

# Vergleich von Systemen zur Positionsbestimmung und Navigation in Gebäuden

Günther Retscher und Michael Kistenich

## Zusammenfassung

Für die Positionsbestimmung von Personen und Objekten in Gebäuden wurden eine Reihe von Verfahren in den letzten Jahren entwickelt. Die wesentlichen Methoden werden in diesem Beitrag zusammengestellt und beschrieben. Neben Systemen, die Infrarot, Ultraschall oder Radiosignale zur Positionsbestimmung einsetzen, unterscheidet man noch visuelle Positionierungssysteme. Diese Systeme können zum Teil in moderne Navigationssysteme Einzug finden, bei denen ein mobiler Nutzer nicht nur im städtischen Umfeld sondern auch in Gebäuden lokalisiert werden soll.

## Summary

*For the location determination of persons and objects in multi-storey buildings systems have been developed in recent years. Important methods are presented and described in this paper, i. e. methods using infrared, ultrasonic or radio signals for position determination and optical tracking systems. These systems can be employed in modern navigation systems where also a location determination of the user in a building is required apart from positioning in urban outdoor environments.*

## 1 Einleitung

Die Navigation und damit verbunden die Positionsbestimmung hat schon seit jeher die Menschen bewegt. Griechische Geschichtsschreiber berichten von Seeleuten, die anhand der Sterne ihren Kurs berechneten, und beim Evangelisten Matthäus wird von Weisen aus dem Morgenland berichtet, die einem Stern nach Bethlechem zu Jesus folgten. Seit damals hat sich vieles verändert in der Navigation. GPS ermöglicht heutzutage weltweit die Navigation in Bereichen mit freier Sicht zu den Satelliten. Mit den steigenden technischen Möglichkeiten stieg auch der Wunsch, Navigation und Positionsbestimmung von Objekten und Personen in Gebäuden zu realisieren. Das FWF-Projekt NAVIO (Fußgängernavigation in Gebäuden und im städtischen Umfeld) (Gartner et al. 2004), das sich mit Fußgängernavigation außerhalb von und in Gebäuden beschäftigt, ist ein Teil dieser Realisierung und läuft zur Zeit an der TU Wien. Die wesentlichen Ziele des Projektes sind die kontinuierliche Bestimmung der Position eines Fußgängers, der nahtlose Übergang der Navigation zwischen Outdoor und Indoor und die Angabe des korrekten Stockwerks eines Nutzers in einem mehrstöckigen Gebäude. Dieser Beitrag beschreibt einen Teilaspekt des Projekts NAVIO und beschäftigt sich mit dem Thema der Positionsbestimmung in Gebäuden.

Zunächst werden in dieser Arbeit die verschiedenen Signale behandelt, die bei der Positionsbestimmung in Gebäuden verwendet werden. Darauf aufbauend werden im Anschluss die Methoden der Positionsbestimmung beschrieben und verschiedene Systeme vorgestellt. Zum Abschluss erfolgt ein Vergleich aller beschriebenen Indoor-Positionierungssysteme.

## 2 Geeignete Signale für die Positionsbestimmung

Grundsätzlich können bei der Positionierung verschiedene Signale verwendet werden, um mit ihrer Hilfe Messungen durchzuführen. Die bei der Positionsbestimmung in Gebäuden gebräuchlichen Signale sind Infrarot, Ultraschall, Radiosignale und sichtbares Licht. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben, wobei auf physikalische Eigenschaften sowie Vor- und Nachteile eingegangen wird.

### 2.1 Infrarot

Infrarot ist unsichtbare elektromagnetische Strahlung (Wärmestrahlung), die im Spektrum zwischen dem roten Licht und den kürzesten Mikrowellen liegt. Man unterscheidet nahes, mittleres und fernes Infrarot. Nahes Infrarot mit einer Wellenlänge von  $0.8\text{--}3\ \mu\text{m}$  ist das kurzwelligste aus der Familie der Infrarotstrahlung. Es schließt sich unmittelbar an das sichtbare Licht an. Fernes Infrarot ist dagegen viel langwelliger (Wellenlänge von  $20\text{--}300\ \mu\text{m}$ ) und reicht bis an das Gebiet der Mikrowellen. Da Infrarot unsichtbar ist, eignet es sich gut als Signal für Positionierungssysteme. Das Infrarotsignal breitet sich bei einer Reichweite von wenigen Metern mit Lichtgeschwindigkeit aus und wird an Oberflächen reflektiert. Einerseits beschränkt dies den Einsatzbereich auf einen einzelnen Raum, weil das Signal Mauern nicht durchdringen kann. Andererseits ist keine direkte Verbindung zwischen Sender und Empfänger nötig, da das Signal in einem geschlossenen Raum durch die Reflexionen zum Empfänger gelangt. Somit kann sehr gut festgestellt werden, ob in einem Raum ein Signal vorhanden ist, die exakte Position ist allerdings nicht feststellbar. Auf das Signal lässt sich eine Senderidentifikation aufmodulieren, wodurch verschiedene Benutzer unterschieden werden können. Infrarotsender und -empfänger sind zudem leicht erhältlich und relativ preiswert (Roth 2004).

## 2.2 Ultraschall

Mit Ultraschall bezeichnet man Schall oberhalb der menschlichen Hörschwelle mit Frequenzen zwischen 20 kHz und 1000 MHz. In der Luft breitet sich der Schall, verglichen mit Infrarot- und Radiosignalen, mit rund 330 m/s eher langsam aus. Dadurch ist es einfacher, mit geringem technischen Aufwand eine Messung zu erzielen beziehungsweise bei der gleichen zeitlichen Auflösung einer Messung höhere Genauigkeiten zu erhalten (Roth 2004). Treffen Ultraschallwellen auf ein Hindernis, so werden sie reflektiert. Dies nutzen zum Beispiel Fledermäuse, die Ultraschallwellen aussenden, um anhand der reflektierten Wellen Abstände zu Hindernissen zu bestimmen. Die Reichweite eines Ultraschallsignals ist stark abhängig von der Erzeugungsenergie des Signals. Die künstliche Erzeugung von Ultraschallsignalen, die in der Luft reine Longitudinalwellen sind, erfolgt mit Hilfe des Piezoeffektes. Auf geeignet zugeschnittene, einander gegenüberliegende Kristalle lässt man ein elektrisches Feld einwirken. Dadurch erleiden die Kristalle elastische Verformungen und erzeugen Ultraschallwellen (Reuter 1999). Ultraschallsender und -empfänger sind preiswert und daher auch gut für den kommerziellen Einsatz geeignet.

## 2.3 Radiosignale

Beginnend bei den elektrischen Wellen mit nur einigen zehn Schwingungen in der Sekunde reichen die Radiowellen bis hin zu Mittel-, Kurz- und Ultrakurzwellen, wobei diese aus bis zu 300 Millionen Schwingungen pro Sekunde bestehen. Radiowellen bilden den Teil des elektromagnetischen Spektrums mit den größten Wellenlängen und kleinsten Frequenzen. Das Frequenzspektrum reicht von 75 kHz bis etwa 10 GHz. Die Radiowellen werden als Trägerwellen genutzt, um Geräusche und andere Informationen drahtlos zu übertragen (z. B. Rundfunk, Mobilfunk, Wireless LAN oder Bluetooth). Prinzipiell kann bei der Datenübertragung mit Radiowellen zwischen zwei Arten unterschieden werden, der Amplitudenmodulation und der Frequenzmodulation. Im Gegensatz zu Infrarotsignalen und sichtbarem Licht können Radiosignale Wände und andere Hindernisse durchdringen, wodurch die Positionsbestimmung nicht auf geschlossene Räume beschränkt ist.

## 2.4 Sichtbares Licht

Sichtbar für uns Menschen ist elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen zwischen 400 und 750 Nanometern. Sie setzt sich aus allen Farben des Regenbogens zusammen. Sichtbares Licht hat gegenüber anderen Signalen den Vorteil, dass es tagsüber überall vorhanden ist und nicht künstlich erzeugt werden muss. Trifft das sichtbare Licht auf eine Oberfläche, so wird es von dieser zu-

rückgeworfen. Für die Positionierung können CCD-Sensoren eingesetzt werden.

## 3 Methoden der Positionsbestimmung

Mit den in Kap. 2 beschriebenen Signalen können Positionsbestimmungen in Gebäuden durchgeführt werden. Dabei kann eine Vielzahl von Möglichkeiten unterschieden werden. Nachfolgend werden die Methoden Cell of Origin (Angabe der Zelle), Laufzeitmessung, Laufzeitdifferenzmessung, Messung des Einfallswinkels (Angle of Arrival), Signalstärkemessung und visuelle Positionsbestimmung mit digitalen Bildern beschrieben.

### 3.1 Angabe der Zelle (Cell of Origin)

Diese Methode kann verwendet werden, wenn das Positionierungssystem eine Zellstruktur aufweist. In diesem Fall erreicht jeder Sender aufgrund seiner beschränkten Reichweite nur ein bestimmtes Gebiet mit seinem Signal. Die Gebiete der verschiedenen Sender können sich aber durchaus überschneiden, wodurch eine Zellstruktur zustande kommt. Aufgrund des erhaltenen Signals, das die Identität des Senders enthält, wird auf den jeweiligen Sender geschlossen. Nun werden alle in Reichweite befindlichen Sender identifiziert und über die Kenntnis der Zellstruktur wird die Zelle ermittelt, in der sich der Empfänger gerade befindet (Ingensand und Bitzi 2001; Retscher 2002).

### 3.2 Laufzeitmessung

Elektromagnetische Signale bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit und aufgrund dessen sind die zu messenden Laufzeiten sehr gering. Unter Voraussetzung einer nahezu konstanten Lichtgeschwindigkeit kann die Zeitdifferenz zwischen dem Sende- und Empfangszeitpunkt eines Signals verwendet werden, um die Distanz zwischen Sender und Empfänger zu ermitteln. In der Ebene sind drei und im Raum vier Distanzen von bekannten Punkten erforderlich, um eine eindeutige Lösung zu erzielen. Dieses Prinzip ist aber nicht nur für elektromagnetische Signale gültig, sondern kann auch auf Ultraschall angewandt werden. Da Ultraschallsignale eine viel geringere Geschwindigkeit aufweisen, gestaltet sich die Zeitmessung bei ihnen einfacher.

### 3.3 Laufzeitdifferenzmessung

Der Unterschied zur Laufzeitmessung besteht hier darin, dass das von einem Sender ausgesandte Signal nicht von einer, sondern von zwei Stationen empfangen wird und

die Differenz der beiden Laufzeiten bestimmt wird. Alle möglichen Empfängerpositionen für eine konstante Laufzeitdifferenz liegen auf einer Hyperbel mit den zwei Senderpositionen in den Brennpunkten. Werden von mindestens drei Punkten aus Messungen durchgeführt, so erhält man zumindest zwei Hyperbelpaare, deren Schnittpunkte die zwei möglichen Positionen des Nutzers markieren. Sind Näherungskordinaten der gesuchten Position bekannt, zum Beispiel durch die Angabe der Zelle bei Mobiltelefonen, so kann die richtige Position ermittelt werden (Retscher 2002).

### 3.4 Messung des Einfallswinkels (Angle of Arrival)

Bei dieser Methode werden in den Empfängern oder Sendern Antennen verwendet, die die Richtung feststellen können, aus der das Signal kommt. Diese Antennen bestehen aus einer Vielzahl von Antennen, die kreisförmig angeordnet sind und jeweils einen bestimmten Empfangswinkel abdecken. Jedes von einem bekannten Punkt aus gemessene Signal entspricht einer Geraden. Wenn von zwei oder mehr bekannten Punkten aus die Richtungen zum Sender gemessen werden, ergibt der Schnitt der Geraden den gesuchten Punkt, auf dem sich der Sender befindet. Beeinträchtigt wird diese Methode, wenn keine direkte Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger vorhanden ist. Dann wird nämlich die letzte Reflexion des Signals zur Winkelbestimmung herangezogen, wodurch das Ergebnis verfälscht wird. Zu Fehlern in der Positionsbestimmung kommt es auch, wenn sich durch Mehrwegausbreitung reflektierte Signale mit dem direkten Signal überlagern (Ingensand und Bitzi 2001; Retscher 2002).

### 3.5 Signalstärkemessung

Die Intensität elektromagnetischer Signale nimmt mit der Entfernung ab. Sind die Intensitäten des ausgesandten und des empfangenen Signals bekannt, kann die Distanz berechnet werden. Doch unglücklicherweise hängt die Intensität des Signals nicht nur von der Entfernung, sondern auch von Hindernissen ab, beispielsweise Wänden, Möbel oder Menschen (Klepal et al. 2002). Der Zusammenhang zwischen Intensität und Distanz geht verloren, jedoch gibt es zwei Methoden diesen Zusammenhang wiederherzustellen. Die erste Methode wird Fingerprint-Methode genannt. Hierbei wird bei Testmessungen die Intensität des Signals gemessen und in einer Datenbank, verknüpft mit den Koordinaten des jeweiligen Punktes, abgelegt. Bei den Messungen wird die gemessene Intensität mit der Datenbank verglichen und die wahrscheinlichste Position ausgegeben (Retscher und Thienelt 2004). Die zweite Methode trägt den Namen Signalmodellierungsmethode und bei ihr wird das Signal durch ein mathematisches Modell beschrieben. Basierend auf dem Modell wird die Datenbank erstellt, die wie bei der

Fingerprint-Methode zur Positionsbestimmung herangezogen wird (Bahl und Padmanabhan 2000).

### 3.6 Visuelle Positionsbestimmung mit digitalen Bildern

Werden Bilder mit speziellen Messkameras gemacht, so können durch photogrammetrische Arbeitsvorgänge aus den Bildern räumliche Daten gewonnen werden und mit deren Hilfe können auch Positionsbestimmungen durchgeführt werden.

## 4 Systeme zur Positionsbestimmung in Gebäuden

Aufbauend auf den vorstehend beschriebenen Methoden der Positionsbestimmung werden in diesem Abschnitt einzelne Systeme untersucht, die zur Positionsbestimmung in Gebäuden verwendet werden können. Dabei werden vor allem die Funktionsweise, die möglichen Einsatzgebiete und spezielle ausgewählte Eigenschaften behandelt. Die Positionierungssysteme können entsprechend dem vom jeweiligen System verwendeten Signal in vier Gruppen eingeteilt werden, nämlich in Positionierungssysteme, die Infrarot, Ultraschall oder Radiosignale nutzen, sowie in Visuelle Systeme. Abschließend werden alle Systeme in einer Tabelle anhand ausgewählter Kriterien verglichen.

### 4.1 Positionierungssysteme, die Infrarotsignale nutzen

Zwei Systeme, die Infrarot als Signal zur Positionierung nutzen, sind Active Badge (Roth 2002) und WIPS (Wireless Indoor Positioning System) (Roth 2004).

Das Active Badge System wurde speziell dafür entwickelt, Personen in Bürogebäuden zu lokalisieren. Jeder Mitarbeiter wird mit einem Badge ausgestattet, der Infrarotsignale aussendet, die von fest installierten Signalstationen empfangen und an einen zentralen Server weitergeleitet werden. Der Badge muss gut sichtbar am Körper getragen werden, um sicherzustellen, dass das Infrarotsignal, das eine Reichweite von 6 Metern hat, eine der fixen Signalstationen erreichen kann. Da das Signal nicht in der Lage ist, Wände zu durchdringen, muss in jedem Raum, der ein Teil des Systems sein soll, mindestens eine Signalstation montiert werden. Abhängig von der Größe des Raumes und der zuvor erwähnten Reichweite des Infrarotsignals ist die Anzahl der notwendigen Signalstationen pro Raum zu ermitteln. Besonders wichtig ist die Montage von Signalstationen an strategisch wichtigen Punkten, wie Ein- und Ausgängen von Korridoren, Stiegenhäusern oder anderen markanten Gebäudeteilen. Bei

der Montage ist darauf zu achten, dass die Signalstationen hoch oben an den Wänden montiert werden, damit die Signalstationen von Personen nicht verdeckt werden können. Alle Signalstationen zusammen bilden ein Netzwerk, über das die empfangenen Infrarotsignale an einen Zentralrechner weitergeleitet werden. Im Zentralrechner werden die empfangenen Infrarotsignale gespeichert und bearbeitet. Für jedes Infrarotsignal wird der dazugehörige Badge ermittelt und in einer Datenbank der Name des Badges, der Raum, in dem sich die registrierte Signalstation befindet, sowie die Uhrzeit der Messung gespeichert. Die verwendete Messmethode ist demnach »Cell of Origin«, wobei die Positionsgenauigkeit von der Zellgröße abhängig ist. Über ein firmeninternes Netzwerk können dann alle autorisierten Nutzer auf diese Daten zugreifen. Am Badge selbst kann man seine Position nicht bestimmen. Mitarbeiter können unter Nutzung des Systems viel schneller gefunden werden und wichtige Anrufe werden seltener versäumt. Falls erwünscht kann ein Mitarbeiter seinen Badge auch einfach ablegen, um nicht geortet zu werden. Zusammenfassend ist zu sagen, dass das Active Badge System sich gut eignet, um eine große Anzahl von Personen in einem Gebäudekomplex in bestimmten Räumlichkeiten zu orten. Die Kosten für das System sind niedrig, da Infrarotsender und -empfänger preiswert sind (Want et al. 1992).

Das Wireless Indoor Positioning System (WIPS) verwendet wie Active Badge Infrarotsignale und die Cell of Origin Methode. Während bei Active Badge die Signale von den Badges ausgesandt werden, verhält es sich bei WIPS gerade umgekehrt. In den Räumen montierte Sender (Beacons) senden Infrarotsignale aus, die von den Badges empfangen werden. Die erhaltene Information wird über Wireless LAN an einen Server gesandt, der die Position des Badges bestimmt und an den Badge zurücksendet. Die Position liegt also auch direkt beim Nutzer vor, was die Anzahl der Anwendungsmöglichkeiten deutlich erhöht. Die Badges sind kleine tragbare Rechner und repräsentieren das Herzstück des gesamten WIPS System. Im Rechner integriert ist eine PCMCIA Karte, um den Zugriff auf das Wireless LAN Netzwerk zu ermöglichen. Der Badge, der als Rechner viele Anwendungsmöglichkeiten bietet, ist auch der kostenintensivste Teil des Systems (Roth 2004). Die Beacons werden an strategisch wichtigen Punkten sowie in allen Räumen montiert. Die Reichweite beträgt allerdings nur 3 m, wodurch eine Vielzahl von Beacons montiert werden muss, um einen flächendeckenden Signalempfang zu gewährleisten. Da die Beacons nur Infrarotsignale aussenden, aber keine mehr empfangen, ist es nicht notwendig, ein Netzwerk zwischen den Beacons aufzubauen. Sie werden einfach unabhängig voneinander montiert und senden jeweils ein einzigartiges Infrarotsignal aus. Die Beacons werden mit Batterien betrieben und sind in der Herstellung preiswert. Über das Wireless LAN kann jeder Nutzer auf die Datenbank zugreifen und hat verschiedene Möglichkeiten, sich die Daten anzeigen zu lassen; z.B. kann auch eine Karte

erstellt werden, in der alle Personen, Objekte und Accesspoints in Echtzeit dargestellt werden.

#### 4.2 Positionierungssysteme, die Ultraschallsignale einsetzen

Zwei Systeme, die Ultraschallsignale zur Positionierung einsetzen, sind Active Bat (Hightower und Boriello 2001) und Cricket.

Das Active Bat System wurde entwickelt, um Positionen und Orientierungen von Objekten in Gebäuden mit einer sehr großen Genauigkeit zu bestimmen. Zusätzlich sollte die gleichzeitige Ortung mehrerer Objekte mit einem geringen Einfluss auf die Umgebung möglich sein. Hier wird ein kleiner tragbarer Ultraschallsender, auch Bat genannt, auf allen Objekten, die geortet werden sollen, montiert. Zusätzlich zum Ultraschallsender sind im Bat ein Mikroprozessor und ein Radioempfänger enthalten (Hightower und Boriello 2001). An der Decke des Raumes werden Ultraschallempfänger rasterförmig mit einem Abstand von 1,2 m montiert. Alle Empfänger zusammen bilden ein Netzwerk, das mit einem Server verbunden ist. Der Server sendet alle 195 ms ein Radiosignal an Sender und Empfänger, das die 16-bit-Adresse eines Bats enthält. Der Bat, dessen Adresse ausgesandt wurde, aktiviert sich und sendet für die Dauer von 50  $\mu$ s auf einer Frequenz von 40 KHz einen Ultraschallimpuls aus. Nach dem Empfang eines Radiosignals geht der Bat in einen Energiesparmodus über, aus dem er 195 ms später wieder erwacht, um das nächste Signal vom Server zu empfangen. Das ausgesandte Ultraschallsignal breitet sich im Raum aus und wird von den Empfängern registriert, wobei es gleich im Empfänger verstärkt, gefiltert und digitalisiert wird. Die Empfänger, die auch das Radiosignal vom Server erhalten haben, beobachten die darauf folgenden 20 ms das im Empfänger erzeugte digitale Signal, um den ersten Einsatz des empfangenen Ultraschallsignals zu registrieren. Die ermittelten Zeitintervalle zwischen dem Radiosignal vom Server und der Ankunft des Ultraschallsignals vom Bat werden von jedem Empfänger an den Server übermittelt. Daraus werden nun die Distanzen zwischen dem Bat und den Empfängern zum Zeitpunkt des Empfangs des Ultraschallsignals bestimmt. Da alle Empfänger an der Decke montiert sind, reichen drei bekannte Entfernungen aus, um die Position eindeutig zu bestimmen. Pro Sekunde werden fünf Messungen durchgeführt, wobei eine einzelne Messung in 95% der Fälle eine Genauigkeit von 14 cm aufweist. Wird das Mittel aus zehn Messungen gebildet, das bedeutet alle zwei Sekunden die Berechnung einer neuen Position, erzielt man eine Genauigkeit von 8 cm. Ein Active Bat System, kann in einem Gebiet von 1100 m<sup>3</sup> 256 Bats gleichzeitig orten und 2<sup>16</sup> verschiedene Bats unterscheiden. Als Energiequelle dient dem Bat eine Batterie, die im vollen Betrieb eine Lebensdauer von drei Monaten aufweist. Soll die Orientierung eines Objektes bestimmt werden, so sind drei Bats am Objekt zu befestigen,

deren Positionen die Orientierung eindeutig wiedergeben. Einsatzgebiete für das Active Bat System sind vor allem Bürogebäude. Es sind jedoch auch alle anderen Gebäude denkbar, bei denen eine freie Sicht zur Decke gewährleistet ist. Die hohe Positionierungsgenauigkeit eröffnet viele Anwendungsmöglichkeiten. Die zentrale Bestimmung der Positionen erlaubt einen guten Überblick über alle vorhandenen Bats, allerdings keine persönliche Kontrolle über die eigenen Daten. Der Arbeitsaufwand und die damit verbundenen Kosten für die Installation der Infrastruktur sind durch die große Anzahl an Ultraschallempfängern und die Notwendigkeit eines Netzwerkes ziemlich hoch. Die Ultraschallempfänger und die Bats sind hingegen preiswert (Ward et al. 1997).

Bei Cricket geht es hauptsächlich darum, dem Benutzer, wenn er einen Raum betritt, möglichst viele relevante Informationen zukommen zu lassen. Die exakte räumliche Positionierung ist nicht das vorrangige Ziel und dient nur als Mittel zum Zweck. Das zweite große Ziel ist es, die Privatsphäre des Benutzers zu erhalten (Roth 2004). Cricket verwendet eine Kombination von Ultraschall- und Radiosignalen. Die Sender sind fix an der Decke oder den Wänden montiert und senden zeitgleich Radiosignale auf einem 418 MHz-Band und Ultraschallsignale. Die mobilen Empfänger warten auf Radiosignale und aktivieren nach dem Empfang der ersten Bits den Ultraschallempfänger. Die Zeitdifferenz zwischen dem Empfang des Radio- und des Ultraschallsignals wird vom Empfänger verwendet, um die Distanz zum Sender zu bestimmen. Dabei kommt es nicht so sehr darauf an, die Entfernung zu bestimmen, sondern vielmehr herauszufinden, welcher der Sender am nächsten liegt. Dabei gilt es zunächst, die Radio- und Ultraschallsignallepaare zu finden und dann dem richtigen Sender zuzuordnen. Radiosignale breiten sich viel schneller aus als Ultraschallsignale und aus diesem Grund können nach dem ersten Radiosignal bereits andere Radiosignale zum Empfänger gelangen, bevor das dazugehörige Ultraschallsignal eintrifft. Um eine eindeutige Zuordnung machen zu können, wurde festgelegt, dass das entsprechende Ultraschallsignal während des Empfangs des Radiosignals beim Empfänger ankommen muss. Um Interferenzen zu vermeiden, wird der Übertragungszeitpunkt der Signale innerhalb eines Zeitintervalls von 250 ms zufällig gewählt. Das entspricht vier Signalen pro Sekunde. Sind die Signallepaare gebildet, kann für jedes Paar die Laufzeitdifferenz berechnet werden, die hier aufgrund der viel größeren Geschwindigkeit des Radiosignals als Laufzeit des Ultraschallsignals aufgefasst werden kann. Über Laufzeitmessung wird die Distanz zwischen Sender und Empfänger ermittelt. Jeder Sender sendet ein einzigartiges Signal, durch das er identifiziert werden kann. Interessant ist aber nur der Sender mit der kürzesten Distanz, da er den Raum angibt, in dem sich der Empfänger befindet. Um zu gewährleisten, dass der nächstgelegene Sender auch wirklich im selben Raum liegt, befindet sich jeweils 60 cm vor einem Durchgang zwischen zwei Räumen ein Sender. Der Abstand von 120 cm reicht aus, um die beiden Sen-

der zu unterscheiden. Um nicht nur den Raum, sondern auch Sektoren im Raum unterscheiden zu können, werden die Sender in einem Raster von 120 × 120 cm an der Raumdecke montiert. Dadurch erfolgt die Positionierung bereits in einem wesentlich kleineren Bereich als in einem Raum (Priyantha et al. 2000). Um dem Benutzer räumliche Informationen zu geben, wird für jede interessante Örtlichkeit, sei es ein Raum oder ein Gang, ein virtueller Raum geschaffen. In diesem virtuellen Raum sind alle Objekte, wie z. B. Drucker oder Beamer und Personen eingetragen, die sich im betroffenen Raum befinden. Mit Hilfe eines Lageplans können die virtuellen Räume sichtbar gemacht werden. Um neben der Position auch die Orientierung bestimmen zu können, wurde der Cricket Kompass, ein erweiterter Empfänger, entwickelt (siehe Priyantha et al. 2001). Cricket bietet zwar nicht so hohe Genauigkeiten wie Active Bat, dafür ist der Schutz der Privatsphäre absolut gegeben, und die dezentralisierte Struktur erlaubt dem Nutzer sofort ins System einzusteigen, da es leicht zu bedienen ist. Die Kosten für Sender als auch für Empfänger betragen jeweils 10 US-Dollar und sind damit sehr preiswert. Die Anzahl der benötigten Sender ist flächenabhängig, kann aber für Kostenschätzungen mit einem Sender pro 1,5 m<sup>2</sup> anberaumt werden (Hightower und Boriello 2001).

### 4.3 Positionierungssysteme, die Radiosignale nutzen

Radiosignale werden von vielen Positionierungssystemen verwendet, wie z. B. GPS, Wireless LAN sowie bei der Lokalisierung von Mobiltelefonen unter Nutzung der Signale von Mobilfunknetzen (GSM, W-CDMA, US-TDMA, UMTS). Wird GPS in Mobiltelefone integriert und stellt das Mobilfunknetz Hilfsdaten zur schnelleren Satellitenakquisition zur Verfügung, spricht man auch von Assisted GPS (A-GPS) (Retscher 2002). Von der australischen Firma Locata wurde ein System zur Positionierung in Gebäuden entwickelt, das GPS-ähnliche Signale verwendet, die von Pseudolites gesendet werden, die im Gebäude anzubringen sind. Die Positionsbestimmung erfolgt dann wie bei RTK GPS (Barnes et al. 2003). Ein weiteres System, das Radiosignale nutzt, ist SpotON. Bei diesem System werden SpotON-Tags, die gleichzeitig Sender und Empfänger sind, im Gebäude installiert und von den Personen, die lokalisiert werden sollen, getragen. Über Signalstärkemessung wird dann die Distanz von einem Sender zu mehreren Empfängern abgeleitet (Hightower et al. 2000). Im folgenden werden nur die Positionierung in WLAN Netzen, UWB, Bluetooth und mit Hilfe von RFID näher beschrieben.

Wireless LAN Systeme bieten die Möglichkeit, mit geringem Aufwand und innerhalb kurzer Zeit drahtlose lokale Netzwerke aufzubauen. Dabei basiert das Verfahren auf dem Standard IEEE 802.11, der 1997 vom »Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)« entwickelt wurde. Von diesem Standard gibt es mittlerweile ver-

schiedene Ausführungen, die mit den Buchstaben a bis i gekennzeichnet sind und jeweils besondere Merkmale bezüglich Übertragungsfrequenz, Bandbreite und Kompatibilität aufweisen. Es gibt zwei verschiedene Betriebsarten, in denen WLAN-Systeme betrieben werden können. Die erste Betriebsart ist der Ad-hoc-Modus, bei dem spontan eine direkte Verbindung zwischen zwei Stationen, zum Beispiel Laptops, aufgebaut wird, so dass ein Peer-to-Peer Netzwerk entsteht. An diesem Netzwerk sind nur die direkt vor Ort befindlichen und miteinbezogenen Stationen beteiligt. Es gibt keine zentrale Stelle, die die Kommunikation überwacht oder kontrolliert. Zur Anwendung kommt der Ad-hoc-Modus zum Beispiel bei der Datenübertragung zwischen Laptops. Die zweite Betriebsart ist der Managed Modus. Das System wird hier nicht spontan aufgebaut, sondern ist fix installiert. So genannte Accesspoints bilden das Bindeglied zwischen dem Drahtnetzwerk und den mobilen Nutzern. Das Drahtnetzwerk könnte zum Beispiel ein LAN-Netzwerk mit Internetanbindung sein, auf das alle mobilen Nutzer über die Funkverbindung mit den Accesspoints zugreifen können. WLAN-Systeme, die im Managed Modus arbeiten, kommen bereits in vielen Firmen, Bildungsanstalten und anderen öffentlichen Gebäuden zum Einsatz. Bei der Datenübertragung mit WLAN wird das ISM-Frequenzband zwischen 2,4 und 2,48 GHz genutzt, das gebührenfrei und ohne zusätzliche Genehmigung verwendet werden kann. Auf diesem Frequenzband stehen 13 Kanäle zur Verfügung (IEEE 2005).

Der große Vorteil bei der Positionsbestimmung mit WLAN-Systemen ist, dass ein bereits vorhandenes Netzwerk genutzt wird und somit keine neuen Installationen notwendig sind. Das spart Kosten und macht das Positionierungssystem für eine große Anzahl von Nutzern, die in ihrem Gebäude bereits über ein WLAN-System verfügen, interessant. Die Positionsbestimmung kann dabei auf zwei Arten erfolgen, nämlich dem Fingerprint-Verfahren und der Signalmodellierungsmethode (vgl. Kap. 3.5). Die Fingerprint-Methode teilt sich in eine »Offline-Phase« und eine »Real-time-Phase«. Während der »Offline-Phase« werden im Messgebiet sowohl an rasterförmig angelegten als auch strategisch wichtigen Punkten Testmessungen durchgeführt, bei denen jeweils die Signalintensität jedes Accesspoints und die Koordinaten des Punktes in einer Datenbank gespeichert werden. Pro Punkt werden Messungen mit verschiedenen Orientierungen durchgeführt, da verschiedene Orientierungen am gleichen Punkt durch die Abschattung der Signale durch den Körper verschiedene Ergebnisse liefern können. Zu beachten ist dabei, dass möglichst alle auf das Signal wirkenden Störsignale, vor allem Menschen, die sich im Messgebiet befinden, vermieden werden sollten. Es ist daher zu empfehlen, die Testmessungen in der Nacht durchzuführen. Als Ergebnis der »Offline-Phase« erhält man für jeden Accesspoint ein Signalintensitätsbild des Messgebiets. In der »Real-time-Phase« misst ein mobiler Empfänger an einer beliebigen Position im Messgebiet die Signalintensität der

Accesspoints und vergleicht die Messung mit den Daten der Datenbank. Mit Hilfe eines geeigneten Algorithmus, der systemabhängig verschieden ist, wird die wahrscheinlichste Position des mobilen Empfängers ermittelt. Die so erzielten Genauigkeiten liegen im Bereich von 1 bis 3 m oder umgerechnet etwa der Größe eines Büros. Der größte Nachteil bei der Fingerprint-Methode ist, dass die Testmessungen sehr arbeits- und kostenaufwendig sind und bei der Installation eines neuen Accesspoints oder baulichen Veränderungen neu durchgeführt werden müssen. Die Signalmodellierungsmethode versucht genau diese Nachteile zu umgehen, indem die Datenbank anhand von Signalmodellen erstellt wird. Dies ist allerdings kein leichtes Unterfangen, da die Signalstärke nicht nur von der Distanz zwischen Accesspoint und Empfänger, sondern auch von der Geometrie der Umgebung abhängt. Grundlage für das Modell bildet ein digitaler Plan des Messgebiets, in dem alle Koordinaten der Accesspoints und Wände enthalten sind. Für jeden Punkt des Messgebiets kann nun die Distanz zu den Accesspoints und die Anzahl der dazwischenliegenden Wände berechnet werden. Diese Daten fließen in das Modell ein und ermöglichen die Erstellung der Datenbank. Die Positionsbestimmung erfolgt dann in derselben Weise wie bei der Fingerprint-Methode. Die erreichbaren Positionierungsgenauigkeiten sind jedoch in der Regel geringer als bei der Fingerprint-Methode (Bahl und Padmanabhan 2000). Für beide Methoden gilt, dass die Reichweite des Systems nur von der Fläche abhängt, die sowohl von den Accesspoints als auch der Datenbank abgedeckt wird und beliebig erweitert werden kann. Der mobile Empfänger kann, wenn ihm die Datenbank über das WLAN-System übermittelt wurde, selbst seine Position bestimmen, ohne dass sie eine andere Person erfährt. Gibt das mobile Gerät den Wert der Signalstärke allerdings weiter, so kann jeder die Positionsbestimmung durchführen, der die empfangene Signalstärke und die Datenbank kennt. Bei WLAN-Systemen kann die Positionsbestimmung koordinativ erfolgen, oder es besteht die Möglichkeit, dass der Empfänger dem Raum zugeteilt wird, in dem er sich befindet. Dies erscheint vor allem aufgrund der ungenauen Positionsbestimmung zweckmäßig. Eine Beschränkung der Anzahl der Benutzer liegt nicht vor, solange die Kapazitäten des WLAN-Systems nicht überschritten werden. Am Markt befinden sich einige Systeme, wie z. B. das System Radar von Microsoft Research (Bahl und Padmanabhan 2000), das System ipos der deutschen Fa. IMST (Imst 2004), das System Ekahau der gleichnamigen finnischen Firma (Ekahau 2005) sowie das System WhereNet der gleichnamigen amerikanischen Firma (WhereNet 2005).

Ultra Wideband (UWB) wird in Zukunft neben WLAN zur Datenübertragung eingesetzt und hat ein Spektrum mit einer Bandbreite von mindestens 500 MHz. Neben der Datenübertragung mit hohen Übertragungsgeschwindigkeiten, die unter IEEE 802.15.3a standardisiert wurde, eignet sich UWB zur Positionierung mit niedrigen Datenübertragungsgeschwindigkeiten, die unter IEEE 802.15.4a

standardisiert wurde (Kong et al. 2004). Ein Gebäude, in dem Positionierungen durchgeführt werden sollen, ist mit UWB-Basisstationen zu versehen, so dass die gesamte Fläche abgedeckt ist. Die Positionsbestimmung kann mit Laufzeitmessung (siehe Kap. 3.2) oder Laufzeitdifferenzmessung (siehe Kap. 3.3) von Signalen mehrerer Basisstationen erfolgen (Pahlavan et al. 2002). Der große Vorteil von UWB gegenüber anderen Systemen ist, dass UWB-Signale nicht von Multipath-Effekten beeinträchtigt werden. Dadurch eignen sie sich hervorragend zur Distanzmessung in Gebäuden (Win und Scholtz 1998). Bei Testmessungen kamen vier bis acht Basisstationen zum Einsatz. Bei zufälliger geometrischer Anordnung der Basisstationen wurde in 67% der Fälle eine Positionsgenauigkeiten von 20 cm erreicht (Kong et al. 2004).

Bluetooth wurde ursprünglich entwickelt, um über kurze Reichweiten drahtlose Verbindungen zu mobilen Devices, Kopfhörern, Computerperipherie oder Laptops aufzubauen. Es arbeitet dabei mit Radiosignalen, die, wie bei WLAN, auf dem gebührenfreien ISM-Frequenzband, das zwischen 2,4–2,48 GHz liegt, gesendet werden. Da diese frei nutzbaren Frequenzen oftmals überlastet sind und Interferenzen hervorrufen können, wechselt Bluetooth 1600 mal pro Sekunde die Frequenz, wobei es jeweils pro benutzter Frequenz ein Datenpaket sendet. Dadurch wird verhindert, beim Gebrauch einer überlasteten Frequenz mehr als ein Datenpaket zu verlieren. Der ständige Frequenzwechsel erhöht außerdem die Sicherheit der Übertragung, da es schwer ist, dem Signal zu folgen. Zusätzlich werden die Daten mit dem eigens dafür entwickelten Programm SAFER+ verschlüsselt. Es gibt drei verschiedene Reichweiten, mit denen Systeme mit Bluetooth arbeiten, wobei die gebräuchlichste Reichweite 10 m beträgt. Jedes einzelne Gerät, das über Bluetooth verfügt, besitzt eine einzigartige Adresse, anhand derer es identifiziert werden kann. In Bürogebäuden gibt es immer mehr ortsfeste Geräte, wie zum Beispiel Computer, die derartig ausgerüstet sind. Um dies für die Positionierung zu nutzen, wird eine Datenbank erstellt, in der jeder Bluetooth-Adresse Koordinaten zugeordnet werden. Dadurch wird die Abdeckung des Gebiets durch sich überlappende Zellen mit einem Radius von 10 m erreicht. Die Datenbank wird auf einem zentralen Server gespeichert und über ein internes Netzwerk beziehungsweise Internet frei zugänglich gemacht. Wenn die zum Einsatz kommenden mobilen Geräte über genügend Speicher- und Rechenkapazität verfügen, kann die Datenbank dem mobilen Gerät auch direkt beim Betreten des Gebiets übermittelt werden (Hallberg et al. 2003). Bewegt sich ein mobiles Gerät, das über ein Bluetooth verfügt, im Gebiet und kommt in die Reichweite eines ortsfesten Systems, so wird zwischen den beiden eine Verbindung aufgebaut. Das mobile Gerät erkennt die Adresse des verbundenen Systems und fragt von der Datenbank dessen Position ab. Ist die Datenbank nicht am Gerät vorhanden, muss die Abfrage über ein Netzwerk direkt beim Server gemacht werden. Somit wurde gleichzeitig die Position des mobilen Ge-

räts mit einer Genauigkeit von 10 m bestimmt. Die Positionsgenauigkeit wird gesteigert, wenn sich das Gerät in der Reichweite mehrerer Systeme befindet und die Überschneidungsfläche herangezogen wird, um den Ort des mobilen Devices anzugeben (Thapa und Case 2001). Die Anzahl der Bluetoothsysteme kann aber nicht beliebig erhöht werden, um die Position zu verbessern, da es eine gewisse Zeit benötigt, um eine Verbindung aufzubauen. Herkömmliche Geräte können aber nur eine Verbindung nach der anderen aufbauen. Somit hat ein Gerät, das sich in Bewegung befindet, möglicherweise gar nicht genügend Zeit, um zu allen sich in Reichweite befindenden Systemen eine Verbindung aufzubauen. Testmessungen mit fünf Systemen haben ergeben, dass das mobile Gerät sich sehr langsam bewegen müsste, um alle Verbindungen aufzubauen. Trotzdem wurden Genauigkeiten für die Positionierung von 1,7 m erzielt. Zusammenfassend ist zu sagen, dass Positionierung mit Bluetooth eine billige und handliche Lösung darstellt.

Die Zielsetzung von Radiofrequenzidentifizierung (RFID) ist, festzustellen, ob ein Objekt bestimmte festgelegte Wegpunkte passiert hat, und im gegebenen Fall gewünschte Informationen vom Objekt abzufragen. Die genaue Bestimmung der Koordinaten steht dabei nicht im Vordergrund (Roth 2004). Ein RFID System besteht aus Tags, einem Reader und Software. Die Tags werden an allen Objekten befestigt, die lokalisiert werden sollen und bilden somit den mobilen Teil des Systems. Informationen über die Identität sowie anwendungsspezifische Daten sind auf den Tags, die über keine eigene Energieversorgung verfügen, gespeichert. Die Reader sind an strategisch wichtigen Punkten im Gebäude, wie zum Beispiel Eingängen, Stiegenhäusern oder Liftanlagen, montiert. Kommt ein Tag in die Reichweite eines Readers, so treten die beiden in Kommunikation miteinander. Dies kann auf zwei verschiedene Arten geschehen: über induktive Kopplung oder über elektromagnetische Wellen. Im ersten Fall induziert die Antenne des Readers ein magnetisches Feld in der Antenne des Tags. Dieser benutzt die induzierte Energie, um Daten zurück an den Reader zu senden. Aufgrund des niedrigen Energieniveaus funktioniert diese Methode nur innerhalb weniger Dezimeter. Im zweiten Fall sendet der Reader die Energie in Form elektromagnetischer Wellen an den Tag. Dieser wird durch die absorbierte Energie aktiviert und sendet einen Teil der Energie modelliert zurück, wodurch Daten übertragen werden. Ein niedriger (100–500 kHz), ein mittlerer (10–15 MHz) und ein hoher (850–950 MHz, 2,4–5,8 GHz) Frequenzbereich werden zur Datenübertragung benutzt. Detaillierte Beschreibungen der drei Frequenzbereiche können im RFID Handbuch (Finkenzeller 2002) nachgelesen werden. Die Reichweite eines Readers ist abhängig von der verwendeten Energie und Frequenz, die nicht frei wählbar sind, sondern vielerorts staatlichen Beschränkungen unterliegen. Es gibt Reader mit Reichweiten zwischen null und zwanzig Metern, wobei die meisten Reader eine Reichweite von rund einem Meter aufweisen. Bei den meis-

ten Anwendungen ist eine allzu große Reichweite aber gar nicht erwünscht, denn die Position wird relativ zum Reader bestimmt und ordnet den Tag einem bestimmten Bereich des Gebäudes zu (Chon et al. 2004). Am weitesten verbreitet ist der Einsatz von RFID zur Warensicherung in Geschäften. Jede Ware bekommt einen Tag aufgeklebt und die Ein- und Ausgänge werden beiderseits mit Readern versehen. Somit genügt eine Reichweite von der halben Ausgangsbreite, um alle vorbei geführten Tags zu erfassen und ein Warnsignal abzugeben. Andere Anwendungsgebiete sind Krankenhäuser, in denen Patienten, die bettlägerig sind, durch ihre Betten geortet werden können. Ohne Fahrstuhl ist es nicht möglich, mit einem Bett Stockwerke zu wechseln, und so kann mit Readern an den Fahrstühlen mit geringem Aufwand ein ungefährender Aufenthaltsort bestimmt werden. Wie die beiden Beispiele zeigen, ist der Einsatz von RFID Systemen vor allem für logistische Problemstellungen hervorragend geeignet. Die Kosten sind im Vergleich zu anderen Systemen niedrig und entfallen hauptsächlich auf die Reader, da die Tags sehr preiswert produziert werden können (Hightower und Boriello 2001).

#### 4.4 Visuelle Positionierungssysteme

Visuelle Positionierungssysteme arbeiten mit digitalen Bildern, um Positionen zu bestimmen. Im Folgenden werden drei visuelle Systeme beschrieben, nämlich Cyber Code, Ubitrack und EasyLiving. Die Positionierung ist meist nicht das alleinige Ziel, sondern meist Mittel zum Zweck, um dem Nutzer auf die Position aufbauende Anwendungen zu ermöglichen.

CyberCode ist ein visuelles Identifizierungssystem, das mit zweidimensionalen Barcodes arbeitet. Die 2D-Barcodes, auch CyberCode Tags genannt, können von CMOS oder CCD Kameras, die in immer mehr elektronischen Geräten, wie zum Beispiel Mobiltelefonen oder Laptops, eingebaut sind, geortet werden. Die Kamera ist der mobile, vom Nutzer mitgeführte, und die CyberCode Tags sind der fest angebrachte Teil des Systems. Die Auflösung der Kameras kann aufgrund der Pixelgröße bei den CyberCode Tags niedrig gehalten werden. Es ist sowohl möglich die Identität des CyberCode Tags als auch die relative Lage der Kamera zum CyberCode Tag festzustellen. Über eine dem Nutzer zugängliche Datenbank können für den jeweiligen CyberCode Tag, bei Eingabe seiner Identität zusätzliche Informationen abgerufen werden. Ist die absolute Position des CyberCode Tags in der Datenbank gespeichert, so kann die Lage der Kamera nicht nur relativ zum CyberCode Tag, sondern auch absolut in Bezug auf die übrige Umgebung angegeben werden. Für die Positionierung in Gebäuden werden die CyberCode Tags an allen strategisch wichtigen Orten, wie Ein- und Ausgängen, Stiegenhäusern oder Gängen, sowie an allen Objekten, die erkannt werden sollen, angebracht. In einem Museum können dann z.B. neben der Navigation der

Besucher durch das Gebäude auch zusätzliche Informationen zu den Ausstellungsstücken dem Benutzer mitgeteilt werden.

Ubitrack ist die Abkürzung für Ubiquitous Tracking und kann bei Augmented-Reality-(AR)-Anwendungen eingesetzt werden. Das System wurde gemeinsam von der TU Wien und der TU München im Jahr 2004 entwickelt. Das Ziel des Systems ist, dass Nutzer miteinander in Kontakt treten können, um virtuelle Daten anzuzeigen. Eine ART-(Augmented-Reality-Tracking)-Kamera und ein Projektor bilden ein ART-System, in dem die beiden Komponenten, Kamera und Projektor, die gegenseitige Lage und Orientierung kennen. Betritt eine Kamera mit ART-Zielmarken den Sichtbereich der ART-Kamera, so wird deren Position bestimmt und an den Projektor weitergeleitet. Dieser projiziert dann ein virtuelles Objekt auf einen Marker im Sichtbereich der Kamera. Somit kann virtuelle Information ausgetauscht werden. Weitere Ziele in der Entwicklung sind, dass die ART-Systeme nicht fest installiert sind, sondern vom Nutzer transportiert werden. Dadurch können zwei Nutzer leicht miteinander Kontakt aufnehmen, was dem Nutzer viel Mobilität bringt (Newman et al. 2004).

EasyLiving ist ein Projekt von Microsoft, dessen Zielsetzung es ist, intelligente Räume zu schaffen. Dies bedeutet Positionen und Identitäten von Personen in Räumen festzustellen, die dann die Ausgangsdaten für viele mögliche Anwendungen sind (Brumitt et al. 2000). Um einen Raum mit EasyLiving auszustatten, benötigt man zwei Triclops Stereokameras, die jeweils mit einem Computer verbunden sind, der die Stereomodelle erzeugt. Von den beiden Stereomodulen gibt es eine Verbindung zu einem weiteren Computer, dem Person Tracker, in dem die Positionsbestimmung erfolgt. Die Stereokameras werden an den Wänden, in einer Höhe von 2,3 m montiert, sodass jeder Punkt des Raumes von mindestens einer Kamera eingesehen wird. Jede Kamera besteht aus drei kleinen Farbkameras. Die Kombination von Farbe und der Erstellung eines Stereomodells macht es einfacher, Personen zu orten, als wenn nur eine der beiden Komponenten verwendet werden würde. Nach der Installation der beiden Stereokameras ist eine Kalibrierung erforderlich, um die gelieferten Daten vergleichen zu können. Die von der Stereokamera erstellten Bilder werden an die Stereomodule weitergeleitet. Dort wird für jedes Bild ein Farb- und ein Tiefenmodell, ein so genanntes Stereomodell, erstellt. Zunächst wird aber der Raum ohne Personen abgebildet, um ein Bild des Hintergrunds zu erhalten. Betritt nun eine Person den Raum, so wird von ihr ein Teil des Hintergrunds verdeckt und sie befindet sich im Vordergrund. Die Aufgabe besteht nun darin, den Hinter- und Vordergrund voneinander zu trennen. Dazu wird jedes Pixel untersucht, ob er die gleichen Farb- und Tiefeneigenschaften wie das positionsgleiche Pixel im Hintergrundbild aufweist. Alle Pixel, bei denen dies nicht der Fall ist, werden markiert und zeigen Vordergrundbereiche im Bild an. Diese Bereiche umfassen sowohl Personen, die aber meist



nicht zur Gänze registriert werden, als auch Bildstörungen. Dadurch wird eine Filterung des Vordergrundbildes notwendig, um Personen registrieren zu können (Krumm et al. 2000). Mit der Kenntnis, welche Pixel Personen darstellen, ermittelt jedes der beiden Stereomodule eine 2D-Position, die an den Person Tracker weitergeleitet wird. Im Person Tracker wird aus den vorausgegangenen Positionen der Person ihre momentane Geschwindigkeit und mit deren Hilfe eine mögliche Position berechnet. Rund um diese Position sucht der Person Tracker nach neuen 2D-Positionen der Stereomodule, um die neue Position zu bestimmen. Befinden sich mehrere Personen im selben Bereich des Raumes, so wird ein vom Stereomodul für jede Person erstelltes Farbhistogramm herangezogen, um die Personen zu unterscheiden. Kann ein Stereomodul, aus welchem Grund auch immer, keine Daten an den Person Tracker senden, gilt für diesen die alte Position der Person weiterhin als wahr. Dies ermöglicht es, kurze Störungen zu überbrücken. In den Ein- und Ausgangsbereichen wird für Personen, die das Zimmer betreten, eine neue Identität erstellt, beziehungsweise beim Verlassen des Raumes gelöscht. Die Identitätszuweisung durch das Farbhistogramm dient also nur zur Personenunterscheidung und enthält keine weiteren Informationen. Hat der Person Tracker die Position bestimmt, stellt er sie in einem Plan grafisch dar (Brummit et al. 2000). Die Positionsbestimmung durch den Person Tracker erfolgt mit einer Frequenz von 3,5 Hz, wobei bis zu drei Personen zeitgleich geortet werden können (Krumm et al. 2000). Die Genauigkeit der Positionsbestimmung wird nicht angegeben, kann aber aufgrund der Anwendungsbeispiele als hoch eingestuft werden. So werden das Abspielen von Lieblingsmusik einer anwesenden Person oder das Anhalten von Filmen,

Tab. 1: Vergleich der Positionierungssysteme in Gebäuden

Systemname	Signal	Methode	Absolute Positionierung	Relative Positionierung	Positioning	Tracking	Geometrisch	Symbolisch	Kosten	Genauigkeit [m]
Active Badge	IR	CoO	✓			✓		✓	niedrig	Raum
WIPS	IR	CoO	✓		✓			✓	niedrig	Raum
Active Bat	US	LM	✓			✓	✓		niedrig	0,1
Cricket	US	LM	✓	✓	✓			✓	niedrig	1,2
A-GPS	RF	LM	✓		✓		✓		hoch	20–25
Locata	RF	LM	✓		✓		✓		hoch	0,1–1
Radar	RF	SS	✓		✓	✓	✓		hoch	3–4
IMST ipos	RF	SS	✓			✓	✓		hoch	1–3
Ekahau	RF	SS	✓		N/A	N/A	✓		hoch	1–3
WhereNet	RF	SS	✓		N/A	N/A	✓		N/A	N/A
UWB	RF	LM/LDM	✓		✓		✓		hoch	0,2
Bluetooth	RF	CoO	✓		✓	✓	✓		mittel	10
SpotON	RF	SS	✓	✓	✓	✓	✓		mittel	1 m <sup>3</sup>
RFID	RF	CoO		✓		✓		✓	niedrig	1–20
GSM	RF	LDM/AoA	✓			✓	✓		niedrig	50–100
CyberCode	SL	DB		✓	✓			✓	mittel	variabel
Ubitrack	SL	DB		✓		✓	✓		N/A	N/A
EasyLiving	SL	DB	✓			✓	✓		hoch	variabel

Folgende Abkürzungen werden in Tab. 1 verwendet:

**Signale:**

IR Infrarot  
 US Ultraschall  
 RF Radiosignale  
 SL Sichtbares Licht

N/A Information nicht verfügbar

**Methoden der Positionsbestimmung:**

CoO Cell of Origin (Angabe der Zelle)  
 LM Laufzeitmessung  
 LDM Laufzeitdifferenzmessung  
 AoA Angle of Arrival (Messung des Einfallswinkels)  
 SS Signalstärkemessung  
 DB Digitale Bilder

wenn man von der Couch aufsteht oder das Zimmer verlässt, als Beispiele genannt (Brummit et al. 2000). Der größte Vorteil von EasyLiving gegenüber anderen Systemen ist, dass der Nutzer ohne jegliche Adaptierungen auskommt. Er kann sich völlig ungezwungen bewegen und wird in seinen Freiheiten nicht eingeschränkt. Einen Nachteil stellt hingegen dar, dass jeder Raum mit zwei Stereokameras und drei Computern ausgestattet werden muss. Dies dürfte sowohl ein Platz- als auch ein Kostenproblem darstellen, auch wenn die Kosten für ein EasyLiving System von Microsoft nicht angegeben werden.

## 5 Zusammenfassung und Vergleich

In diesem Beitrag wurden verschiedene Systeme zur Positionsbestimmung von Personen und Objekten in Gebäuden vorgestellt und beschrieben. Dabei wurden die Systeme aufgrund der verwendeten Signale eingeteilt, nämlich in Systeme, die Infrarot, Ultraschall oder Radiosignale nutzen, sowie in visuelle Positionierungssysteme. Die Funktionsweisen, Eigenschaften und Anwendungsgebiete der Systeme wurden zusammengestellt. Da Positionierungssysteme in Gebäuden bei den verschiedensten Anwendungen zum Einsatz kommen, gibt es kein System, das den anderen überlegen ist, sondern nur eines, das den gestellten Anforderungen technisch und wirtschaftlich am besten entspricht. Die einzelnen Systeme weisen dabei durchaus große Unterschiede auf, die sich wiederum als Vorzüge gegenüber anderen Systemen entpuppen können.

Die Infrarotsysteme arbeiten nur mit der in Kap. 3.1 beschriebenen »Cell of Origin«-Methode und erreichen keine hohen Genauigkeiten. Die Position wird symbolisch angegeben und ist abhängig von der Raumgröße. Die Kosten sind aber niedrig, da die einzelnen Systemkomponenten am Markt gängige Produkte sind. Die Ultraschallsysteme arbeiten mit der in Kap. 3.2 beschriebenen Methode der Laufzeitmessung, da die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Ultraschallsignals im Vergleich mit einem Lichtsignal sehr gering ist. Dies ermöglicht es, Positionen mit sehr großen Genauigkeiten zu bestimmen. Dies wird auch durch die Installation von vielen Sensoren erreicht, wodurch das optische Erscheinungsbild verändert wird. Die Kosten sind wie bei den Infrarotsystemen niedrig. Radiowellen werden von den meisten sich am Markt befindlichen Systemen verwendet. Dabei kommen viele verschiedene Methoden der Positionsbestimmung zum Einsatz. Die Positionen werden fast ausschließlich absolut und geometrisch bestimmt. Sowohl bei den Genauigkeiten, die sich vom Submeterbereich bis hin zu mehreren Zehnermetern bewegen, als auch bei den Kosten weisen die Systeme eine große Bandbreite auf. Die Systeme, die aus digitalen Bildern Positionen bestimmen, befinden sich noch stark in der Entwicklungsphase. Sie haben aber ein großes Potential, da sie zusätzlich zu räumlichen auch visuelle Informationen liefern können. Die Genauigkeiten sind variabel und von den gelieferten digitalen Bildern abhängig. Die Kosten sind mittel bis hoch einzustufen, werden aber aller Voraussicht nach mit der fortlaufenden Entwicklung sinken. Tab. 1 enthält eine abschließende Zusammenstellung und einen Vergleich der wesentlichen Methoden.

### Danksagung

Die in dieser Arbeit präsentierte Forschung wird zum Teil vom FWF Projekt NAVIO (Fußgängernavigation in Gebäuden und im städtischen Umfeld) des Fonds zur Förderung wissenschaftlicher Forschung, Österreich, Projektnummer P16277-N04, unterstützt.

### Literatur

- Bahl, P. und Padmanabhan, V.: Radar: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, Proceedings of IEEE Infocom, Tel-Aviv, March, pp. 775–784, 2000.
- Barnes, J., Rizos, C. und Wang, J.: Locata: A New Positioning Technology for High Precision Indoor and Outdoor Positioning. In: Papers presented at the ION GPS/GNSS 2003 Conference, September 9–12, 2004, Portland, Oregon, USA, unpaginated CD-Rom Proceedings, 2003.
- Brumitt, B., Meyers, B., Krumm, J., Kern, A., und Shafer, S.: EasyLiving: Technologies for Intelligent Environments, Microsoft Corporation, 2000.
- Chon, H. D., Jun, S., Jung, H. und An, S. W.: Using RFID for Accurate Positioning. In: Papers presented at the 2004 International Symposium on GNSS, Sydney, Australia, 6–8 December, 2004, 10 pgs, 2004.
- Ekahau (2005): Ekahau Firmenhomepage mit Produktübersicht, <http://www.ekahau.com>, Letzter Zugriff 07.2005.
- Finkenzeller, K.: RFID Handbook: Fundamentals and Application in Contactless Smart Cards and Identification, Carl Hanser Verlag, Munich, Germany, 2002.
- Gartner, G., Frank, A. und Retscher, G.: Pedestrian Navigation System in Mixed Indoor/Outdoor Environment – The NAVIO Project. In: Schrenk M. (Ed.): CORP 2004 and Geomultimedia04. Proceedings of the CORP 2004 and Geomultimedia04 Symposium, February 24–27, 2004, Vienna, Austria, pp. 165–171, [http://corp.mmp.kosnet.com/CORP\\_CD\\_2004/archiv/papers/CORP2004\\_GARTNER\\_FRANK\\_RETSCHER.PDF](http://corp.mmp.kosnet.com/CORP_CD_2004/archiv/papers/CORP2004_GARTNER_FRANK_RETSCHER.PDF), Letzter Zugriff 07.2005.
- Hallberg, J., Nilsson, M. und Synnes, K.: Bluetooth Positioning, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on Telecommunications (ICT), Tahiti, Feb. 23 – March 1, 2003.
- Hightower, J., Want, R. und Boriello, G.: SpotON: An Indoor 3D Location Sensing Technology Based on RF Signal Strength. University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, 2000.
- Hightower, J. und Boriello, G.: A Survey and Taxonomy of Location Systems for Ubiquitous Computing, Technical Report, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, 2001.
- IEEE (2005): IEEE 802.11<sup>TM</sup> Wireless Local Area Networks – The Working Group for WLAN Standards, Institute of Electrical and Electronics Engineers, <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>, Letzter Zugriff 07.2005.
- Imst: Indoor Locating – Imst ipos, Project c21, Presentation, IMST GmbH, Carl-Friedrich-Gauß-Str. 2, D-47475 Kamp-Lintfort, Germany, siehe auch <http://www.centrum21.de/>, Letzter Zugriff 07.2005.
- Ingensand, H. und Bizi, P.: Technologien der GSM-Positionierungsverfahren. In: Allgemeine Vermessungsnachrichten, Wichmann Verlag, Heft 8–9, pp. 286–294, 2001.
- Klepal, M., Pesch, D. und Hradecky, Z.: Optimising Motif Models for Indoor Radio Propagation Prediction Using Evolutionary Computation, ISSC 2002, Cork, 25–26 June, 2002.
- Kong, H., Kwon, Y. und Sung, T.: Comparisons of TDOA Triangulation Solutions for Indoor Positioning. In: Papers presented at the 2004 International Symposium on GNSS, Sydney, Australia, 6–8 December, 2004, 11 pgs.
- Krumm J., Harris, S., Meyers, B., Brumitt, B., Hale, M. und Shafer, S.: Multi-Camera Multi-Person Tracking for EasyLiving, 3<sup>rd</sup> IEEE International Workshop on Visual Surveillance, Dublin, July 1, 2000.
- Newman, J., Wagner, M., Bauer, M., Mac Williams, A., Pintaric, T., Beyer, D., Pustka, D., Strasser, F., Schmalstieg, D. und Klinker, G.: Ubiquitous Tracking for Augmented Reality, Technical Report, Vienna University of Technology, <http://www.ims.tuwien.ac.at/media/documents/publications/ubitrackismar04.pdf>, Letzter Zugriff 07.2005.
- Pahlavan, K., Li, X. und Mäkelä, J.-P.: Indoor Geolocation Science and Technology, IEEE Communications Magazine, February 2002, pp. 112–118.
- Priyantha, N., Chakraborty, A. und Balakrishnan, H.: The Cricket Location-Support System. In: Proceedings of the 6<sup>th</sup> Ann. Intl. Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, August, 2000.

- Priyantha, N., Miu, A., Balakrishnan, H. und Teller, S.: The Cricket Compass for Context-Aware Mobile Applications. In: Proceedings of the 7<sup>th</sup> Ann. Intl. Conference on Mobile Computing and Networking, Rom, July, 2001.
- Retscher, G.: Einsatz von Location Based Services (LBS) als Navigationshilfe: Integration in moderne Navigationssysteme, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, VGI 1/02, pp. 2–12, 2002.
- Retscher, G. (2004a): Allgegenwärtige Positionierungsmethoden für Moderne und Intelligente Navigationssysteme und -dienste, Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation VGI, Heft 3–4, 2004, pp. 136–144.
- Retscher, G. (2004b): Multi-sensor Systems for Pedestrian Navigation. In: Papers presented at the ION GNSS 2004 Conference, September 21–24, 2004, Long Beach, California, USA, unpaginated CD-Rom Proceedings, 12 pgs.
- Retscher, G. und Thienelt, M.: Die Zukunft des Einkaufens – Was können Geodäten dazu beitragen? Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Wichmann Verlag, Heidelberg, AVN 11/12, pp. 387–393, 2004.
- Retscher, G. und Kealy, A.: Ubiquitous Positioning Technologies for Intelligent Navigation Systems. In: Papers presented at the 2<sup>nd</sup> Workshop on Positioning, Navigation and Communication 2005, University of Hannover, Germany, March 17–18, 2005, 10 pgs.
- Reuter: Werkstoffprüfung: Einführung in die Ultraschallprüfung, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, 1999, <http://www.haw-hamburg.de/m/pers/rtr-wpl-us.pdf>, Letzter Zugriff 07.2005.
- Roth, J. (2002): Mobile Computing, Vorlesungsunterlagen, Kapitel 8 »Positionsbestimmung«, Universität Dortmund.
- Roth, J.: Data Collection. In: Schiller, J. and Voisard A. (Eds.) (2004): *Location-Based Services*, Morgan Kaufmann Publishers, USA, pp. 175–205, 2004.
- Thapa, K. und Case, S.: An Indoor Positioning Service for Bluetooth Ad Hoc Networks, Department of Computer and Information Sciences, Minnesota State University, 2001.
- Want, R., Hopper, A., Falcao, V. und Gibbson, J.: The Active Badge Location System, ACM Transactions on Information Systems, 10(1), pp. 91–102, 1992.
- Ward, A., Jones, A. und Hopper, A.: A New Location Technique for the Active Office, IEEE Personal Communications, 4(5), pp. 42–47, 1997.
- WhereNet: WhereNet Firmenhomepage, <http://www.wherenet.com>, Letzter Zugriff 07.2005.
- Win, M. und Scholtz, R.: On the Performance of Ultra-Wide Bandwidth Signals in Dense Multipath Environment, IEEE Commun. Letters, Vol. 2, No. 2, Feb. 1998, pp. 51–53, 1998.

#### Anschrift der Autoren

Ass.-Prof. Dr.-Ing. Günther Retscher | Michael Kistenich  
Institut für Geodäsie und Geophysik, Forschungsgruppe Ingenieur-geodäsie, Technische Universität Wien  
Gusshausstraße 27–29, A-1040 Wien, Österreich  
[gretsch@pop.tuwien.ac.at](mailto:gretsch@pop.tuwien.ac.at)  
[michael.kistenich@gmx.at](mailto:michael.kistenich@gmx.at)