

Technologien der GSM- Positionierungsverfahren

Mit der ständig wachsenden Zahl von Mobilfunkantennen ist es nicht nur für Geodäten nahe liegend, diese Sendeanlagen neben der Kommunikation auch für die Positionsbestimmung zu nutzen. In den letzten zwei Jahren ist die Entwicklung von GSM-Positionierungsverfahren durch ein US-Gesetz (FCC E 911) forciert worden, demzufolge ab 2001 ein Mobiltelefon-Notruf auf 125 m genau geortet werden muss. Entsprechende Standards (ETSI) sind auch in Europa in Vorbereitung. Obwohl inzwischen Mobiltelefone mit integriertem GPS-Empfänger angeboten werden, so hat doch die nachfolgend beschriebene GSM-Positionstechnik gegenüber GPS den entscheidenden Vorteil, dass gerade in bebauten Gebieten eine Positionsbestimmung überall dort möglich ist, wo der Mobilfunkempfang gewährleistet ist.

1 Einleitung

Mit der ständig wachsenden Zahl von Mobilfunkantennen ist es nicht nur für Geodäten nahe liegend, diese Sendeanlagen neben der Kommunikation auch für die Positionsbestimmung zu nutzen. Insbesondere für mobile Informationssysteme wird die Bestimmung der Position in Zukunft eine wichtige Funktion sein, da damit georeferenzierte Informationen (Location Based Services) miteinander verknüpft werden können.

In den letzten zwei Jahren ist die Entwicklung von GSM-Positionierungsverfahren durch ein US-Gesetz (FCC E 911) forciert worden, demzufolge ab 2001 ein Mobiltelefon-Notruf auf 125 m genau geortet werden muss. Entsprechende Standards (ETSI) sind auch in Europa in Vorbereitung. Obwohl inzwischen Mobiltelefone mit integriertem GPS-Empfänger angeboten werden, so hat doch die nachfolgend beschriebene GSM-Positionstechnik gegenüber GPS den entscheidenden Vorteil, dass gerade in bebauten Gebieten eine Positionsbestimmung überall dort möglich ist, wo der Mobilfunkempfang gewährleistet ist.

Mit der GSM-Positionierung eröffnet sich zudem ein breites Anwendungsspektrum wie:

- Sicherheitsanwendungen (Lokalisierung von Notrufen, Fahrzeugüberwachung)
- Mobile ortsbezogene Informationsdienste (Location Based Services)
- Verkehrstelematik
- Entfernungsabhängige Abrechnung von Mobilfunk-Leistungen

2 Die Mobilfunktechnik im Hinblick auf die Positions- bestimmung

Um die GSM-Positionierungstechnologien zu verstehen, sind an dieser Stelle einige Standards und Begriffe

der Mobilfunktechnik zu erwähnen. Ein Mobilfunknetz ist in so genannte Zellen (Waben) aufgeteilt, in deren Zentrum ein Antennenmast steht. Da die Antennen als Richtantennen ausgebildet sind, kann jede Zelle in Sektoren unterteilt werden, die einen horizontalen Öffnungswinkel von 65° bis 85° aufweisen. In der Vertikalen beträgt der Öffnungswinkel 5° bis 15° , wobei die Antennen in Abhängigkeit vom Standort geneigt angeordnet werden.

Im Laufe der Mobilfunkentwicklung haben sich zudem neue Übertragungsstandards entwickelt. Zu Beginn wurde noch mit analogen Techniken, wie z. B. dem amerikanischen Advanced Mobile Phone System (AMPS), gearbeitet, welche heute durch leistungsfähigere digitale Standards wie der Global Standard for Mobile Communications (GSM) in Europa sowie der Personal Communication Service (PCS) auf dem amerikanischen Kontinent ersetzt werden.

Jedes Funktelefon unterteilt die ihm zur Verfügung stehende Frequenz in 416 Kanäle von je 30 kHz Breite. Davon werden zur Sprachübertragung 395 als Voice Channels benutzt, die restlichen 21 dienen als Reverse Control Channels. Sie erfüllen die verschiedenen Zusatzaufgaben, wie die Registrierung bei jedem Ein- und Ausschalten des Gerätes, alle 15 Minuten die Anmel-

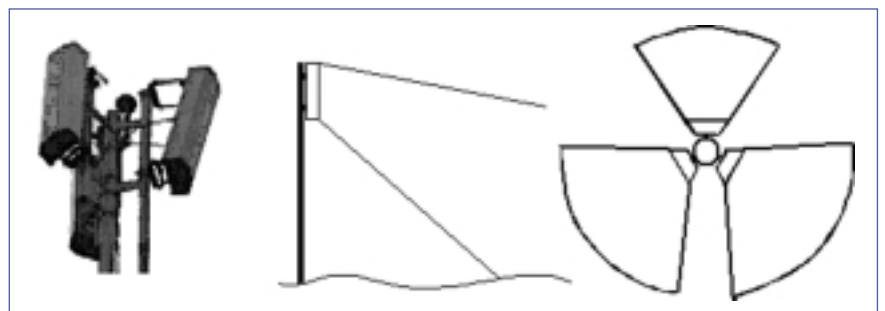


Abb. 1: Sektorisierte Standard-Antenne und ihre Abstrahlcharakteristik

Tab. 1: Eigenschaften der Kanäle

	Voice Channel	Reverse Control Channel
Sendezeit	Lang	100 ms
Zusatzinformation	Keine	Mobile Identification Number (MN)
Signalstärke	Variiert um 27 dB (600 mW – 3 W)	Konstant 600 mW
Aktiviert	Nur bei Gesprächen	Alle 15 Minuten, jedoch nicht während eines Gesprächs

dung eines ankommenden Anrufes sowie die Anrufannahme. Die beiden Kanaltypen (siehe Tabelle 1) haben folgende Eigenschaften und damit spezifische Vor- und Nachteile für die Positionsbestimmung. Der Mobilfunk-Standard ist so strukturiert, dass nur der Anruf über den Reverse Control Channel aufgebaut wird. Die weitere Kommunikation läuft während der Dauer des Gespräches über den Voice Channel. Der Reverse Control Channel arbeitet mit Übertragungsraten von 10 Kbit/s und sehr kurzen Übertragungszeiten von 100 ms. Die Voice Channels hingegen übertragen während längerer Zeitabschnitte. Das erhöht die Interferenz zwischen

benachbarten Kanälen und führt zu einem schlechteren Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Für die Positionsbestimmung sind die Reverse Control Kanäle am interessantesten, da mit einer konstanten Übertragungsleistung von 600 mW gesendet wird. Bei den Voice-Kanälen dagegen variiert die Leistung über einen Bereich von 27 dB (600 mW bis 3 W). Für die Auswertung des Reverse Control Channels kann zudem ein einfacher 1-MHz-Empfänger verwendet werden, der wesentlich kostengünstiger als ein 12-MHz-Empfänger für die Voice Channels ist. Der Reverse Control Channel hat jedoch einen entscheidenden Nachteil: Er kann während der Dauer ei-

nes Gespräches nicht benützt werden. Aus diesem Grunde sind einige Systeme in der Lage, auch über die Voice-Kanäle Positionsbestimmungen durchzuführen.

3 GSM-Positionierungstechniken

Im Wesentlichen lassen sich vier Verfahren unterscheiden, die natürlich auch kombiniert werden können:

- Zuordnung zu einer Zelle und weitere präzisere Positionierung innerhalb der Zelle
- Standlinienverfahren
- Hyperbelschnittverfahren
- Multipath-Muster

Die grundsätzlichen GSM-Positionierungstechnologien sind im folgenden Diagramm ersichtlich.

3.1 Bestimmung der Herkunftszelle

Diese Methode (Cell of Origin, COO) bedeutet nichts anderes als die räumliche Zuordnung zur

nächstgelegenen Antenne, wodurch die Genauigkeit dieses Verfahrens völlig von der Antennendichte abhängig ist. In unbewohnten Gebieten können die einzelnen Zellen einen Radius von 35 km aufweisen, in Innenstädten, mit einer hohen Antennendichte, betragen die Radien 100–200 m.

Zur weiteren Verfeinerung der Position innerhalb einer Zelle wird zusätzlich der Timing-Advanced Effect (TA) benutzt. Da beim GSM-Standard das Zeitfenster, in dem eine Information (Kennung) vom Mobiltelefon zur Basisstation gesendet wird, nur wenige Millisekunden beträgt, ist es notwendig, die Daten vom Mobiltelefon aus etwas früher abzuschicken, damit sie beim Öffnen des Zeitfensters auch bei der Basisantenne angekommen sind. Diese Zeitdifferenz wird bei einer 6-bit-A/D-Wandlung auf etwa 3,7 µs aufgelöst, woraus wiederum der Abstand zur Basisantenne auf ca. 1 km bestimmt werden kann. Da viele Zellen zudem sektorisierte Antennen besitzen (siehe Abbildung 2), kann die Position weiter eingeschränkt werden.

3.2 Standlinienverfahren (Messung des Ankwunftswinkels)

Eine weitere Methode basiert auf der Bestimmung des Ankwunftswinkels (Angle of Arrival, AOA) oder Richtungsfindung (Direction of Arrival, DOA). Bereits mit zwei Antennenstandorten ist es so möglich, durch Schneiden der Standlinien die Position zu bestimmen. Dieses Verfahren braucht keinerlei Modifikationen an den mobilen Empfängern.

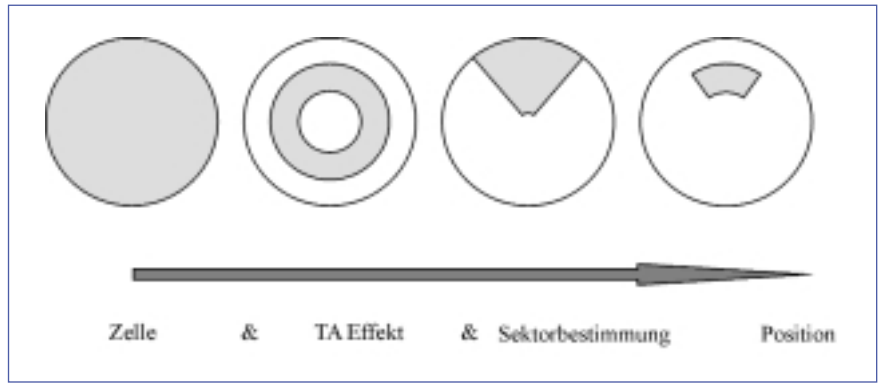


Abb. 2: Das Cell-of-Origin-Verfahren

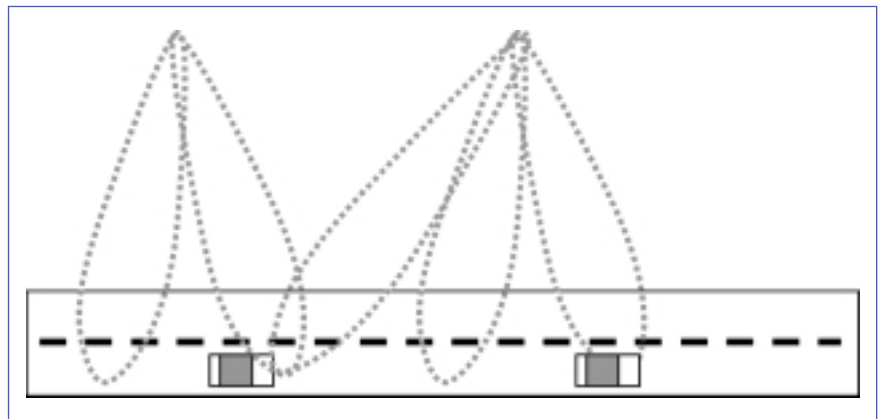


Abb. 3: Fahrzeug-Positionsbestimmung durch Richtungsbestimmung z.B. mit Smart-Antennen

Von der Senderseite her ist es jedoch nötig, ein Antennenarray von 4 bis 12 Einzelantennen aufzustellen oder eine so genannte Smart-Antenne (siehe Abbildung 3). Diese dürfen nicht weiter als eine Wellenlänge auseinander liegen, was für die Frequenzen von 900 MHz und 1800 MHz bedeutet, dass der maximale Abstand 34 cm bzw. 17 cm betragen darf.

Auf Grund des Winkels ergibt sich zwischen jeder Antenne eine kleine Phasenverschiebung, mit deren

Hilfe man den Winkel des ankommenden Signals relativ zur Ausrichtung des Antennenarrays berechnen kann.

Der Winkel α , relativ zur Antennenausrichtung, kann folgendermaßen berechnet werden:

Es gilt:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{cp}{2\pi fb}\right) \tag{1}$$

c = Lichtgeschwindigkeit

p = Phasendifferenz

f = Frequenz

b = Distanz zwischen zwei Antennenelementen

Die Genauigkeit der Winkelbestimmung ist damit abhängig von der Genauigkeit der gemessenen Phasendifferenz:

$$\sigma_\alpha = \sigma_p \tag{2}$$

Die Genauigkeit verschlechtert sich, wenn das Signal fast parallel zur Basislinie ankommt, da in diesem Fall $\cos\alpha$ sehr nahe bei null ist. Deshalb werden keine Richtungswinkel größer als 60° zugelassen, so dass die

Tab. 2: Die verschiedenen GSM-Positionierungstechnologien

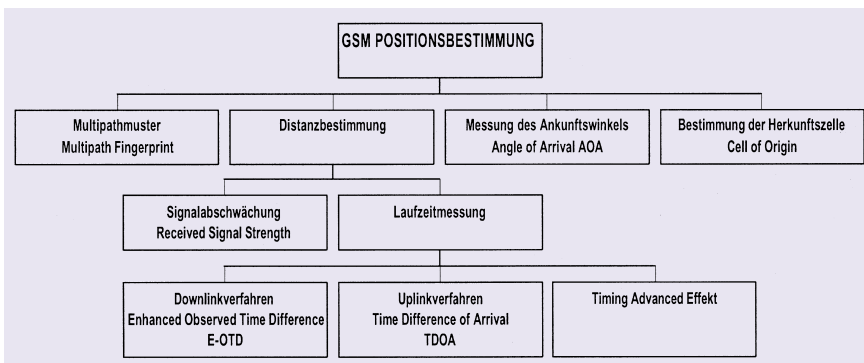




Abb. 4: Antennen-Array (Smart-Antenne) [LEHNE et al. 2000]

Messung nie mehr als einen Faktor 2 verschlechtert wird. Die Hauptproblematik dieser Methode liegt in den Verzerrungen der Wellenfront durch Multipath-Effekte. Zudem erreicht man mit dieser Methode nur akzeptable Resultate, wenn das Signal des Voice Channels ausgewertet wird, da damit längere Integrationszeiten möglich sind. Die Benutzung des Voice Channels ist vom System her nicht ganz einfach. Erstens wird die Verbindung zu den einzelnen Antennen häufig gewechselt, zweitens springt die Verbindung zwischen den verschiedenen Sprachkanälen einer Antenne hin und her. Dieses Problem wurde durch das Aufkommen der digitalen Netze noch erschwert, da bei diesen die Signaldauer noch kürzer und das Channel Sharing viel ausgeprägter ist.

3.3 Hyperbelschnittverfahren

Das bisher genaueste und interessanteste GSM-Positionierungsverfahren basiert auf der auch bei anderen terrestrischen Navigationsverfahren bekannten Technik des Hyperbelschnittverfahrens durch Distanzbestimmung zu mindestens drei Antennen. Es gilt, dass sich sämtliche Punkte, deren Distanzdifferenz zu zwei anderen Punkten konstant ist, auf einer Hyperbel befinden. Bei drei Antennen ergeben sich zwei Hyperbeln, deren Schnittpunkt der gesuchten Position entspricht.

Die GSM-Distanzbestimmung erfolgt wiederum nach verschiedenen Verfahren:

- Distanzbestimmung durch Messung der Signalstärke (Received Signal Strength, RSS)
- Distanzbestimmung mittels Laufzeitverfahren
 - Laufzeitdifferenzverfahren (Time Difference of Arrival, TDOA)
 - verbessertes zeitkorrigiertes Laufzeitverfahren (Enhanced Time Difference of Arrival, E-TDOA, und Enhanced Observed Time Difference, E-OTD)

3.3.1 Distanzbestimmung durch Messung der Signalstärke

Die Stärke des ausgesendeten Signals schwächt sich quadratisch zum Sender-Empfänger-Abstand ab. Wenn die Ausgangsendestärke bekannt ist, so kann nach den bekannten Ausbreitungsmodellen die Distanz zur Antenne berechnet werden. In Hauptstrahlrichtung einer Antenne ergibt sich in einem Abstand r somit die Feldstärke E_{eff} in Abhängigkeit von der Richtcharakteristik $C(\vartheta, \varphi)$:

$$E_{eff}(\vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{P_T Z_{F0} D}{4\pi r^2}} C(\vartheta, \varphi) \quad (3)$$

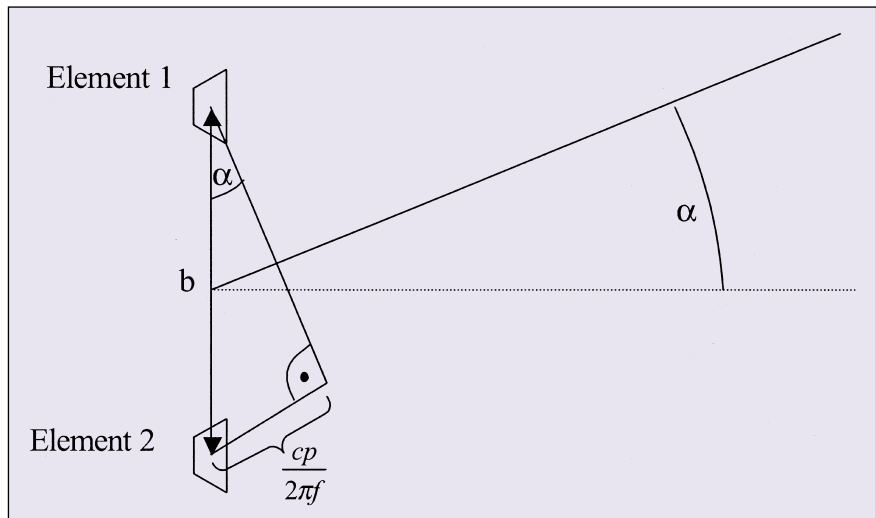


Abb. 5: Winkelbestimmung am Beispiel zweier Antennenelemente

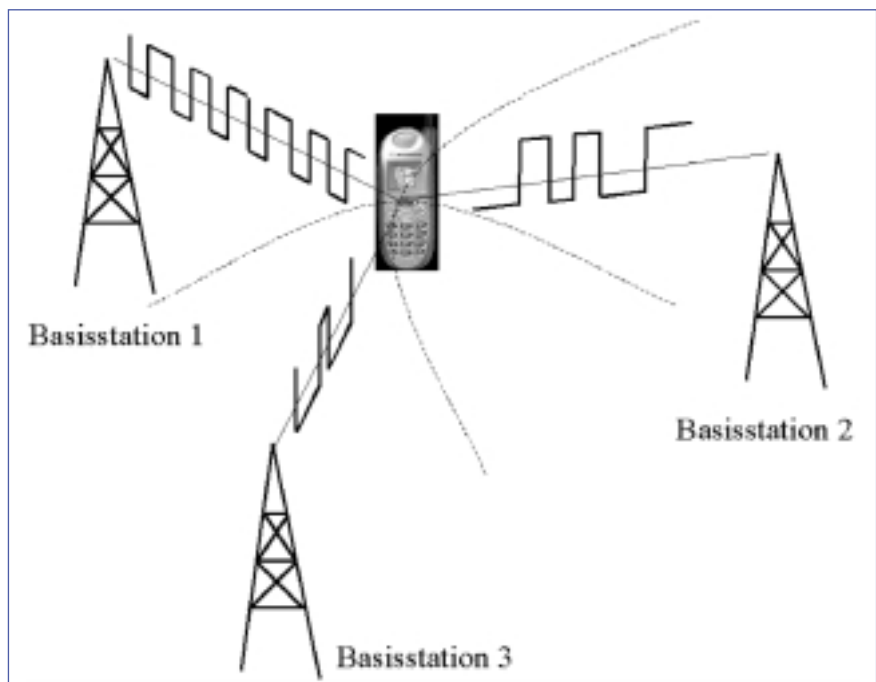


Abb. 6: Hyperbelschnittverfahren

Hierbei stellt Z_{F0} den Feldwellenwiderstand dar, welcher für den freien Raum etwa 377Ω beträgt. D ist der Richtfaktor der Antenne, der proportional mit der Antennenverstärkung zusammenhängt. Die Richtcharakteristik $C(\vartheta, \varphi)$ ist abhängig vom horizontalen (φ) und vertikalen (ϑ) Abstrahlungswinkel der Antenne und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei der Wert 1 einem linearen, isotropen Kugelstrahler entspricht. Die von der Antenne abgestrahlte Leistung wird mit P_T bezeichnet. Aus der Signalstärke kann durch einfache Auflösung von (3) der Abstand zur Antenne berechnet werden:

$$r = \sqrt{\frac{P_T Z_{F0} D}{4\pi E_{eff}^2}} C(\vartheta, \varphi) \quad (4)$$

Das Signalstärkemessverfahren ist im Vergleich zu den folgenden Verfahren das ungenaueste Verfahren, da die gemessene Signalstärke von Faktoren wie der Sektorisierung der Zellen oder dem Neigungswinkel, mit dem die Signale ausgesendet werden, abhängig ist. Das heißt, jede Antenne müsste zusätzlich eine Information betreffend ihrer Abstrahlungswinkel aussenden. Hinzu kommt noch, dass Feldstärkemessungen nicht zwischen der direkten Welle und den Reflexionen (Multipath) unterscheiden lassen.

3.3.2 Messung der Signallaufzeiten

Die Messung von Laufzeitunterschieden ist die zuverlässigste und genaueste Methode, um eine GSM-Position zu bestimmen. Das Satellitennavigationssystem GPS basiert ebenso auf dieser Technologie wie die meisten anderen Systeme für Ortungs- und Überwachungsdienste. Generelle Voraussetzung für die nachfolgenden Verfahren ist, dass die Koordinaten der Basisstationen bekannt und die ausgesendeten Signale synchronisiert sind, indem z. B. alle Basisstationen mit GPS als hochpräzises Zeitübertragungssystem ausgestattet sind. Als Signale zur Zeitdifferenzmessung werden sogenannte Bursts verwendet, die unterschiedliche Aufgaben wie z. B. die Synchronisation zwischen Basis-

station und mobiler Station haben. Es gibt zudem unterschiedliche Bursts, die einerseits vom Mobiltelefon ausgestrahlt und andererseits von den Basisstationen ausgesandt werden.

Bei den Laufzeitmessungen wird daher bei der GSM-Positionierung zwischen einem Uplink-Verfahren, d. h. dem Übertragungsweg „Mobiltelefon → Basisstationen“ und dem Downlink-Verfahren „Basisstationen → Mobiltelefon“ unterschieden. Beim Downlink-Verfahren berechnet das Mobiltelefon den eigenen Standort aus den Signallaufzeiten. Dieses Verfahren wird als Enhanced Observed Time Difference (E-OTD) bezeichnet. Es setzt eine leistungsfähige Software im Mobiltelefon voraus, da sowohl im Idle-Mode, d. h. wenn keine Gespräche geführt werden, als auch im Dedicated-Mode, wenn Gespräche geführt werden, aus den vorhandenen Signalen eine Position berechnet werden muss.

Beim Downlink-Verfahren messen die Basisstationen die Ankunftszeit des Bursts, der vom Mobiltelefon ausgesendet wird. Dieses Verfahren wird als Time Difference of Arrival (TDOA) bezeichnet. Die berechnete Position wird dann z. B. via SMS von einer Zentrale an das Mobiltelefon übertragen. Dabei werden auch die Uhrenfehler des Mobiltelefons (Frequenzdrift) sowie weitere systematische Fehler eliminiert. Da die Burst-Signalstruktur bekannt ist, wird die Korrelation als effektivste Methode für die TDOA-Bestimmung verwendet. Für Signale des AMPS-Standards kann dazu der 48 bit lange Header der Registrierungsmitteilung verwendet werden. Für die Korrelation werden die Signale mittels Fourier-Transformation vom Zeit- in den Frequenzraum transformiert.

Durch die Fourier-Transformation ergibt sich jedoch ein Verlust in der Auflösung. Zur Behebung dieses Problems benutzt die Firma Cellocate als Verfahren für die Rücktransformation den MUSIC-Filter (Multiple Signal Identification and Classification) [Cellocate, 2000]. Dadurch erreicht der Korrelationspeak eine bessere Auflösung.

MUSIC-Filter:

$$P_{MUSIC}(f) = \frac{1}{s^H(f) V_N V_N^H s(f)} \quad (5)$$

wobei V die Matrix mit den N Eigenvektoren ist und s der komplexe Sinus-Vektor:

$$s = \begin{pmatrix} 1 \\ e^{2\pi j f} \\ \dots \\ e^{2\pi j f N} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Mit s^H ist der konjugierte und transponierte Vektor s gemeint.

MUSIC ist eine Technik zur Berechnung des Leistungsdichtespektrums. Man spricht auch von einem so genannten Frequenz-Schätzer. Dieser Filter benutzt Funktionen, die bei den gesuchten Frequenzen theoretisch unendlich sind. Mit digitaler Dämpfung wird dies verhindert und man erhält statt dessen einen sehr scharfen Peak. Auf Grund der störenden Multipath-Effekte benutzen die meisten Systeme in der Vergangenheit Breitbandfrequenzen (> 1 MHz), welche für dieses Problem weniger anfällig sind.

Die Genauigkeit der Laufzeitmessung

Wie bereits im Kapitel 2 besprochen, sind die beiden verfügbaren Kanäle (Reverse Control Channel und Voice Channel) sehr unter-

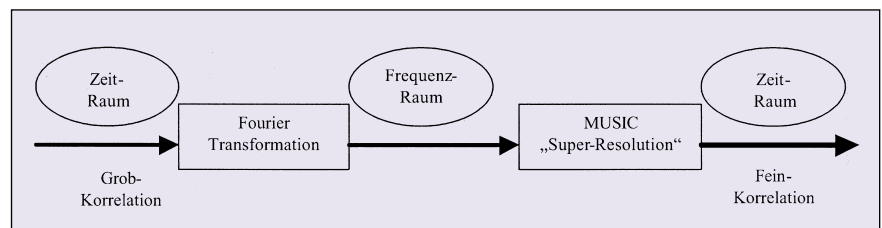


Abb. 7: Korrelationsprozess der Fa. Cellocate

schiedlich in ihrer Struktur. In Bezug auf die TDOA-Methode spielt zudem die Modulationscharakteristik eine Rolle. Diese ist beim Reverse Control Channel

Tab. 3: Standardabweichung der Laufzeitmessung

S/N ₁ [dB]	S/N ₂ [dB]	σ _{ΔT} [ns]	σ _{Distanz} [m]
13	13	80	24
20	20	36	11
25	25	20	6
20	0	250	75
18	-6	500	150

markant besser, was in einer um 13 dB erhöhten Lokalisierungsgenauigkeit resultiert. Während auf dem Reverse Control Channel über die gesamte Sendedauer von 100 ms integriert wird, benötigt derselbe Algorithmus beim Voice Channel zwei Sekunden Integrationszeit, um ein vergleichbares Resultat zu erhalten. Die theoretische Genauigkeit der Laufzeitmessung wird durch die Cramér-Rao-Schranke beschrieben. Die Cramér-Rao-Schranke ist ein statistischer Wert, welcher die theoretische Untergrenze der Genauigkeit beschreibt, mit der ein Signal gemessen werden kann. Dabei wird nur die Signalcharakteristik berücksichtigt. Alle physikalischen Einflüsse (Antennentyp, Atmosphäreneinflüsse) werden nicht beachtet.

Die relevanten Größen sind:

- Bandweite
- Übertragungszeit
- Signal/Rausch-Verhältnis
- Basislinie zwischen den beiden Antennen, für die die Laufzeitdifferenz berechnet wurde.

Die gebräuchlichste Formel der Cramér-Rao-Schranke ist:

$$\sigma_{\Delta T} = \frac{1}{2 \cdot \sigma_b \cdot (2 \cdot b \cdot \delta t) \cdot R_{S/R}} \quad (7)$$

σ_{ΔT} = Standardabweichung, mit der die Zeitdifferenz gemessen werden kann

σ_b = Standardabweichung der Bandbreite

b = Bandbreite

δt = Integrationsdauer

R_{S/N} = Normierter Bruch, berechnet aus dem Signal/Rausch-Verhältnis von Antenne 1 (S/N₁) bzw. Antenne 2 (S/N₂), gemäß unten stehender Formel

$$R_{S/N} = \frac{S/N_1 \cdot S/N_2}{1 + S/N_1 + S/N_2} \quad (8)$$

Die Tabelle zeigt den Einfluss unterschiedlicher S/N-Verhältnisse auf die Genauigkeit, mit der σ_{ΔT} bestimmt werden kann.

Die Cramér-Rao-Schranke zeigt, dass mit typischen Signalstärken Genauigkeiten erreicht werden können, die bereits für viele Anwendungen genügen. Es sei hier jedoch nochmals darauf hingewiesen, dass diese Schranke ein theoretischer Grenzwert ist, der in der Praxis nie ganz erreicht werden kann. Weiter ist zu beachten, dass ein Widerspruch zwischen einem guten S/N-Verhältnis und möglichst kurzen Integrationszeiten besteht.

3.3.3 Das Fingerprintverfahren

Ein völlig anderer Ansatz in der Positionsbestimmung ist das Fingerprintverfahren der Firma Radio Camera. Bei diesem System werden die sonst störenden Multipath-Effekte zur Positionsbestimmung verwendet, da zwischen Mobiltelefon und Antenne ein eindeutiges Multipath-Signalmuster (Fingerabdruck) entsteht. Die Voraussetzung ist jedoch, dass das Multipath-Muster konstant bleibt.

Diese Phasen- und Amplitudencharakteristiken werden mit einer Datenbank verglichen, in der die typischen Muster jedes Ortes gespeichert sind.

Dank dieses Vorgehens eignet sich das System hervorragend für dicht besiedeltes Gebiet. Die Qualität der Resultate ist damit unabhängig von einer direkten Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger. Zudem ist die Positionsbestimmung auch mit nur einer Antenne möglich. Die Genauigkeit soll die Anforderungen der FFC übertreffen. Laut Hersteller ist das System einiges genauer als die bekannten AOA- und TDOA-Techniken.

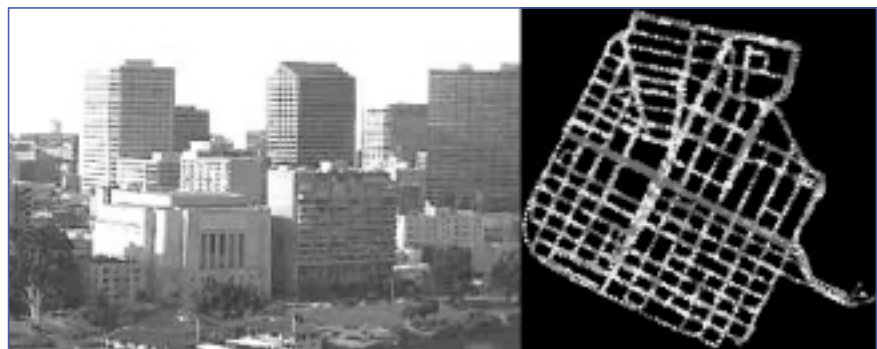


Abb. 8: Stadtteil (links) und sein typisches Multipath-Muster (rechts) [USWC, 2000]

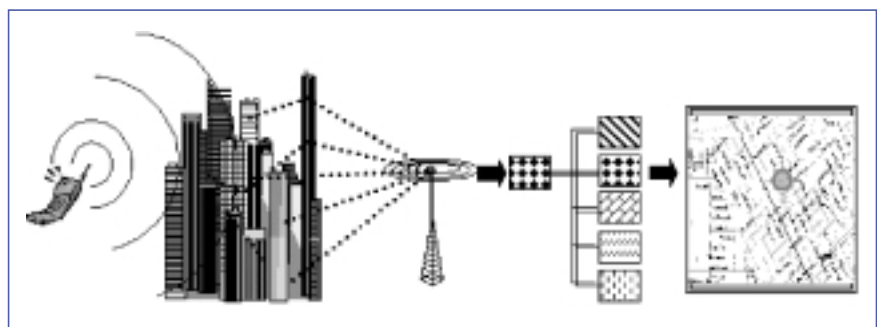


Abb. 9: Mustererkennung [USWC, 2000]

3.4 Vergleich der verschiedenen Technologien

Tab. 4: Übersicht Positionsbestimmungs-Technologien

Technologie	Modifikationen	Vorteile	Nachteile
COO	Keine	Alles bereits vorhanden; keine Investitionen nötig	sehr schlechte Genauigkeit langsam in der Positionsberechnung Messung nur während Gespräch möglich Einbußen in der Sprachqualität möglich
AOA	Spezieller Antennentyp erforderlich	Standard unabhängig mind. 2 Antennen nötig (in Komb. mit Smart-Antennen nur eine) keine Synchronisation nötig	Antennenarrays oder Smart-Antennen erforderlich
RSS	An Basisstation	Unempfindlich gegenüber Multipath-Effekten	sehr schlechte Genauigkeit Messungen aufwendig
TOA	An Basisstation		keine Elimination der Uhrenfehler sehr genaue Zeitreferenz nötig Messung nur während Gespräch möglich Einbußen in der Sprachqualität möglich
TDOA E-OTD	Am Handy und an Basisstation	Genaueste Methode keine Beeinträchtigung der Sprachqualität Messung immer möglich, wenn Handy eingeschaltet	Braucht mind. 3 Antennen Genauigkeit durch Bandbreite limitiert Sehr genaue Zeitreferenz nötig Empfindlich auf Multipathing Periodische Kalibrierung des gesamten Netzwerkes nötig
Multipath Fingerprint			aufwendiges Template-Matching-Verfahren setzt stationäres Verhalten der Multipath-Muster voraus erfordert Datenbanken

Die folgende Tabelle zeigt die bereits von den verschiedenen Herstellern vorgesehenen Positionierungsverfahren.

Tab. 5: Übersicht der Anbieter bezüglich Technologie und Genauigkeit

System	Technologie	Genauigkeit
BT Cellnet	E-OTD	–
Cellocate	TDOA	250 m Standardabweichung
CellTrax	TDOA	< 200 m
Cellpoint	–	200 m
Cursor	E-OTD	98 m Standardabweichung mit UMTS < 20 m
Ericsson		
Geometrix	TDOA & AOA	125 m (FFC-Anforderungen)
MicroTrax	–	–
Mobile Positioning System	TDOA	300 m – 1000 m
RadioCamera	Localization Fingerprint (LF)	< 125 m (FFC-Anforderungen)
RoadTrack	TDOA	1000 m (95%-VI)
Sigma-5000	TDOA & AOA	100 m Standardabweichung
TeleSentinel	AOA	< 125 m (FFC-Anforderungen)
TruePosition	TDOA	< 125 m (FFC-Anforderungen)

4 Generelle Genauigkeitsbetrachtungen

4.1 Basisstationen und mobile Telefone

Die verwendete Hardware hat einen sehr starken Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit. Eine Untersuchung an Basisstationen hat gezeigt, dass sie für hochpräzise Zeitmessungen nicht ideal sind. Dies ist nicht verwunderlich, wird doch für die Demodulation des Voice Channels nur eine Stabilität im Mikrosekunden-Bereich gefordert. Die im Lauf der Zeit eingeführten Neuerungen führten zu immer stabileren und genaueren Systemen. Die aktuelle Generation von Basisstationen darf für sämtliche Basislinien mit einer Genauigkeit (σ_t) besser als 50 ns gerechnet werden. Die wichtigsten Punkte, welche die Gerätegenauigkeit beeinflussen, sind im Folgenden erwähnt:

- Die Empfängeruhren müssen eine möglichst kleine Drift sowie ein tiefes Phasenrauschen aufweisen. Ersteres hat einen Einfluss darauf, wie oft ein System kalibriert werden muss. Letzteres erhöht die Fähigkeit des Systems, Multipath-Effekte von anderen systematischen Fehlern zu unterscheiden. Als Zeitnormal kann auch GPS verwendet werden, wenn die Basisstation zusätzlich mit einer solchen Antenne ausgerüstet ist. Da ein Rubidium-Oszillator inzwischen kaum mehr kostet als eine gute GPS-Antenne, werden oft direkt solche eingebaut. Die Stabilität dieser Oszillatoren (σ_t) ist besser als 20 ns.
- Bei den meisten Basisantennen werden die ankommenden Signale vor dem Sampling mehrmals gefiltert. Diese Filter können zu einer signifikanten Verzögerung des Signals führen. Diese Verzögerungen ändern sich durch verschiedene Einflüsse (Zeit, Temperatur). Um diese Fehler auf den Genauigkeitsbereich des Oszillators zu reduzieren (10 ns bis 30 ns), ist es wichtig, die Filter regelmäßig zu kalibrieren.
- Die Empfänger-Technologie ist ebenfalls wichtig. Analoge Stationen zeigen je nach Konstruktion und verwendeter Komponenten Variationen von 10 ns bis 100 ns. Dagegen erreichen die digitalen Breitband-Stationen ein σ_t von weniger als 20 ns (ohne Quantifizierungsfehler).

4.2 Multipath-Effekt

Es hat sich gezeigt, dass der Multipath-Effekt den mit Abstand größten Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit hat. In städtischem Gebiet kann die Verzögerung, mit der die Reflexionen des Signals die Antenne erreichen, mehrere Mikro-

sekunden (typischerweise 1–5 ms) betragen. Daraus resultiert ein Positionsfehler von 300 m bzw. 1500 m. Dieser Wert kann durch Überbestimmung natürlich noch verbessert werden. Im schlimmsten Fall ist es auch möglich, dass sich die Reflexion und das Originalsignal auslösen.

Die Fähigkeit, reflektierte Signale detektieren zu können, ist stark abhängig vom jeweiligen Antennentyp. Allgemein kann man sagen, je eingeschränkter der Sendebereich ist, umso besser wird das S/N-Verhältnis und damit die Chance, Multipathing zu entdecken. Noch bessere Resultate erhofft man sich von Smart-Antennen. Mit diesem Antennentyp kann man mittels elektronischem „beam-steering“ die Empfindlichkeit in Richtung der größten Signalstärke erhöhen. Falls dieses „beam-steering“ schnell genug ist, um auch auf die kurzen Übertragungszeiten des Reverse Control Channels (100 ms) reagieren zu können, ergeben sich daraus Vorteile für die TDOA-Methode. Um Multipath-Komponenten detektieren zu können, wird eine Kreuzkorrelation verwendet.

4.3 Sonstige Genauigkeitsbestimmende Einflüsse

Wie auch bei GPS wird aus der Verteilung der empfangbaren Basisstationen ein GDOP-Wert berechnet werden. Somit wird der Einfluss der Geometrie auf die Genauigkeit mitberücksichtigt. Je schlechter die Verteilung der Antennen, umso größer wird dieser Wert. Für die Standardabweichung der Positionsbestimmung gilt dann

$$\text{HDOP} = \text{SQRT}(k_{xx}^2 + k_{yy}^2) \quad (9)$$

Weitere Faktoren sind:

- Anzahl der empfangbaren Basisstationen (n); die Standardabweichung nimmt mit $\frac{1}{\sqrt{n}}$ ab.
- Möglichst viele unterschiedliche Antennentypen; damit steigt die statistische Unabhängigkeit.
- Abstand zu den Antennen; je kürzer die Distanz zur Antenne ist, umso besser ist das S/N-Verhältnis.

Dieses nimmt im Quadrat zur Distanz ab.

- Antennenhöhe der Basisstationen; je höher die Antennen, umso höher ist die Signalstärke des direkten Signals. Die Verbesserung ist im Verhältnis 1/h.
- Mittlere Leistungsverstärkung der Antenne in Richtung des sendenden Telefons.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Auch im Zeitalter von GPS bleibt die Forderung nach einer flächendeckenden Positionsbestimmung. Hier werden die GSM-Positionierungsverfahren eine Ergänzung für die Bereiche bilden, in denen GPS nicht funktioniert. Obwohl die GSM-Positionierungsverfahren die Genauigkeit von GPS nicht erreichen und zudem stark von der Konfiguration und anderen Faktoren abhängig bleiben, sind Positionierungen mit Dekametergenauigkeiten für viele Anwendungen völlig ausreichend, insbesondere wenn sie mit der GSM-Technologie nahezu gratis erreichbar sind. Der neue UMTS-Standard mit wesentlich höheren Übertragungsraten lässt eine weitere Genauigkeitssteigerung erwarten. Viele Hersteller von Positionierungssystemen sprechen von markant größeren Genauigkeiten auf Grund der besseren Zeitsynchronisation. So verspricht etwa der Systemanbieter Cursor [Cursor, 2000] mit der neuen UMTS-Technik eine gegenüber der momentanen GSM-Positionierungstechnik um den Faktor vier gesteigerte Genauigkeit.

Ein weiteres GSM-gestütztes Positionierungsverfahren zeichnet sich zudem in der Kombination von GPS und GSM, z. B. mit der Entwicklung des Snaptrack-Verfahrens [KRASNER et al. 1998] ab, das aber nicht Gegenstand dieser Publikation sein sollte.

Es bleibt aber immer noch die Frage, ob eine „Überversorgung“ eines Gebietes mit mehreren GSM-Antennen überhaupt wirtschaftlich ist und Location Based Services diesen Aufwand rechtfertigen.

Literatur

- BALSINGER, P., SUN, D., GOMEZ, M., PELLANDINI, F., AESCHLIMANN, M., DWORZAK, C., HUBMANN, M., SOLLBERGER, A. [2000]: Mobile Geo-dependent Information on Demand, MOGID, Workshop on Position Dependent Information Services, Joint W3C-WAP Forum Workshop, Sophia Antipolis, February 2–3th, 2000 France, und <http://www.w3.org/Mobile/posdep/>.
- BAUER, M. [1997]: Vermessung und Ortung mit Satelliten; Wichmann Verlag; ISBN 3-87907-309-0.
- Collocate [2000]: www.cell-loc.com/library/klukas1.
- Cursor [2000]: www.cursor-system.com.
- EISSFELLER, B. [2001]: Zukünftige Systeme für Geodäsie und Navigation, Geodätisches Seminar am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich im WS 2000/2001 (unveröffentlicht).
- GEIGER, A. [1999]: Präzisionsnavigation; Skript zur Vorlesung SS 1999.
- KOSHIMA, H., HOSHEN, J. [2000]: Personal Locator Services Emerge, Spectrum, February 2000.
- KRASNER, N., MOEGLEIN, M. [1998]: An Introduction to SnapTrack Server-Aided GPS Technology, <http://www.snaptrack.com/pdf/ion.pdf>.
- KREITER, N. [2000]: Positionierung von Personal Digital Assistants, Geodätisches Seminar am Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich im WS 1999/2000 (unveröffentlicht).
- LEHNE, P. H., PETTERSEN, M. [1999]: An Overview of Smart Antenna Technology for Mobile Communications Systems Telenor Research and Development, <http://www.comsoc.org/pubs/surveys/4q99issue/lehne.html>
- USWC, U.S. Wireless Corporation [2000]: <http://www.uswcorp.com/USWCMainPages/our.htm>.
- ZETSCHKE, H. [1979]: Elektronische Entfernungsmessung; Vermessungswesen bei Konrad Wittwer Verlag; ISBN 3-87919-127-1.
- Anschrift des Verfassers:
Prof. Dr.-Ing. H. INGENSAND
ETH- Hoenggerberg HIL.D 43.3
CH-8093 Zürich