

Was ist GPS ?

Das **Global Position System** besteht aus 24 Satelliten (3 davon sind Reserve), die sich in 6 verschiedenen Umlaufbahnen um die Erde bewegen. Die Umlaufbahnen haben dabei eine Neigung von 55° gegenüber der Äquatorebene. Einmal in 12 Stunden Sternzeit (entspricht in Erdstunden 11 Stunden 58 Minuten) und in einer Höhe von 20.200 km umlaufen die Satelliten die Erde. Die GPS Satelliten stehen dabei ständig in Kontakt mit eines der Kontrollzentren auf der Erde, von denen es fünf Stück gibt. Dabei werden den Satelliten ihre voraussichtlichen Positionen (Ephemeriden) eingespeist und die GPS Zeit kontrolliert.

Zunächst benötigt man einen GPS Empfänger. Dieser berechnet eine 2 D Position, indem er die Entfernung zu mindestens drei Satelliten (ab 4 Satelliten 3 D, also auch Höhe) mißt. Dazu werden aufmodellerte Codes verwendet. Der GPS Empfänger generiert den gleichen Code wie der Satellit und mißt dann die Zeitdifferenz, die er zum Synchronisieren beider Codesignale benötigt. Der GPS Empfänger vergleicht also die Zeit, zu der das Signal vom Satelliten ausgesendet wurde und wann er es empfangen hat. Aus dieser Zeitdifferenz kann nun die Entfernung berechnet werden. Erhält der GPS Empfänger nun von mehreren Satelliten dieses Signal, so kann er seine Position bestimmen. Durch eine ständige Neuberechnung kann der GPS Empfänger auch die Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung berechnen. Die Genauigkeit variiert dabei von Metern bis in den Millimeterbereich, beispielsweise bei Landvermessung mit aufwendigen Meßtechniken und anschließenden Berechnungen, geodätische Meßverfahren reichen bis in den Millimeterbereich.

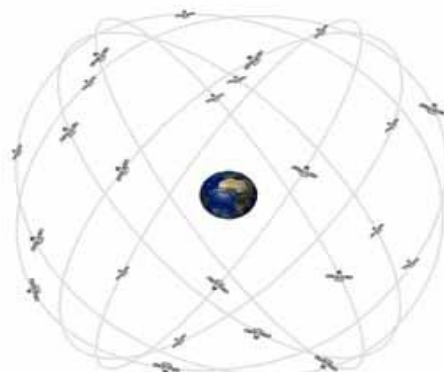
Genauigkeit von GPS

Mit eingeschalteter "Selective Availability" (SA) erreichten die Empfänger typischerweise Genauigkeiten von etwa 100 Metern. Nach der Abschaltung der SA stieg die Genauigkeit auf etwa 15 Meter, je nach verfügbarer Zahl und Stellung der Satelliten.

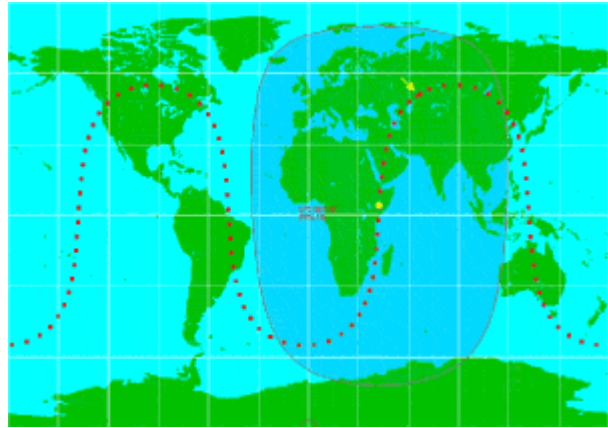
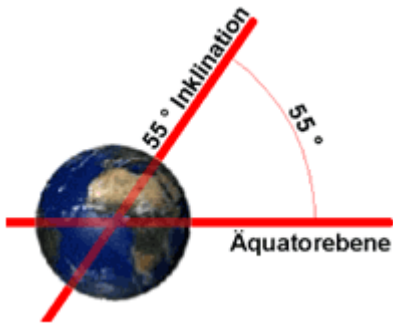
Genauigkeit des ursprünglichen GPS-Systems mit aktivierter SA	100 Meter
Typische Positionsgenauigkeit ohne SA	15 Meter
Typische Differential-GPS (DGPS)-Genauigkeit	3 - 5 Meter
Typische Genauigkeit mit aktiviertem WAAS/EGNOS	1 - 3 Meter

Die Umlaufbahnen

Die Satelliten umkreisen die Erde mit 3,3 km pro Sekunde und haben eine Umlaufzeit von 12 Stunden Sternzeit, was in Erdenstunden 11 Stunden 58 Minuten ausmacht. Das bedeutet, dass der gleiche Satellit jeden Tag etwa 4 Minuten früher über der gleichen Position steht. Die mittlere Entfernung vom Erdmittelpunkt beträgt 26560 km, was bei einem mittleren Erdradius von 6360 km zu einer Bahnhöhe von etwa 20200 km führt. Umlaufbahnen in dieser Höhe werden auch MEO - "medium earth orbit" genannt. Im Vergleich dazu haben geostationäre Satelliten wie die ASTRA oder Meteosat-Satelliten mit 42300 km eine Umlaufbahn in etwa der doppelten Entfernung. Die GPS-Satellitenbahnen befinden sich in sechs Ebenen, die jeweils vier Satelliten in gleichen Abständen beinhalten. Die Inklination der Ebenen beträgt 55° . Die Ebenen sind in der Äquatorebene um jeweils 60° gegeneinander versetzt. Das bedeutet, dass die Umlaufbahnen die Satelliten bis 55° nördlicher und 55° südlicher Breite führen.



Diese Anordnung der Satelliten hat zur Folge, dass einige Satelliten überall auf der Welt zu jeder Zeit empfangen werden können. Je weiter man sich allerdings den Polen nähert, desto weiter am Horizont befinden sich die Satelliten, können aber trotzdem gut empfangen werden, sind jedoch in keinem Fall mehr direkt über Kopf. Aufgrund der Geometrie der Satellitenpositionen kann dies zu geringen Einbußen in der Positionierungsgenauigkeit führen. Diese Geometrieeffekte treten jedoch bei bestimmten Satellitenkonstellationen von Zeit zu Zeit auch an anderen Punkten der Erde auf.



Die Bodenstationen (GPS-Kontroll-Segment)

Zur Überwachung der Satelliten dient eine "Master Control Station" sowie vier weitere Monitorstationen auf Hawaii, den Ascension Islands, Diego Garcia und Kwajalein (siehe Grafik). Die passiven Monitorstationen sind nichts weiter als GPS Empfänger, die alle im Sichtbereich befindlichen Satelliten verfolgen und auf diese Weise Messdaten der Satellitensignale sammeln. Die Monitorstationen senden diese Rohdaten an die "Master Control Station" zur Weiterverarbeitung. Die Stationen Ascension Islands, Diego Garcia und Kwajalein sind auch Sendestationen für Korrekturdaten.



Die "Master Control Station" befindet sich in der Schriever Air Force Base (ehemals Falcon AFB), die knapp zwanzig Kilometer östlich von Colorado Springs liegt. Das "50th Space Wing's 2nd Space Operations Squadron" ist für den Betrieb des GPS Systems verantwortlich. Hier werden die Daten der Monitorstationen 24 Stunden am Tag in Echtzeit ausgewertet und daraus Informationen über die Uhren und Bahnen der Satelliten gewonnen. Auf diese Weise können eventuelle Fehlfunktionen schnell festgestellt werden. Aus den Informationen werden auch neue Ephemeridendaten berechnet. Ein bis zwei mal pro Tag werden diese Daten dann zusammen mit anderen Kommandos über Sendeantennen der Stationen auf den Ascension Islands, Diego Garcia oder Kwajalein über ein S-Band Signal (S-Band: 2000 - 4000 MHz) an die Satelliten

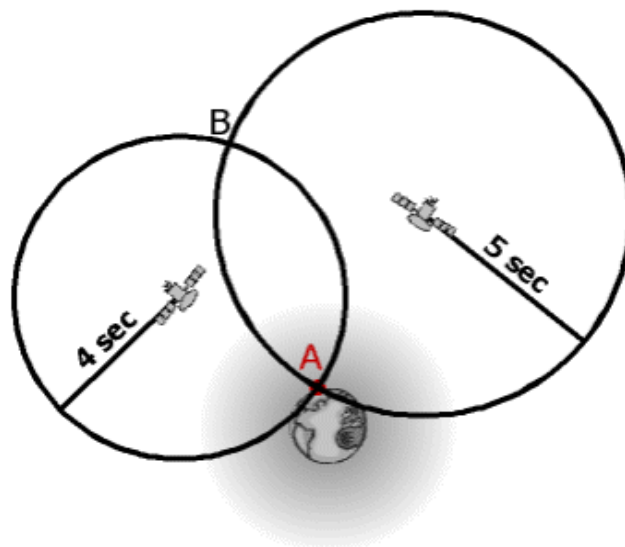
zurückgesandt. Die Satelliten des Block IIR sind in der Lage Signale mit anderen GPS-Satelliten auszutauschen und können dadurch ihre Bahndaten selbst korrigieren, wodurch sie theoretisch nur alle 180 Tage eine Verbindung mit den Bodenstationen benötigen.



(50th Space Wing's 2nd Space Operations Squadron und Schriever AFB, Colorado)

Positionsbestimmung

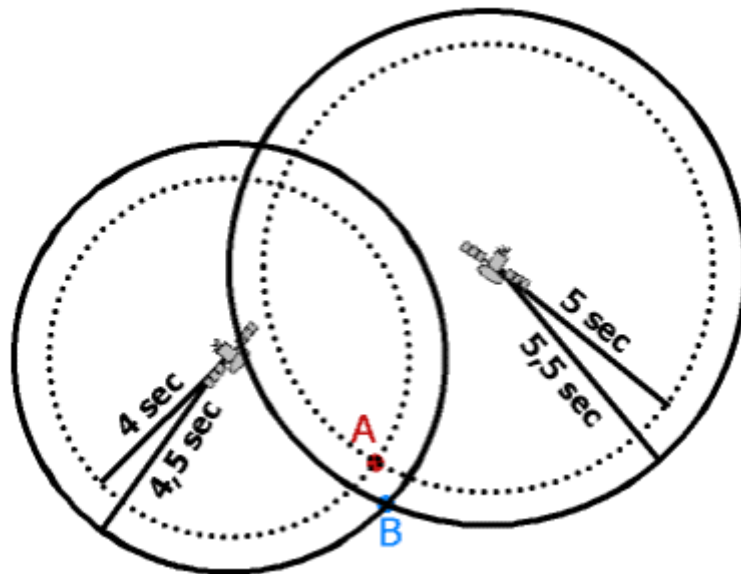
Stark vereinfacht gesagt sendet jeder Satellit eine Nachricht der Art: "Ich bin Satellit Nr. X, meine Position ist gerade Y und diese Nachricht wurde zum Zeitpunkt Z versandt". Dies ist, wie gesagt, stark vereinfacht, das Prinzip wird jedoch klar. Der GPS-Empfänger erhält die Nachricht und speichert ebenfalls ausgesendete Ephemeriden- und Almanachdaten zur späteren Verwendung. Diese Informationen können auch dazu verwendet werden, die Uhr des GPS-Empfängers zu stellen oder zu korrigieren.



Um nun die Position zu bestimmen, vergleicht der GPS-Empfänger die Zeit, zu der das Signal ausgesendet wurde mit der Zeit, zu der das Signal empfangen wurde. Aus dieser Zeitdifferenz kann nun die Entfernung des Satelliten berechnet werden. Werden nun von weiteren Satelliten Messungen hinzugefügt, so kann die aktuelle Position trianguliert werden. Mit wenigstens drei Satelliten kann der GPS Empfänger den Längen- und Breitengrad bestimmen. Dies wird "2D position fix" (zweidimensionale Positionsbestimmung) genannt. Mit Hilfe von vier oder mehr Satelliten kann ein "3D position fix", also zusätzlich die Höhe bestimmt werden. Durch ständige Neuberechnung der aktuellen Position kann der GPS Empfänger auch genau die Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung (als "ground speed" und "ground track" bezeichnet) berechnen. Eine andere Möglichkeit der Geschwindigkeitsmessung ist das Ausnutzen des Dopplereffekts, der durch die Bewegung bei den übermittelten Signalen auftritt. Das funktioniert nach dem gleichen Prinzip, wie ein Beobachter ein Martinshorn als höheren Ton wahrnimmt, wenn es sich auf ihn zu bewegt und als tieferen Ton, wenn es sich von ihm weg bewegt.

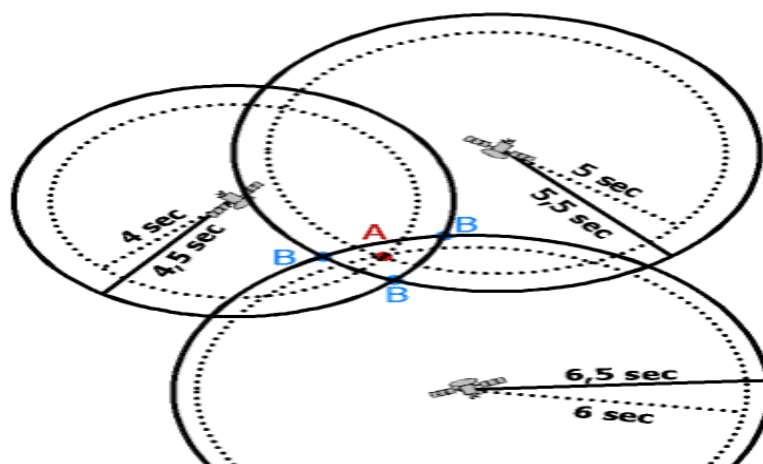
Das Problem ist, die tatsächliche und exakte Laufzeit der Signale zu kennen. Die Satelliten übermitteln wie gesagt mit jeder Nachricht eine Art Zeitstempel, wann die Nachricht abgesandt wurde. Ausserdem wissen wir, dass die Uhren aller Satelliten absolut genau und synchron gehen. Das Problem ist jedoch die Uhr unseres GPS Empfängers. Kein GPS-Empfänger hat eine eingebaute Atomuhr, was ihn ungeheuer teuer machen würde. Deshalb geht die Uhr des Empfängers nicht sehr genau. Wie wirkt sich das nun in der Praxis aus?

Angenommen die Uhr in unserem GPS Empfänger geht gegenüber den Uhren der Satelliten eine halbe Sekunden vor. Wenn wir wieder unser obiges Beispiel verwenden, führt diese scheinbar längere Laufzeit der Signale dazu, dass wir glauben anstatt am Punkt A am Punkt B zu sein.



Die Kreise die sich in B schneiden werden im GPS-Wortschatz auch Pseudorange (Pseudobereiche) genannt. Diese werden so lange mit "Pseudo" bezeichnet, bis die Korrektur der Synchronisationsfehler der Uhren durchgeführt wurde. Je nachdem, wie genau die Uhr funktioniert, wird die ermittelte Position "mehr oder weniger falsch" sein. Für die Praxis der Navigation mit GPS würde das bedeuten, dass bei den ungeheuer kleinen Signallaufzeiten die ermittelte Position immer viel "mehr als weniger" falsch ist und damit völlig unbrauchbar. Ein Uhrenfehler von 1/100 Sekunde, was die Vorstellungskraft bereits strapaziert, einem jedoch von Auto- und Skirennen heute dennoch durchaus geläufig ist, macht in der GPS-Navigation eine Fehlbestimmung der Position um ca. 3000 km aus. Um eine Positionsbestimmung auf 10 m genau zu erreichen muss die Laufzeit bis auf 0,00000003 Sekunden genau sein. Natürlich lässt sich dieses Problem elegant umgehen.

Zieht man noch einen dritten Satelliten hinzu, und betrachtet zunächst wieder den Fall, dass die Uhr des Empfängers absolut genau geht, so erhält man wieder eine eindeutige bestimmte Position A.



Betrachtet man den gleichen Fall wieder unter der Voraussetzung, dass die Empfänger-Uhr eine halbe Sekunde vor geht, so erhält man keinen eindeutigen Schnittpunkt mehr, sondern drei Schnittpunkte B aus je zwei Kreisen. Diese macht jetzt unseren GPS-Empfänger "hellhörig" und er sucht nach einem gemeinsamen Korrekturfaktor für die Laufzeit der drei Satellitensignale. Dieser Korrekturfaktor ist die eigene Uhrzeit, die nun solange verändert wird, bis sich die drei Laufzeiten im Punkt A treffen. Neben der Positionsbestimmung hat der GPS-Empfänger damit auch eine atomgenaue Uhrzeit, da seine Zeit jetzt synchron mit der der Satelliten ist. Jetzt wird aus dem "Pseudorange" eine echte Entfernungsangabe.

In unserem Beispiel sind also die Signale von drei Satelliten nötig, um eine eindeutige zweidimensionale Positionsbestimmung durchzuführen. In der Realität braucht man für eine 3D-Positionierung wie bereits erwähnt demnach vier Satelliten. Man kann jedoch in der Praxis auch mit drei Satelliten eine Ortsbestimmung erhalten, dann lässt sich jedoch die Höhe nicht bestimmen. Hierbei geht man dann davon aus, dass man sich ganz einfach auf der Oberfläche der Erdkugel (bzw. dem Erdellipsoid) befindet, wodurch die Bestimmung auf zwei Dimensionen reduziert wird und man wieder genau dort ist, wo wir in unserem aufgezeichneten Beispiel waren.

Von den Satelliten ausgesendete Signale

Die Art, wie mit Hilfe des GPS-Systems Positionen bestimmt werden hängt in hohem Maße von den von den Satelliten ausgesendeten Signalen ab. Es gibt eine ganze Reihe von Kriterien, die in die Entwicklung der Signalstruktur eingeflossen sind. Als Folge davon ist das GPS Signal relativ komplex und bietet folgende Möglichkeiten: Ein-Weg (passive) Positionsbestimmung, genaue Entfernungs- und Geschwindigkeitsbestimmungen (Doppler-Effekt), Aussenden einer Navigations-Nachricht, simultane Erfassung mehrerer Satellitensignale, Bereitstellung von Korrekturen für die ionosphärische Verzögerung der Signale und Störungsunempfindlichkeit gegenüber Interferenzen und Mehrwegeeffekte. Um allen diesen Forderungen Genüge zu tun wurde die nachfolgend beschriebene Signalstruktur entwickelt.

Pseudo Zufalls Code und PRN-Nummer

Jeder der GPS-Satelliten überträgt zwei Trägersignale im Mikrowellenbereich, die als L1 und L2 bezeichnet werden (Die Bezeichnung L weist auf die Frequenz hin, die im L-Band liegt (1000 - 2000 MHz). Zivile GPS-Empfänger verwenden die L1-Frequenz mit 1575,42 MHz (Wellenlänge: 19,05 cm) (L2 - Frequenz: 1227.60 MHz; Wellenlänge: 24,45 cm). Die L1-Frequenz trägt sowohl die Navigationsdaten als auch den SPS code (standard positioning code - Standard-Positionsbestimmungscode). Die L2 Frequenz trägt nur den P-Code und wird von Empfängern die nicht für den PPS (precision positioning code) vorgesehen sind nur zur Korrektur von Ionosphärenstörungen verwendet. Die Gründe für die Wahl gerade dieser Frequenzen sind folgende:

1. Die Frequenz sollten unter 2 GHz gewählt werden, da Frequenzen darüber den Einsatz von Richtantennen in der Empfangseinheit erforderlich machen würden.
2. Ionosphärische Verzögerungen sind in den Bereichen kleiner 100 MHz und größer 10 GHz enorm hoch.
3. Elektromagnetische Wellen weichen in ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit um so stärker von der Lichtgeschwindigkeit ab, je kleiner die Frequenz ist. Dies würde wiederum die Laufzeitberechnungen nachteilig beeinflussen.
4. Die PRN-Codes benötigen eine große Bandbreite für die Code-Modulierung auf die Trägerfrequenz, es musste also ein entsprechender Bereich hoher Frequenz und mit Möglichkeit zu großer Bandbreite gewählt werden.

Die Trägerphasen werden durch drei unterschiedliche Binärcodes moduliert, zum einen dem C/A code (coarse acquisition, grobe Bestimmung). Dieser Code ist ein 1023 "chip" langer Code, der mit einer Frequenz von 1,023 Mhz übertragen wird. Ein "chip" ist im Prinzip das gleiche wie

"bit", also eine Eins oder eine Null, der Begriff "chip" wird jedoch hier deshalb verwendet, da das Signal keine Information trägt. Durch diesen Code wird das Trägersignal moduliert und dadurch auf eine Bandbreite von 1 Mhz ausgebreitet (Spread spectrum), was die Störungsanfälligkeit verringert. Der C/A Code ist ein Pseudozufälliger Code (PRN - pseudo random code), der wie zufällig aussieht, jedoch für jeden der Satelliten eindeutig festgelegt ist. Er wiederholt sich nach jeweils 1023 bit oder einer Millisekunde. Pro Sekunde werden damit also 1 023 000 chips generiert, wodurch sich mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit die "Länge" eines "chips" auf 300 m berechnet.

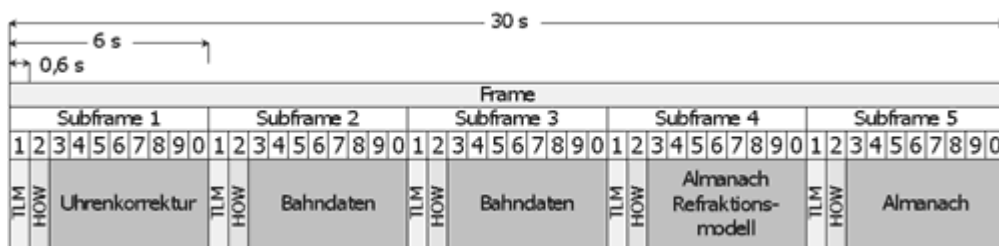
Häufig werden die Satelliten vom Empfänger über eine PRN-Nummer identifiziert (1 - 32) welche je nach Gerät auf der Anzeige des GPS-Empfängers wiederzufinden ist. Zur Vereinfachung des Satellitennetzwerks sind 32 verschiedene PRN Nummer vorhanden, obwohl nur 24 Satelliten für das System verwendet werden. Dadurch kann ein Ersatzsatellit gestartet und aktiviert werden, bevor der zu ersetzende Satellit tatsächlich ausfällt. Für diesen Satelliten wird dann einfach eine der zusätzlichen Nummern verwendet. Der C/A Code ist die Basis für alle zivilen GPS-Empfänger.

Der P Code (precise) moduliert sowohl die L1, als auch die L2 Trägerfrequenz und ist ein sehr langer 10,23 MHz Pseudozufallscode (sieben Tage werden verwendet, der Code ist aber 266 Tage lang).

Im Anti-Spoofing (AS) Betrieb (Manipulationssicherer Betrieb) wird der P-Code in einen Y-Code verschlüsselt. Der verschlüsselte Code benötigt ein spezielles AS-Modul für jeden Empfängerkanal und ist nur für autorisiertes Personal mit speziellem Schlüssel zugänglich. Der P bzw. Y Code sind die Basis für die präzise (militärische) Positionsbestimmung. Seit 31. Januar 1994 ist das AS-System in Betrieb und der P-Code wird verschlüsselt als Y-Code ausgesendet.

Ephemeriden- und Almanach-Daten

Die Navigationsnachricht wird zusätzlich zum C/A-Code mit 50 bit/s in das L1-Signal mit hineinmoduliert. Sie besteht aus einem 50 Hz Signal und enthält Daten wie die Satellitenbahnen, Uhrenkorrekturen und andere Systemparameter (z.B. den Status der Satelliten, also ob in Ordnung oder fehlerhaft). Diese Daten werden ständig von jedem Satelliten übermittelt. Aus diesen Informationen erhält der GPS-Empfänger sein Datum und die Uhrzeit, deren genaue Kenntnis essentiell für die Positionsbestimmung ist. Aus diesem Grund hat jeder GPS Satellit eine eigene Cäsium-Atomuhr an Bord (zur Sicherheit sind es sogar vier), wodurch alle Satelliten eine hochgenaue Uhrzeit haben.



Die Navigationsnachricht besteht aus 1500 bit, die Übertragung dauert also 30 Sekunden. Dieser 1500 bit große Datenblock wird als Frame ("Rahmen") bezeichnet, der wiederum in fünf Subframes ("Unterrahmen") aufgeteilt ist. Diese werden wiederum in jeweils 10 Words ("Worte") von je 30 bit unterteilt. Jeder dieser Unterrahmen beginnt mit zwei Spezialworten. Zum einen ist dies ein "Telemetry Word" (TLM) mit Auskunft über Bahnkorrekturen der Satelliten. Das andere ist das "Hand Over Word" (HOW), welches einen Zeit-Count übermittelt, der alle 1,5 s den Beginn eines Datensatzes in Bezug zur GPS-Zeit festlegt.

Der erste Unterrahmen enthält Informationen über den Zustand des Satelliten ("Health"), Alter der Uhrendaten, Parameter zur Berechnung des Uhrenfehlers und die GPS-Wochennummer. Der zweite und dritte Unterrahmen enthält die Parameter zur Berechnung der Ephemeriden und

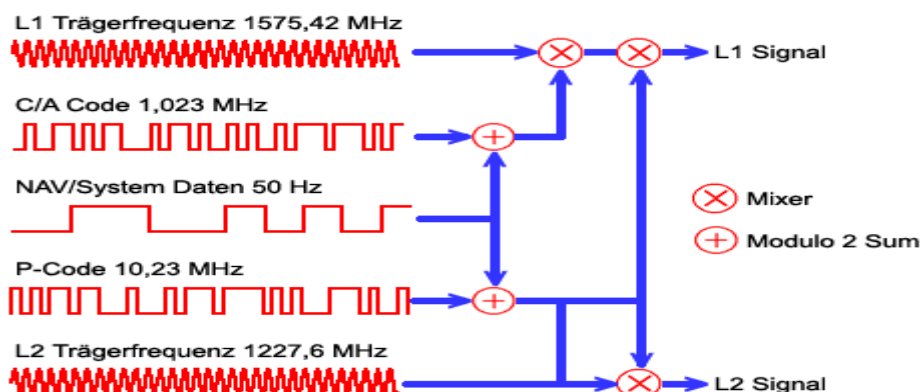
Korrekturparameter zur ionosphärischen Laufzeitverzögerung. Die Unterrahmen 4 und 5 schliesslich beinhalten die sogenannten Almanachdaten, die in vereinfachter Form Informationen über die Bahnparameter aller Satelliten, deren technischen Zustand und ihre momentane Konfiguration, Identifikationsnummer usw. enthalten.

Wenn ein Satellit die Signale nicht korrekt übermittelt oder in seiner Umlaufbahn instabil ist, kann ihn das US Verteidigungsministerium als "ungesund" kennzeichnen, womit angezeigt wird, dass er aus den Berechnungen ausgeklammert werden sollte. Ein typischer Grund, warum ein Satellit als "ungesund" gekennzeichnet wird ist, dass er in eine andere Umlaufbahn gelenkt werden muss. Für diese Veränderung werden die Triebwerke gezündet und wenn der Satellit in seiner neuen Umlaufbahn ist, dauert es noch einige Zeit, während der er als "ungesund" gekennzeichnet wird, bis diese sich stabilisiert hat. Übrigens werden die geostationären EGNOS-Satelliten während des Testbetriebs ebenfalls als "ungesund" gekennzeichnet, weshalb deren Korrekturdaten noch nicht allgemein zugänglich sind.

Während die ersten drei Subframes alle 30 Sekunden aktualisiert und wiederholt werden, benötigt der gesamte Almanach insgesamt 50 Subframes, benötigt also für eine vollständige Übertragung 12,5 Minuten. Diese Daten werden vom GPS-Empfänger gespeichert und dazu verwendet, zunächst nur nach den Satelliten "Ausschau zu halten", die momentan "sichtbar" sein sollten.

Warum müssen nun Korrekturparameter für die Satellitenuhren übertragen werden, wo die Atomuhren doch so hochgenau sind? Jeder Satellit besitzt mehrere Atomuhren und damit eine sehr exakte Zeit. Die Atomuhren der einzelnen Satelliten werden allerdings nicht auf die GPS Referenz-Zeit abgeglichen sondern laufen völlig frei. Aus diesem Grund werden Korrekturparameter für die Uhr jedes einzelnen Satelliten benötigt. Die GPS Referenz-Zeit unterscheidet sich von der UTM-Zeit (oder Weltzeit), welche regelmäßig der Erddrehung angepaßt wird (Schaltsekunden).

Die Speicherung der Ephemeriden- und Almanach-Daten im GPS-Empfänger führt dazu, daß Empfänger, die für nicht sehr lange (Wochen) ausgeschaltet waren, nur kurze Zeit für eine Positionsbestimmung benötigen. Sind sowohl die im Empfänger gespeicherten Almanach- als auch die Ephemeridendaten aktuell, so spricht man beim Einschalten des Geräts von einem "Warmstart", die Positionsbestimmung dauert lediglich ca. 15 Sekunden. Sind die Ephemeriden veraltet, müssen also vor der ersten Positionsberechnung neu empfangen werden, spricht man von einem "Kaltstart". Hierbei dauert es etwa 45 Sekunden bis zur ersten Positionsbestimmung. Sind die Almanach-Daten veraltet, was passiert, wenn der Empfänger für einige Wochen ausgeschaltet war, so muss zunächst die Übertragung der Almanach Daten abgewartet werden, um entscheiden zu können, welche Satelliten empfangen werden können. Dies dauert bis zu über 10 Minuten. Wurde die Position des Empfängers in ausgeschaltetem Zustand um mehr als etwa 300 km verändert, so stimmen die "sichtbaren" Satelliten nicht mehr mit den Satelliten überein, die vom Empfänger erwartet werden, der ja noch von der alten Position ausgeht, weshalb auch hier die Zeit bis zur ersten Positionsbestimmung länger dauert. Den meisten GPS-Empfängern kann dies durch Eingabe des ungefähren Standorts oder der Tatsache, dass dieser verändert wurde erleichtert werden.



Fehlerquellen bei der Positionsbestimmung

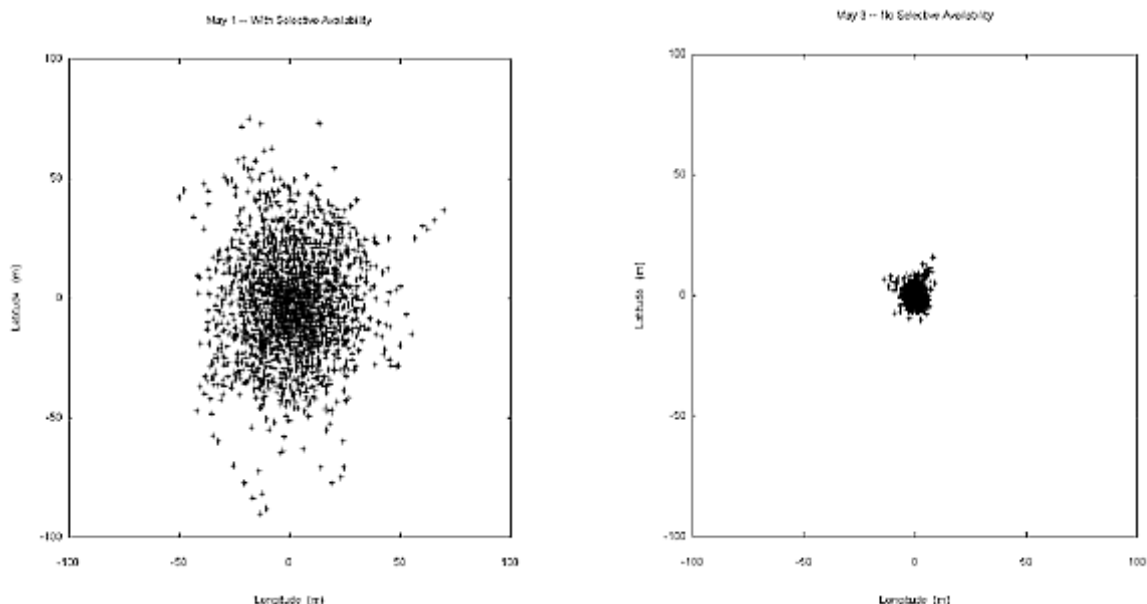
Selective Availability

Der größte Faktor bei der Positionsgenauigkeit des GPS besteht seit 2. Mai 2000 5:05 Uhr (MEZ) bis auf weiteres nicht mehr. An diesem Tag wurde die sogenannte "selective availability" (SA) abgeschaltet. Hierbei handelt es sich zum einen um eine künstliche Verfälschung der vom Satelliten übermittelten Uhrzeit im L1 Signal, was bei zivilen GPS Empfängern dazu führt, eine ungenauere Positionsbestimmung zu erzielen. Dies führt zu Schwankungen um ca. 50 m während wenigen Minuten. Zusätzlich werden die Ephemeriden-Daten ungenauer übertragen, d.h. die übermittelte Satellitenposition stimmt nicht mit der tatsächlichen überein. Hierdurch kann eine Ungenauigkeit der Position um 50 bis 150 m mit Periodendauern von mehreren Stunden erreicht werden. Während bei eingeschalteter SA die Positionsgenauigkeit im Bereich von 100 Metern lag, wird jetzt eine Genauigkeit von 20 Meter erreicht, die in der Praxis häufig jedoch sogar noch unterschritten wird.

Vor allem die Höhenbestimmung hat stark von der Abschaltung der SA profitiert. Vorher war eine Höhenbestimmung über GPS praktisch unbrauchbar.

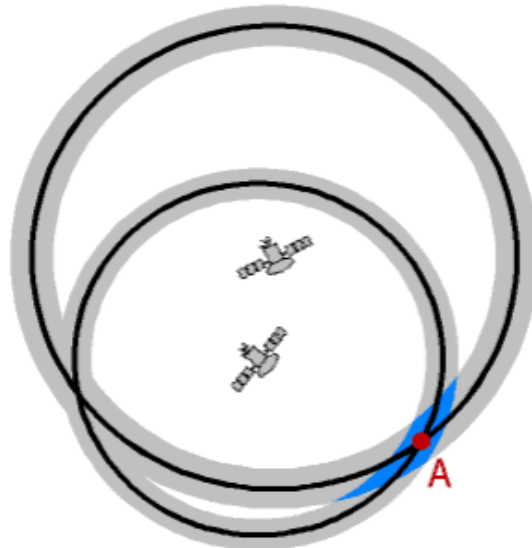
Als Grund für SA wurden Sicherheitsbedenken angegeben, es beispielsweise Terroristen unmöglich zu machen, kritische Einrichtungen in den USA mit selbstgebauten Fernlenk Waffen genau treffen. Paradoxerweise war genau diese SA bereits während des Golfkriegs teilweise deaktiviert, da für die vielen dortigen Truppen nicht genügend militärische Empfänger zur Verfügung standen und auf zivile Empfänger ausgewichen werden musste, wovon 10000 Stück eingekauft wurden. Dies ermöglichte den Truppen sehr präzise Operationen in einer orientierungspunktlosen Wüste. Wie gesagt wurde dieses SA jedoch mittlerweile aufgrund der großen Verbreitung von GPS Empfängern und des damit verbundenen weltweiten Nutzens deaktiviert.

Nachfolgend noch zwei Diagramme, die die Verbesserung der Positionsbestimmung durch die Abschaltung der SA verdeutlichen. Die Kantenlänge der Diagramme beträgt jeweils 200 Meter, die Daten wurden am 1. Mai 2000 bzw. am 3. Mai 2000 jeweils über 24 Stunden aufgenommen. Während mit SA 95 % der Messwerte innerhalb eines 45 m Radius liegen, sind ohne SA 95 % der Werte innerhalb eines 6,3 m Radius. Die folgenden Grafiken zeigen die Streuung der Positionsbestimmung mit ein- und ausgeschalteter "Selective Availability"



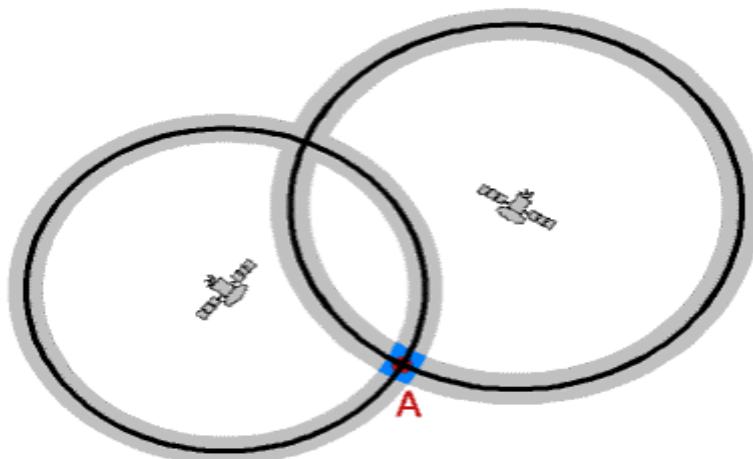
Satellitengeometrie

Ein weiterer Faktor, der die Genauigkeit der Positionsbestimmung beeinflusst ist die "Satellitengeometrie". Einfach gesagt bezieht sich "Satellitengeometrie" auf die vom Empfänger aus gesehene Stellung der gerade empfangenen Satelliten zueinander im Raum. Wenn ein Empfänger beispielsweise gerade vier Satelliten empfängt und alle vier Satelliten sind beispielsweise nur im Nordwesten, so ergibt sich daraus eine "schlechte Geometrie". Unter Umständen kommt überhaupt keine Positionsbestimmung zustande. Wenn alle Entfernungsmessungen aus der gleichen Richtung erfolgen, kann keine Position trianguliert werden. Selbst wenn der Empfänger eine Positionsbestimmung durchführen kann, so kann der Fehler ohne weiteres im Bereich von 100 bis 150 Metern liegen. Sind hingegen die vier empfangenen Satelliten möglichst gut über den gesamten Himmel verteilt, so wird die Positionsbestimmung wesentlich genauer. Angenommen die Satelliten befinden sich im Norden, Osten, Süden und Westen, sind also in 90° Abständen angeordnet, so ist die "Satellitengeometrie" sehr gut, da die Entfernungsmessungen in allen Richtungen gemacht werden. Die kann mit den folgenden Zeichnungen für den zweidimensionalen Fall wieder recht deutlich gemacht werden. Wir beschränken uns auf zwei Satelliten, lassen also Uhrzeitungenauigkeiten aus dem Spiel.



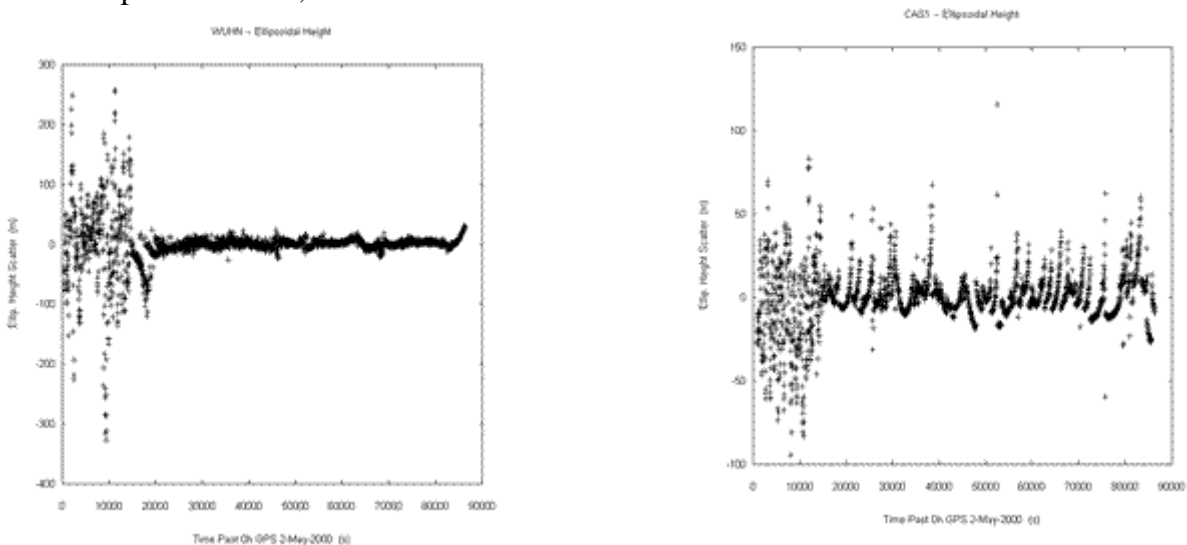
Angenommen die Satelliten befinden sich in einer "günstigen" Anordnung. Vom Betrachter aus bilden die Sichtlinie zu den Satelliten etwa einen rechten Winkel. Die Laufzeit kann nun aus verschiedenen Gründen (siehe Fehlerquellen) nicht ganz exakt bestimmt werden, was durch die grauen Bereiche um die "Laufzeitkreise" dargestellt wird. Der "Schnittpunkt" A der beiden Kreise ist nun eine relativ kleine annähernd quadratische Fläche (blau), die Positionsbestimmung wird entsprechend genau sein.

Befinden sich die beiden Satelliten jetzt vom Betrachter aus gesehen mehr hintereinander, so ergibt die Schnittfläche aus den gleichen Kreisen eine wesentlich größere in die Länge gezogene Fläche. Als Folge davon ist die Positionsbestimmung weniger genau.



Die Satellitengeometrie muss auch berücksichtigt werden, wenn der GPS Empfänger in Fahrzeugen oder in der Nähe von hohen Gebäuden verwendet wird. Wenn einige Satellitensignale abgeblockt werden, so entscheiden die restlichen Satellitenpositionen darüber, wie gut die Positionsbestimmung sein wird und ob überhaupt eine Positionsbestimmung möglich ist. Dies kann häufig sehr gut innerhalb von Gebäuden in Fensternähe beobachtet werden. Wenn noch eine Positionsbestimmung möglich ist, ist diese meist sehr ungenau. Je größer der verdeckte Bereich des Himmels ist, desto schwieriger wird die Positionsbestimmung. Die meisten GPS Empfänger zeigen nicht nur an, welche Satelliten empfangen werden, sondern bieten darüber hinaus auch eine Positionsanzeige der Satelliten an. Dies ermöglicht es dem Benutzer zu Erkennen, ob ein zur Positionsbestimmung nötiger Satellit eventuell durch ein Hindernis verdeckt wird. Auch wird häufig ein Maß für die "Geometrie" angezeigt, manchmal unterteilt in LDOP (Longitudinal Dilution Of Precision) und HDOP (Horizontal Dilution Of Precision).

Wie bereits weiter vorn erwähnt hängt der Fehler der Positionsbestimmung durch die Satellitengeometrie auch vom Breitengrad des Empfängers ab. Anhand von zwei Diagrammen kann dies wieder veranschaulicht werden. Das linke Diagramm zeigt den Höhenfehler (anfangs noch mit SA eingeschaltet) aufgenommen in Wuhan (V. R. China), welches auf $30,5^\circ$ nördlicher Breite liegt und somit praktisch immer ideale Satellitenkonstellationen vorfindet. Das rechte Diagramm zeigt den gleichen Messzeitraum aufgenommen auf der Casey-Station in der Antarktis ($66,3^\circ$ südliche Breite). Bedingt durch zeitweise ungünstige Geometrie fällt der Fehler deutlich grösser aus. Die Skala beträgt jeweils 150 m um die wahre Position. Zusätzlich kommt es, je näher man zu den Polen kommt zu einer Verschlechterung der Positionsgeauigkeit dadurch, dass die Signale flacher durch die Atmosphäre laufen und somit eine "dickere" Atmosphäre "sehen", die zu Fehlern führt



Die Satellitengeometrie verursacht keinen Fehler in der Positionsbestimmung, der mit Meterangaben fassbar ist. Vielmehr vervielfachen die DOP-Werte die anderen Fehler. Hohe DOP-Werte wirken sich also auf die restlichen Fehler einfach stärker aus, als niedere DOP-Werte.

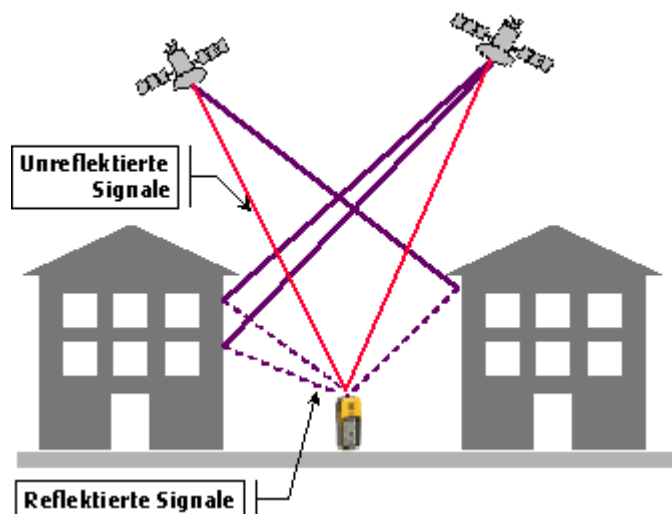
Satellitenumlaufbahnen

Obwohl die GPS Satelliten sich in sehr präzisen Umlaufbahnen befinden kommt es zu leichten Schwankungen durch Gravitationskräfte. So beeinflussen Sonne und Mond die Bahnen geringfügig. Die exakten Bahndaten werden jedoch regelmässig kontrolliert und auch korrigiert

und in den Ephemeridendaten zu den Empfängern gesandt. Dadurch bleibt der für die Positionsbestimmung resultierende Fehler mit ca. 2 Metern sehr gering.

Mehrwegeeffekt

Eine weitere Fehlerquelle ist der Mehrwegeeffekt. Dies ist ein Effekt der durch Reflektion der Radiowellen an Objekten zustande kommt. Der gleiche Effekt verursachte Geisterbilder bei Fernsehbildern, als noch die normale Dachantenne üblich war (die Generation der nicht Kabel- und Schlüsselverwöhnten kennt das noch). Bei GPS-Signalen tritt dieser Effekt durch Reflektion an hohen Gebäuden oder anderen Erhebungen auf. Das reflektierte Signal braucht länger, um zum Empfänger zu gelangen als das direkt empfangene Signal. Der daraus resultierende Fehler liegt typischerweise bei etwa 1 Meter.

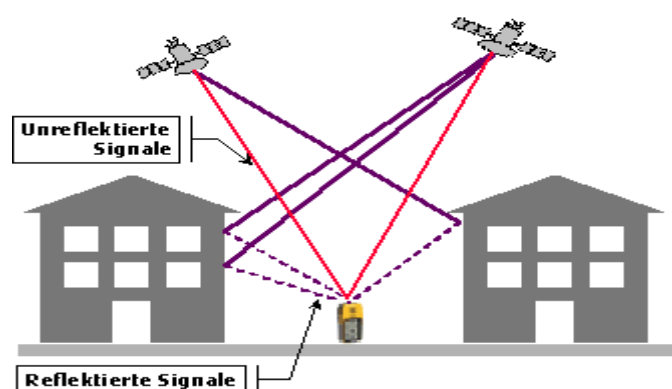


Atmosphärische Effekte

Weiterhin zum Genauigkeitsfehler trägt die durch durch atmosphärische Effekte in der Troposphäre und Ionosphäre verringerte Ausbreitungsgeschwindigkeit bei. Während sich Radiosignale im Weltall mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, breiten sich diese in der Ionosphäre und der Troposphäre mit geringerer Geschwindigkeit aus.

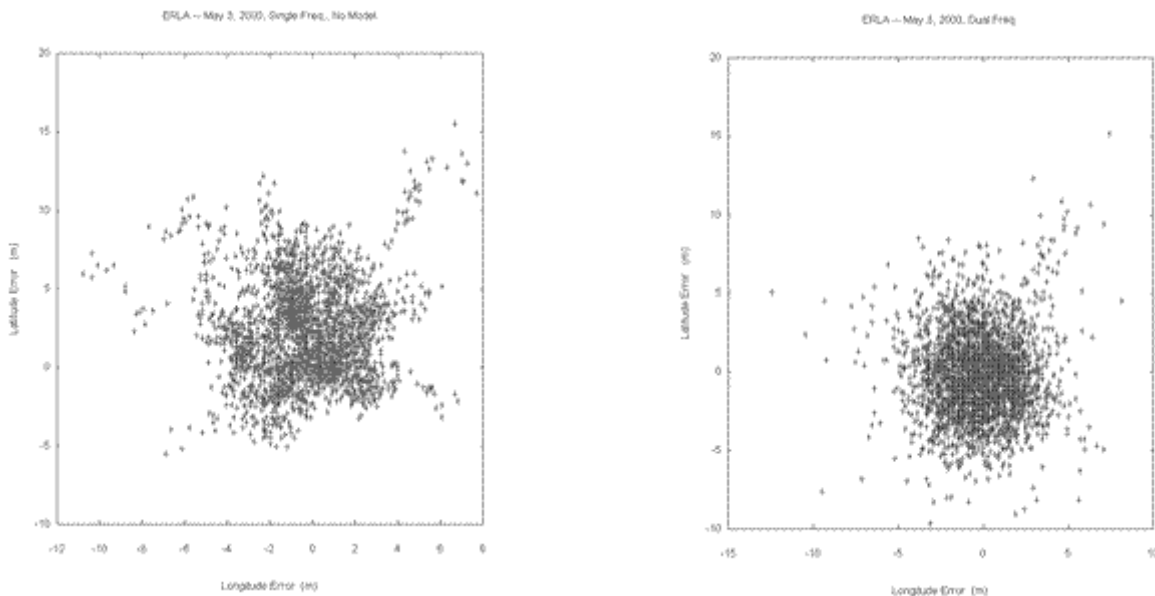
So werden in der Ionosphäre durch die ionisierende Wirkung der Sonne in einer Höhe von ca. 80 bis 400 km Elektronen und positive Ionen in großer Zahl gebildet. Diese konzentrieren sich in vier leitenden Schichten innerhalb der Ionosphäre (D-, E-, F1-, und F2- Schicht). Diese Schichten reflektieren bzw. brechen die elektromagnetischen Wellen der Navigationssatelliten. Daraus folgt eine längere Laufzeit der Satellitensignale.

Diese Fehler sind gering und werden größtenteils im Empfänger durch entsprechende Berechnungen kompensiert. Dies geschieht dadurch, dass man die typischen Geschwindigkeitsabweichungen bei tiefen und hohen Frequenzen während der Ionosphärendurchdringung an einem Standardtag zu Standardbedingungen kennt und bei allen Entfernungsberechnungen mit einbezieht. Was bei zivilen Empfängern nicht kompensiert werden kann ist eine unvorhergesehene Laufzeitänderung beispielsweise durch veränderte Ionosphäre infolge starker Sonnenwinde.



Man weiß, dass sich elektromagnetische Wellen beim Durchgang der Ionosphäre umgekehrt proportional ihrer Frequenz zum Quadrat ($1 / f^2$) verlangsamen. Das bedeutet, daß sich elektromagnetische Wellen mit niedrigen Frequenzen stärker als solche mit hohen Frequenzen verlangsamen. Wenn man nun die bei einem Empfänger ankommenden hoch- und tieffrequenten Signale hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Ankunftszeit untersucht, kann die ionosphärische Laufzeitverlängerung berechnet werden. Militärische GPS-Empfänger verwenden hierzu die Signale beider Frequenzen (L1 und L2), die unterschiedlich von der Atmosphäre beeinflusst werden und sind somit in der Lage einen weiteren Teil der Ungenauigkeit herauszurechnen. Der Troposphärenfehler ist ein weiterer Faktor, der durch Brechung die Laufzeit elektromagnetischer Wellen verlängert. Ursache dafür sind die bei unterschiedlichen Wetterlagen bedingten unterschiedlichen Wasserdampfkonzentrationen in der Troposphäre. Der Fehler ist aber kleiner als der Ionosphärenfehler, lässt sich jedoch nicht herausrechnen und kann lediglich durch ein allgemeines Modell bei den Berechnungen angenähert werden.

Zur Veranschaulichung zwei Grafiken, die den Unterschied in der Positionsgenauigkeit zwischen Zweifrequenz-Empfängern mit Ionosphären-Korrektur und Einfrequenz-Empfängern verdeutlichen. Links die Streuung der Positionsbestimmung bei einem Einfrequenzempfänger, rechts bei einem Zweifrequenzempfänger. Beide Diagramme haben näherungsweise die gleiche Skala (Links: Breitengrad -15 m bis +10 m, Längengrad -10 m bis +20 m, Rechts: Breitengrad -12 m bis +8 m, Längengrad -10 m bis +20 m). Deutlich erkennbar ist das Verschwinden einzelner "Ausreisser" mit Ionosphären-Korrektur, während die mittlere Positionsgenauigkeit für 95 % der Messwerte nicht sehr stark verbessert wird.



Durch Einführung von WAAS und EGNOS ist es möglich, "Karten" mit dem Einfluss der Atmosphäre auf bestimmte Gebiete zu erstellen und diese Korrekturdaten an die Empfänger zu senden. Dadurch wird die Genauigkeit deutlich erhöht.

Uhrenungenauigkeit und Rundungsfehler

Eine weitere Fehlerquelle ist, trotz der Synchronisierung der Uhr während der Positionsbestimmung auf die Zeit der Satelliten, die verbleibende Ungenauigkeit der Empfänger-Uhr. Die verbleibende Uhrenungenauigkeit der Satelliten macht einen Fehler von ca. 2 Metern aus. Rundungs- und "Rechenfehler" der Empfänger bewirken etwa einen 1 Meter Ungenauigkeit.

Relativistische Effekte

Hier wird jetzt keine Erklärung der allgemeinen oder speziellen Relativitätstheorie erfolgen, aber da diese Effekte einen wichtigen Einfluss auf das Funktionieren des GPS-Systems haben, soll kurz erwähnt werden, weshalb das so ist. Damit wird aber auch klar, dass die Relativitätstheorie kein theoretisches Gebilde mehr ist, sondern uns heute ganz selbstverständlich im täglichen Leben begleitet.

Da, wie bereits erwähnt, die Zeit bei der ganzen GPS-Navigation ein sehr kritischer Faktor ist und bis auf 20 - 30 Nanosekunden genau bekannt sein muss, um die gewollte Genauigkeit zu erreichen, spielt hier die schnelle Bewegung der Satelliten eine Rolle. Wer sich schon einmal mit der speziellen Relativitätstheorie auseinandergesetzt hat, (oder auseinandergesetzt wurde!), weiss, dass bei schneller Bewegung die Zeit langsamer vergeht als im Stillstand. Für die Satelliten, die sich mit 3874 m/s bewegen, bedeutet das aber, dass deren Uhren von der Erde aus gesehen langsamer gehen. Diese relativistische Zeitdilatation macht einen Zeitfehler von etwa 8 Nanosekunden (1 Nanosekunde = 10^{-9} Sekunden) pro Tag aus.

Die allgemeine Relativitätstheorie sagt nun aber zudem, dass die Zeit umso langsamer vergeht, je stärker das Gravitationsfeld ist, dem man ausgesetzt ist. Dieser Effekt führt dazu, dass ein Beobachter auf der Erde die Uhr des Satelliten, der ja in 20200 km Höhe einem geringeren Erdgravitationsfeld ausgesetzt ist, als der Beobachter, als zu schnell empfindet. Dieser Effekt ist etwa sechsmal so gross wie der durch die Geschwindigkeit hervorgerufene. In Summe gesehen scheinen die Uhren der Satelliten also etwas zu schnell zu laufen. Die Zeitverschiebung zum Beobachter auf der Erde wäre etwa 38 Mikrosekunden pro Tag und würde einen Gesamtfehler von etwa 10 Kilometern pro Tag ergeben. Damit man sich nicht ständig mit diesen Fehlern herumschlagen muss haben sich die Entwickler der GPS-Systems etwas einfache und schlaues einfallen lassen. Sie haben die Uhren der Satelliten auf 10.229999995453 Mhz anstatt 10.23 Mhz eingestellt, tun aber so, als hätten sie wirklich 10.23 MHz. Damit werden die Relativistischen Effekte kompensiert.

Es gibt noch einen weiteren Relativistischen Effekt, der bei normalen GPS Positionsbestimmungen nicht berücksichtigt wird: Der Sagnac-Effekt. Dieser kommt dadurch zustande, dass sich ein Beobachter auf der Erde durch die Erdrotation ebenfalls mit bis zu 500 m/s (am Äquator) bewegt. Da der Einfluss dieses Effekts sehr gering und kompliziert zu berechnen ist, da der richtungsabhängig ist, wird er nur in besonderen Fällen berücksichtigt. Wer das Ganze noch ein wenig ausführlicher wissen will, sollte hier nachsehen. Insgesamt sieht die Fehlerbilanz etwa folgendermassen aus, wobei die Werte keine festen Größen, sondern durchaus Schwankungen unterworfen sind. Die angegebenen Werte sind circa-Werte.

Störungen durch die Ionosphäre	± 5 Meter
Schwankungen der Satellitenumlaufbahnen	± 2.5 Meter
Uhrenfehler der Satelliten	± 2 Meter
Mehrwegeeffekte	± 1 Meter
Störungen durch die Troposphäre	± 0.5 Meter
Rechnungs- und Rundungsfehler	± 1 Meter

Insgesamt ergibt sich daraus ein Fehler von ± 15 Metern. Mit aktivierter SA waren es noch etwa ± 100 Meter

Erreichbare Genauigkeit

Ein typischer GPS-Empfänger für die zivile Nutzung bietet heute eine Genauigkeit von bis zu wenigen Metern. Hierbei fällt jedoch die Anzahl der empfangenen Satelliten und die Geometrie stark ins Gewicht, so dass im praktischen Gebrauch Genauigkeiten um 20 Meter erwartet werden können. Ausgefeiltere und teure GPS Empfängersysteme wie sie für die Landvermessung

Verwendung finden kosten mehrere tausend Euro und erreichen Genauigkeiten im Zentimeter-Bereich.

Mit eingeschalteter "Selective Availability" (SA) erreichten die Empfänger typischerweise Genauigkeiten von etwa 100 Metern (diese Angaben gelten immer für 95 % der Fälle).

Nach der Abschaltung der SA stieg die Genauigkeit auf etwa 15 Meter, je nach verfügbarer Zahl und Stellung der Satelliten.

Differenzial GPS (DGPS)

Mit Hilfe der "Differenzial GPS" genannten Technik (DGPS) können jedoch auch zivile Empfänger Genauigkeiten von fünf bis manchmal unter einem Meter erreichen. Bei DGPS wird ein zweiter stationärer GPS Empfänger zur Korrektur der Messung des ersten eingesetzt. Ist die Position des zweiten stationären Empfängers sehr genau bekannt, so kann man mit Hilfe eines Langwellensenders (283.5 - 325.0 kHz) ein Korrektursignal ausstrahlen, das von einem mit dem mobilen GPS Empfänger verbundenen Empfänger ausgewertet wird. Das Korrektursignal wird wie das GPS-Signal selbst kostenlos ausgestrahlt, es entstehen lediglich die Kosten für die Anschaffung des Langwellenempfängers. Dieser Empfänger wird über eine dreiadrige Verbindung mit dem GPS verbunden und überträgt die Korrekturdaten in einem seriellen Datenformat (RTCM SC-104). Die Ausstrahlung dieser DGPS-Signale beschränkt sich teilweise auf Küstenregionen und wird häufig von der Küstenwache der einzelnen Länder vorgenommen.

Wide Area Augmentation System (WAAS)

Seit 1999 in den USA in Betrieb und seit 2001 auch für kleine tragbare GPS-Systeme verfügbar ist ein System mit dem Namen WAAS (Wide Area Augmentation System) was auf deutsch etwa mit "weiträumiges Erweiterungssystem" übersetzt werden könnte.

WAAS ist ein System, in dem etwa 25 Bodenstationen die die GPS-Signale überwachen, zwei Referenzstationen an den beiden Küsten der USA, die die Daten der Referenzstationen sammeln und die Korrekturdaten errechnen. Diese Daten enthalten Korrekturinformationen für die Satellitenumlaufbahnen, Uhrendrift der Satelliten und Signalverzögerungen, die durch die Ionosphäre und Atmosphäre verursacht werden. Die Daten werden dann über einen von zwei geostationäre Satelliten an die Empfänger übermittelt.

Seit Dezember 1999 ist WAAS nahezu durchgängig in Betrieb. Es wurde für die amerikanische Luftfahrtbehörde FAA für hohe Genauigkeit bei Landeanflügen entwickelt. Das WAAS-Signal ist für zivile Nutzung zugänglich und bietet sowohl auf dem Land wie auch auf See oder in der Luft eine weiterreichende Abdeckung, als sie bisher durch landgestützte DGPS-Systeme ermöglicht wurde. Im Gegensatz zur normalen DGPS-Korrektur sind für den Empfang keine zusätzlichen Empfänger nötig, es reicht aus, einen normalen GPS-Empfänger zu besitzen, dessen Software für den Empfang der WAAS-Korrektursignale vorbereitet ist.

Von Bedeutung ist allerdings, dass zur Funktion des WAAS "Sichtkontakt" zu einem der geostationären Satelliten vorhanden sein muss. Dies wird umso mehr erschwert, je nördlicher die Position des Empfängers ist, da die Höhe der geostationären Satelliten über dem Horizont entsprechend abnimmt. So ist WAAS vor allem für Navigation in offenem Land, die Luft- und Seefahrt von Bedeutung.

Weiterhin funktioniert das WAAS-System ausschließlich in Nord-Amerika, weil die entsprechenden Satellitensignale nur nach dorthin abgestrahlt werden und die Korrekturen nur für dort gültig sind. Werden Satellitennavigationsgeräte außerhalb Nord-Amerikas mit eingeschalteter WAAS - Funktion benutzt, so kann sich sogar das Ergebnis der Messung verschlechtern. Mit Hilfe des WAAS-Systems lassen sich Genauigkeiten von etwa 3 Metern erreichen.

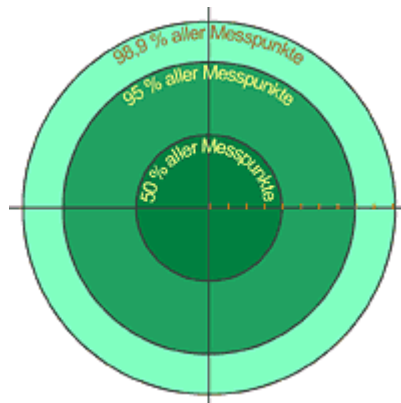
In den nächsten Jahren wird ein dem WAAS entsprechendes System in Europa namens EGNOS (Euro Geostationary Navigation Overlay Service - Europäischer Zusatz-Navigationsdienst) und im asiatischen Raum ein japanisches System namens MSAS (Multi-Functional Satellite

Augmentation System) aufgebaut werden. Diese Systeme arbeiten alle nach dem gleichen Prinzip, so dass GPS-Empfänger, die bereits heute WAAS unterstützen in Zukunft auch von EGNOS und MSAS profitieren werden. Näheres zum WAAS/EGNOS-System hier.

Garmin's Genauigkeitsangabe

Die Genauigkeitsanzeige der Garmin-GPS sorgt häufig für Verwirrung. Was bedeutet nun eigentlich, wenn das Gerät beispielsweise anzeigt. Genauigkeit: 4 m. (Dies ist ein häufig zu erreichender Wert)

Die Anzeige bezieht sich auf die sogenannte 50 % CEP (Circular Error Probable). Das heisst, dass sich 50 % aller Messungen in einem Kreis mit dem angegebenen Radius befinden, also hier 4



m. Das bedeutet aber auch, dass die Hälfte der Messpunkte ausserhalb dieses Radius sind. Es ist aber weiterhin so, dass sich 95 % aller Messpunkte innerhalb eines Kreises mit dem doppelten angegebenen Radius befinden. Und weiterhin 98,9 % der Messungen in einem Kreis mit dem 2,55 fachen Radius. Nahezu alle Punkte befinden sich also im angegebenen Beispiel in einem Kreis mit etwa 10 m Radius. Die bestimmte Position ist dann also praktisch immer auf etwa schlimmstenfalls 10 m genau.

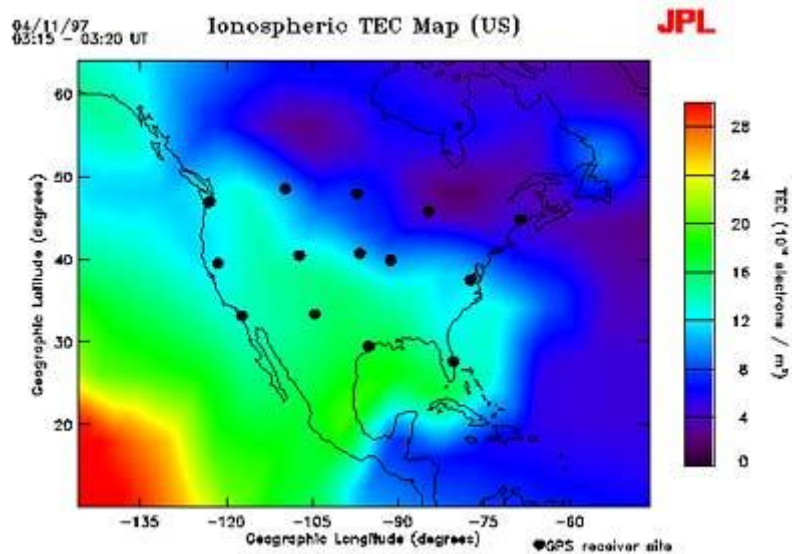
Der Unterschied zwischen WAAS, EGNOS und MSAS

Das Prinzip ist bei allen drei Systemen das gleiche und die Systeme werden sogar miteinander kompatibel sein. Das kann man beinahe schon als erstaunlich bezeichnen, da WAAS von den Nordamerikanern, EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) von den Europäern und MSAS (Multi-Functional Satellite Augmentation System) von den Japanern bzw. allgemein asiatischen Ländern entwickelt und betrieben wird. Während sich das WAAS-System nun bereits seit einigen Jahren im fortgeschrittenen Testbetrieb befindet, hat das EGNOS-System vor allem im Jahr 2002 grosse Fortschritte gemacht. Die Entwicklung des MSAS hingegen erfuhr 1999 einen herben Rückschlag, nachdem der erste von zwei für diesen Dienst benötigten Satelliten beim Start verloren ging. Anfang 2003 ist der Start des Ersatzsatelliten geplant. Selten hört man als Sammelbegriff der Systeme die Bezeichnung SBAS (Satellite Based Augmentation Systems, Satellitengestützte Erweiterungssysteme), obwohl damit eigentlich alle drei Systeme gemeinsam beschrieben würden.

Signalverzögerungen durch die Ionosphäre

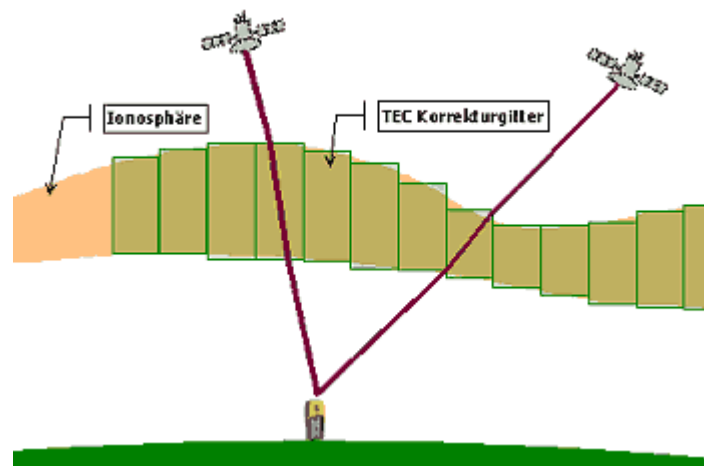
Das für zivile Nutzer wohl wichtigste Ergebnis ist das IONO Korrekturgitter. Da nach Abschaltung der künstlichen Signalverschlechterung (SA) die größte Fehlerquelle für Einfrequenzempfänger die Signalverzögerungen der Ionosphäre sind, hat eine exaktere Korrektur als das in jedem GPS-Empfänger allgemeine Ionosphärenmodell direkte und grosse

Auswirkungen auf die Genauigkeit der bestimmten Position. Aus den Messdaten der RIMS wird nun eine Art Karte mit der Gesamtelektronenmenge (TEC = Total Electron Content) des Gebietes berechnet, welches von den Empfangsstationen abgedeckt wird. Mit etwas verminderter Genauigkeit lässt sich dies sogar über ein weiteres Gebiet berechnen.



Diese ganzen Informationen werden nun an Geostationäre Satelliten gesendet. Für das EGNOS-System von von Aussaguel (Frankreich, bei Toulouse) an den IMARSAT AOR-E und von Fucino (Italien) aus an INMARSAT IOR.

Die Geostationären Satelliten senden auf der selben Frequenz wie die GPS-Satelliten ein sehr ähnliches Signal wie die GPS-Satelliten. Damit können die Satelliten zum einen zur Positionsbestimmung verwendet werden und weiterhin werden die gesendete Informationen im GPS-Empfänger dazu verwendet, die Genauigkeit der Positionsbestimmung zu verbessern. Mit Hilfe dieser Ionosphären-Karte kann nun für jedes Signal eines GPS-Satelliten, das zur Positionsberechnung verwendet wird, der Durchtrittspunkt durch die Ionosphäre bestimmt und die Signalverzögerung berechnet werden.



Die Ionosphäre verändert sich mit der Sonnenaktivität und damit auch im Laufe des Tages. So ist beispielsweise bekannt, dass normale Einfrequenz GPS-Positionen Nachts nach Mitternacht beispielsweise eine höhere Genauigkeit aufweisen als Tagsüber. Die übrigen Funktionen zur Integritätsüberprüfung des GPS-Systems, die die WAAS-System bieten, werden von Handheld-Empfängern vermutlich nie ausgewertet, da die notwendigen Berechnungen zu komplex sind und die Aussagen daraus vermutlich auch für den Normalbenutzer nicht sinnvoll sind.

Abdeckungsbereich der geostationären Satelliten

Der Bereich, in dem WAAS, EGNOS und MSAS verfügbar sind, hängt zum einen davon ab, wo überall RIMS stehen, deren Informationen zur Berechnung verwendet werden und zum anderen davon, wo die Signale der geostationären Satelliten empfangen werden können. Als Satelliten zur Ausstrahlung der Korrektursignale werden Inmarsat-Satelliten verwendet, die alle eine geostationäre Umlaufbahnen (ca. 36000 km) haben und eigentlich Telefonsatelliten für Telefongespräche von und zu Schiffen sind. Nachfolgende Grafik zeigt die momentan zur Ausstrahlung verwendeten Inmarsat-Satelliten und deren "Footprint" also der Bereich, in dem die Signale empfangen werden können.

