

# Kapitel 1

## Einleitung

Digitale Mobilfunksysteme haben seit ihrer Einführung zu Beginn der neunziger Jahre eine enorme Verbreitung erfahren. Insbesondere die Mobilfunkstandards GSM (*Global System for Mobile Communication*) und IS-95 erlangten dabei sowohl im geschäftlichen, als auch im privaten Bereich innerhalb weniger Jahre eine bedeutende Nutzerzahl. Die hohe Akzeptanz wurde neben immer geringeren Preisen für Gespräche besonders durch eine zunehmend verbesserte Netzabdeckung erreicht, welche in Industriestaaten zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur noch wenige Lücken aufweist.

Eine Folge dieser Entwicklung ist die Tatsache, dass ein zunehmender Anteil von Telefongesprächen über die Mobilfunknetze geführt wird. Damit erhöht sich ebenso der Anteil von Notrufen, der, beispielsweise bei Verkehrsunfällen, von Mobiltelefonen abgesetzt wird. Um in solchen Fällen Hilfsmaßnahmen einzuleiten, ist es für Notrufzentralen unter anderem erforderlich, die genaue Position des Notfalls bzw. des entsprechenden Anrufers zu bestimmen. Da dieser oftmals nur ungenaue Angaben über seine Position machen kann, ist eine Ortung der Mobiltelefone durch die entsprechende Notrufzentrale von besonderem Interesse. Um dies zu erreichen stellte die US-amerikanische Telekommunikationsbehörde FCC (*Federal Communications Commission*) im Jahr 1996 mit der so genannten E-911-Forderung [FCC96] einen Zeitplan vor, welcher die Funktionalität einer Positionsbestimmung für alle neuen Mobiltelefone in den USA innerhalb weniger Jahre verbindlich vorsah. Auf europäischer Ebene wurde die so genannte E-112-Empfehlung erlassen, welche ebenfalls die Möglichkeit zur Ortung von Mobiltelefonen zu dem genannten Zweck verlangt. Während letztere jedoch keine Angaben über die Positionsgenauigkeiten enthält, beinhaltet die E-911-Forderung dezidierte Genauigkeiten, welche für eine Positionsbestimmung durch die Mobilstation und durch das Mobilfunknetz jeweils unterschiedlich gefasst sind. Eine Ortungsart bezeichnet den Fall, in welchem ortungsrelevante Signale durch die

Mobilstation empfangen werden, dort geeignet ausgewertet werden und ebenfalls dort die Position errechnet wird. Für diese mobilstationbasierte Ortung sieht die E-911-Forderung Genauigkeiten vor, welche in 67% aller durchgeführten Positionsbestimmungen besser als 50m und in 95% besser als 150m sein müssen. Eine zweite Ortungsart, welche auch als netzwerkbasierte Ortung bezeichnet wird, sieht den Empfang und die Auswertung der Signale einer Mobilstation durch eine oder mehrere Basisstationen vor. Die Berechnung der Position der Mobilstation erfolgt an geeigneter Stelle im Mobilfunknetz. Die durch die E-911-Forderungen postulierten Mindestgenauigkeiten für diese Art der Ortung sind weiter gefasst und betragen jeweils 100m für 67% und 300m für 95% aller Positionsbestimmungen.

Eine offensichtliche Lösung zur Erfüllung der genannten Anforderungen stellt die Implementierung von satellitengestützten Ortungsmethoden in Mobiltelefonen dar. Die geforderten Genauigkeiten sind mit handelsüblichen GPS-Empfängereinheiten problemlos erreichbar. Demgegenüber stehen bei dieser Lösung jedoch einige Nachteile. Neben der in einigen Situationen nicht gegebenen Verfügbarkeit von Satellitensignalen, beispielsweise innerhalb von Gebäuden oder in innerstädtischen Gebieten, stellen insbesondere die höheren Kosten für Mobiltelefone mit integriertem GPS-Empfänger ein gewichtiges Argument gegen diese Ortungslösung dar.

Ein anderer Lösungsansatz, der seit einigen Jahren zunehmend Beachtung findet, sieht die Nutzung der Mobilfunksignale der Basisstationen oder der Mobilstation selbst zum Zweck der Ortung vor. Hierzu existieren eine Reihe von Verfahren, welche sich durch die aus den Mobilfunksignalen gewonnenen Parameter sowie durch deren Weiterverarbeitung zur Positionsschätzung unterscheiden. Allen Verfahren gemeinsam ist der deutlich geringere Implementierungsaufwand gegenüber einer satellitengestützten Lösung, da sie sich im Wesentlichen auf die digitale Signalverarbeitung der Mobilfunksignale beschränken. Ein weiterer Vorteil liegt in der bereits angesprochenen hohen Verfügbarkeit von Mobilfunksignalen, wodurch eine zuverlässige Ortung gewährleistet wird. Andererseits besteht ein wichtiger Nachteil dieser Ortungslösung in der Tatsache, dass Mobilfunksysteme weder bezüglich ihrer Signalstrukturen, noch bezüglich der Topologien der Basisstationen für Ortungsanwendungen konzipiert sind. Dies gilt sowohl für die momentan etablierten Mobilfunkstandards GSM und IS-95, als auch für die neuen Standards der dritten Generation UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) und cdma2000. Aus diesem Grund sind zwar die bei satellitengestützter Ortung erreichbaren Genauigkeiten in der Größenordnung von wenigen Metern für die Verfahren mobilfunkbasierter Ortung nicht realistisch, jedoch erscheinen

die in den E-911-Forderungen postulierten Positionsgenauigkeiten für eine mobilfunkgestützte Ortung erreichbar.

Obwohl die Verfahren mobilfunkbasierter Ortung prinzipiell für alle genannten Mobilfunkstandards anwendbar sind, existieren dennoch Unterschiede hinsichtlich der zu erwartenden Positionsgenauigkeiten. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Strukturen der Mobilfunksignale. Die mit  $5\text{MHz}$  vergleichsweise hohe Bandbreite von UMTS-Signalen macht diese in besonderem Maße geeignet für eine Ortung, da hierdurch in vielen Fällen eine präzisere Erfassung ortungsrelevanter Parameter möglich wird. Für diese Signale bietet sich eine laufzeitbasierte Ortung an, da in diesem Fall sowohl bezüglich der CDMA-Struktur der Signale, als auch hinsichtlich der Auswertung von Signallaufzeiten für die Ortung, enge Parallelen existieren zum Prinzip der satellitengestützten Positionsbestimmung mit Hilfe des GPS-Systems. Aus diesem Grund wird die Leistungsfähigkeit einer Ortung anhand der geschätzten Laufzeiten von UMTS-Mobilfunksignalen in der vorliegenden Arbeit untersucht.

UMTS-Signale bieten jedoch durch ihre CDMA-Struktur weiteres ungenutztes Potential, welches weit über die Möglichkeit einer akkuraten Bestimmung von Signallaufzeiten bzw. -laufzeitdifferenzen hinausgeht. Dieses Potential umfasst die Erkennung einer direkten Sichtverbindung zwischen einer Basisstation und einer Mobilstation allein anhand des durch die Mobilstation empfangenen UMTS-Signals. Die Gewinnung dieser besonderen Information mit einem neuartigen Algorithmus sowie deren Nutzung bei der Ortung der Mobilstation ist Gegenstand dieser Arbeit. Es wird gezeigt, dass durch diese Maßnahmen eine deutliche Steigerung der Positionsgenauigkeit unter realitätsnahen Bedingungen möglich ist.

In Kapitel 2 werden zunächst die für UMTS-Systeme spezifizierten Ortungsverfahren [3GP05d] eingehend beschrieben, da bei einer Implementierung einer UMTS-gestützten Ortung mit hoher Wahrscheinlichkeit eines dieser Verfahren zum Einsatz kommt. Nicht spezifizierte Verfahren wie beispielsweise die Methode der datenbankbasierten Ortung werden nicht erläutert, da dies auf Grund der Vielzahl existierender Ansätze den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Anschließend wird in diesem Kapitel der momentane Stand der Forschung bezüglich der laufzeitbasierten Ortungsverfahren sowie der Methoden zur Erkennung direkter Sichtverbindung beschrieben.

Aufbauend auf dem erläuterten Stand der Forschung wird in Kapitel 3 die Motivation für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methoden dargelegt. Diese umfassen neben den genannten Algorithmen zur Erkennung und Nutzung direkter Sichtverbindung darüber hinaus den Aufbau eines detaillierten Simulationssy-

stems zur Ortung, welches die Validierung der Algorithmen unter realitätsnahen Randbedingungen erlaubt. Die weitere Gliederung dieser Arbeit wird ebenfalls dort erläutert.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Nachrichtentechnik der Universität Paderborn. Mein besonderer Dank gilt dem Fachgebietsleiter Herrn Professor Dr.-Ing. Reinhold Häb-Umbach. Seine stetige Unterstützung und Hilfsbereitschaft ermöglichten mir die Durchführung dieser Arbeit. Für die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Klaus Meerkötter. Weiterhin gilt mein Dank meinen Kollegen des Fachgebiets Nachrichtentechnik, die mich durch ihre Hilfsbereitschaft auf vielfältige Weise unterstützt haben. Stellvertretend möchte ich Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Schulz nennen, dem die Fachgebietsleitung zu Beginn meiner Tätigkeit oblag. Seine Anregungen trugen wesentlich zum Gelingen der Arbeit bei. Danken möchte ich ferner Herrn Dr.-Ing. Günter Heinrichs für das Korrekturlesen dieser Arbeit. Nicht vergessen möchte ich die Studenten, die mit ihren Diplom- und Seminararbeiten wichtige Ergebnisse lieferten.

Paderborn, im April 2007

Thomas Hesse

# Kapitel 2

## Stand der Forschung

### 2.1 Einführung

In Folge der genannten E-911-Forderungen [FCC96] der FCC in den USA sowie der entsprechenden E-112-Empfehlungen auf europäischer Ebene entstand eine Vielzahl von Ansätzen, um eine Ortung von Endgeräten in Mobilfunknetzen zu ermöglichen und die geforderten Genauigkeiten zu erreichen. Auf eine umfassende Erläuterung all dieser Ansätze soll an dieser Stelle verzichtet werden, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Vielmehr werden im folgenden Abschnitt 2.2 nur jene Konzepte vorgestellt, welche nach [3GP05d] für den Einsatz in einem UMTS-Netz im FDD-Modus (*Frequency Division Duplex*) spezifiziert sind und deren Einsatz damit wahrscheinlich, zumindest jedoch möglich erscheint.

Das OTDOA-Verfahren, welches in Abschnitt 2.2.3 beschrieben wird, stellt das für alle Untersuchungen in dieser Arbeit zu Grunde gelegte Verfahren dar. Daher wird in Abschnitt 2.3 für diese Methode der momentane Stand der Forschung im Mobilfunkbereich beleuchtet.

Wie ebenfalls in Abschnitt 2.2.3 erläutert wird, kommt bei einer OTDOA-basierten Positionsschätzung der Existenz oder dem Fehlen direkter Sichtverbindung zwischen der Mobilstation und den umliegenden Basisstationen eine besondere Bedeutung zu. Das im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte Verfahren zur blinden Erkennung direkter Sichtverbindung trägt dieser Tatsache Rechnung, die OTDOA-basierte Positionsschätzung wird durch die Nutzung dieser Information nachhaltig verbessert. Zur Einordnung dieses Verfahrens wird in Abschnitt 2.4 ein Überblick gegeben über den momentanen Stand der Forschung bezüglich der Erkennung direkter Sichtverbindung sowie der Einbeziehung dieser Information in die Positionsschätzung.

## 2.2 Spezifizierte Verfahren zur Gewinnung von Ortungsinformation

### 2.2.1 Cell-ID-Verfahren

Ein besonders einfaches Verfahren zur Ortung von Mobilstationen innerhalb eines Mobilfunknetzes ist das *Cell-ID*-Verfahren. Es nutzt die Tatsache, dass sich die Mobilstation im Abdeckungsgebiet jener Basisstation befinden muss, unter welcher es im Netz eingebucht ist. Das Abdeckungsgebiet stellt somit eine ungefähre Schätzung des Aufenthaltsgebiets der Mobilstation dar. Bei einer in der Ebene rundum abstrahlenden Basisstation befindet sich diese etwa in der Mitte des Abdeckungsgebiets. In diesem Fall stellt die Position jener Basisstation die beste Schätzung für die Position der Mobilstation dar. Im Fall einer Zellsektorisierung, wie sie in GSM- und UMTS-Netzen üblich ist, befindet sich die Basisstation am Rand des durch sie abgedeckten Gebiets. Somit stellt für diesen Fall das Zentrum des Abdeckungsgebiets die beste Positionsschätzung der Mobilstation dar.

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der einfachen Realisierbarkeit für ein UMTS-Netz ebenso wie für nahezu jedes andere zellulare Mobilfunknetz, da die für die Ortung erforderlichen Funktionalitäten mit jenen übereinstimmen, welche für die Kommunikation einer Mobilstation mit dem entsprechenden Mobilfunknetz erforderlich sind. Besteht bereits eine Kommunikationsverbindung der Mobilstation mit dem Netz, so ist die Basisstation, über welche die Kommunikation abgewickelt wird, und damit auch das entsprechende Abdeckungsgebiet bekannt. Besteht dagegen keine Verbindung, so wird die Ortung der Mobilstation beispielsweise durch einen netzwerkseitigen *Paging*-Prozess oder andere, in [3GP05d] spezifizierte Prozesse, eingeleitet, auf welche die Mobilstation mit einer Nachricht antwortet, durch deren Empfang die entsprechende Basisstation und damit wiederum das Abdeckungsgebiet bekannt wird.

Die Implementierung einer *Cell-ID*-basierten Ortung erfordert daher nur geringe Modifikationen im Netzwerk, jedoch keine Änderungen an den Mobilstationen. Die Ortungsfunktionalität ist damit bei netzwerkseitiger Implementierung für alle Endgeräte gegeben. Aus diesem Grund ist das *Cell-ID*-Verfahren in [3GP05d] für die Ortung in einem UMTS-Netz spezifiziert.

Der Nachteil des *Cell-ID*-Verfahrens besteht in der relativ geringen Positionsgenauigkeit, welche direkt mit der Größe der Abdeckungsgebiete von Funkzellen zusammenhängt. Während in städtischen Gebieten die Größe der Funkzellen und damit die Positionsgenauigkeit in der Größenordnung oberhalb von 100m liegt, erreichen diese Werte in ländlichen Gebieten mehrere Kilometer [Yil02].

Auf Grund dieser geringen zu erwartenden Genauigkeit wird das Verfahren im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Obwohl mit den erreichbaren Positionsgenauigkeiten keine präzise, flächen-deckende Ortung erreichbar ist [Yil02], findet das Verfahren dennoch eine Vielzahl von Anwendungen in GSM-Netzen. Beispielsweise werden in Deutschland von mehreren Netzbetreibern ortsabhängige Tarifierungen angeboten, welche auf dem *Cell-ID*-Ortungsverfahren basieren. Darüber hinaus existieren Anwendungen des Verfahrens im Telematik-Bereich wie beispielsweise Flottenmanagement oder Frachtgüterverfolgung. Durch den zu erwartenden zunehmenden Ausbau von UMTS-Netzen sind hierfür in der Zukunft ähnliche Anwendungen wahrscheinlich.

### 2.2.2 Network-Assisted-GPS-Verfahren

Das *Network-Assisted-GPS*-Verfahren sieht nach [Yil02] die Nutzung sowohl des *Global Positioning Systems* (GPS) als auch des jeweiligen Mobilfunksystems zur Ortung einer Mobilstation vor. Erforderlich ist hierfür eine in die Mobilstation integrierte GPS-Empfangseinheit sowie an das UMTS-Netz angeschlossene GPS-Empfänger. Vor der Erläuterung der genauen Funktionsweise dieser Struktur sowie ihrer spezifischen Vor- und Nachteile soll nachfolgend zunächst das allgemeine Prinzip einer GPS-gestützten Ortung kurz beleuchtet werden.

Das seit den achtziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts aufgebaute GPS-System erlaubt eine nahezu weltweite Bestimmung der Position und Geschwindigkeit von Endgeräten und bietet darüber hinaus eine universelle Zeitbasis. Im Januar 2006 wurde dies mit einem Netz von 29 aktiven Satelliten erreicht, deren Entwicklung und Betrieb vom US-amerikanischen Verteidigungsministerium durchgeführt wird. Alle Satelliten sind mit Uhren hoher Ganggenauigkeit und Synchronität ausgestattet und senden jeweils ein spezifisches DS-CDMA-moduliertes Signal mit einer Trägerfrequenz von etwa  $1,575\text{GHz}$ . Neben anderen Informationen enthält das Signal in regelmäßigen Abständen Zeitstempel, welche die präzise Sendezeit des jeweiligen Signalabschnitts angeben.

In einem ersten Schritt empfängt ein GPS-Endgerät die Signale der jeweils sichtbaren Satelliten und synchronisiert sich auf diese. Nach der Demodulation der übertragenen Information werden die Zeitstempel der einzelnen Signale ausgewertet. Dazu werden die Empfangszeiten der Signale bezogen auf eine im GPS-Endgerät integrierte Uhr bestimmt und anhand der Sendezeiten die jeweiligen Entfernungen zu den einzelnen Satelliten geschätzt.

Da jedoch die im GPS-Endgerät integrierte Uhr aus Kostengründen nicht die

hohe Genauigkeit der Satellitenuhren besitzt, tritt dort ein *Offset*-Zeitfehler auf, welcher in die berechneten Entfernungen zu den Satelliten eingeht. Aus diesem Grund werden diese als Pseudo-Entfernungen bezeichnet. Neben den drei Koordinaten des Endgeräts stellt der *Offset*-Zeitfehler die vierte unbekannte Größe dar und macht damit für eine GPS-gestützte Ortung den Empfang von mindestens vier Satelliten notwendig.

In einem nächsten Schritt werden nun die in jedem Satellitensignal übertragenen Ephemeridendaten ausgewertet. Diese Daten stellen Koeffizienten einer Gleichung dar, anhand derer die Position des entsprechenden Satelliten in Abhängigkeit von der Zeit berechnet wird.

Mit den so verfügbaren, momentanen Positionen von mindestens vier Satelliten und den entsprechenden Pseudo-Entfernungen können abschließend die Position des GPS-Endgeräts sowie der *Offset*-Zeitfehler der darin integrierten Uhr berechnet werden.

Neben den genannten Daten wird mit jedem Satellitensignal jedoch weitere Zusatzinformation übertragen, welche als Almanach bezeichnet wird und für die momentan sichtbaren Satelliten unter anderem die durch deren hohe Geschwindigkeiten bedingten Doppler-Frequenzen sowie die Nummern der Spreizungscodes enthält. Da die Übertragung dieser Daten sowie der Ephemeridendaten nur mit der sehr geringen Datenrate von  $50\text{bit}/s$  erfolgt, werden sie nach einmaligem Empfang im GPS-Endgerät gespeichert und beschleunigen damit zeitnah folgende Positionsbestimmungen erheblich.

Bei einem Neustart eines GPS-Endgeräts und ohne diese gespeicherten Daten kann durch die dann erforderliche aufwändige Signalsuche, Synchronisation und Doppler-Entzerrung die Zeit bis zur ersten Positionsbestimmung mehrere Minuten betragen. Diese Zeitspanne ist für viele Ortungsanwendungen einer UMTS-Mobilstation, insbesondere jedoch für eine Notruffunktion inakzeptabel.

An dieser Stelle greift das *Network-Assisted-GPS*-Konzept. Durch die an das UMTS-Netz angeschlossenen GPS-Empfänger sind zu allen Zeiten die jeweils aktuellen Almanach- und Ephemeridendaten im Netzwerk verfügbar und können bei Bedarf über eine schnelle UMTS-Verbindung an die Mobilstation übertragen werden. In dem dort integrierten GPS-Empfänger können die Operationen Signalsuche, Synchronisation und Doppler-Entzerrung durch die verfügbare Zusatzinformation in sehr kurzer Zeit durchgeführt werden. Damit stehen auch die Pseudo-Entfernungen in sehr kurzer Zeit zur Verfügung.

Für den weiteren Ablauf des Ortungsprozesses sind in [3GP05d] zwei Modi spezifiziert, welche jeweils eine unterschiedliche Implementierungsform der

GPS-Empfangseinheit in der Mobilstation vorsehen.

Der *UE-Assisted*-Modus erfordert eine GPS-Empfangseinheit mit einer eingeschränkten Funktionalität, welche ausschließlich in der Lage ist, Pseudo-Entfernungen nach dem oben genannten Schema zu bestimmen. Diese Daten werden von der Mobilstation zu einer Berechnungseinheit im UMTS-Netz übertragen, durch welche die eigentliche Positionsbestimmung vorgenommen wird. Das Ergebnis dieser Berechnung, die Position der Mobilstation sowie die GPS-Referenzzeit, werden in einem letzten Schritt über eine UMTS-Datenverbindung zur Mobilstation übertragen. Der spezifische Vorteil dieses Modus liegt in einem geringeren schaltungstechnischen Aufwand und damit geringeren Kosten für die GPS-Empfangseinheit. Dem steht als Nachteil ein höheres Datenvolumen gegenüber, welches über eine UMTS-Verbindung übertragen werden muss.

Der *UE-Based*-Modus sieht eine GPS-Empfangseinheit mit voller Funktionalität in der Mobilstation vor. Nach Empfang von Almanach- und Ephemeridendaten erfolgt die Positionsbestimmung nach dem oben erläuterten allgemeinen Prinzip einer GPS-basierten Ortung vollständig in der Mobilstation. Der spezielle Vorteil dieses Modus besteht im geringeren zu übertragenden Datenvolumen, nachteilig wirkt sich der Implementierungsaufwand des vollständigen GPS-Empfängers in der Mobilstation aus, was zu höheren Gerätekosten führt.

Ein genereller Vorteil des *Network-Assisted-GPS*-Verfahrens liegt in der hohen Positionsgenauigkeit, welche durch die Auswertung der GPS-Signale erreicht wird und unter günstigen Randbedingungen in der Größenordnung von einigen Metern liegen kann. Ein großer Nachteil einer rein GPS-gestützten Ortung, die relativ lange Such- und Synchronisationsphase, kann durch das dargelegte *Network-Assisted-GPS*-Konzept großteils kompensiert werden. Durch die starke Verkürzung dieser Phase ergibt sich ferner für die GPS-Empfangseinheit bzw. die Mobilstation ein deutlich reduzierter Energieverbrauch gegenüber einem herkömmlichen GPS-Empfänger ohne Mobilfunkunterstützung.

Der größte Nachteil des *Network-Assisted-GPS*-Verfahrens liegt in der erforderlichen Ausstattung der Mobilstationen mit GPS-Empfangseinheiten. Es ist zu erwarten, dass damit die Kosten für entsprechende Mobilstationen deutlich steigen werden, was einer umfassenden Einführung des Verfahrens für alle Mobilstationen im Wege stünde. Aus diesem Grund wird das *Network-Assisted-GPS*-Verfahren in der vorliegenden Arbeit nicht weiter untersucht.

Die Umsetzung des Verfahrens für einzelne Mobilstationen höherer Preisklassen ist jedoch denkbar, zumal der moderate Implementierungsaufwand auf Seiten der UMTS-Netze einen diesbezüglichen Ausbau wahrscheinlich macht. Entsprechende Empfängerkomponenten sind bereits entwickelt, es sind jedoch derzeit nur