



geoinformation.net

Projektpartner: Westfälische Wilhelms-
Universität Münster -
Institut für Geoinformatik
Datum: 03.02.2003

Lerneinheit: „Standortbestimmung“

Einleitung

Wie funktioniert die technische Navigation? Woher weiß ein Gerät, wo es sich gerade befindet?

Grundsätzlich lassen sich zwei Paradigmen unterscheiden: Absolute und relative Positionsbestimmung. Während erstere die zeitlich unabhängige Position im Raum bestimmt, ermittelt letztere die aktuelle Position immer in Bezug zu einer vorhergehenden, ist also ohne einmalige absolute Positionsbestimmung nur selten zu gebrauchen. Der erste Teil dieser Lerneinheit fokussiert Methoden zur absoluten Bestimmung der räumlichen Position mittels Satellitennavigation und solche, die im Bereich der Mobilkommunikation Anwendung finden, während im Abschnitt Autonavigation relative Methoden diskutiert werden sollen.

Eine weitere Unterscheidung finden wir bezüglich der Aktionsbasis der Positionsbestimmung: Selbstortende Systeme initiieren die Standortbestimmung autark, während bei der Fernortung der Positionsbestimmungsprozess von einem Fremdsystem eingeleitet wird. Diese Unterscheidung spielt bei der Diskussion um Wahrung von Privatsphären eine entscheidende Rolle.

Der Fokus des zweiten Teils dieses Kapitels liegt auf der Lokalisierung von Mobiltelefonen oder per Mobilfunk in ein Netzwerk integrierter PDAs, da diese die wichtigsten Adressaten für Location Based Services darstellen und in der Regel ohne GPS Funktionalität auskommen müssen.

Inhalt

Lerneinheit 4: „Standortbestimmung“	1
Satellitengestützte Verfahren	3
Global Positioning System - GPS	3
DGPS - Differentielles GPS.....	27
„Galileo“	29
Netzwerkbasierter Positionsbestimmung	31
Zellbasierter Positionsbestimmung.....	31
Timing Advance Positionsbestimmung	32
Kombinierte Zell-ID / Timing Advance Positionsbestimmung	32
Positionsbestimmung mittels Signalstärkemessung.....	33
Uplink Time of Arrival (TOA).....	33
Enhanced Observed Time Difference (E-OTD).....	34
Angle of Arrival (AOA).....	34
Telefonsystembasierter Positionierung und GPS.....	35
Literatur.....	37

Satellitengestützte Verfahren

Global Positioning System - GPS

Mit dem Anwachsen der Genauigkeitsansprüche und der immer noch bestehenden Notwendigkeit eine global einheitlich einsetzbare Positionierungsmethode bereit zu stellen, wandte man sich mit Beginn des Raumfahrtzeitalters (1957, Sputnik) zunehmend der Entwicklung extraterrestrischer Positionierungssysteme zu.

Ein extraterrestrisches Positionierungssystem berechnet die Punktposition nahe oder auf der Erdoberfläche mittels Nutzung physikalischer Messmethoden. Ziel war es, an jedem Ort der Erde eine Positionierung zu ermöglichen ohne auf ein lokal geltendes Bezugssysteme ([Link auf Gauß-Krüger](#)) bzw. Zentralpunkte zurückgreifen zu müssen. Man konzentrierte sich deshalb auf das elektromagnetische Spektrum als Träger der Information, sowohl in seiner reflektiven als auch emittierten Form. In gewisser Weise gab es bereits die bewährte Methode der Astromavigation (Sextanten), wie sie an Bord von Schiffen seit vielen Jahren Einsatz findet. Allerdings liegen die durch Bestimmung der Azimutal- bzw. Höhenwinkel der Sonne/Gestirne ermittelten Schiffsorte bei ruhiger See in einem Genauigkeitsbereich von max. $0,3^\circ$ Grad (= 300-400 m). Daneben wäre eine Echtzeit-Positionsbestimmung für schnellbewegte, moderne Objekte wie z.B. Flugzeuge, mittels Sextanten unmöglich.

Historie

Mit Beginn der 60'er Jahre wurde an der John Hopkins University das US Navy Navigation Satellite System (NNSS) entwickelt, welches später in TRANSIT umbenannt wurde. Es stellt den eigentlichen Vorläufer des GPS-Positionierungssystems dar und war bis Ende der 80'er Jahre im militärischen, bzw. seit 1967 z.T. auch pilothaft im zivilen Einsatz.

Das TRANSIT-System bestand aus sechs Satelliten mit polarem Orbit in einer Höhe von ca. 1.100 km bei einer Umlaufzeit von je 107 Minuten. Zweimal am Tag wurden die Dopplermessungen (Berechnung der Position mit Hilfe eines kontinuierlichen Funksignals, dass auf zwei Frequenzen sendet) mit den Ephemeriden (Bahnparameter) der Satellitenbahnen verrechnet und zu den Satelliten zurückgesandt, welche dann diese Informationen zu den jeweiligen (mobilen) Empfängern weitergaben. Der Vergleich der empfangenen Signale mit der geeichten Oszillationsfrequenz der Geländeempfänger (Dopplereffekt, Frequenzverschiebungen) konnte bei ausreichender Messdauer (einige Minuten) eine bis auf 1m genaue Position liefern. Parallel zu TRANSIT entwickelte die ehemalige Sowjetunion das vergleichbare System TSICADA. Die Erfahrungen aus TRANSIT flossen später in das System NAVSTAR/GPS ein.

Das Global Positioning System (GPS) wurde mit dem Zweck entwickelt, die Nachteile des älteren TRANSIT-Systems zu beseitigen. TRANSIT lässt nur exakte Messungen über eine relativ lange Messdauer zu, wobei die Satellitenabdeckung global als sehr schlecht galt (nur sechs Satelliten). Im Durchschnitt konnte innerhalb der USA nur alle 90 Minuten eine günstige Satellitenkonstellation für TRANSIT abgegriffen werden. Für alle anderen Zwischenzeiträume musste die Position interpoliert werden.

Das Global Positioning System i.e.S. ging aus dem prototypischen Vorläufer NAVSTAR (NAVigation Satellite Time And Range) Global Positioning System 1973 hervor. NAVSTAR selber war ein aus den Projekten TIMATION (US Navy) und 621-B (US Airforce) unter Berücksichtigung von TRANSIT zusammengeführtes Projekt mit dem Ziel, zunächst eine militärisch nutzbaren Echtzeit-Positionierung sich schnell bewegender Fahrzeuge zu Wasser, zu Lande und in der Luft zu ermöglichen.

Der erste GPS-Satellit (Block I Satellit) wurde am 27. Juni 1977 in sein ca. 20.000 km hohes Orbit um die Erde gebracht. Ihm folgten bis 1990 23 weitere Satelliten um so die globale Abdeckung zu gewährleisten. 1996 waren es bereits 26 operationelle Satelliten (plus Reserve!),

heute sind es 32 (inkl. Reserve), so dass die Verfügbarkeit und Qualität der GPS-Messungen global im Normalfall wenig zu wünschen übrig lässt.

Die GPS-Technik hat nicht nur die globale Positionsbestimmung ermöglicht, sondern auch in seiner erweiterten Form des DGPS (Differentielles GPS) das globale Vermessungswesen revolutioniert. Mit der Schaffung eines World Geodetic Systems 1984 (WGS 84) lässt sich nun mit dem GPS an fast jedem Ort der Welt die Position (bezogen auf WGS-84) bestimmen und in lokale Bezugssysteme umrechnen.

Bezugssysteme

Die Beschreibung der Satellitenbewegung, die Modellierung der Beobachtungsgrößen und die Darstellung sowie Interpretation der Ergebnisse der Positionsbestimmung muss in geeigneten, wohldefinierten und reproduzierbaren Bezugssystemen erfolgen (Seeber, 1989). Bezugssysteme der genauen Satellitengeodäsie sind von Natur aus global und geozentrisch, da die Satellitenbewegung um den Massenmittelpunkt der Erde erfolgt. Terrestrische Messungen haben von Natur aus nur lokalen Charakter und werden in der Regel in **lokalen Bezugssystemen** ausgedrückt. Da diese Systeme nicht identisch sind, ist die Bereitstellung genauer Transformationsbeziehungen zwischen den Systemen und den Satellitendaten notwendig.

In der Satellitengeodäsie werden deshalb zwei Bezugssysteme benötigt: Ein raumfestes, inertiales Bezugssystem (Conventional Inertial System = CIS) zur Beschreibung der Satellitenbahnen und ein erdfestes, terrestrisches Bezugssystem (Conventional Terrestrial System = CTS) zur Festlegung der Beobachtungspunkte und der Ergebnisse der Messung auf der Erdoberfläche.

Eine gute Annäherung an ein CIS stellt das Äquatorsystem der sphärischen Astronomie dar, welches durch einen Katalog von Positionen einiger Fundamentalsterne und kosmischer Konstanten in Bezug zum Massenschwerpunkt des Gesamtsystems (meist Erdmassenpunkt) definiert wird. Ein geeignetes erdfestes Bezugssystem muss mit der Erde verbunden sein und wird z.B. historisch durch den Nullmeridian von Greenwich in Verhältnis zum Äquator und den Rotationspolen der Erde definiert.

Das World Geodetic System von 1984 (WGS-84) stellt ein in der praktischen Anwendung bewertetes ellipsoides CTS dar, welches versucht, die tatsächliche Erdfigur bestmöglich in Form eines Rotationsellipsoiden mathematisch **global** zu beschreiben. Die Erde stellt annähernd einen solchen geometrischen Körper dar, weil sie durch die Rotation an den Polen abgeplattet ist (beitseitig ca. 21 km) und somit eine Meridianellipse um ihre kleine Achse formt. Diesem globalen ellipsoiden System kann mit den ellipsoiden Größen Breite, Länge und Höhe ein kartesisches Koordinatensystem (Rechtssystem) mit den Koordinaten X, Y und Z zur Seite gestellt werden, dessen Koordinaten wiederum in ein lokales System überführt werden können.

Exkurs Gauß-Krüger-Koordinatensystem

Das Gauß-Krüger-System ist das in der Bundesrepublik Deutschland dominierende rechtwinklige Koordinatensystem mit Rechts- und Hochwerten bezogen auf das Bessel-Ellipsoid. Viele GPS-Empfänger verfügen in ihrer Software über direkte Positionstransformationen in dieses wichtige kartographische Bezugssystem. In den neuen Bundesländern wurde ein ähnlich strukturiertes System nach dem Krieg eingeführt, welches sich jedoch auf das Krassowski-Referenzellipsoid bezieht. Letzteres wird aber von GPS-Seite bisher nicht vollständig unterstützt.

Da die Meridiane polwärts zusammenlaufen, sind die Gradnetzfelder Trapeze, und die Koordinaten eines Punktes sind durch ein schiefwinkliges Koordinatensystem ausgedrückt. Das Gauß-Krüger-System besitzt rechtwinklige Koordinaten, was bzgl. geodätisch-mathematischer Transformationen wesentlich günstiger ist (Wagner, 1958). Auch treten im schiefwinkligen Koordinatensystem in Richtung der Längengrade positive und negative Werte in Bezug zum Nullmeridian (Greenwich) auf.

mathematische Operationen einfacher auszuführen sind. Das Ellipsoid hat sich deshalb als Bezugsfläche für Lagekoordinaten durchgesetzt und bewährt. Als Höhenbezugsfläche ist das Ellipsoid weniger geeignet. Hier wird allgemein das Geoid als Niveaulfläche des Erdschwerefeldes verwendet, da es dem Ozeanpiegel bestmöglich angepasst ist und sich theoretisch unter den Kontinenten fortsetzt.

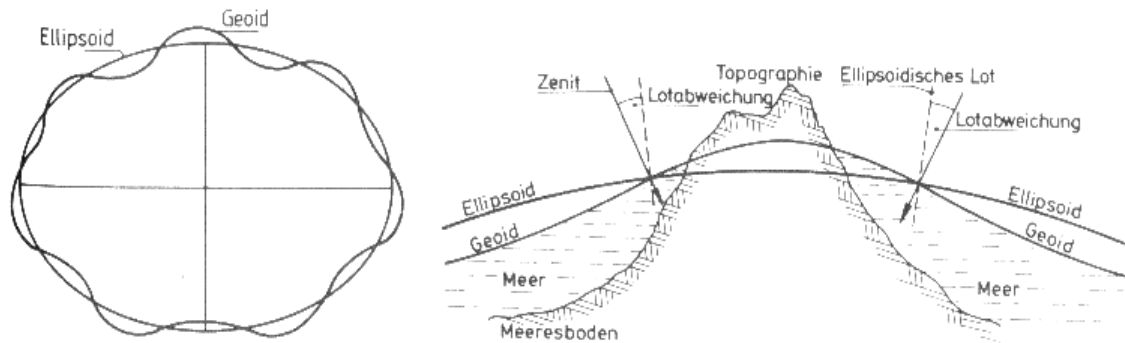


Abbildung 3: Beziehung zwischen Geoid und Ellipsoid (Seeber, 1989)

Die Abweichung des Geoids vom gewählten Referenzellipsoid heißen Geoundulationen. Diese können für ein globales Referenzellipsoid bis zu 100 m betragen.

Daher ist es notwendig, dass für die gemeinsame Behandlung von dreidimensionalen Positionen der Satellitengeodäsie und ihrer Transformation in terrestrische Positionen die lokale Geoidundulation bekannt sein muss. Zusätzlich gibt es neben den globalen Referenzellipsoiden, von dem sich z.B. das WGS-84 ableitet auch lokal berechnete, bestanschließende Ellipsoide, welche sich auf nur eine bestimmte Region beziehen und so die Grundlage lokaler Landesvermessungssysteme darstellen. Die Beziehung zwischen einem solchen lokalen Ellipsoid und dem globalen geodätischen Bezugssystem heißt Geodätisches Datum (z.B. für Gauss-Krüger mit Rechts- und Hochwerte ist dies Potsdam Bezug auf das Bessel-Ellipsoid).

Funktionsweise

TRANSIT bot mit sechs Satelliten eine nur stark eingeschränkte Verfügbarkeit, da nur zu wenigen Augenblicken optimale Konstellationen von drei bzw. vier Satelliten zur exakten, dreidimensionalen Positionsbestimmung gegeben waren. Eine derartige Positionsbestimmung war mittels der alten Systeme nicht weltweit durchführbar.

Um eine kontinuierliche globale Abdeckung mit Satelliten zu erreichen, wurde ein Orbit-System berechnet, welches an jedem Punkt der Erde mindestens vier Satelliten für die exakte GPS-Positionsbestimmung zu jeder Tages- und Nachtzeit gewährleistet. Für eine Mindestumsetzung des GPS-Konzeptes wurden 24 Satelliten geplant, welche in einem ca. 12-stündigen Kreisorbital in 20.200 km Höhe mit 55° Inklination zur Äquatorebene die Erde in Vierergruppen pro Orbit gleichverteilt umkreisen (die Orbits sind gegeneinander um 60° geneigt). Man bezeichnet die 21 ständig aktiven Satelliten als Block II-, die Mindestreservesatelliten (drei, heute acht) als Block IIA-Typen.

Neben einem für rein militärische Zwecke reservierten Präzisionssignal (P-Code) wurde ein weiteres 'ungenaueres' Signal (C/A-Code) für zivile Zwecke geschaltet, welches von jedem privaten oder kommerziellen Nutzer empfangen werden kann.

Die Übertragungsfrequenzen werden in einem zufälligen Impulscode, dem PRN-Code (Pseudo Random Noise Code), moduliert. Die Master Control Station der Satelliten befindet sich in Colorado Springs, USA.

Prinzipiell erhöht jeder zusätzlich 'sichtbare' Satellit die momentane Positionierungsqualität erheblich, da auf der Erde lokal auch mit ungünstigen topographischen Verhältnissen gerech-

net werden muss, welche während der terrestrischen GPS-Messungen zur Abschattung einer oder mehrerer der vier zwingend erforderlichen Satelliten führen kann.

Am 17. Juli 1995 wurde offiziell die endgültige Betriebsbereitschaft erklärt. 1997 befanden sich bereits 26 Satelliten im Orbit, so dass man (je nach lokalen Bedingungen) meist deutlich mehr als 4 Satelliten (durchschnittlich etwa 5-8) mit ausreichender Signalqualität zur Positionsberechnung empfangen konnte. Diese hohe Anzahl von Trabanten erlaubt eine zuverlässige Messung von geographischer Länge, Breite, Höhe, Geschwindigkeit, Richtung der Bewegung und speziellerer Parameter.

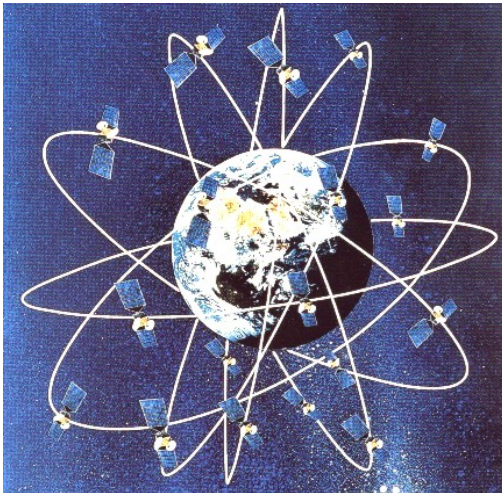


Abbildung 4: GPS-Satellitenorbits (Kumm, 1997)

Mitte der Neunziger Jahre gab man das ursprünglich rein militärisch ausgerichtete GPS-Satellitensystem in einer modifizierten Form auch für die zivile Nutzung frei, da die Planungs- und Betriebskosten des Gesamtsystems so stark angestiegen waren, dass sie politisch im Hinblick auf eine rein militärische Nutzung nicht mehr vertretbar waren. Diesem Umstand verdanken alle nicht-militärischen Nutzer die weltweit freie Verfügbarkeit des zivilen Signals (C/A Code = coarse acquisition) zur Positionsbestimmung. Der hochauflösende Präzisionscode (P-Code (Precise)) bleibt weiterhin der militärischen Nutzung vorbehalten und kann nur von militärischen Empfängern verarbeitet werden.

GPS-Segmente

Das GPS-System lässt sich in drei unterschiedliche Segmente gliedern, welche in ihrer Funktionalität aufeinander abgestimmt sind:

- Weltraumsegment
- Bodensegment
- Nutzersegment

Letzteres ist im Gegensatz zu den beiden Betreibersegmenten stark nutzer- bzw. zweckdefiniert und damit technisch sehr variabel gestaltet.

Das Weltraumsegment

Die Anwendung der GPS-Technik hängt wesentlich von der Konstellation und Charakteristik der Satelliten ab. Parameter wie Bahnhöhe, Bahnneigung, Symmetrie und Gleichverteilung der Satelliten definieren das sogenannte Weltraumsegment des GPS-Systems. Wie bereits angedeutet kreisen momentan 28 Block II/IIA-Satelliten (inkl. Reserve) in einem kreisförmigen, 20.183 km hohen Orbit um die Erde. Die einzelnen Bahnen sind 55° gegen den Äquator

und 60° gegeneinander geneigt. Jedes Orbit ist mit mindestens vier Satelliten bestückt, wobei jeder Satellit eines identischen Orbits 120° geographischer Breite gegen seinen Vor- bzw. Nachläufer versetzt ist. Diese spezielle Bahngeometrie gewährleistet, dass zu jeder Zeit ausreichend viele Satelliten vom GPS-Empfänger am Boden empfangen werden kann.

Die jeweilige aktuelle orbitale Systemkonfiguration der Satelliten kann auch online (<http://liftoff.msfc.nasa.gov/realtime/jtrack/3d/JTrack3d.html>) abgerufen werden.

Die Umlaufdauer eines jeden Satelliten beträgt ca. 12 Stunden. Folge ist eine sich täglich im Vier-Minuten-Takt gegenüber UTC (Weltzeit = Universal Time Coordinated) verschiebende Konstellation der Satelliten. Daraus ergibt sich heute i.d.R. eine Sichtbarkeit von durchschnittlich 10 Satelliten oberhalb 10° Beobachtungshöhe (Mindestsichthöhe). Die Orbitalinformation wird vom Satelliten direkt an den Empfänger und an die Kontrollstationen gesandt, wobei die Zuschaltung einer Selective Availability (SA) für den zivilen Bereich bis vor kurzem eine Positionsbestimmung mit dem C/A-Code weiter einschränkte.

Die 845 kg schweren Satelliten (Abbildung 5) besitzen eine mittlere Lebensdauer von ca. 8 Jahren und werden über Solarflügel mit Strom versorgt. An Bord sind ein Radio-Transceiver, eine Cäsium/Rubidium-Atomuhr, div. Mikroprozessoren und weiteres Steuerequipment untergebracht. Jeder Satellit verfügt über ein eigenes, kleines Antriebssystem zur Lagekorrektur. Die Hauptaufgaben des GPS-Satelliten sind:

- Empfangen und Speichern, der vom terrestrischen Kontrollsegment übertragenen Informationen
- Einfache Datenverarbeitung mittels Mikroprozessoren
- Vorhalten einer auf 10^{-13} Sekunden genauen Uhrzeit (Atomuhr)
- Bahnkorrekturen durch Steuerungselemente

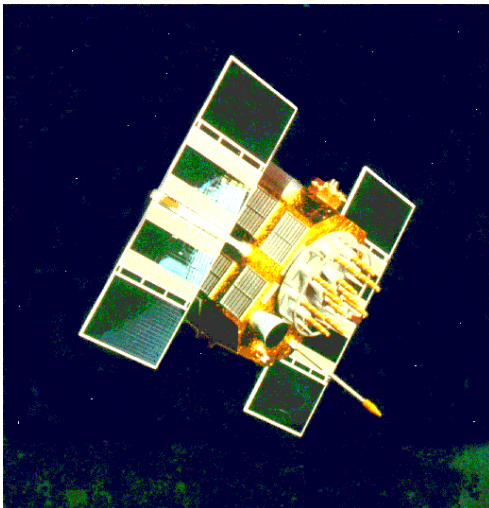


Abbildung 5: NAVSTAR-GPS-Satellit im Orbit (Brinkkötter-Runde, 1995)

Das Kontrollsegment

Die GPS-Satelliten werden über unterschiedliche Bodenstationen in ihrer Funktionalität überwacht und gesteuert. Dieses sogenannte Kontroll- oder auch Bodensegment nimmt folgende Aufgaben wahr:

- Kontrolle des Gesamtsystems
- Datenverarbeitung und Datenübermittlung
- Bestimmung der GPS-Systemzeit (Atomuhr)

- Vorausberechnung der Navigationsdaten und Bahnephemeriden bzw. Steuerung der Satelliten

Die GPS-Satelliten werden über unterschiedliche Bodenstationen in ihrer Funktionalität überwacht und gesteuert. Das Operationelle Kontrollsegment (OCS) besteht aus der Master Control Station in Colorado Springs, CO, USA, drei Monitorstationen mit Bodenantennen in Diego Garcia, Ascension und Kwajalein sowie zwei weiteren Monitorstationen in Colorado und Hawaii (Abbildung 6).

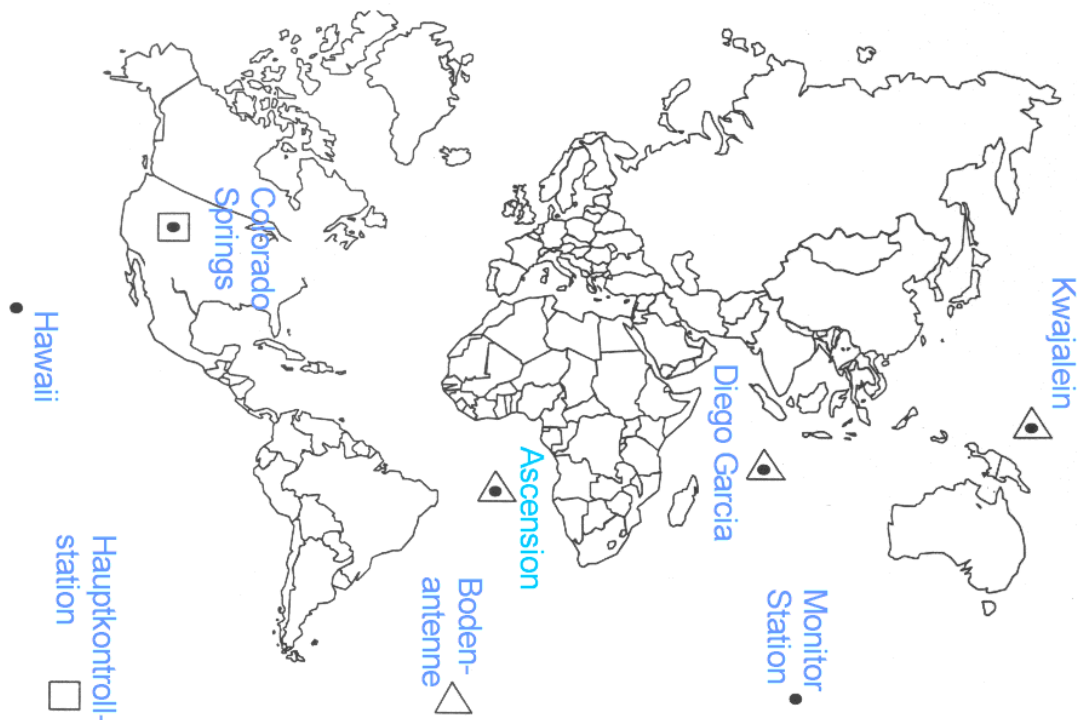


Abbildung 6: Das GPS-Kontrollsegment (modifiziert nach Brinkkötter-Runde, 1995)

Aufgabe der Monitorstationen ist das Empfangen der Signale vom Satelliten und das Berechnen der Entfernungsdaten. Diese werden dann an die Master Control Station weitergeleitet, welche dann die genauen Satellitenephemeriden (Bahnparameter) ermittelt und evtl. Bahnkorrekturen einleitet. Zusammen mit der Zeitinformation (Atomuhren) werden diese dann über die Bodenantennen an den Satelliten zurückgesandt. All diese Informationen sendet der Satellit nun wiederum an die Empfänger der GPS-Nutzer, wo letztlich die Positionsbestimmung erfolgt.

Das Nutzersegment

Das Nutzersegment stellt von allen drei notwendigen Segmenten des Gesamtsystems den wohl breitgefächerten bzw. individuell verschiedenartigsten gestalteten Hardware-Bereich dar. Prinzipiell wird das Segment aber immer durch einen GPS-Empfänger repräsentiert, der je nach Typ, Bauart und Anwendung (zivil oder militärisch) in technischen Details voneinander abweicht.

Die Hauptunterschiede bei GPS-Empfängern liegen in der Art der Signalakquisition und Datenverarbeitung: Einfrequenzempfänger arbeiten immer nur mit dem sog. L1-Signal (1575,42 MHz), Doppelfrequenzempfänger entsprechend mit dem L1- und L2-Signal (1575,42 + 1227,60 MHz). Nach Petersen (1990) können beide Typen empfangstechnisch in drei Klassen eingeteilt werden:

- **Sequentielle Empfänger:** Diese Empfänger verfügen über ein oder max. zwei Hardwarekanäle mit denen die Signale mehrerer Satelliten nur zeitversetzt empfangen werden können. Dies wirkt sich negativ auf die Dauer und Genauigkeit der Positionsbestimmung aus (entsprechende Geräte stammen aus der Frühzeit der Entwicklung und finden heute kaum noch Verwendung)
- **Multiplexempfänger:** Obwohl dieser Typ nur einen Hardwarekanal besitzt, kann im Millisekundentakt auf die Signale aller verfügbaren Satelliten umgeschaltet werden, was zu einer Pseudo-Mehrkanalfunktionalität führt. Die Datenakquisition läuft rascher, die Position ist genauer (dieser Empfänger findet noch vereinzelt Einsatz, wird aber auch zunehmend vom Markt verdrängt)
- **Mehrkanalempfänger:** Dieser heute am weitesten verbreitete Empfängertyp arbeitet synchron mit bis zu 12 Kanälen. Zusätzlich wird oft ein sequentieller Kanal zur Überwachung und Auswahl aller zur Verfügung stehenden Satelliten herangezogen. Die Datenakquisition und Positionierung erfolgt (fast) in Echtzeit und ist sehr genau.

Neben der unterschiedlichen Anzahl der zum Empfang des Satellitensignals notwendigen Kanäle spielt auch die Art der Daten-/Signalverarbeitung eine wichtige, typabhängige Rolle. Hier unterscheidet Seeber (1989)

- codeabhängige Empfänger von
- codefreien Empfängern

Codeabhängige Empfänger können nur Signale verarbeiten, deren Code sie kennen um so an die Navigationsinformation zu gelangen. Codefreie Empfänger benötigen diese Information nicht und können auch unterschiedlich verschlüsselte Signale auswerten. Handelsübliche GPS-Empfänger sind meist codeabhängige Geräte, die nur den ungenauen C/A-Code empfangen können.

Grundprinzip der GPS-Navigation

An dieser Stelle soll ein kurzer allgemeiner Abriss der Grundprinzipien der GPS-Messung und der daraus abgeleiteten Ortsbestimmung erfolgen.

Das GPS-System ist so konzipiert, dass eine Positionsbestimmung in x-, y- und z-Richtung (Punktbestimmung) überall auf der Erde jederzeit möglich ist. Die Position wird aus der Messung von Laufzeiten der Signale des Satelliten zum GPS-Empfänger abgeleitet. Es handelt sich also prinzipiell um eine Messung der **Distanzen** zwischen GPS-Empfänger und Satelliten.

Stellt man sich die Positionen der Satelliten zu einem bestimmten Zeitpunkt im All eingefroren vor, kann ihre exakte stellare Position durch die Ephemeriden des Orbits bestimmt werden. Wenn die von ihnen ausgesandten Signale (sog. Almanachdaten) vom GPS-Empfänger aufgenommen werden, haben diese eine unterschiedlich lange Laufzeit hinter sich, aus denen die Distanz zu den jeweiligen Satelliten abgeleitet werden kann. Parallel dazu erzeugt der Empfänger selber ein Signal gleicher Kennung und synchronisiert dieses mit den empfangenen Informationen. Voraussetzung ist die zeitliche Gleichschaltung der Satelliten und des Empfängers. Die abgeleitete Phasenverschiebung führt zu einer weiteren zeitlichen Korrekturkomponente, welche in die Berechnungen der Laufzeiten einfließen.

Betrachtet man nur **einen** einzelnen Satelliten, so zeichnet das ausgesandte Signal eine Kugelsphäre um den Satelliten herum nach, auf dessen Oberfläche das Signal gleichzeitig empfangen werden kann (engl.: range). Analog zur terrestrischen Navigation könnte man hier von einer Standfläche oder, auf die Erdkugel bezogen, von einer kreisförmigen Standlinie 'gleicher Empfangszeiten' sprechen, auf der sich ein Signal empfangen lässt (Abbildung 7).

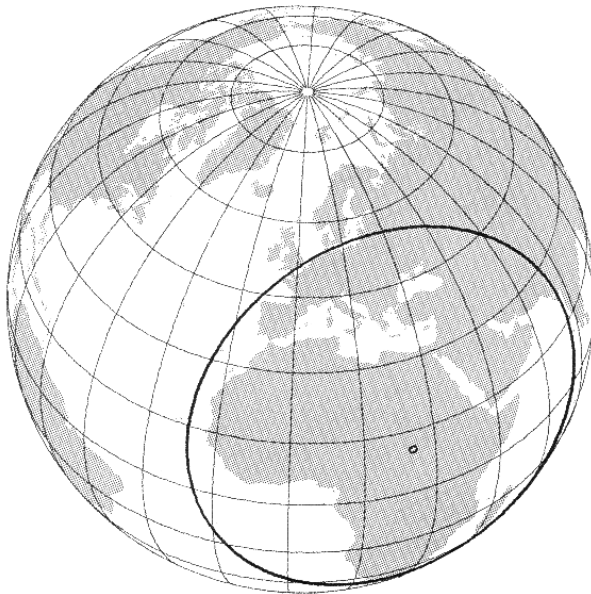


Abbildung 7: Schematische Darstellung einer zeitgleichen, kreisförmigen GPS-Standlinie, gegeben durch ein zeitcodiertes Signal, dessen Ursprung im Orbit über Afrika liegt (Kumm, 1997)

Eine kreisförmige Standlinie macht noch keinen Ort (Position). Es kann lediglich davon ausgegangen werden, dass man sich irgendwo auf dieser Linie zum gegebenen Zeitpunkt mit seinem Empfänger befindet. Wird nun simultan ein Signal eines **zweiten** Satelliten empfangen, kommt eine zweite kreisförmige Standlinie hinzu, welche die mögliche Position theoretisch auf zwei gemeinsame Schnittpunkte mit der ersten Standlinie einschränkt (Abbildung 8).

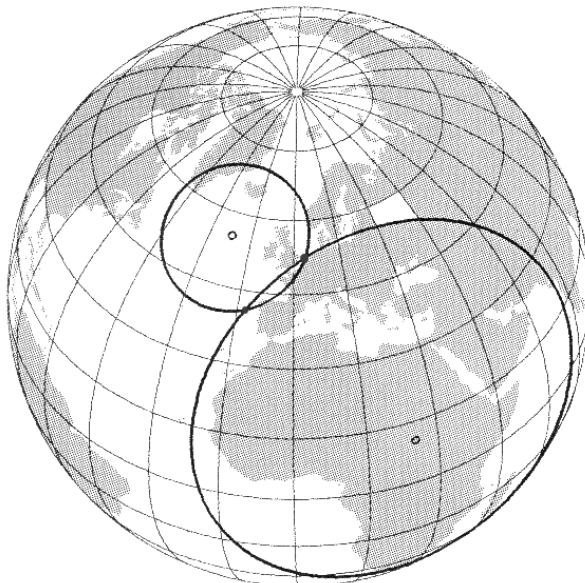


Abbildung 8: Schematische Darstellung eines Verschnitts zweier kreisförmiger GPS-Standlinien, gegeben durch Signale, deren Ursprünge im Orbit über Afrika und S' von Island liegen. Die unterschiedlichen Kreisdurchmesser beziehen sich auf die unterschiedlichen Laufzeiten der Signale gleicher Zeitkennung (Kumm, 1997)

Die theoretisch endgültige Positionsbestimmung kommt nun über die Einbindung einer **dritten** Standlinie mit definierter Zeitkennung zustande (Abbildung 9). Grundvoraussetzung ist die absolute Zeitsynchronisation der Satellitenuhren, ihrer Signale und die des GPS-Empfängers(-uhr). Das ausgesandte Signal trägt neben der Orbitinformation (Ephemeriden, Almanachdaten) des Satelliten immer einen Zeitmarker, der es dem Empfänger ermöglicht seine Laufzeit mit anderen Signalen identischer Zeitmarkierung, aber unterschiedlichen Ursprungs zu vergleichen und die Phasenverschiebung zu errechnen. Weiterhin werden die Signale mit der internen Zeitmessung des gesamten GPS-Systems verglichen und auf Verschiebungen analysiert. Hierfür sind die Satelliten mit genauen Atomuhren ausgestattet, während die GPS-Empfänger mit herkömmlichen Quarzuhren auskommen müssen. In der Praxis ergeben sich hieraus erste Genauigkeitsunterschiede(-fehler) bzgl. der Zeitmessung, welche ihrerseits zu Schwankungen in der Positionsberechnung (Fehlerdreieck) führen.

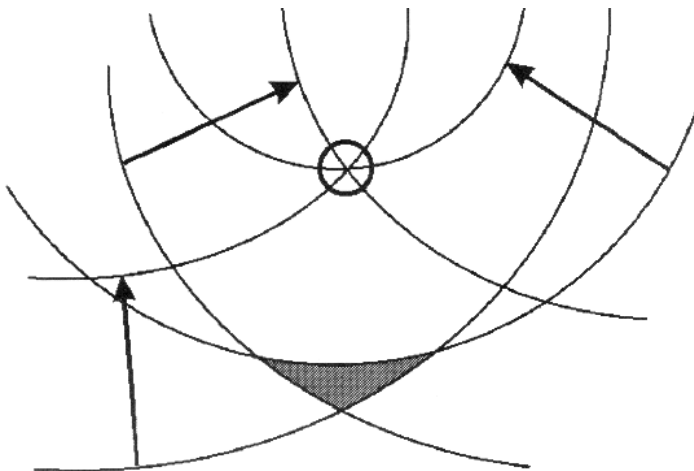


Abbildung 9: Schematische Darstellung eines durch Zeitverschiebung auftretenden Fehlerdreiecks bzgl. einer Position gleicher Zeitkennung und dem durch Korrekturrechnungen theoretisch ermittelten Schnittpunkt der drei kreisförmigen GPS-Standlinien zum endgültigen Standort (Kumm, 1997)

Der Zeitversatz zwischen Sendersignal und GPS-Empfänger wird auch als 'offset' oder 'bias' bezeichnet. Der Offset eines jeden GPS-Empfängers ist apparatetechnisch bedingt (Uhr) und verursacht eine leichte positive oder negative, aber in jedem Fall fehlerhafte Verschiebung in der Distanzmessung. Letztere kann nur durch die simultane Messung eines **vierten** Satelliten korrigiert werden, da seine Pseudodistanz eine Korrektur des Offsets im GPS zulässt (allerdings kamen zum Offset noch gewollte Fehler der Betreiber, z.B. die SA-Funktion hinzu. Zusätzlich erzeugt jeder GPS-Empfänger einen eigenen Signalcode, der mit den Satellitendaten synchronisiert wird und so weitere Informationen über den vorliegenden Offset liefert.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die Positionsbestimmung mit Hilfe des GPS-Systems über die exakte Bestimmung der Laufzeiten von Signalen zum Empfänger, der daraus abgeleiteten Distanz zu den jeweiligen Satelliten und einer zeitlichen Synchronisation von Empfänger- und Sendersignal bestimmt wird. Je mehr Signalquellen simultan gemessen werden können, desto genauer ist das Ergebnis der Positionierung des Empfängers.

Theoretisch sind mindestens drei, praktisch jedoch vier Satelliten zur Berechnung der Position in x-, y- und z-Koordinaten notwendig. Bei momentan 26 + 8 zur Verfügung stehenden GPS-Satelliten ist diese Mindestkonstellation jederzeit global verfügbar. Ausnahmen bilden topographisch sehr ungünstige Gegebenheiten (z.B. Abschattung im Gebirge, dichtes Laubdach, Häuserschluchten...). Die statistische Genauigkeit der Positionierung liegt heute nach Abschaltung der Selective Availability(SA) (vgl. Kapitel „Genauigkeit und Fehlerquellen“) im zivilen Sektor (C/A-Signal) bei etwa 10 Metern (GPS-Betrieb) bzw. im Zentimeterbereich bei

DGPS-Betrieb (Differenzielles GPS); im militärischen Sektor (P-Code) bei ca. <50 cm (nur GPS-Betrieb).

Sichtbarkeit

Für die Positionierung mittels GPS ist die sog. Sichtbarkeit hinreichend vieler (mindestens vier) Satelliten von großer Bedeutung. Eigentlich sind mit dem Begriff 'Sichtbarkeit' die maximale Ausdehnung des zu empfangenden Signalkegels gemeint. Als Grundregel gilt immer: Je günstiger die geographischen, topographischen und morphologischen Rahmenbedingungen des Beobachtungsstandortes in Bezug zum Strahlungskegel der Satelliten, desto besser der Empfang und die Qualität des zur Berechnung der Position notwendigen Signals. Maßgeblich ist die 'quasioptische' Sichtverbindung zu den Trabanten.

Satellitenkonstellationen

Aus der komplexen Bahnverteilung aller GPS-Satelliten (sechs Orbits) lassen sich auf Anhieb nicht die Sichtbarkeitsverhältnisse vom Beobachter zu den einzelnen Trabanten klären. Steht ein Satellit direkt über dem Beobachter (also im Zenit), befindet sich man sich momentan direkt auf dem sog. Subsatellitenpunkt (Abbildung 10).

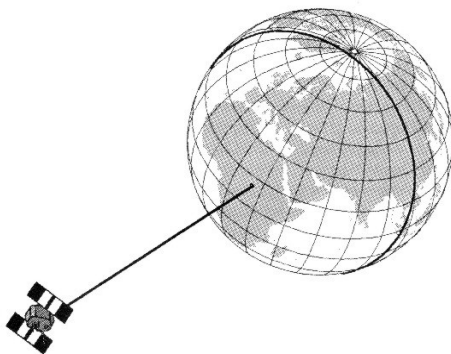


Abbildung 10: Die Verbindungsstrecke Satellit-Erdmittelpunkt durchstößt die Erdoberfläche am Nadir- oder Subsatellitenpunkt(Kumm, 1997)

Wer kann nun neben dem Beobachter am Subsatellitenpunkt diesen Trabanten noch betrachten? Grundsätzlich jeder, der innerhalb des Ausleuchtungsbereiches zum selben Zeitpunkt seinen Standort hat. Im obigen Fall stand der Satellit zur einer gegebenen Zeit direkt über Zentralafrika. Betrachtet man nun die max. Signalausbreitung in der Mercator-Projektion wird deutlich, dass zu diesem Zeitpunkt eine theoretische Empfangsmöglichkeit für diesen Satelliten von Thailand über Brasilien bis nach Grönland und Sibirien bestand.

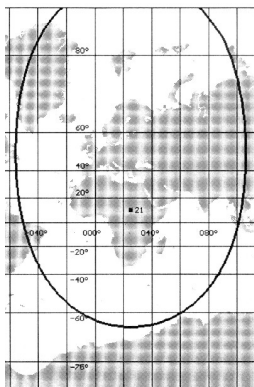


Abbildung 11: Empfangsgebiet eines Satelliten über Zentralafrika

Der sphärische Radius des Signalkegels beträgt etwa 8200 km, wobei die am Rande der Kugelsphäre befindlichen Beobachter mit den stärksten Qualitätseinbußen hinsichtlich des Empfanges rechnen müssen, da das Signal unter zunehmend flacher werdenden Winkeln zum GPS-Empfänger gelangt. Für die Beobachter am Rande der Signalsphäre stände der Satellit genau in der Kimm (d.h. am Horizont = 0° Azimutalhöhe). Für einen ausreichenden Empfang sollten jedoch mindestens 15° über dem Horizont angepeilt werden.

Verfügbarkeit und Signalstärke

Die Verfügbarkeit und Signalstärke einzelner Satelliten wird dem Beobachter meist über die Empfänger-Software automatisch in graphischer Form dargeboten. Somit wird dem Nutzer sofort eine Möglichkeit zur Einschätzung der Qualität des Signals und den lokalen Empfangsbedingungen gegeben. Üblicherweise geschieht dies über

- eine sphärische Azimutalprojektion der Satellitenstandorte und
- einem Balkendiagramm hinsichtlich der symbolhaften Feldstärke des Signals der einzelnen Satelliten (Abbildung 12)

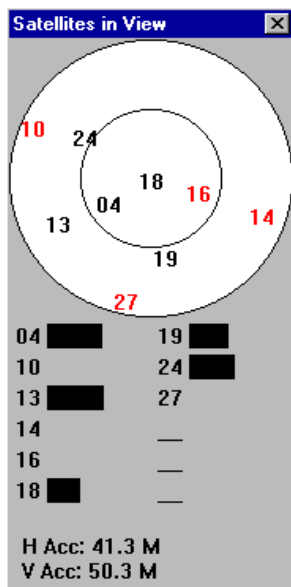


Abbildung 12: Azimutalprojektion der Satellitenkonstellation über dem AVZ, Robert-Koch-Str. 28 vom 24.10.98 um 12.00 MEZ. Empfangen wurden Sat.-Nr. 4, 13, 18, 19 und 24. Im NE-Sektor konnten keine Satelliten empfangen werden, da hier totale Abschattungsverhältnisse vorherrschten (Interface: FUGAWI)

Da sich die Satelliten in ihrem Orbit ständig über der Erde in Bewegung befinden und der Globus selbst eine Eigenrotation ausübt, verändern sich die Konstellationsverhältnisse für den Betrachter laufend. Bezogen auf einen ortsfesten Standpunkt kann erst nach 24 Stunden mit einer annähernd gleichartigen Konstellation von Satelliten gerechnet werden, da sich die Erde bis dahin einmal um ihre Achse gedreht hat und die Satelliten zwei volle Orbitalumläufe hinter sich gebracht haben.

Signale und Codes

Sendefrequenzen

Für das Verständnis der Funktionsweise einer Abstandsmessung zwischen Bodensegment (GPS) und Weltraumsegment (Satelliten) ist die Kenntnis der Signalstrukturen im Global Positioning System wichtig. Jeder der momentan 32 Satelliten sendet Navigationssignale (codes), Navigations- sowie Systemdaten (messages) aus. Die Informationen werden auf zwei Sende- oder

Trägerfrequenzen, den sogenannten PRN-Sequenzen (Pseudo-Random-Noise), aufmoduliert (Abbildung 13).

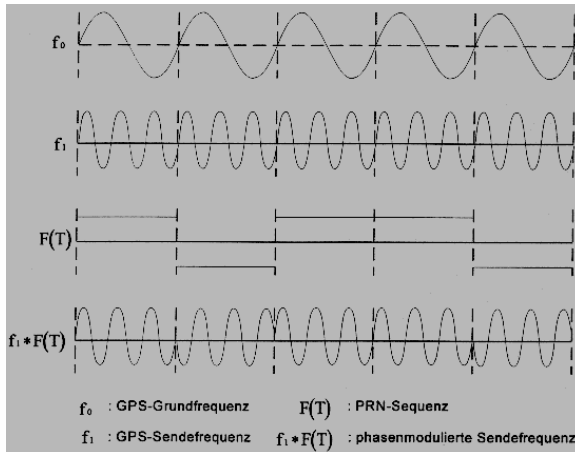


Abbildung 13: Phasenmodulation der GPS-Signale (Brinkkötter-Runde, 1995)

Die Übertragungsfrequenzen für die Positionsdaten liegen bei $L_1 = 1575,42$ für C/A-Code (Coarse Acquisition) und P-Code (Precise), und $L_2 = 1227,6$ MHz nur für P-Code. Beide Trägerfrequenzen werden in einem zufälligen Impulscode, dem PRN-Code, moduliert (Pseudo Random Noise Code) und stehen für militärische (P-Code) bzw. zivile (C/A-Code) Nutzungen zur Verfügung. Beide Frequenzen lassen sich aus der durch den Satellitenoszillator generierten Grundfrequenz von $L_0 = 10,23$ MHz ($\lambda = 29,3\text{m}$) durch Multiplikation ableiten.

Der Frequenzbereich des GPS-Systems liegt im sog. L-Band, das sich von 1-2 GHz erstreckt und damit im Gegensatz zur Ultra-Kurz-Welle (UKW: 30-300 MHz) im Mittelwellenbereich liegt (Zentimeterwelle). Als Multiplikatoren gelten für $L_1 = 154 \times L_0$ und für $L_2 = 120 \times L_0$ (entsprechend 1575, 42 MHz bei $\lambda = 19,05$ cm bzw. 1227,60 MHz bei $\lambda = 24,45$ cm).

Für die Wahl von Frequenzen im L-Band sprechen nach Hartl & Thiel (1984) folgende fünf Gründe:

- Frequenzen über 2 GHz machen den Einsatz von Richtantennen in der Empfangseinheit (GPS) erforderlich
- Die gleichzeitige Auswertung von zwei Trägerfrequenzen mit einem Wellenlängenabstand von etwa 20% ermöglicht die Erfassung des Verzögerungsverhalten in der Ionosphäre (Störungskorrekturen werden möglich)
- Ionosphärische Verzögerungen liegen in Bereichen <100 MHz und >10 GHz enorm hoch; die gewählten GPS-Frequenzen stellen also einen Kompromiss dar
- Elektromagnetische Wellen weichen in ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit um so stärker von der Lichtgeschwindigkeit ab, je kleiner ihre Frequenz ist
- PRN-Codes benötigen große Bandbreiten für die Code-Modulierung auf die Trägerfrequenz (C/A-Code 2 MHz, P-Code 20 MHz)

Codemodulation

Die oben beschriebenen Trägerfrequenzen werden zum Zwecke des Informationstransportes mit einer Folge positiver und negativer Impulse, einem sog. Code moduliert. Da die Folge der negativen und positiven Impulse beliebig gewählt werden kann, spricht man auch von einem quasi-zufälligen Signal oder dem PRN-Code. Die Frequenz L_1 trägt dabei den C/A-Code und den P-Code, L_2 nur den P-Code! Nicht autorisierte (i.R. nicht militärische) Benutzer haben nur Zugang zum C/A-Code oder dem Standard Positioning Service (SPS), nicht zum PPS (Precise Pos. Syst.).

An dieser Stelle soll der **C/A-Code** genauer betrachtet werden. Es handelt sich bei dem ca. 1000 Mikrosekunden langen Code um einen bipolaren Code (d.h. mit positiven und negativen Amplituden mit den Werten +1 oder -1; bzw. auch NRZ-Code = Non Return Zero).

In Abbildung 11 ist ein Ausschnitt des C/A-Codes wiedergegeben:

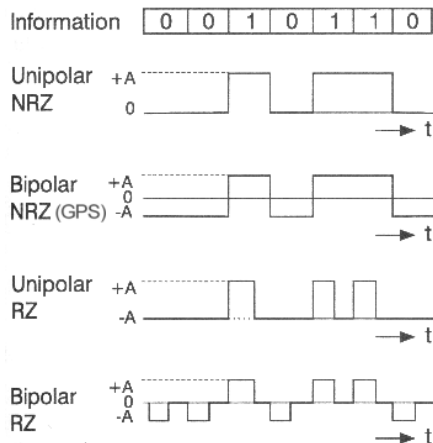


Abbildung 14: Binäre Signale und das GPS-Signal (Mansfeld, 1998)

Die Impulse sind binäre Zeichen (z.B. Bits). Ihre determinierte Folge wird als Code bezeichnet. Eine spezielle Art der determinierten Impulsfolgen sind die Pseudozufallsfolgen mit einer verhältnismäßig großen Länge. Die Impulsfolge unterliegt einer Regel, wie z.B. einem algebraischen Polynom, das zur Entschlüsselung benötigt wird und den Empfangseinheiten bekannt ist.

Der C/A-Code enthält etwa 1000 positive und negative Impulse (Bits) von je einer Mikrosekunde Dauer. Die vollständige Codelänge beträgt so etwa 300 km ($0,001 [s] \times 300.000 \text{ km/s} [c]$). In einer Sekunde wird so der C/A-Code 1000 mal gesendet (oder 1000×1000 Bit). Zusätzlich wird eine Navigationsnachricht mit 50 Bit/s der Frequenz aufmoduliert was bei einer Gesamtlänge der Nachricht von 1500 Bit zu einem Übermittlungszeitraum von 30 Sekunden führt. Der gesamte 1500 Bit Datenblock wird auch als Frame ('Rahmen') bezeichnet. Ein Rahmen ist in fünf Unterrahmen (Subframes) zu je zehn Worten a 30 Bit aufgeteilt. Jeder Unterrahmen beginnt mit zwei Spezialworten:

- Telemetry Word (TLM), mit Auskunft über Bahnkorrekturen der Satelliten
- Hand Over Word (HOW), übermittelt den Zeit-Count, der alle 1,5 Sekunden den Beginn eines Datensatzes in Bezug zur GPS-Zeit festlegt

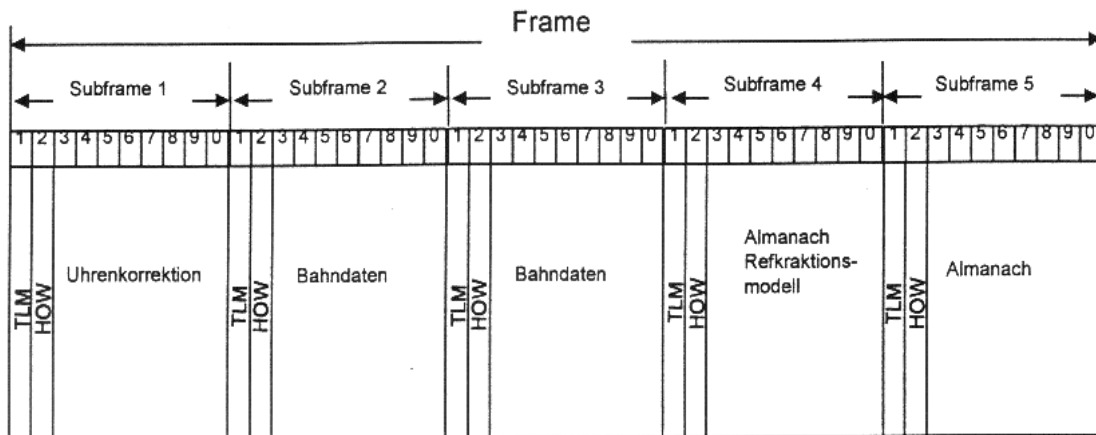


Abbildung 15: Generelle Struktur der GPS-Navigationsdaten (Brinkkötter-Runde, 1995)

Ein Frame kann in Bezug zu seinem Inhalt in drei Blöcke gegliedert werden: Der erste Block entspricht dem ersten Subframe und gibt Informationen über Zustand des Satelliten (Health), Alter der Uhrendaten (Age of Data Clock = AODC), Parameter zur Berechnung des Uhrenfehlers und die GPS-Wochennummer an den Empfänger weiter. Block Zwei umfasst Subframe 2-3 und enthält die Parameter zur Berechnung der Ephemeriden und Korrekturparameter zur ionosphärischen Laufzeitverzögerung. Der letzte Datenblock beinhaltet Unterrahmen 4 und 5 mit den sogenannten Almanachdaten, die in vereinfachter Form Informationen über die Bahnparameter aller Satelliten, deren technischen Zustand, ihre momentane Konfiguration, Identifikationsnummer u.ä. beinhalten.

Die ersten drei Subframes werden alle 30 Sekunden aktualisiert. Der Almanach benötigt für eine vollständige Übertragung weitere fünfzig Subframes. Die Übertragung dauert demnach 12,5 Minuten.

Die Codelänge und Übertragungsdauer des P-Code ist aufgrund der detaillierten Information um ein Vielfaches länger als der C/A-Code: Er benötigt theoretisch 267 Tage für eine vollständige Übermittlung, wobei in der Praxis jedoch nur ein siebentägiges Fragment pro Satellit ausgesandt wird. Wie detailliert hier die Information ist, wird deutlich, wenn man sich zusätzlich vor Augen führt, dass ein Bit nur 0,1 Mikrosekunden zur Übertragung im P-Code benötigt.

Atomuhr-Grundfrequenz	10.23 MHz
L1-Trägersignal	154 * 10.23 MHz
Frequenz	1575.42 MHz
Wellenlänge	19.05 cm
L2 Trägersignal	120 * 10.23 MHz
Frequenz	1227.60 MHz
Wellenlänge	24.45 cm
P-Code	
Frequenz	10,23 MHz (Mbps)
Wellenlänge	29.31 m
Zykluslänge	267 Tage; 7 Tageausschnitt je Satellit
C/A-Code	
Frequenz	10.23 MHz (Mbps)
Wellenlänge	293.1 m
Zykluslänge	1 Millisekunde
Datensignal-Frequenz	50 bps
Zykluslänge	30 s

Tabelle 1: Vergleich der P- und C/A-Signal-Charakteristik (Brinkkötter-Runde, 1995)

Genauigkeit und Fehlerquellen

Codebeeinflussung

Das DOD (Department of Defense) hat seit der Freigabe des GPS-Systems für die zivile Nutzung darauf hingewiesen, dass aus Gründen der Sicherheit der USA die im System verfügbare hohe Genauigkeit nur den Militärs zur Verfügung steht. Für alle anderen Nutzer wird die Genauigkeit der Positionierung durch gewollte Manipulationen reduziert. Allerdings wurde aus dieser Beeinträchtigung der Code-Verfügbarkeit aus ökonomischen Gründen abgestellt (seit 01.05.2000).

Die Reduzierung der Genauigkeit wurde im zivilen Bereich (C/A-Code) durch die sog. **Selective Availability (SA)**, einer Verfälschung des Empfangssignals erreicht. Genau genommen wird die Navigationsmitteilung der Satelliten (Ephemeriden, Uhrzeit, etc.) durch gewollte Schwankungen im Signal ‚verstümmelt‘. Die Veränderung der Ephemeriden ging unmittelbar als Fehler in die gemessene Pseudo-Entfernung ein. Sie wurde unregelmäßig angelegt und war deshalb nicht korrigierbar. Das Gleiche gilt nach wie vor für die Uhrzeiten: Sie werden z.T. im Minutenbereich verändert. Viele GPS-Empfänger versuchen jedoch den entstehenden Fehler durch statistische Abschätzungen in seiner Wirkung einzudämmen. P-Codes sind von der SA nicht betroffen!

Eine weitere Maßnahme schützt das System insgesamt: Das sog. Anti-Spoofing oder auch AS (spoofing = schwindeln) schirmt die L_2 -Trägerfrequenz (P-Code) elektronisch gegen Manipulationen feindlicher Kräfte ab. Eine bewusste Veränderung des P-Codes würde zu falschen Entfernungen, und damit zu falschen Positionen führen. Deshalb wird der P-Code zweifach verschlüsselt ausgesandt. Er heißt dann P(y)-Code. Eine Entschlüsselung des P(y)-Codes ist nur den autorisierten Nutzern vorbehalten (z.B. der NATO).

Fehlerarten und -einflüsse

Bei der Positionsbestimmung fließen unterschiedliche Fehler in die Berechnung ein. Grundsätzlich kann man zwischen drei wesentlichen Fehlerarten unterscheiden:

- zufällige Fehler
- grobe Fehler
- systematische Fehler

Zufällige Fehler treten meist als Folge momentaner Messbedingungen (z.B. Baumbestand, Signalabschattung, Überreichweiten, Wetterlage, etc.) auf und sind z.T. korrigierbar.

Grobe Fehler können durch unsachgemäße Handhabung eines GPS-Empfängers verursacht werden (sind also nutzerbedingt).

Systematische Fehler sind grundsätzlich physikalischer und/oder gerätetechnischer Natur. Diese Art von Fehlern wird bei der Datenverarbeitung so weit wie möglich zurückgedrängt, da man sie reproduzieren und z.T. korrigieren kann. Zu den systematischen Fehlern gehört(e) auch die künstlich erzeugte SA-Charakteristik der Signale für den CA-Code.

Fast alle Fehlertypen beeinflussen die Beobachtungsgrößen hinsichtlich der Signalausbreitung (Laufzeit-) und Empfängereigenschaften. Zusätzlich spielt die Satellitengeometrie eine erhebliche Rolle für die Güte einer Positionsmessung.

Signalausbreitung

Das Verhalten der GPS-Signale wird aufgrund der Ausbreitung des Satellitensignals durch die verschiedenen Schichten der Atmosphäre beeinflusst.

Die Ionosphäre (70-1000 km Höhe) ist mit Ionen und Elektronen gesättigt, so dass eine Beeinflussung der Ausbreitung von Radiowellen anzunehmen ist. Diese wirken sich auf Laufzeit- und Trägerphasenmessung mit unterschiedlichen Vorzeichen aus. Entsprechende Ausbreitungsverzögerungen oder -beschleunigungen sind orts-, zeit- und frequenzabhängig (ionosphärische Refraktion).

Der Einfluss der Troposphäre (troposphärische Refraktion) ist auf die unteren Luftschichten der Erde bis in eine Höhe von ca. 40-70 km gegeben. Hier kommen vor allem meteorologische Faktoren wie Wetterlage, Luftdruck, Temperatur u.ä. zum tragen. Die troposphärische Signalrefraktion lässt sich durch empirisch gewonnene Korrekturmodelle ansatzweise minimieren.

Zusätzlich kann es durch Phasenüberlagerung und Reflexion von Signalen zu Mehrwegausbreitung eines ursprünglich direkten GPS-Signals kommen. Dadurch werden Phasenfehler erzeugt, die sich auch auf die Entfernungsmessung auswirken können.

Empfängereigenschaften

Auch der Empfänger von GPS-Signalen ist technischen Rahmenbedingungen unterworfen. Das Empfängerrauschen (noise) steht in einem geräteabhängigen Verhältnis von Antenne zu Signal und wird oft als SNR (Signal-Noise-Ratio) bezeichnet. Ungünstige SN-Verhältnisse beeinflussen die Güte der gemessenen Beobachtungsgrößen.

Auch Uhrenfehler gehen direkt in die Positionsmessung mit ein: Die Atomuhren im Satelliten (Cs-Rb-Oszillatoren) weisen Fehler von nur 60 nsec, die der Quarzuhren im GPS von 20 msec auf. Dieses entspräche einer zusätzlichen (theoretischen) Erhöhung des Positionsfehlers von 18 m auf Satellitenseite bzw. 6000 km bzgl. der GPS-Seite bei ausbleibender Korrektur.

Satellitengeometrie

Nicht jede Satellitenkonstellation erlaubt eine optimale Auswertung der Signale. Die Güte einer Konstellation wird unter dem Begriff Dilution of Precision (DOP) beschrieben (Auflösung/Abschwächung der Genauigkeit).

Im dreidimensionalen Fall wird der PDOP-Wert als Gütemaß verwandt (Position DOP). Der PDOP ist als reziproker Wert des Volumens V eines gedachten Tetraeders aus 4 Satelliten + 1 Standpunkt (-ort) anzusehen.

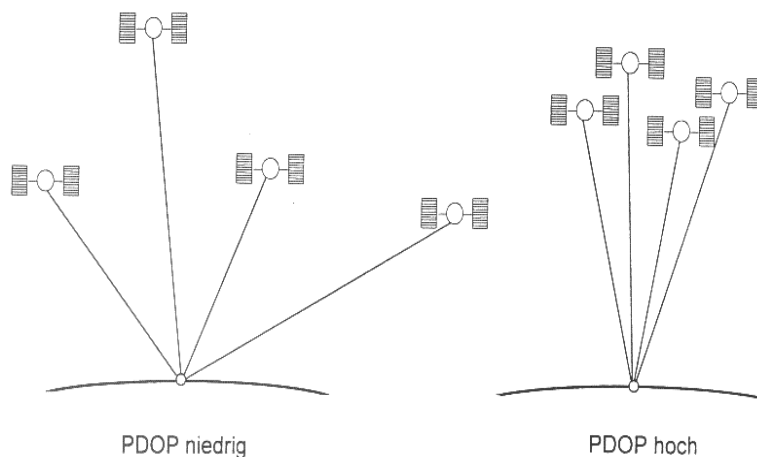


Abbildung 16: Geometrische Unterschiede zwischen guten und schlechten PDOP (Brinkkötter-Runde, 1995)

Je kleiner der PDOP ist (d.h. größer der Tetraeder, ausgenommen Extremlagen $<10^\circ$ Azimutalhöhe), desto günstiger die geometrische Satellitenkonstellation. Im Idealfall befindet sich ein Satellit genau im Zenit des Beobachtungspunktes, während die anderen drei Trabanten in einem Abstand von je 120° zueinander in Horizontnähe verweilen (oder: je enger die Satellitenkonstellation (kleines Volumen), desto unschärfer die Schnittkreisbildung der Standlinien).

Resultierende GPS-Genauigkeiten

Die Genauigkeitsangaben beziehen sich bei GPS auf Entfernungen bzw. Pseudoentfernungen, Position (3D-Ort), Geschwindigkeit und Zeit. Der Fehler bzgl. einer Position wird häufig durch eine skalare Größe angegeben. Dies ist die Abweichung im Betrag vom gemessenen Standort

zum eigentlichen geodätischen Punkt. In Tabelle 2 aufgeführte Angaben entstammen der Literatur und beruhen auf Zusammenfassungen unterschiedlicher Quellen (Mansfeld, 1998):

<u>Quelle</u>	<u>Typ der Messung (GPS)</u>	<u>Genauigkeit</u> (W=Wahrscheinlichkeit)
FRP (USA)	C/A-Code (horizontal)	< 100m (W=95%), < 300m (W=99,99%)
	C/A-Code (vertikal)	< 140m (W=95%)
	Speed	< 0,1m/s (W=68%)
Kaplan (USA)	C/A-Code (horizontal) ohne SA	< 25 m (W=95%)
	C/A-Code (horizontal) mit SA	< 100m (W=95%)
	C/A-Code (vertikal) ohne SA	< 43m (W=95%)
	C/A-Code (vertikal) mit SA	< 156m (W=95%)
Seeber (USA)	Entf. C/A-Code (horizontal) ohne SA	< 2,7m (W=95%)
	P-Code (momentan)	< 10m (W=95%)
	P-Code (Dauermessung)	< 2m (W=95%)
Daimler Benz Aerospace (D)	C/A-Code (horizontal) ohne SA	< 40m
	C/A-Code (horizontal) mit SA	< 100m
	P-Code (horizontal)	< 20m
Joint Program Office (USA)	C/A-Code (horizontal) mit SA	< 100m (W=95%)

Tabelle 2: GPS-Genauigkeiten

Es zeigt sich, dass bei zugeschalteter SA (dies ist momentan nicht der Fall) mit einem möglichen Fehler von 100 m bzgl. einer horizontalen Positionierung mittels GPS ausgegangen werden muss. Ohne SA liegt die mittlere Genauigkeit bei ca. 10 -15 Metern. Einige Softwareeinstellungen am GPS erlauben jedoch eine Reduzierung des gemessenen Fehlers mittels statistischer Methoden auf < 10m (ohne SA). Weniger fehlerbelastete Daten können nur noch mittels DGPS-Technik über den C/A-Code erreicht werden. Hier liegen die Fehler im Mittel bei < 1,5 Metern.

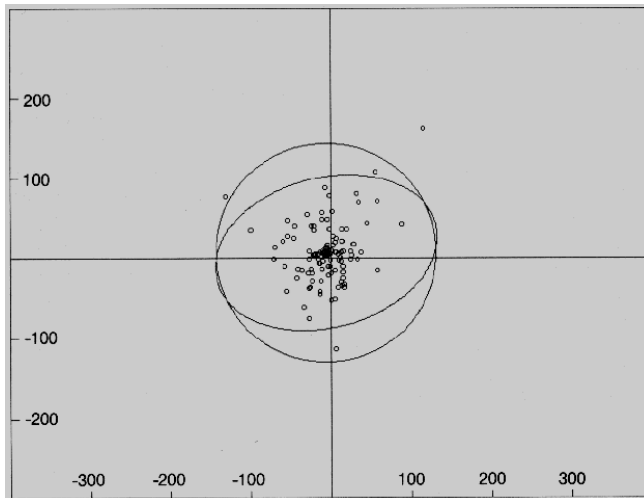


Abbildung 17: Statistische Auswertung von 100 GPS-Messungen, gleichverteilt über 24 h mit SA: Der mittlere GPS-Ort ist vom geodätischen Ort (Fadenkreuz) etwa 10 m (Skala in Metern!) nach 320° versetzt (Kumm, 1997)

Lokale Einflüsse

Außerhalb der technischen Rahmenbedingungen gibt es in der Praxis eine Vielzahl von meist topographischen bzw. morphologischen Bedingungen, die einen guten GPS-Empfang behindern oder z.T. völlig vereiteln können. Hier sollen einige wichtige Standortparameter/Grundregeln genannt werden, auf die während des Geländeeinsatzes von GPS-Anlagen bzgl. des Empfanges geachtet werden sollte:

- optimale Empfangsbedingungen sind auf 'freiem Feld' mit geringem Relief zu erwarten
- unter (belaubten, dicht stehenden) Bäumen ist bereits mit einer Beeinträchtigung der Signalstärke zu rechnen
- im Gebirge und engen Tälern kann es u.U. bereits zu starken Abschattungserscheinungen von GPS-Satelliten niedriger Azimutalhöhe kommen (dies gilt auch für hohe Gebäudefronten und Häuserschluchten)
- im DGPS-Betrieb muss neben dem GPS-Signal auch das Korrektursignal sauber, d.h. ohne Abschattung und Schwächung empfangen werden können (z.B. immer vergewissern, dass man sich innerhalb der Sendereichweite des Korrektursenders befindet, seine Qualität überprüfen, die Geländemorphologie berücksichtigen)
- große metallische Häuser- oder Konstruktionsbauteile können zu Echoeffekten und damit zur Signalverzerrung führen
- bei mobilen GPS-Einheiten mit Außenantenne ist bei Unwetter der Betrieb einzustellen (Blitzschlag, statische Störungen), insbesondere auf freiem Feld
- die unmittelbare Nähe großer Sender (z.B. Militärsender) und Hochspannungen meiden
- bei einem Hand-GPS kann bereits die ausgestreckte Armhaltung zur Verbesserung der Empfangsbedingungen beitragen
- grundsätzlich Phasen günstiger Konstellationen abwarten und nutzen (Satellitenbewegung)
- bei Fahrzeugen sollten die GPS-Antennen möglichst hoch und freistehend, aber dennoch geschützt angebracht werden

Insgesamt sollten (wenn möglich) zur GPS-Positionierung Standorte mit ungehindertem Blick in alle Himmelsrichtungen und zum Zenit gewählt werden. Grundsätzlich sollte der Beobachtungswinkel zwischen dem jeweiligen Ort und dem gerade angepeilten Satelliten größer (i.R. $> 15^\circ$) als der sog. Minimalerhebungswinkel sein (Abbildung 18).

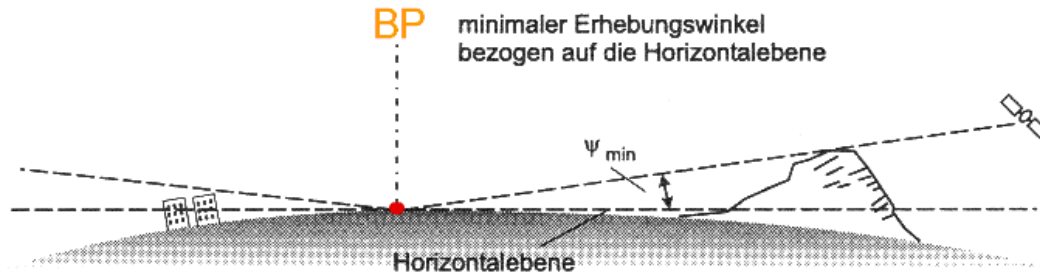


Abbildung 18: Minimaler Erhebungswinkel eines Satelliten unter Berücksichtigung der Topographie und in Bezug zur Horizontalebene eines Beobachtungspunktes; i.R. gilt $> 15^\circ$ als ausreichend (Mansfeld, 1998)

Zeitsysteme

Für die Positionsbestimmung mittels GPS spielt die Zeit eine grundlegende Rolle als Messgröße. Bei der Beobachtung der Satellitenbewegungen für die GPS-Datenauswertung unterscheiden wir vier wichtige, grundsätzliche Zeitsysteme:

Sternzeit und Weltzeit

Beide werden aus der Erdrotation abgeleitet. Die zeitabhängige Position der Erde dient der Verknüpfung von irdischen Beobachtungen innerhalb eines raumfesten Bezugssystems im Universum

Dynamische Zeit

Diese wird aus der Bahnbewegung der Erde inklusive ihrer Trabanten im Weltraum abgeleitet und ist als unabhängige Variable ein streng gleichförmiges Zeitmaß, welches auch zur Definition von Satellitenbewegungen herangezogen wird

Atomzeit

Diese ist durch atomphysikalische Abläufe definiert, bildet eine absolute Richtgröße und findet auch bei der Bestimmung von Entfernungen mit sehr hoher Genauigkeit (Signallaufzeiten) in Satellitenortungssystemen wie GPS Anwendung

Koordinierte Weltzeit

Sie dient als Basis lokaler Zeitrechnung (Universal Time Coordinated = UTC)

Die oben aufgezeigten unterschiedlichen Systeme beruhen auf der Beobachtung periodisch wiederkehrender astronomischer bzw. physikalischer Erscheinungen. Als Zeitmaß für die betreffenden Zeitskalen dient die Sekunde, mit der man die zeitlichen Abstände der Erscheinungen misst. Insgesamt wird die irdische Zeitmessung durch 45 Messstationen mit gleichmäßiger Verteilung auf der Erde erfasst, verglichen und koordiniert.

In Abbildung 19 ist der Zusammenhang zwischen Zeit- und Ortsabweichung in Bezug zur Satellitenbewegung dargestellt.

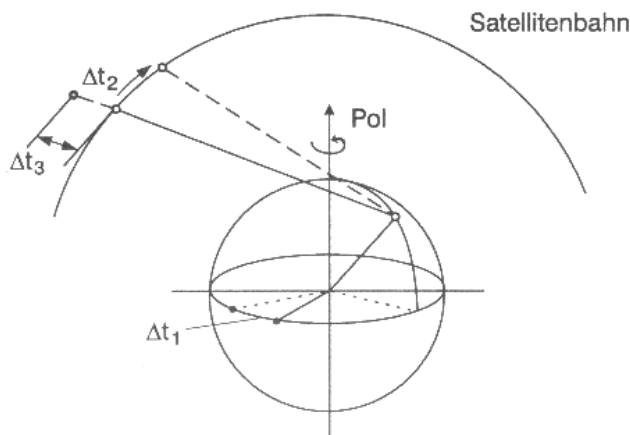


Abbildung 19: Zeit- und Ortsabweichung

Für eine Entfernungsabweichung von ca. 1cm an unterschiedlichen Orten gilt deshalb:

- Die Bewegung eines Punktes auf dem Äquator um 1cm infolge der Erdrotation entspricht einer Zeitabweichung (-intervall) von $\Delta t_1 = 2 \times 10^{-5}s$
- Die Abweichung eines Satelliten in der Bahnbewegung von 1cm entspricht einer Zeitabweichung (-intervall) von $\Delta t_2 = 2 \times 10^{-6}s$
- Die Abweichung der radialen Entfernung des Satelliten von 1cm bei der Messung der Signallaufzeiten zwischen dem irdischen Beobachtungsort und dem Trabanten entspricht einer Zeitabweichung (-intervall) von $\Delta t_3 = 2 \times 10^{-10}s$

Stern- und Weltzeit

Stern- und Weltzeit sind in ihrem Ursprung einander äquivalent, da beide von der Erdrotation abgeleitet werden, wobei der Meridiandurchgang eines Fixsterns (Frühlingspunkt am 21. März) zugrunde gelegt wird. Hier überschreitet die Sonne auf ihrer scheinbaren Bahn den Himmelsäquator von Süden nach Norden. Der Stundenwinkel ist damit abhängig von der geographischen Länge des Beobachtungsstandortes, wobei die wahre lokale Sternzeit von der mittleren lokalen Sternzeit (d.h. ohne Berücksichtigung der Notation) zu unterscheiden ist. Die Sternzeit findet überwiegend in der Astronomie Anwendung.

In der Satellitentechnik wird ein Zeitmaß benötigt, welches mit dem Lauf der Sonne verknüpft ist. Da die Sonne jedoch im Jahresverlauf unterschiedliche Stände aufweist, wird von einem mittleren Sonnenstand ausgegangen (mittlerer Stundenwinkel). Ein mittlerer Sonnentag ist das Intervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen der mittleren Sonne durch den Meridian. Die mittlere Sonnenzeit lässt sich dann als Stundenwinkel der mittleren Sonne bestimmen. Als Weltzeit ist somit der Greenwich Stundenwinkel der mittleren Sonne definiert (UT = Universal Time). Aus praktischen Gründen wurde international vereinbart, den Tagesbeginn auf Mitternacht zu legen. Damit verschiebt sich der UT-Zeitbeginn um 12 h, was bedeutet, dass UT = Greenwich mittlerer Stundewinkel (Mittag!) +/- 12 h ist.

Als lokale Normalzeit werden die notwendigen Anpassungen an UT für jeden Ort der Erde bezeichnet (z.B. Mittlere Europäische Zeit = MEZ). Die Erde wird deshalb in 24 Zeitzonen unterteilt.

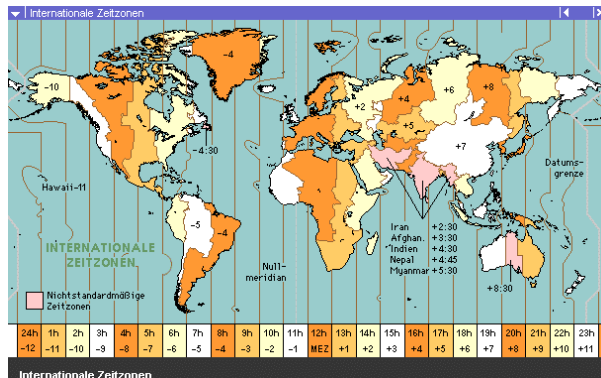


Abbildung 20: Die Zeitzone der Erde in Bezug zur MEZ=mitteleuropäische Zeit (Microsoft Encarta)

Atomzeit

Für die Bereitstellung einer universellen, 'absoluten' Zeitskala, welche den vielfältigen Ansprüchen der physikalischen Praxis entspricht und gleichzeitig auch für die GPS-Positionierung von Bedeutung ist, wurde die internationale Atomzeitskala (Temps Atomique International = TAI) eingeführt. In ihr ist die Sekunde das $9,192631770 \times 10^9$ -fache der Periodendauer des Strukturüberganges unter Strahlungsfreisetzung im Nuklid ^{133}Cs !

Die so definierte Zeit ist damit Bestandteil des SI-Systems (System International d'Unites). Die Atomzeit wurde so festgelegt, dass ihr Startpunkt am 01.01.1958 um 00.00 Uhr mit der von UT1 übereinstimmt. Aufgrund der laufend verzögerten Erdrotation treten zunehmend Unterschiede gegenüber UT auf (1986 waren dies bereits + 22,7 s). Atomuhren finden zur genauen Zeitsynchronisation mittels Cs/Rb-Normalen der GPS-Signale in den Satelliten Einsatz.

Koordinierte Weltzeit (UTC)

Um in der Praxis eine Zeitskala verfügbar zu machen, welche sich an der universellen Atomzeit orientiert und gleichzeitig an die Weltzeit UT1 angepasst ist, wurde international die Koordinierte Weltzeit (Universal Time Coordinated = UTC) eingeführt.

45 Zeitinstitute weltweit vergleichen regelmäßig ihre UTC(i) miteinander und mit unterschiedlichen Atomuhren.

In Deutschland beziehen sich fast alle elektronischen Zeitsignale auf UTC. GPS selbst besitzt jedoch eine eigene Zeitskala, die GPS-Zeit (s.u.). Beide Zeitskalen stimmten am 06.01.1980 um 00.00 Uhr überein. Da in der GPS-Zeit keine Schaltsekunden eingefügt werden, die die wachsenden Unterschiede korrigieren, nehmen die Unterschiede zu TAI bzw. UTC ständig zu (im Juni 1992 bereits 7 Sekunden).

GPS-Zeit

Die allgemeine GPS-Systemzeit wird durch eine Wochennummer und die Zahl der Sekunden innerhalb der jeweiligen Woche angegeben. Anfangsdatum ist Samstag, der 5. Januar 1980 um 0.00 Uhr (UTC). Jede GPS-Woche startet deshalb in der Nacht von Samstag auf Sonntag, wobei eine kontinuierliche Zeitskala, welche durch die Hauptuhr der Master Control Station vorgegeben wird, gewährleistet ist. Die auftretenden Zeitdifferenzen zwischen GPS- und UTC-Zeit werden ständig errechnet und der Navigationsnachricht beigelegt.

Satelliten-Zeit

Aufgrund konstanter und unregelmäßiger Frequenzfehler der Atom-Ozillatoren in den GPS-Satelliten unterscheidet sich die individuelle Satellitenzeit von der GPS-Systemzeit. Die Satellitenuhren werden von der Kontrollstation überwacht und ggf. korrigiert. Verantwortlich sind vor allem folgende Effekte:

- Uhren gehen als Folge ihrer eigenen, relativ zur Erde schnelleren Bewegung im All langsamer als auf der Erdoberfläche
- Uhren gehen aufgrund der geringeren Schwere im All schneller als jene auf der Erdoberfläche

Trotz der sich z.T. wechselseitig aufhebenden Effekte relativer Zeitmessung resultiert eine Zeitdifferenz, die während der lokalen GPS-Messungen berücksichtigt werden muss. Um diesem Phänomen Rechnung zu tragen, werden die Satellitenuhren vor dem Start des Trabanten etwas unterhalb ihres Nominalwertes von 10,23 MHz eingestellt (Kompensation).

Empfänger-Zeit

Im Gegensatz zu den Satelliten sind die GPS-Empfänger baubedingt nur mit Quarzuhren ausgestattet, welche durch ihre hohen Frequenzschwankungen eine genaue Bestimmung von der Abweichungen erschweren. Die Genauigkeit der Zeitmessung und damit der Signallaufzeiten/Entfernungen ist auf Empfängerseite somit geräteabhängig.

Standortbestimmung

Für die Pseudoentfernungsmessung ist es erforderlich, dass auf der Benutzerseite ein Empfänger die Funkverbindung zu den einzelnen Satelliten selektiv herstellt und aufrecht hält. Die in der Kommunikationstechnik übliche Selektion nach unterschiedlichen Sendefrequenzen, wie z.B. beim Radio (Frequency Division Multiplex Access = FDMA) kann nicht in Betracht gezogen werden, da alle GPS-Satelliten die gleichen Frequenzen benutzen. Deshalb wird bei GPS das Code Multiplex Verfahren (CDMA) angewandt, wobei jedem GPS-Satelliten eine bestimmte PRN-Impulsfolge zugeordnet wird, welche eine Identifikation der Satelliten trotz gleicher Sendefrequenz auf Empfängerseite ermöglicht. Einheitlich sind innerhalb der Codes lediglich Bit-Länge und -Anzahl, Taktfrequenz bzw. Länge des Codes. Zur Kontaktaufnahme mit einem speziellen Satelliten muss der Empfänger also einen passenden Identifikationscode auswählen.

Der grundsätzliche Messvorgang beruht auf dem Prinzip der Korrelation von empfangenem und intern erzeugtem Referenzsignal. Auf der Empfängerseite wird der Messvorgang mit der empfangenen PRN-Impulsfolge des C/A-Codes eingeleitet. Die zeitgleich erzeugten möglichen PRN-Referenzimpulse werden mit den empfangenen Signalen verglichen und synchronisiert, wobei bereits eine Zeitverzögerung hinsichtlich des eintreffenden Satellitensignals ermittelt werden kann.

Erst in dem Moment, wenn erzeugte und empfangene PRN-Impulsfolgen zur Deckung kommen ist die Funkverbindung zu einem identifizierten Satelliten hergestellt. Das Kriterium zur Übereinstimmung ist die Phase der Impulsfolge, deshalb wird dieses Verfahren auch oft Code-Phase-Verfahren genannt.

Im nötigen Korrelationsprozess gibt es technisch gesehen drei wesentliche Arbeitsschritte:

- Suchen (search): Die Phase der gewählten PRN-Impulsfolge wird kontinuierlich verschoben, bis die Übereinstimmung erreicht ist
- Empfangen (acquisition): Jetzt ist die Funkverbindung selektiv hergestellt, die Information wird übertragen
- Verfolgen/Nachlaufen (tracking): Da die geometrische Position von Empfänger und Satelliten ständigen Änderungen unterworfen ist, muss die Phasenverschiebung zur Aufrechterhaltung der Funkverbindung fortlaufend nachgeregelt werden

Austauschformat NMEA Protokoll 0183

Das NMEA (National Marine Electronics Association) Protokoll wurde zum Datenaustausch zwischen elektronischen Marine-Mess- und Auswertungsgeräten entworfen und ist inzwischen ein Standardprotokoll für das Interface vielseitiger Mess- und Datengeräte, das auf der seriellen

Schnittstelle (RS232) aufsetzt. Erweiterte Spezifikationen sind in der Protokollversion 2.00 enthalten.

Festgelegte Einstellungen für die Schnittstelle sind:

- Baudrate: 4800
- Datenbits: 8 (Bit 7 ist 0)
- Stopbits: 1 oder 2
- Parity: none
- Handshake: none

NMEA Informationen sind unterteilt in Sätze aus jeweils maximal 80 Zeichen. Jeder Satz beginnt mit dem \$-Zeichen und endet mit [CR][LF] (carriage return/line feed):

Beispiel

\$GPRMC,225446,A,2758.612,N,08210.515,W,085.4,227.4,040900,003.1,W*43[CR][LF]

Die ersten fünf Zeichen nach dem \$ stellen das Adressfeld dar, wobei die ersten beiden Buchstaben die Talker-ID kennzeichnen (hier GP für GPS-Device) und die Zeichen drei bis fünf den Typ des Satzes spezifizieren, d.h. welche Art Informationen übermittelt wird (hier RMC - Recommended minimum specific GPS/Transit data). Insgesamt werden im Standard 58 verschiedene Sätze definiert, die jedoch auf Seiten der GPS-Geräte selten vollständig Unterstützung finden. Anschließend folgen, durch Kommata abgetrennt, die Datenfelder:

225446	Fixzeit: 22:54:46 UTC
A	Empfängerwarnung A=OK, V=Warnung
2758.612,N	geographische Breite: 27° 58.612min, Nord
08210.515	geographische Länge: 82° 10.515min, West
085.4	Geschwindigkeit über Grund in Knoten
227.4	Kurs in Grad
040900	Fixdatum: 04. September 2000
003.1	magnetische Abweichung: 3.1°, West

Tabelle 3: Erläuterung der Zeichenabschnitte der NMEA-Informationen

Zu den vom Standard vorgesehenen Sätzen kommen noch proprietäre, vom Hersteller des GPS-Geräts definierte Formate hinzu. Diese beginnen beispielsweise mit \$PGRMx, wobei P den proprietären Code kennzeichnet, GRM für Garmin steht und das x vom Hersteller frei vergeben werden kann (Baddeley, 2001).

Die Reihenfolge wie auch die Häufigkeit der gesendeten Sätze hängt vom verwendeten Gerät und dessen aktuellen Status ab.

DGPS - Differentielles GPS

Die Anzahl der GPS-Anwendungsgebiete und die Genauigkeitsanforderungen sind im Laufe der letzten Jahre an das Gesamtsystem gestiegen. Für viele wissenschaftliche Arbeitsbereiche genügen die garantierten 10 - 50m Positionsfehler nicht mehr aus, da viele Messverfahren großmaßstäbliche Karten einbeziehen und dort die Lagegenauigkeit über die Zeichenstärke (Strichstärke) bei etwa 3m liegt (z.B. Deutsche Grundkarte DGK-5). Im geodätischen Bereich sollte die Positionsgenauigkeit (Fehler) sogar im Millimeterbereich liegen.

Für die DGPS-gestützte Geodatenerhebung im Gelände werden als topographische Basis oft digitale amtliche Grundmessblätter oder -Karten verwandt (z.B. Katasterpläne, TK-50, -25 oder DGK-5), welche gemäß ihres Maßstabes Ungenauigkeiten bzgl. der Lage von Geo-Objekten aufzeigen. Die mittlere Lagegenauigkeit liegt bei der amtlichen Landesvermessung auf der Basis der DGK-5 bereits bei ca. 3m.

Das DGPS-Verfahren bietet nun die Möglichkeit mit relativ geringem Aufwand die mittlere Güte der Ortsbestimmung in den Bereich der Zeichengenauigkeit der verwandten Karten zu steigern (1-5 Meter). Zu diesem Zweck werden Fehlerausgleichsgrößen zur Errechnung der Pseudoentfernungen (Position) herangezogen, welche als ein zusätzliches Korrektursignal dem GPS-Empfänger zur Verfügung gestellt wird.

Das Verfahren ist für die zivilen Nutzer, die mit dem Träger L1 und dem C/A-Code arbeiten müssen entwickelt worden. Die technische Einrichtung des Referenzsenders ist betriebsseitig unabhängig von der US-Behörde bzw. dem GPS i.e.S. Es gibt deshalb allein in der BRD eine Vielzahl von festen bzw. beweglichen Referenzsendern, welche ein entsprechendes Korrektursignal ausstrahlen.

Das Verfahren beruht auf dem Vergleich der GPS-Position einer geodätisch genau eingemessenen Referenzstation mit der vom GPS errechneten Entfernung bzw. Koordinaten. Die anfallenden Differenzen werden als Korrektursignal (-daten) ausgesandt und zur Korrektur der Geländedaten im GPS herangezogen (Abbildung 21).

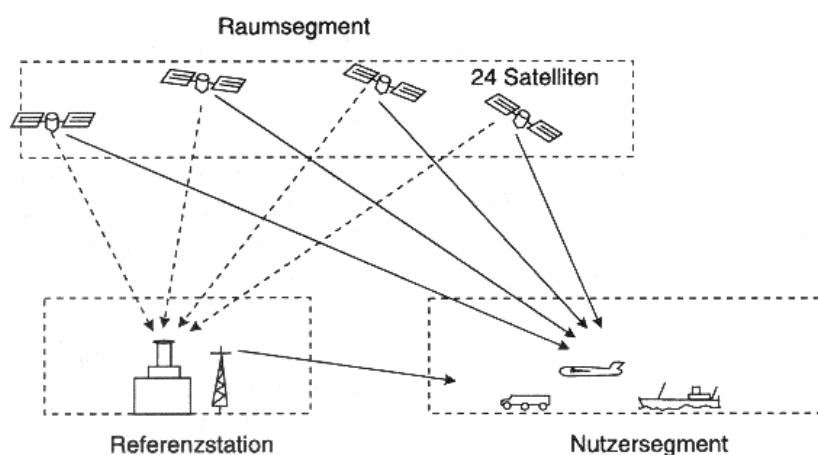


Abbildung 21: Prinzip des DGPS-Aufbaus und der Sendewege von GPS- und Korrektursignal (Mansfeld, 1998)

Die errechneten Korrekturwerte gelten nur für die betreffende Referenzstation, wobei die Genauigkeit der Korrekturdaten von der Genauigkeit der geodätisch bestimmten Position (WGS-84) des Phasenzentrums der Antenne am Sender (Basissender und -empfänger) abhängig ist.

Ist nun die Position eines Referenzpunktes geodätisch im WGS-84 bekannt und wird dort zeitgleich ein (nahezu) identisches GPS-Signal wie am mobilen Empfänger verarbeitet, kann aus der resultierenden Differenz zu den anderen Punkten mit identischer Empfangscharakteristik

die relative Genauigkeit der Punkte untereinander auf eine absolute Lagegenauigkeit im Gelände abgebildet werden.

Allgemein gilt, je größer die Entfernung zum Sender, desto größer die Ungenauigkeit der Korrektur im GPS-Empfänger, da die Messbedingungen nicht mehr als hinreichend gleich betrachtet werden können!

Für den zivilen Nutzer sind zwei Typen der differentiellen Auswertung wichtig:

- Positionskorrekturverfahren
- Messwertkorrekturverfahren

Im **Positionskorrekturverfahren** bestimmt der Referenzempfänger/-sender aus der aktuell berechneten GPS-Position die Differenz zur genauen geodätischen Position seines Standortes (Sollkoordinaten des Referenzpunktes). Diese Koordinatendifferenz wird als Shift-Wert an den mobilen GPS-Empfänger des Nutzers übermittelt, welcher nun seine eigene GPS-Position damit beschickt. Einschränkend muss jedoch bemerkt werden, dass die Satellitenkonstellation zwischen Referenzsender und Gelände-GPS streng genommen nicht immer identisch sein kann, also geringste Abweichungen in den Rahmenbedingungen der Messung auftreten. Um extreme Unterschiede in der Satellitenkonstellation zu umgehen, werden die Horizontalbereiche des Empfangs (Azimuth) aufeinander abgeglichen: Referenzsender z.B. 10° Elevation Mask und mobiler GPS-Empfänger mit 15° Elevation Mask, d.h. bis 300 km identische Satellitenkonstellationen.

Messwertkorrekturen beziehen sich in der differentiellen Auswertung auf die Pseudostreckenmessung des Referenzempfängers zu allen sichtbaren Satelliten. Mittels Schätzung der Empfängeruhrenfehler und Berechnung der Pseudodistanzen werden durch Vergleich mit den tatsächlich gemessenen Pseudostrecken die Soll-Strecken ermittelt. Diese Pseudostreckenkorrekturwerte werden dem Nutzer mitgeteilt, der nun seine eigene Pseudostreckenberechnung korrekter durchführen kann. Im Vergleich zum Positionskorrekturverfahren ist diese Art der Korrekturdatenermittlung zeitlich aufwendiger aber auch genauer und flexibler.

„Galileo“

Benutzer von Satelliten-Navigationssystemen haben keine andere Wahl als sich der Dienste des US GPS oder des russischen GLONASS zu bedienen. Die militärische Nutzung beider Dienste garantiert keine ungestörte und im vollen Umfang nutzbare Funktion zu jeder Zeit. Die Satellitennavigation ist zu einem unverzichtbaren Mittel in der Schifffahrt geworden und auf dem Weg einen ebenso hohen Stellenwert im Bahn- und Straßenverkehr sowie in der Luftfahrt einzunehmen. Ein Ausfall oder Abschalten der Signale hätte große Auswirkungen auf das gesamte Transportwesen und würde dazu führen, auf traditionelle Methoden zurückgreifen zu müssen. Je stärker die Abhängigkeit von satellitengestützten Systemen wird, desto größer werden die Auswirkungen eines Ausfalls dieses Systems. So wurde von der EU und der ESA beschlossen, ein unter ziviler Kontrolle und zu jeder Zeit uneingeschränkt zur Verfügung stehendes globales Satelliten-Navigationssystem zu entwickeln.

Galileo ist eine Initiative der Europäischen Union (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation ESA (European Space Agency). Die EU ist für die politischen Dimensionen und Erfordernisse verantwortlich. Sie initiierte Untersuchungen bzgl. der Gesamtarchitektur, der ökonomischen Nutzen und der Erfordernisse eines solchen Systems. Galileo wird interoperabel mit GPS(USA) und GLONASS(Russland), den beiden anderen globalen Systemen, sein. Die Echtzeit-Positionierungsgenauigkeit wird im Meter-Bereich liegen, wobei der Benutzer über auftretende Systemfehler innerhalb von Sekunden informiert wird und das System somit geeignet ist, Anwendungen mit hohen Sicherheitsanforderungen, wie Landung von Flugzeugen, Steuerung von Zügen oder Autos, zu erfüllen.

Die Verantwortlichkeit der ESA liegt in der Definition, Entwicklung und Beurteilung der Weltraum- und Kontrollsegmente. Die Arbeit an neuen Technologien, die für die Realisierung dieser Segmente erforderlich sind, finden seit einigen Jahren am Technical Centre der ESA, ESTEC, in den Niederlanden statt. Unter anderem werden Rubidium-Präzisionsuhren für die Installation in den Satelliten, Signal-Generatoren zur Erzeugung der Positionierungssignale, Radio-Frequenz-Multiplexer und Antennen entwickelt. Fortschritte werden in der ersten Phase des Galileo System Test Bed (GSTB) erzielt, in dem Galileo-spezifische Kontrollalgorithmen, wie Uhrenanpassung und Prozeduren für die Vorhersage einzelner Satellitenorbits, getestet werden bevor das System zum Einsatz kommt. In der zweiten Phase des GSTB wird ein Test-Satellit gestartet, der einige der neuen Technologien im Orbit testen wird.

Dieser erste experimentelle Satellit wird voraussichtlich Ende 2004 gestartet. 2005-2006 werden weitere 4 Satelliten gestartet und 2008 soll die volle operationelle Kapazität von Galileo zur Verfügung stehen.

Das vollständige System besteht aus 30 (27 + 3 Reserve) Satelliten, die in 3 Umlaufbahnen (Medium Earth Orbit, MEO) in 23616km Höhe mit einer Inklination der Orbitalbahnen von 56° um die Erde kreisen. In dieser Konstellation kann eine gute Abdeckung sogar bis zu 75° nördlicher Breite gegeben werden, was in etwa dem Nordkap entspricht.

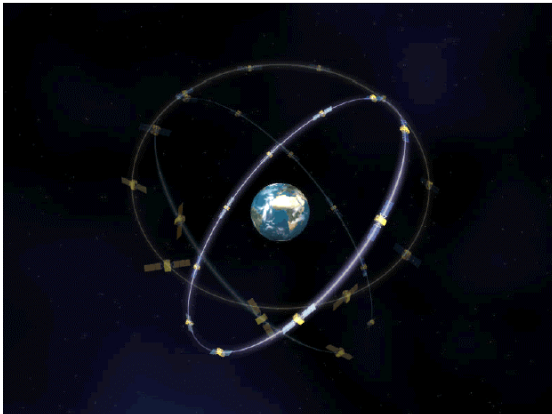


Abbildung 22: MEO-Konstellation (Benedicto, ESA, 2000)

Es werden zwei Kontroll-Stationen (Galileo Control Centres, GCC) in Europa eingerichtet werden, um die Navigation der Satelliten und die Synchronisation der Satelliten- und Stationsuhren zu gewährleisten. Unterstützt werden diese Stationen durch ein Netzwerk weiterer 20 weltweit verteilter Sensor-Stationen, die die GCCs mit Daten versorgen.

Als weiteres Merkmal wird Galileo eine Search-and-Rescue Funktion anbieten. Jeder Satellit wird mit einem Transponder ausgestattet, der in der Lage ist, Notruf-Signale an Rettungs-Koordinierungs-Zentren weiterzuleiten. Gleichzeitig kann das System den Benutzer darüber informieren, dass sein Notruf gemeldet wurde und Hilfe unterwegs ist.

Netzwerkbasierte Positionsbestimmung

Im ersten Teil dieses Lernmodul haben wir die Positionsbestimmung mittels Satelliten kennen gelernt. Mal abgesehen vom Nachteil, dass das momentan eingesetzte System dem amerikanischen Verteidigungsministerium untersteht und somit keinerlei Gewährleistung existiert, dass die damit ermittelten Werte korrekt sind, haben wir mit dem „Global Positioning System“ ein System zur Hand, das uns weltweit die Positionsbestimmung ermöglicht. Betrachtet man aber die Entwicklung der modernen mobilen Geräte wie Mobiltelefone und PDAs hin zu immer kompakteren Geräten, haben wir das Problem, die komplizierte und vor allem für den Energieverbrauch teure GPS-Funktionalität zu integrieren. Es liegt folglich nahe, andere Methoden zur Positionsbestimmung zu nutzen - die netzwerkbasierte Positionsbestimmung.

Grundvoraussetzung für den netzwerkbasierten Ansatz ist die eindeutige Identifizierung der Geräte. Zwar ließen sich alle Telefone innerhalb einer Funkzelle mittels dynamisch vergebenen Identität unterscheiden, bei einem Wechsel von einer Funkzelle in die andere ginge die Identität allerdings verloren - Bewegungen der Mobilkommunikationspartner könnten nicht verfolgt werden (dies ist nur ein Problem von vielen, dass die Positionsbestimmung ganz direkt betrifft. Unabhängig davon wäre es auch schwierig, eine bestimmte Mobilstation mit wechselnden Identitäten von außen zu erreichen).

In allen in diesem Seminar angesprochenen Netzwerken existieren eindeutige Identifizierungen: GSM, UMTS, WLAN, Bluetooth, etc. Die Kennungen der Mobiltelefone, die Korrespondenten der MAC-Adressen von Netzwerkadaptern im Bereich der Computernetzwerke, werden dabei von der International Telecommunications Union (ITU) vergeben.

Alle aktuell eingesetzten Mobilfunknetzwerke operieren nach dem gleichen Schema: Das Gesamtnetz ist in Basisstationsumgebende Zellen eingeteilt, über die sich der Nutzer mit dem globalen Telefonnetzwerk (oder IP) verbindet. Wenn sich die Nutzer im Zellverband bewegen und von einer Zelle in eine Nachbarzelle wechseln, findet ein handover statt, welches in Datenbanken festgehalten wird. Auf diese Weise lässt sich die Position eines jeden Nutzers (auch nachträglich) bestimmen. Die Leistungsfähigkeit dieser Datenbanken wird deutlich, wenn man bedenkt, dass handovers im Millisekundenbereich vollzogen werden.

Die Positionsbestimmung auf Zellebene ist in den meisten Fällen nicht befriedigend. Zwar existieren Netzwerke, wie etwa das japanische PHS mit Zellgrößen von 200x200m, die für bestimmte Einsatzzwecke ausreichend genaue Positionen liefern, in der Regel haben wir es jedoch mit deutlich größeren Zellen zu tun. Es existieren daher weitere Mechanismen, um auch bei Zellgrößen im Quadratkilometerbereich noch effektiv nutzbare Positionsbestimmungen zu realisieren. Nichts desto trotz wollen wir zunächst auf die Zellidentifikation eingehen und einige der Grundprinzipien der Kommunikation zwischen Mobil- und Relaisstation aufzeigen.

Zellbasierte Positionsbestimmung

Sobald man ein Mobiltelefon einschaltet verbinden sich Mobil- und Relaisstation einer Zelle über den Control Channel, eine Art Organisationskanal, über den sämtlicher, nicht kommunikationsbezogener Daten/Sprachaustausch realisiert wird. Im Falle von GSM und UMTS werden über diesen Kanal auch die zu nutzenden Frequenzen, time slots und codes vereinbart (s. Kap. 2 und Kap. 3). Neben den Mobiltelefonen sind auch sämtliche Funkzellen weltweit eindeutig identifizierbar (Cell Global Identity, CGI). Abhängig von der Zellgröße können Genauigkeiten von 100m bis 35km, der maximalen Zellgröße, erreicht werden.

Zellnummern an sich sind erstmal relativ wertlos. Als einfache numerische Werte beschrieben, kann ich mit dem Wissen, mich in Zelle 644 990 zu befinden, wenig anfangen. Erst die Auflösung, dass ich mich auf dem Rollfeld des Frankfurter Flughafens befinde, bringt mich weiter (allerdings sollte ich hier bereits mein Telefon ausgeschaltet haben...).

Timing Advance Positionsbestimmung

In GSM Netzwerken sind jedem Teilnehmer bestimmte Frequenzen und Zeitschlitze zugeordnet (s. Kap. 2). Die „timing advance“ (TA) Messungen dienen dabei der Kontrolle des Zeitschlitzmanagements: gesendete Signale müssen im entsprechenden Zeitfenster bei der Empfangsstation ankommen, um korrekt weiterverarbeitet zu werden. Diese Messungen, bei denen die Laufzeit des Signals (GSM) oder der Zeitverzug vom Beginn eines Zeitschlitzes bis zum Eintreffen des Signals (UMTS) bestimmt wird, lassen eine feinere Positionsbestimmung zu als über reine Zell-IDs: Die Auflösung beträgt dabei ein GSM bit: Dieses benötigt 1,85 ms und legt in dieser Zeit 550 m zurück.

Kombinierte Zell-ID / Timing Advance Positionsbestimmung

Der eigentliche Vorteil des timing advance Verfahrens kann erst in der kombinierten Messung mehrerer Empfangsstationen mittels Triangulation erzielt werden, liefert es schließlich singulär nur reine Entfernungen. Das Verfahren ist dabei das gleiche wie bei GPS: Betrachtet man die Schnittpunkte mehrerer Entfernungskreise, ergibt sich die Position des Senders, wie in Abbildung 23 verdeutlicht.

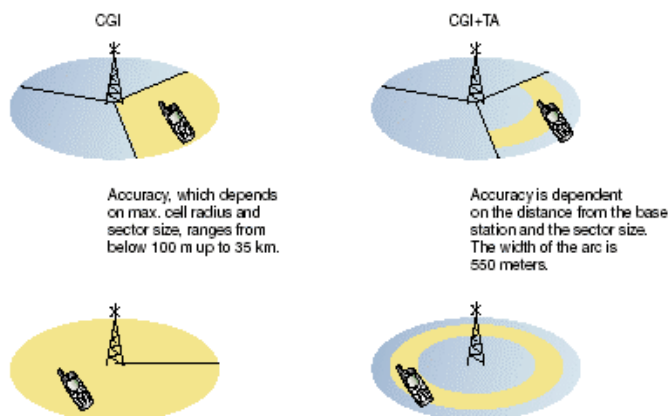


Abbildung 23: Positionsbestimmung mittels Zell-ID Sektoren und timing advance (Swedberg 1999)

Was in der Theorie ein perfektes Verfahren zur Positionsbestimmung zu sein scheint (immerhin beruht das hochgenaue GPS im Wesentlichen auf dem gleichen Verfahren) funktioniert in der Praxis leider nur eingeschränkt. Das liegt daran, dass sich die Zellen nicht als perfekte Kreise darstellen, was an den unterschiedlichen Antennen und genutzten Frequenzen der einzelnen Basisstationen liegt. Wenn der Zellradius unter einen Kilometer fällt, bringt der zusätzliche Einsatz des timing advance-Verfahrens keinen Vorteil mehr, da die Auflösung der Zelle kleiner ist als die des TA-Verfahrens.

Positionsbestimmung mittels Signalstärkemessung

Entfernungsmessungen können nicht nur basisstationsseitig erfolgen, sondern auch im mobilen Gerät. Ein mögliches Verfahren ist dabei die Signalstärkemessung. Ein GSM Telefon kommuniziert über den Kontrollkanal nicht nur mit der Basisstation, über die letztendlich die Gespräche abgewickelt werden, sondern mit allen erreichbaren Stationen in der Umgebung. Die einzelnen Stationen werden je nach Entfernung mit unterschiedlicher Signalstärke empfangen. Die empfangene Signalstärke entspricht dabei der gesendeten Signalstärke plus Antennengewinne minus Übertragungsverlust. Die Auflösung dieser Gleichung kann zur Positionsbestimmung genutzt werden. Die Berechnungen erfolgen systemseitig, d.h. das mobile Gerät muss die gemessenen Signalstärken an die Basisstation übertragen, was zusätzlichen Overhead verursacht.

Die Hauptfehlerquelle bei diesem Verfahren liegt in der Tatsache begründet, dass der Signalverlust nicht nur durch die Entfernung zur Basisstation, sondern auch durch Störungen bedingt wird, die sich nur unzureichend herausfiltern lassen. Da die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen mit Lichtgeschwindigkeit nahezu konstant ist, werden in der Praxis Laufzeitmessungen gegenüber Signalstärkemessungen favorisiert.

Uplink Time of Arrival (TOA)

Uplink Time of Arrival (TOA, auch TDOA, *Time Difference of Arrival* genannt) nennt sich das für GSM entwickelte Positionsbestimmungsverfahren, welches auf zuvor beschriebenen Laufzeitmessungen beruht und dem T1P1.5 Gremium als ausgewähltes Verfahren für das amerikanische E911 Forderung vorgelegt¹ wurde. Dabei sind die Basisstationen mit speziellen Empfängern ausgestattet, die Signallaufzeit vom Mobiltelefon zum Empfänger wird gemessen und der Teilnehmer mittels Triangulation lokalisiert. Die Methode ist umso genauer, je mehr Empfänger zur Verfügung stehen, je langsamer sich der Teilnehmer bewegt und je größer die Zellen sind. Alle Sender und Empfänger müssen darüber hinaus zeitsynchronisiert werden, was im

¹ Was bitte sind T1P1.5 oder E911? Wesentlicher Bestandteil sämtlicher Entwicklungen im Bereich der mobilen Datenkommunikation ist die internationale Standardisierung der Systeme und verwendeten Protokolle. Darum fließen in den Lerneinheiten immer wieder Abkürzungen von Standards und Standardisierungsgremien mit ein. Der rein technisch interessierte Leser mag darüber hinweg lesen.

Interessant ist es dabei weniger, die einzelnen Gremien und ihre genaue Funktion zu kennen, als vielmehr ein Gefühl dafür zu bekommen, was notwendig und warum es auch so schwierig ist, mit seinem Telefon weltweit kommunizieren oder seine Position bestimmen zu können.

Ein kleines Beispiel: Wenn ich im Auto mit 70 Meilen pro Stunde unterwegs bin und das Telekommunikationssystem nur „70“ überträgt (Einheiten werden nicht übertragen, was dem Paradigma zur Minimierung der übertragenen Datenmenge entspricht), das in Deutschland lokalisierte Routingssystem aber 70 Kilometer pro Stunde versteht, fahre ich an den meisten Kreuzungen vorbei.

T1P1.5 ist ein Unter-Komitee innerhalb der TIA, der *Telecommunications Industry Association*, einer amerikanischen Standardisierungsorganisation, dessen Arbeit jetzt von 3GPP, the *Third Generation Partnership Project*, einem Zusammenschluss verschiedener Standardisierungsorganisationen übernommen wurde (namentlich ARIB, CWTS, ETSI, T1, TTA, TTC).

E911 steht für *Enhanced 911*. 911 ist die amerikanische Notrufnummer. Per Gesetz müssen alle Mobiltelefone bei Absetzen eines Notrufs in einem Radius von 125 m lokalisiert werden können (mit einer Sicherheit von 67%).

Fälle der Basisstationen über GPS Uhren realisiert werden kann. Mobile Nutzer, die keine Atomuhr mit sich herumschleppen und auch keine GPS Signale empfangen können werden von den Empfangsstationen zu einem handover-request gezwungen, der ein Zeitstempel beinhaltet. Somit lässt sich das Synchronisationsproblem mathematisch umgehen.

Da immer mehrere Empfangsgeräte simultan genutzt werden müssen ist die Kapazität beschränkt und nimmt wegen Interferenz-Störungen zusätzlich ab. Daher eignet sich das TOA-Verfahren für Notfallsituationen, ist jedoch ungeeignet wenn hunderte von Autofahrern zur Navigation ständig ihre Position bestimmen wollten.

Die Genauigkeit des Verfahrens schwankt zwischen 50 und 150 m. In UMTS ist kein Pendant mehr vorgesehen, dort werden andere Mechanismen zur Anwendung kommen.

Enhanced Observed Time Difference (E-OTD)

Im Unterschied zum TOA-Verfahren misst beim *Enhanced Observed Time Difference* (E-OTD)-Verfahren das mobile Gerät die Signallaufzeit von drei oder mehr geographisch getrennten Basisstationen und überträgt die Messergebnisse dann zurück zum System. Es handelt sich hierbei folglich um ein so genanntes *downlink*-Verfahren, im Gegensatz zum zuvor diskutierten *uplink*-Verfahren.

Um das E-OTD Verfahren nutzen zu können müssen die Mobiltelefone mit einer besonderen Software ausgestattet werden. Sie müssen Kenntnis über die Position der Referenzstationen besitzen, Identitätssignale verstehen und Zeitinformationen verarbeiten können. Da die Zeitsignale innerhalb eines Netzwerkes in der Regel nicht homogen sind, bedarf es neben den Softwareerweiterungen häufig weiterer Hardwarekomponenten, um von E-OTD Gebrauch machen zu können.

Die Genauigkeit von E-OTD liegt etwa im Bereich von TOA.

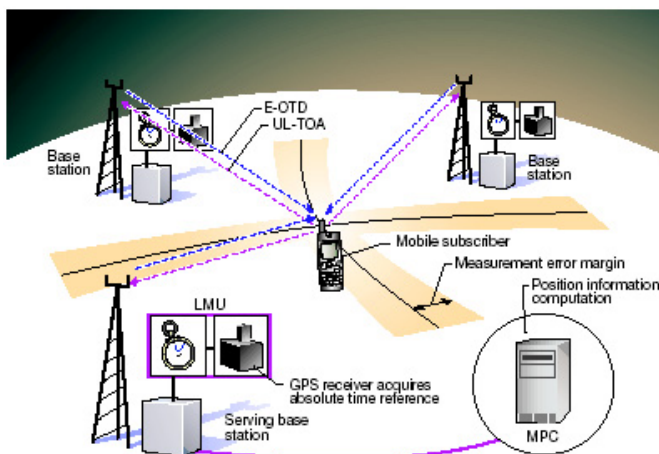


Abbildung 24: Uplink TOA und E-OTD (Swedberg 1999)

Angle of Arrival (AOA)

Das Angle of Arrival Verfahren kennt man insbesondere von Radarsystemen: Eine sich drehende Antenne misst die Eingangswinkel von reflektierten Signalen. Bei GSM Systemen kommt dieses Verfahren in etwas abgewandelter Form zum Einsatz: Basisstationen werden mit mehreren Sektorantennen ausgestattet, die definierte, sich teilweise überschneidende Bereiche abdecken.

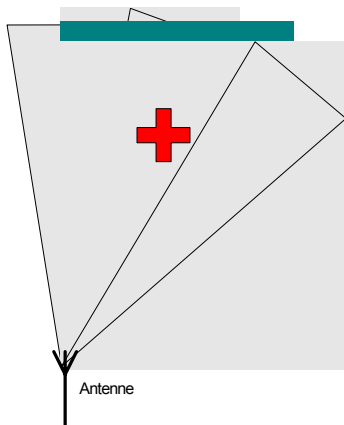


Abbildung 25: Sektorantennen für das AOA Verfahren

Telefonsystembasierte Positionierung und GPS

Wenn man sich die verschiedenen Möglichkeiten der Positionsbestimmung durch das Telekommunikationsnetz anschaut stellt sich die Frage, in wieweit die Integration von GPS-Komponenten in Mobiltelefone notwendig ist oder in Zukunft sein wird.

Zur Positionsbestimmung im Telefonnetz braucht man sinnvoller Weise mindestens drei Referenzstationen. Betrachtet man aber die Netzabdeckung mit GSM Sendemasten in Deutschland, so ist man nur äußerst selten in der Lage, mehr als zwei Stationen empfangen zu können (mehr Stationen sind eigentlich nur in Städten verfügbar. Hier steigt aber gleichzeitig auch der Anspruch an die Bestimmungsgenauigkeit!). Das wird sich mit UMTS natürlich alles ändern. Überall Funkmasten und Antennen, eine Positionierung ist da problemlos möglich - so man der Werbung glaubt. Eine Untersuchung der Technischen Universität München ergab da ein ganz anderes Bild: Betrachtet wurden zwei Gebiete, einmal das Stadtgebiet Stuttgarts sowie das ländliche Gebiet von Oedekoven, einem Vorort von Bonn. Die deutsche Telekom hatte die Koordinaten der UMTS Sendemasten zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe digitaler Gelände- und Stadtmodelle wurde anschließend untersucht, in wie viel Prozent der Fälle ein Anwender Kontakt zu mehreren Sendestationen hat. Ergebnis: Im Raum Stuttgart lag der Wert bei 36,1%, im ländlichen Oedkoven nur bei 27,8%. Das bedeutet, dass man in beiden Gebieten in den meisten Fällen nicht die notwendigen drei Referenzstationen zur Verfügung hat!

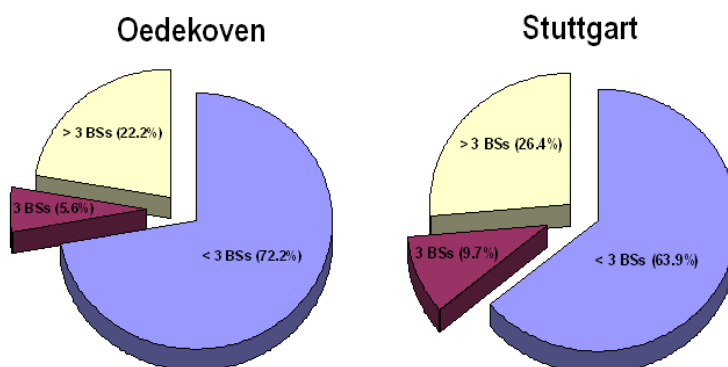


Abbildung 26: Zellverfügbarkeit Oedekoven und Stuttgart

Um eine flächenhafte Positionsgenauigkeit im UMTS-Netz von besser 50m zu erzielen, müssten Investitionen in einer Größenordnung von 2-3 Mrd. Euro getätigt werden!

Die Integration von GPS-chips in Mobiltelefone wird auch auf längere Sicht hin anzustreben sein. Das Problem des erhöhten Energieverbrauchs wird sich durch „*single shot measurements*“ weitestgehend in den Griff bekommen lassen. Bei dieser Technik wird der GPS Chip mit Zusatzinformationen aus dem Telefonnetz versorgt. Durch diese zusätzlichen Informationen ist es möglich, extrem schnelle Positionsbestimmungen durchzuführen (Vergleich mit/ohne: etwa 1s / 1min). Ein weiterer großer Vorteil ist die drei dimensionale Lokalisierung. Während telefonsystembasierte Verfahren immer nur 2D-Positionen liefern, ist es mit den kombinierten Verfahren möglich, 3D Positionen zu erhalten, auch innerhalb von Gebäuden!

Literatur

- (1) Brinkkötter-Runde, K. (1995): Untersuchung der Nutzbarkeit der satellitengestützten Positionierung für die digitale Erfassung raumbezogener Daten im Gelände. 78 S., Diplomarbeit, Inst. f. Geoinformatik; WWU-Münster (unvöfl.)
- (2) FUGAWI 2.05 (1997): Fugawi 2.05 - Moving Map GPS-Interface-Software. Fugawi, Toronto, Canada.
- (3) GALILEO: Satellite System Design and Technology Developments. J. Benedicto, S.E.Dinwiddy, G. Gatti, R. Lucas, M. Lugert, European Space Agency, November 2000
- (4) Kumm, W. (1997): GPS - Global Positioning System. 156 S., Delius Klasing Verlag (Bielefeld)
- (5) Mansfeld, W. (1998): Satellitenortung und Navigation: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. 345 S., Vieweg Verlag
- (6) Seeber, G. (1989): Satellitengeodäsie. 475 S., de Gruyter (Berlin, New York)
- (7) Swedberg, G. (1999) Ericsson's mobile location solution. Ericsson, Technical Report 4