]. Die Position des mobilen Endgerätes wird dabei anhand der MAC-Adresse des Access Point, der üblicherweise den Mittelpunkt der Zelle darstellt, bestimmt. Verlässt der Benutzer den Kommunikationsbereich eines Access Point, so wechselt die *Guide*-Anwendung in einen interaktiven Modus, damit sich der Benutzer anhand vorgegebener Fotos interaktiv positionieren kann. Die genaue Funktionsweise des interaktiven Modus wird hier aus Platzgründen nicht beschrieben.

Wie die Verfasser feststellen, ist die Größe von Wireless-LAN-Zellen über die Zeit hinweg nicht konstant. Die Autoren identifizieren Hindernisse, wie sich bewegende Objekte (zum Beispiel Fahrzeuge) oder Wettereigenschaften (zum Beispiel heftiger Regen), als Grund für die Größenveränderungen. Gegenstände können die üblicherweise kreisförmige Ausbreitungsform der Wellen derart verändern, dass es zu asymmetrischen und schwer vorhersagbaren Zellstrukturen kommt.

NearMe. Das *NearMe*-Projekt definiert zwei Arten von Nachbarschaft: *Nahbereichs*- und *Fernbereichs*-Nachbarschaft [17]. Alle mobilen Endgeräte, die in Kommunikationsreichweite mindestens eines gemeinsamen Access Point sind, befinden sich in einer Nahbereichs-Nachbarschaft zueinander. Zwei Endgeräte befinden sich in einer wechselseitigen Fernbereichs-Nachbarschaft, wenn sie nicht in Kommunikationsreichweite zu einem gemeinsamen Access Point stehen, aber über eine Kette, gebildet durch sich überlappende Zellen, miteinander verbunden sind.

Die Autoren verstehen ihr Positionierungssystem als ein System zur Identifikation von Schlüsselpositionen (wie Orte oder Plätze). So ist es bei diesem System möglich, mittels der *NearMe*-Anwendung nach Gegenständen in der Nahbereichs-Nachbarschaft zu fragen und vorhandene Gegenstände in eine Datenbank einzutragen. Weiterhin können Gegenstände in der Fernbereichs-Nachbarschaft erfragt werden. Zusätzlich liefert das System eine Schätzung über die Entfernung zu den Gegenständen, die abgefragt wurden. Diese Schätzung basiert auf den Erfahrungswerten, die das System anhand der Bewegungsmuster anderer Nutzer gesammelt hat. *NearMe* ist in der Lage, die Entfernung zu schätzen, wobei es keine Aussage darüber treffen kann, in welche Richtung man sich bewegen muss, um ein gewünschtes Ziel zu erreichen. Dies liegt daran, dass *NearMe* keine Informationen über die absoluten Positionen der Access Points vorhält. Jedoch ist dieses Positionierungssystem für die von den Autoren beschriebene Beispielanwendung, eine Art Friend-Finder-Anwendung, die andere Benutzer in der Nahbereichs-Nachbarschaft anzeigt, gut geeignet.

3.1.2 Entfernungsspeilung

MagicMap. Das Positionierungssystem *MagicMap* wendet zur Positionsbestimmung ein Peilverfahren an, das die Distanz zwischen einem Endgerät und einem Referenzpunkt mit Hilfe des *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* ermittelt [15]. Dieses Verfahren erfordert eine spezielle Kalibrierung für jeden Netzwerktyp. Da diese Technik nach Aussage der Autoren innerhalb von Gebäuden eine Genauigkeit von circa 10 Metern bietet, schlagen sie zur Positionsfindung vor, die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen einer angenommenen Position und den sich daraus ergebenden Distanzen zu minimieren.

Die innovative Idee von *MagicMap* ist die kooperative Zusammenarbeit der mobilen Endgeräte bei der Positionsfindung. Hierbei können neben den Access Points andere mobile Endgeräte, bei denen man von einer relativ genauen Position ausgehen kann, zur eigenen Positionsbestimmung hinzugezogen werden. Dadurch werden Effekte der Signalstreuung statistisch ausgeglichen, die Genauigkeit der Positionsangaben nimmt zu. Erste Versuche lieferten eine Genauigkeit von 1 bis 5 Metern. Durch diese Zusammenarbeit wird das Positionierungssystem gegenüber Ausfällen der Infrastruktur zumindest teilweise unabhängig.

Ein ähnliches Verfahren wurde in [11] vorgestellt, welches das zugrunde liegende Kommunikationsmedium außer Acht lässt, indem es von ihm abstrahiert. Weiterhin nehmen die Verfasser an, dass die Entfernung zwischen zwei Geräten anhand der Signalstärke exakt bestimmt werden kann. Die Autoren evaluieren ihre Methode anhand einer Simulation, was den direkten Vergleich mit den bisher vorgestellten Verfahren nicht erlaubt.

3.1.3 Karten mit Radio-Fingerabdrücken

Die Radio-Fingerabdruck-basierten Systeme können, wie in Abschnitt 2 dargestellt, in deterministische und probabilistische Verfahren eingeteilt werden. Im Folgenden werden zunächst die *deterministischen* Verfahren vorgestellt.

RADAR. Microsoft Research stellte im Jahr 2000 *RADAR*, das erste Positionierungssystem auf Basis von Wireless-LAN und Karten mit Radio-Fingerabdrücken, vor [4]. Dabei wurde neben dem Radio-Fingerabdruck-Verfahren noch ein Peilverfahren zur Entfernungsmessung vorgeschlagen, auf das hier nicht näher eingegangen

wird. Bei dem Fingerabdruck-Verfahren handelt es sich um ein deterministisches Verfahren, bei dem in der Datenbank nur die Durchschnittswerte der Signalstärkemessung gespeichert werden. Positionen werden innerhalb der Infrastruktur berechnet, indem die mobilen Endgeräte regelmäßig Leuchtfeuer-Signale zur Positionsbestimmung aussenden und die Access Points die Signalstärken messen. Die Verfasser weisen schon in ihrer Veröffentlichung auf die Implikationen bezüglich der Skalierbarkeit hin und erläutern mögliche Lösungsansätze. Zur Positionsbestimmung schlagen die Autoren den *K-Nearest Neighbor*-Algorithmus vor, der in Abschnitt 2.1.3 vorgestellt wurde.

Die Genauigkeit des Systems untersuchten die Autoren anhand einer Testinstallation innerhalb eines Gebäudes und erzielten dabei eine Genauigkeit von unter 4,69 Metern in 75 Prozent der untersuchten Fälle. Zusätzlich stellten die Autoren fest, dass eine ständige Verfolgung eines sich bewegenden mobilen Endgerätes die Genauigkeit um circa 20 Prozent verschlechtert.

In [3] untersuchten die Autoren weitere Algorithmen zur Positionsbestimmung und konnten anhand zusätzlicher Optimierungen die Genauigkeit auf unter 4 Metern bei 90 Prozent der untersuchten Fälle erhöhen. Hierbei stellten die Autoren fest, dass bei einer Anzahl von Access Points größer fünf die Genauigkeit nicht mehr signifikant zunimmt. Darüber hinaus merken die Verfasser an, dass es bei Einsatzgebieten, die sehr unterschiedliche Bewegungsprofile von Menschen oder Maschinen aufweisen, sinnvoll sein kann, typische Szenarien zu identifizieren und für jedes Szenario eine eigene Karte mit Fingerabdrücken zu erstellen. Dieser Ansatz hat für eine Testumgebung, in der zwei Szenarien identifiziert wurden, die Genauigkeit auf 3,16 Metern verbessern können.

PlaceLab. Das *PlaceLab*-Projekt ist ein von Intel Research entwickeltes System, das bereits vorhandene drahtlose Netzwerktechnologien zur Positionierung nutzt [24]. Die Autoren argumentieren, dass die Verfügbarkeit eines Positionierungssystems viel wichtiger als seine Genauigkeit ist. Deshalb verwenden die Autoren eine große Anzahl von verfügbaren und leicht zugänglichen Kommunikationsmöglichkeiten und bauen darauf Positionierungssysteme auf, die unter Umständen nicht sehr genau arbeiten. Dabei beschränkt sich *PlaceLab* nicht nur auf Wireless-LAN und Bluetooth, sondern verwendet zusätzlich noch GPS und Mobilfunkzellen der *Global System for Mobile Communications (GSM)* [25].

In [8] beschreiben die Autoren ein Verfahren, bei dem Karten von Radio-Fingerabdrücken zur Positionierung im Freien genutzt werden. Die wesentlich neue Idee dabei ist, dass die Datenbanken mit Fingerabdrücken nicht speziell für das Positionierungssystem erstellt werden müssen, sondern vorhandene *War-Driving-Datenbanken* zur Kartenerstellung genutzt werden. *War-Driving-Datenbanken* werden von einer Großzahl von Freiwilligen erstellt, die mit ihren mobilen Endgeräten durch bewohnte Gebiete fahren, nach Access Points Ausschau halten und diese kartographieren. Die Motivation, eine solche Datenbank zu erstellen, ist vielfältig. Manche verfolgen den Traum des überall verfügbaren und kostenlos nutzbaren Internetzugangs. Andere suchen nach ungeschützten und schlecht gewarteten Access Points, damit sie diese für ihre teilweise illegalen Aktivitäten im Internet nutzen können. Eine der größten *War-Driving-Datenbanken* ist über das Internet zugänglich und enthält über 4,5 Millionen Einträge [2]. Besonders im Hinblick auf die Skalierbarkeit ist dieser Ansatz sehr interessant, da er eine verteilte und dezentrale Erstellung der Karten mit Radio-Fingerabdrücken erlaubt.

Als Algorithmus zur Positionsbestimmung setzten die Autoren eine leicht abgewandelte Version des K-Nearest-Neighbors-Algorithmus ein, der vom RADAR-Projekt vorgeschlagen wurde. Die Autoren verwenden dabei nur die vier nächsten Nachbarn, also vier Einträge in der Fingerabdruck-Datenbank, um aus deren Positionen die Position des Endgerätes zu bestimmen.

Eine Evaluierung dieses Systems hat für die Innenstadt von Seattle einen Positionierungsfehler von 18,5 Metern im Median ergeben. In Kirkland, einem Vorort von Seattle, wurden noch Positionierungsfehler von 30,0 Metern im Median erreicht.

In [30] zeigen die Autoren anhand eines analytischen Modells, dass probabilistische Verfahren eine höhere Genauigkeit als deterministische erreichen können. Trotz dieser Tatsache wurden im vorherigen Absatz zwei deterministische Verfahren vorgestellt, da diese Veröffentlichungen die ersten waren, die Karten mit Radio-Fingerabdrücken zur Positionsbestimmung innerhalb von Gebäuden und im Freien verwendet haben und somit die Grundlage für alle anderen Radio-Fingerabdruck-Verfahren darstellen. Im Folgenden wird nun ein probabilistisches Verfahren vorgestellt.

Rice. Das im Folgenden vorgestellte Ortungssystem *Rice*, das hier nach seiner Herkunftsuniversität benannt wurde, basiert auf einer so genannten *Markov-Lokalisierung* [12]. *Rice* ist in der Lage, mobile Endgeräte in Zimmern oder in Bereichen von Fluren zu lokalisieren. Dazu verwendet es eines *Bayesschen Filter*, mit dem die Wahrscheinlichkeit bestimmt werden kann, dass eine Signalstärkemessung an einem bestimmten Messpunkt der Fingerabdruck-Datenbank vorkommt. Dieses Verfahren nennen die Verfasser *Markov-Lokalisierung*, da die Wahrscheinlichkeit, mit der die letzte Position bestimmt wurde, als a-priori Wahrscheinlichkeit für die aktuelle Position in den Algorithmus eingeht.

In der Trainingsphase werden in den Radio-Fingerabdrücken nur der Mittelwert und die Standardabweichung der Signalstärken gespeichert. Dies hat den Vorteil, dass die Datenbank für die Radio-Fingerabdrücke nur relativ wenige Daten pro Messpunkt speichern muss.

Die Verfasser erweiterten *Rice* noch um die Fähigkeit, als Trackingsystem sinnvoll eingesetzt werden zu können. Hierzu modellieren die Autoren die möglichen Bewegungsmuster als *Markov-Kette*: Die Messpunkte, die in der Fingerabdruck-Datenbank gespeichert sind, und die realen Verbindungen zwischen diesen Punkten werden als Endlicher-Automat dargestellt. Die Annahme ist dabei, dass mobile Endgeräte keine Sprünge über mehrere Messpunkte hinweg machen oder sich nicht von einem Messpunkt zum anderen bewegen können, wenn für diese zwei Punkte keine Verbindung modelliert wurde. Dieser Ansatz schränkt den Suchraum während der Positionierungsphase deutlich ein und vereinfacht somit die Positionsbestimmung.

Eine Testinstallation in einem Gebäude der Rice University mit 510 Messpunkten wurde zur Evaluierung des Verfahrens genutzt. Dabei zeigte sich, dass eine korrekte Ortsbestimmung zu 97 Prozent möglich ist. Wenn sich die mobilen Endgeräte mit Schrittgeschwindigkeit (bis zu 4 m/s) bewegen, dann ist immerhin noch eine korrekte Bestimmung des Ortes in 71 Prozent der Fälle möglich.

3.1.4 Sensor-Fusion

In diesem Unterabschnitt werden zwei Sensor-Fusion Verfahren vorgestellt, zum einen ein vertikales Verfahren aus dem *PlaceLab*-

Projekt und zum anderen das horizontale Verfahren *Quality of Information*.

PlaceLab. In [19] untersuchen die Autoren die Abdeckung von Positionierungstechniken in alltäglichen Szenarien. Hierfür wählen sie drei Testpersonen aus, um anhand deren Bewegungsmuster die Verwendbarkeit von GPS als Positionierungssystem für Location-Based Services und mobile Geschäftsanwendungen abzuschätzen. Die Untersuchung zeigt, dass GPS über einen Tag hinweg nur zu 4,5 % der Zeit zur Verfügung steht. Gleichzeitig untersuchten die Autoren, wie häufig GSM und Wireless-LAN zur Verfügung stehen, und es zeigte sich, dass diese Technologien über den Tag hinweg zu über 94 Prozent verfügbar waren.

Aufgrund dieser Zahlen entwickelten die Autoren einen Partikel-Filter-Algorithmus, der mit unterschiedlichen Technologien zur Positionsbestimmung umgehen kann. Partikel-Filter gehören zu den sequentiellen *Monte Carlo* Methoden und stellen probabilistische Schätzverfahren dar, die einen Bayesschen Filter implementieren. Hierzu werden die Zell-IDs der GSM-Zellen, der Access Points von Wireless LAN und Bluetooth ausgelesen und an den Partikel-Filter übergeben. Dieser führt die Daten der verschiedenen Sensoren zusammen und generiert daraus ein Ergebnis. Letztendlich erzeugt der Algorithmus eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine Anzahl möglicher Positionen [14].

Würde nur Wireless-LAN zur Positionierung verwendet, so erreichte dieses Positionierungsverfahren eine Genauigkeit von durchschnittlich 29,0 Metern in Kirkland, einem Vorort von Seattle. Dabei zeigte sich aber, dass Wireless-LAN nur zu 42 Prozent der Tageszeit zur Verfügung steht. Wird hingegen nur GSM als Positionierungsverfahren gewählt, so ergab sich eine Genauigkeit von durchschnittlich 187,2 Metern bei einer Abdeckung von 99,7 Prozent.

Bei gleichzeitiger Verwendung von Wireless-LAN und GSM verbesserte sich der durchschnittliche Positionierungsfehler auf 42,4 Meter, und die Abdeckung erreichte 100 Prozent. Es zeigte sich weiterhin, dass Bluetooth noch nicht die Durchdringung von Wireless-LAN und GSM erreicht hat, da kaum stationäre Access Points gefunden werden konnten.

Quality of Information. *Quality of Information (QoI)* ist ein Verfahren, das die Anzahl der Anfragen an Sensoren, die zur Positionsbestimmung notwendig sind, minimiert [7]. Die Autoren beschreiben ein Positionierungsverfahren basierend auf einem Model, bei dem die Sensoren als Bayessche Netze modelliert werden. Dieser Ansatz verfolgt die Idee, dass die Sensoren anhand ihrer Qualität bewertet werden: es werden nur die Sensoren abgefragt, die zur Erreichung einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit, mit der die gemessene Position mit der realen Position übereinstimmt, notwendig sind. Diese Wahrscheinlichkeit wird QoI genannt.

Die Autoren verglichen ihren QoI-Ansatz mit einem reinen Bayesschen Verfahren, das die Anzahl der verwendeten Sensoren nicht minimiert. Hierfür nutzen die Autoren ein Wireless-LAN-basiertes Positionierungssystem, das symbolische Positionierung auf Basis von Räumen durchführt und dabei Positionen Infrastruktur-basiert berechnet. Bei der Evaluierung zeigte sich, dass QoI die Genauigkeit nicht beeinträchtigt, aber die Anzahl der Sensoranfragen von 570 auf 270 reduziert. Dieses Verfahren ist deshalb gut dafür geeignet, die Skalierbarkeit von Infrastruktur-basierten Positionierungssystemen zu erhöhen.

3.2 Bluetooth-basierte Positionierungssysteme

3.2.1 Nachbarschaftserkennung

BIPS. Das *Bluetooth Indoor Positioning Service (BIPS)*-Projekt ist ein Positionierungssystem, das auf Nachbarschaftserkennung basiert und dabei die Positionierung über die Infrastruktur berechnet [1].

Die am häufigsten anzutreffende Bluetooth-Variante bietet eine Kommunikationsreichweite von circa 10 Metern und ist deshalb geradezu prädestiniert, um als Nachbarschaftserkennungstechnologie genutzt zu werden. Aufgrund der geringen Sendeleistung von 1 mW durchdringt Bluetooth üblicherweise keine Wände und kann deshalb gut dafür genutzt werden, einzelne Räume (wie zum Beispiel Büros oder Teile von Fluren) abzudecken. Wird beispielsweise in jedem Büro einer Abteilung ein Bluetooth-Terminal installiert, so sind mobile Endgeräte jeweils in den Büros lokalisierbar, in denen sie sich befinden. In dem von den Autoren vorgeschlagenen System wird ein zentraler Server genutzt, um die Standorte der mobilen Endgeräte zu verwalten.

Die Verfasser stellen fest, dass Bluetooth nur bedingt für Trackingsysteme geeignet ist. Dies liegt zum Einen daran, dass Bluetooth bei einem Nachbarschaftsscan bis zu 22,5 Sekunden benötigt, um andere Bluetooth-Geräte in der Umgebung wahrzunehmen. Der Grund hierfür ist, dass Bluetooth ein Frequenzspritzverfahren zur Kommunikation nutzt und deshalb auf jeder Trägerfrequenz einige Zeit verbringen muss, um auf benachbarte Bluetooth-Geräte zu warten. Zum anderen beträgt die Kommunikationsreichweite je nach verwendeten Endgeräten 10 beziehungsweise 100 Meter. Bewegt sich ein Endgerät mit hoher Geschwindigkeit durch den Raum, so reicht die Zeit für einen Nachbarschaftsscan nicht aus, um während des gesamten Scans von demselben Access Point abgedeckt zu sein.

Bei einem Test stellten die Autoren fest, dass im Schnitt 4,1320 Sekunden vergehen, bis die Geräte in der Nachbarschaft gefunden werden.

3.2.2 Entfernungsspeilung

Da die hier vorgestellten Positionierungssysteme von ihren Verfassern nicht benannt wurden, werden sie nach den Städten der Universitäten bezeichnet, an denen sie bearbeitet wurden.

Hannover. In [10] verwenden die Autoren den *Resource Signal Strength Indicator (RSSI)* von Bluetooth, um darüber die Entfernung zwischen dem Sender und dem Empfänger abzuschätzen. Der RSSI gibt die Empfangsstärke in dBm wieder. Die Autoren wenden die Methode der kleinsten Quadrate an, um über einen Satz von gemessenen Werten eine Entfernungsfunktion ableiten zu können. Bei der anschließenden Evaluierung mit Bluetooth Geräten, die eine Kommunikationsreichweite von 10 Metern aufwiesen, zeigte dieses Verfahren einen durchschnittlichen Positionierungsfehler von 2,06 Metern.

Luleå. An der Luleå University in Schweden wurde ein Bluetooth-basiertes Positionierungssystem entwickelt, das sowohl Infrastruktur-basierte als auch Endgeräte-basierte Positionierung erlaubt [20]. Je nach Leistungsfähigkeit des Endgerätes kann die Positionsberechnung an die Infrastruktur übergeben oder auf dem Endgerät durchgeführt werden.

Die Autoren stellen, wie schon beim oben beschriebenen *BIPS*-Projekt, fest, dass Bluetooth nur bedingt als Tracking-Technologie

geeignet ist. Die Autoren schlagen deshalb Bluetooth als Positionierungstechnologie für langsame Objekte vor (zum Beispiel Personen, die sich zu Fuß fortbewegen); alternativ sollen Bluetooth-Geräte mit einer Reichweite von bis zu 100 Metern verwendet werden. Zur Positionsschätzung wendeten die Autoren einen Entfernungsspeilungsalgorithmus an und erreichten damit in einer Testreihe unter Laborbedingungen einen durchschnittlichen Positionierungsfehler von 1,7 Metern.

Mankato. In [28] schlagen die Autoren ein Positionierungssystem vor, bei dem die Entfernung über die *Bit Error Rate (BER)* der *L2CAP*-Schicht abgeschätzt wird. Die *L2CAP*-Schicht wird beim Bluetooth-Protokollstack als Grundlage für den Aufbau und die Konfiguration von logischen Kanälen genutzt. Diese Schicht eignet sich deshalb sehr gut, da die darunter liegenden Schichten weder Fehlererkennung noch -korrektur durchführen und somit die BER direkt auslesbar ist. Die Idee des Vorschlags ist, dass sich die BER mit zunehmender Entfernung zwischen Sender und Empfänger verschlechtert und es somit zu Bit-Fehlern beim Empfänger kommt. Von diesem innovativen Ansatz liegen leider noch keine Meßergebnisse vor.

3.2.3 Karten mit Radio-Fingerabdrücken

Den Autoren dieses Artikels ist kein Bluetooth-basiertes Positionierungsverfahren bekannt, das Radio-Fingerabdrücke zur Positionierung nutzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bestehende Bluetooth-basierte Verfahren eine Positionierungsgenauigkeit im Bereich von gängigen Wireless-LAN-basierten Fingerabdruck-Verfahren aufweisen und es sich deshalb nicht lohnt, den Aufwand der Kartenerstellung ohne wirklichen Nutzen auf sich zu nehmen.

3.2.4 Sensor-Fusion

Auch Bluetooth wurde beim *PlaceLab*-Projekt als Positionierungstechnologie untersucht [19]. Dabei stellten die Autoren fest, dass bestehende Bluetooth-Installationen zur Positionierung im Freien kaum geeignet sind, da die Kommunikationsreichweite von Bluetooth nicht ausreicht, um Access Points, die in einem Gebäude installiert sind, außerhalb zu empfangen.

Der Sensor-Fusion-Algorithmus von *PlaceLab* unterstützt zwar Bluetooth, aber es war bei mehreren Testreihen im Stadtgebiet von Seattle nicht möglich, einen Bluetooth Access Point zu finden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Artikel hat einen allgemeinen Überblick über Wireless-LAN- und Bluetooth-basierte Positionierungssysteme gegeben, wobei zuerst grundlegende Positionierungsverfahren vorgestellt wurden. Anschließend wurden Kriterien für Positionierungssysteme erarbeitet, die schließlich in einer Übersicht über bereits bestehende Positionierungssysteme angewendet wurden. Diese Übersicht über bestehende Positionierungssysteme hat gezeigt, dass der Raum, der durch die Unterscheidungskriterien aufgespannt wurde, bereits dicht mit existierenden Systemen besetzt ist. Dennoch wird ersichtlich, dass in einigen Bereichen noch Forschungsbedarf besteht, insbesondere im Bereich der Sensor-Fusion.

Danksagungen

Dieser Artikel wurde gefördert von der *Landesstiftung Baden-Württemberg* und dem *Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg*.

Literatur

- [1] Giuseppe Anastasi, Renata Bandelloni, Marco Conti, Franca Delmastro, Enrico Gregori, and Gianni Mainetto. Experimenting an Indoor Bluetooth-based Positioning Service. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems*, number 1, pages 480–484, Washington, DC, USA, May 2003. IEEE Computer Society.
- [2] arkasha and bobzilla. Wireless Geographic Logging Engine - Plotting WiFi on Maps. Website: <http://www.wigle.net>, 2001-2005.
- [3] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan. Enhancements of the RADAR User Location and Tracking System. Technical Report MSR-TR-2000-12, Microsoft Research, Microsoft Corporation One Microsoft Way Redmond, WA 98052, February 2000.
- [4] Paramvir Bahl and Venkata N. Padmanabhan. RADAR: An In-Building RF-Based User Location and Tracking System. In *Proceedings of the 19th International Conference on Computer Communications (Infocom 2000)*, volume 2, pages 775–784, Tel Aviv, March 2000. IEEE.
- [5] Barry Brumitt, Brian Meyers, John Krumm, Amanda Kern, and Steve Shafer. EasyLiving: Technologies for Intelligent Environments. In *Second International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing*, pages 12–27, September 2000.
- [6] Simon Byers and Dave Kormann. 802.11b Access Point Mapping. *Communications of the ACM*, 46:41–46, May 2003.
- [7] Paul Castro, Patrick Chiu, Ted Kremenek, and Richard R. Muntz. A Probabilistic Room Location Service for Wireless Networked Environments. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2004)*, pages 18–34, Atlanta, Georgia, USA, 2001. Springer-Verlag, London, UK.
- [8] Yu-Chung Cheng, Yatin Chawathe, Anthony LaMarca, and John Krumm. Accuracy Characterization for Metropolitan-scale WiFi Localization. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services (Mobisys 2005)*, pages 233–245, Seattle, Washington, 2005. ACM Press, New York, NY, USA.
- [9] Keith Cheverst, Nigel Davies, Keith Mitchell, and Adrian Friday. Experiences of Developing and Deploying a Context-Aware Tourist Guide: The GUIDE Project. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)*, pages 20–31, Boston, MA, 2000.
- [10] Silke Feldmann, Kyandoghere Kyamakya, Ana Zapater, and Zighuo Lue. An indoor Bluetooth-based positioning system: concept, implementation and experimental evaluation. In Weihua Zhuang, Chi-Hsiang Yeh, Olaf Droegehorn, C.-T. Toh, and Hamid R. Arabnia, editors, *International Conference on Wireless Networks*, pages 109–113, Las Vegas, Nevada, USA, June 2003. CSREA Press.
- [11] Charalampos Fretzagias and Maria Papadopouli. Cooperative Location-Sensing for Wireless Networks. In *Proceedings of the Second IEEE Annual Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2004)*, pages 121–131, 2004.
- [12] Andreas Haeberlen, Eliot Flannery, Andrew M. Ladd, Algis Rudys, Dan S. Wallach, and Lydia E. Kavradi. Practical Robust Localization over Large-Scale 802.11 Wireless Networks. In *Proceedings of the Tenth ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM)*, pages 70–84, New York, NY, USA, September 2004. ACM Press.
- [13] Jeffrey Hightower and Gaetano Borriello. Location Systems for Ubiquitous Computing. *Computer, IEEE Computer Society Press*, 34(8):57–66, August 2001. This article is also excerpted in “IT Roadmap to a Geospatial Future,” a 2003 report from the Computer Science and Telecommunications Board of the National Research Council.
- [14] Jeffrey Hightower and Gaetano Borriello. Particle Filters for Location Estimation in Ubiquitous Computing: A Case Study. In Nigel Davies, Elizabeth D. Mynatt, and Itiro Siio, editors, *Proceedings of the Sixth International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2004)*, volume 3205 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 88–106. Springer, 2004.
- [15] Peter Ibach and Tobias Hübner. MagicMap - Kooperative Positionsbestimmung über WLAN. In *Chaos Communication Congress Proceedings*. Chaos Computer Club, Dezember 2004.
- [16] Elliott Kaplan. *Understanding GPS: Principles and Applications*. Artech House, Incorporated, second edition, December 2005.
- [17] John Krumm and Ken Hinckley. The NearMe Wireless Proximity Server. In Nigel Davies, Elizabeth D. Mynatt, and Itiro Siio, editors, *Proceedings of the 6th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2004)*, volume 3205 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 283–300. Springer, 2004.
- [18] Axel Küpper. *Location-based Services*. John Wiley & Sons, 2005.
- [19] Anthony LaMarca, Yatin Chawathe, Sunny Consolvo, Jeffrey Hightower, Ian Smith, James Scott, Timothy Sohn, James Howard, Jeff Hughes, Fred Potter, Jason Tabert, Pauline Powledge, Gaetano Borriello, and Bill Schilit. Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild. In *the Third International Conference on Pervasive Computing*, pages 116–133, Munich, Germany, May 2005.
- [20] Marcus Nilsson, Josef Hallberg, and Kåre Synnes. Positioning with Bluetooth. In *Proceeding of the 10th International Conference on Telecommunications (ICT)*, Tahiti, Papeete, French Polynesia, 2003.
- [21] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition. <http://standards.ieee.org/getieee802/>, 1999.

- [22] Nissanka B. Priyantha, Anit Chakraborty, and Hari Balakrishnan. The Cricket Location-Support System. In *Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)*, pages 32–43. ACM Press, 2000.
- [23] Theodore S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, second edition, December 2001.
- [24] Bill Schilit, Anthony LaMarca, Gaetano Borriello, William Griswold, David McDonald, Edward Lazowska, Anand Balachandran, Jason Hong, and Vaughn Iverson. Challenge: Ubiquitous Location-Aware Computing and the Place Lab Initiative. In *Proceedings of the First ACM International Workshop on Wireless Mobile Applications and Services on WLAN Hotspots (WMASH 2003)*, pages 29–35, New York, NY, USA, September 2003. ACM Press.
- [25] Jochen Schiller. *Mobilkommunikation*. Pearson Studium, Mai 2003.
- [26] Asim Smailagic, Daniel P. Siewiorek, Joshua Anhalt, David Kogan, and Yang Wang. Location Sensing and Privacy in a Context Aware Computing Environment. *Wireless Communications, IEEE*, 9:10–17, October 2002.
- [27] IEEE Computer Society. Core Specification of the Bluetooth System Specification Volume 1. <http://ieee802.org/15/Bluetooth/>, 2001.
- [28] Kiran Thapa and Steven Case. An Indoor Positioning System Using Bluetooth Ad Hoc Networks. In *ISA Expo 2003 - Emerging Technologies Conference*, Houston, TX, October 2003. The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- [29] Roy Want, Andy Hopper, Veronica Falcao, and Jonathon Gibbons. The Active Badge Location System. *ACM Transactions on Information Systems*, 10(1):91–102, January 1992.
- [30] 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.
- [31] Vasileios Zeimpekis, George M. Giaglis, and George Lekakos. A Taxonomy of Indoor and Outdoor Positioning Techniques for Mobile Location Services. *SIGecom Exchange*, 3(4):19–27, 2003.