

NAVSTAR GPS - Geschichtliches

Das GPS-System ist ein vom amerikanischen Verteidigungsministerium (DOD; Department of Defense) ersonnenes, realisiertes und betriebenes System, das aus (geplant) 24 Satelliten besteht (21 werden benötigt, 3 sind aktiver Ersatz; heute sind es allerdings meist um die 30 aktive Satelliten), welche die Erde in einer nominellen Höhe von 20200 km umkreisen. GPS Satelliten senden Signale aus, welche die genaue Ortsbestimmung eines GPS Empfängers ermöglichen. Die Empfänger können ihre Position ermitteln, wenn sie feststehend sind, sich auf der Erdoberfläche in der Erdatmosphäre oder in niederen Umlaufbahnen bewegen. GPS wird sowohl in der Luft-, Land- und Seefahrtnavigation als auch bei der Landvermessung und anderen Anwendungen eingesetzt, bei denen es auf genaue Positionsbestimmung ankommt. Das GPS-Signal wird jedem auf oder in der Nähe des Planeten kostenlos zur Verfügung gestellt, der einen GPS-Empfänger besitzt und eine uneingeschränkte "Sicht" auf die Satelliten hat. Der eigentlich Name des Systems ist NAVSTAR (**N**avigation **S**ystem for **T**iming and **R**anging), bekannt ist es aber nur als GPS (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem).

- | | |
|-------------|--|
| 1973 | Beschluss zur Entwicklung eines Satellitennavigationssystems basierend auf den Systemen TRANSIT, TIMATION und 621B der U.S. Air Force und der U.S. Navy. |
| 1974 - 1979 | Systemtests |
| 1977 | Erste Empfängertests noch bevor die ersten Satelliten im Weltraum waren. Es wurden Sender am Boden aufgestellt, die als Pseudolites (Pseudosatellites) bezeichnet wurden. |
| 1978 - 1985 | Start von insgesamt elf Block I Satelliten |
| 1979 | Beschluss das GPS System komplett auszubauen. Kurz darauf wurden die Mittel stark gekürzt und das Programm etwas restrukturiert. Zunächst sollten daraufhin nur 18 Satelliten in Betrieb gehen, 1988 wurde aber wieder auf die 24 ursprünglich geplanten Satelliten zurückgegangen, da die Funktionalität nicht zufriedenstellend war. |
| 1980 | Start des ersten Block I Satelliten mit Sensoren zur Erkennung von Atomexplosionen nachdem 1963 zwischen den USA und der Sowjetunion ausgehandelt wurde, keine Atomtests mehr überirdisch, unter Wasser oder im Weltraum durchzuführen. |
| 1980- 1982 | Immer wieder war die Finanzierung gefährdet, da der Nutzen des Systems für die Finanzierenden oft nicht erkennbar wurde. |
| 1983 | Nach dem Abschuss des zivilen Flugzeugs Korean Airline 007 über sowjetischem Territorium, welches dort irrtümlich unterwegs war, wurde beschlossen, das GPS-System auch für die zivile Nutzung zur Verfügung zu stellen. |
| 1986 | Der Space Shuttle "Challenger" Unfall hatte einen Rückschlag zur Folge, da zwischenzeitlich beschlossen wurde, das Space Shuttle als Transporter der Block II GPS-Satelliten in die Umlaufbahnen vorgesehen war. Schliesslich wurde wieder auf die ursprünglich geplanten Delta-Rakteten zurückgegriffen. |
| 1989 | Der erste Block II Satellit wurde "installiert" und aktiviert. |

1990 - 1991	Zeitweise Abschaltung der SA (selective availability) während des Golfkriegs um zivile Empfänger nutzen zu können, da zu wenig militärische Empfänger verfügbar sind. Am 01.07.1991 wird die SA wieder aktiviert.
08.12.1993	Erste Betriebsbereitschaft (Initial Operational Capability, IOC) wurde bekanntgegeben. Im gleichen Jahr wurde auch definitiv beschlossen, dass das GPS-System für weltweite zivile kostenlose Nutzung freigegeben wird.
März 1994	Der letzte Block II Satelliten komplettiert die Satellitenkonstellation.
17.07.1995	Volle Betriebsbereitschaft (Full Operational Capability, FOC)
01.05.2000	Endgültige Abschaltung der SA und damit Erhöhung der Genauigkeit für zivile Nutzer von ca. 100 m auf 20 m.
20.03.2004	Start des 50sten GPS-Satelliten.
25.09.2005	Start des ersten Satelliten des Typs IIR-M (Block 2 Replacement Modernized; Modernisierter Block 2 Ersatzsatellit). Dieser Satellit unterstützt als erster die neuen militärischen M-Signale und das zweite zivile Signal L2C.

Der Aufbau des GPS-Systems

Das GPS-System lässt sich in drei grundlegende Segmente unterteilen, die nachfolgend besprochen werden:

- Weltraumsegment (Satelliten)
- Kontrollsegment (Kontrollstationen)
- Benutzersegment (GPS-Empfänger)

Das Weltraumsegment



GPS-Block IIF Satellit

Das Weltraumsegment besteht aus mindestens 24 Satelliten. Der erste dieser Satelliten wurde bereits 1978 in seine Umlaufbahn gebracht. Mittlerweile gibt es fünf

verschiedene Typen (Block I, Block II, Block IIA, Block IIR und Block IIF) dieser Satelliten, die natürlich im Laufe der Jahre immer weiter entwickelt wurden.

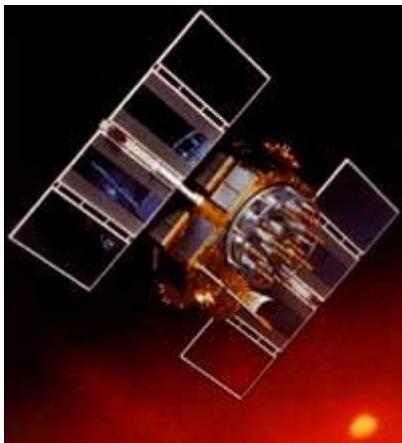
Block I Satelliten



GPS-Block I Satellit ([Quelle:NASA](#))

Zwischen 1978 und 1985 wurden von Kalifornien aus elf Block I Satelliten mit jeweils einer Masse von 845 kg gestartet, von denen heute jedoch kein einziger mehr in Betrieb ist. Diese Satelliten waren für eine Lebensdauer von 4,5 Jahren konzipiert, überlebten jedoch ihr geplantes Alter um weitere fünf Jahre. Einer der Satelliten war 13 Jahre lang in Betrieb. Bei den Block I Satelliten, die als Prototypen lediglich der Erprobung des Systems dienen, waren alle Signale für zivile Nutzer zugänglich. Zur Stromversorgung dienen Solarpanels mit 400 Watt Leistung. Während sich die Satelliten im Erdschatten befanden, dienten Nickel-Cadmium-Zellen als Reserve. Die Triebwerke zur Positionskorrektur wurden mit Hydrazin betrieben. Informationen zu den Block I Satelliten können [hier](#) eingesehen werden (englisch), die Informationen sind jedoch von 1996, da alle Block I Satelliten mittlerweile ausser Betrieb sind.

Block II Satelliten



GPS-Block IIA Satellit ([Quelle:NASA](#))

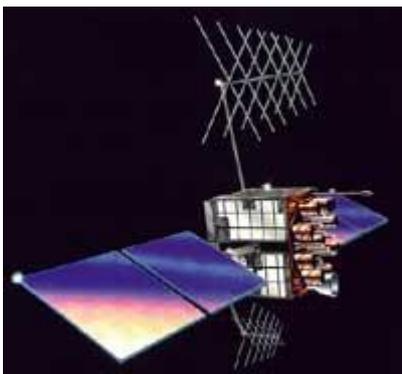
Die Block II Satelliten wiegen mit über 1500 kg etwa das doppelte der Block I Satelliten. Der erste dieser Satelliten wurde 1989 von Cape Canaveral aus gestartet. Diese Satelliten haben eine "Spannweite" von ca. 5,1 m. Die Block II Satelliten sind

für eine Betriebsdauer von 7,5 Jahren ausgelegt. Insgesamt wurden 9 Block II Satelliten und 18 Block IIA Satelliten bis September 1996 gestartet. Obwohl die Satelliten sich weiterhin auf sechs unterschiedlichen Bahnen mit einem jeweils gleichen Winkel zum Äquator befinden, haben die neueren Block II Satelliten eine etwas veränderte Konstellation. Im Jahr 1990 wurde der erste Block IIA-Satellit (A steht für "advanced") in seine Umlaufbahn gebracht. Infos über den Status der Block II Satelliten gibt es [hier](#) (englisch). Der Status des Gesamtsystems ist [hier](#) zu finden (englisch).



Kleine Atomuhr (zu sehen im [Verkehrshaus Luzern](#))

Die Block II und Block IIA Satelliten besitzen jeweils zwei Rubidium und zwei Cäsium [Atomuhren](#) mit einer Uhrenstabilität von mindestens 10^{-13} s. Aus der Grundfrequenz der Atomuhren (10,23 MHz) leiten sich alle anderen benötigten Frequenzen ab. Die Satelliten des Blocks IIR haben drei Rubidium-Atomuhren an Bord. Diese extreme Ganggenauigkeit von ± 1 Sekunde in 1 Million Jahren ist absolut notwendig für das Funktionieren des Systems. Warum wird im Kapitel [Positionsbestimmung](#) erklärt.



GPS-Block IIR und II-M Satellit

Bei diesen neuen Block IIR Satelliten ist jetzt nur noch das sogenannte C/A-Signal (Coarse/Aquisition) für zivile Anwendungen zugänglich. Die Stromversorgung und der Antrieb blieben gleich wie bei den Block I Satelliten, die Solarpanels leisten jetzt allerdings 750 Watt.

Von der nächsten Generation (Block IIR (replenishment - Auffrischung)) Satelliten sollten ursprünglich jeweils drei Stück mit dem Space Shuttle in ihre Umlaufbahn gebracht werden, nach der Challenger Katastrophe (1986) wurde dann aber beschlossen, jeweils zwei Satelliten mit einer Delta-Rakete in den Orbit zu bringen.

Im September 2005 wurde der erste Satellit der nächsten Generation (Block IIR-M) gestartet. Dieser Satellit unterstützt als erster eine zweite Frequenz für die zivile Nutzung (L2C) und ein neues militärisches Signal (L1M, L2M). Der neue Satellit wiegt 2 Tonnen und kostet 75 Millionen Dollar. Weitere der IIR-M Satelliten sollen 2006 folgen.



Start einer Delta-Rakete (Bild: NASA)

Paradoxerweise gingen dabei bereits die ersten beiden Satelliten verloren, da aufgrund einer Fehlfunktion der Delta II Rakete (übrigens die erste Fehlfunktion bei einer Rakete diesen Typs) diese kurz nach dem Start zerstört werden musste.

Alle Block II Satelliten haben weiterhin noch einige zusätzliche Fähigkeiten, die aber mit dem eigentlichen GPS-System nichts zu tun haben. Dazu gehören beispielsweise Sensoren, die Atomexplosionen detektieren können. Der bisher letzte Block IIa Satellit wurde am 30. Januar 2001 von Cape Canaveral aus gestartet.

Der Start eines Block II Satelliten kostet etwa \$ 50 Mio., was deutlich macht, welche hohen Investitionskosten das System birgt. Diese enormen Ausgaben werden teilweise nur deshalb vom US Kongress bewilligt, weil das System sowohl militärisch als auch zivil genutzt werden kann. Aktuelle Informationen zum Status der Block II Satelliten kann [hier](#) oder [hier](#) eingesehen werden (englisch).

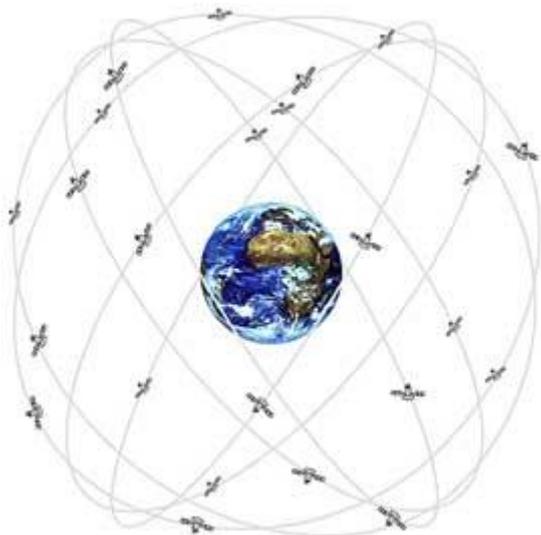
Die nächste Generation der Satelliten (Block IIF) soll voraussichtlich über eine dritte Frequenz für die zivile Nutzung verfügen (L5), die dann Positionsbestimmungen mit noch größerer Genauigkeit ermöglicht. Diese Satelliten des Block IIF besitzen anstatt der Rubidium- bzw. Cäsium-Atomuhren Wasserstoffmaser, die eine noch größere Genauigkeit aufweisen. Die neuen Satelliten werden nach der bisherigen Planung aber erst deutlich nach 2005 einsatzbereit sein.

Die Abstrahlungsleistung der Satelliten beträgt momentan lediglich maximal 50 Watt. Zum Vergleich: Fernsehsatelliten wie die ASTRA-Satelliten strahlen mit einer

Leistung von etwa 100 Watt, jedoch nur über Europa und man benötigt mindestens eine 50 cm Parabolantenne für den Empfang ohingegen eine GPS-Antenne meist nur wenige Zentimeter gross ist. Bei den Fernsehsatelliten sind die Datenübertragungsraten jedoch unvergleichlich höher.

Aufgrund der verwendeten hohen Frequenz können die Signale weder Stein noch Wasser durchdringen und werden unter Umständen bereits von sehr dichter Belaubung in Wäldern so stark abgeschwächt, dass manche (vor allem ältere) Empfänger Schwierigkeiten bekommen können. Allerdings funktioniert das GPS bei jedem Wetter, also auch bei stärkster Bewölkung (Probleme können jedoch bei sehr starkem Schneefall auftreten).

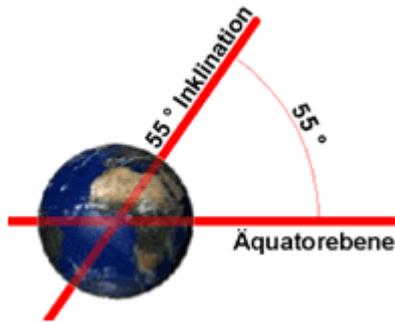
Umlaufbahnen der GPS Satelliten



Satellitenbahnen (Abstände sind massstabsgetreu)

Die Satelliten umkreisen die Erde mit 3,9 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, in denen jeweils vier Satelliten in gleichen Abständen vorgesehen waren. Heute sind es meist mehr als 24 Satelliten, was die Verfügbarkeit weiter erhöht. Die Inklination der Ebenen beträgt 55 °. Das bedeutet, dass die Umlaufbahnen die Satelliten bis 55 ° nördlicher und 55 ° südlicher Breite führen. (Die Satelliten des Block I hatten noch eine Inklination der Bahnebene gegenüber dem Äquator von 63 °). Die Ebenen sind in der Äquatorebene um jeweils 60 ° gegeneinander versetzt.

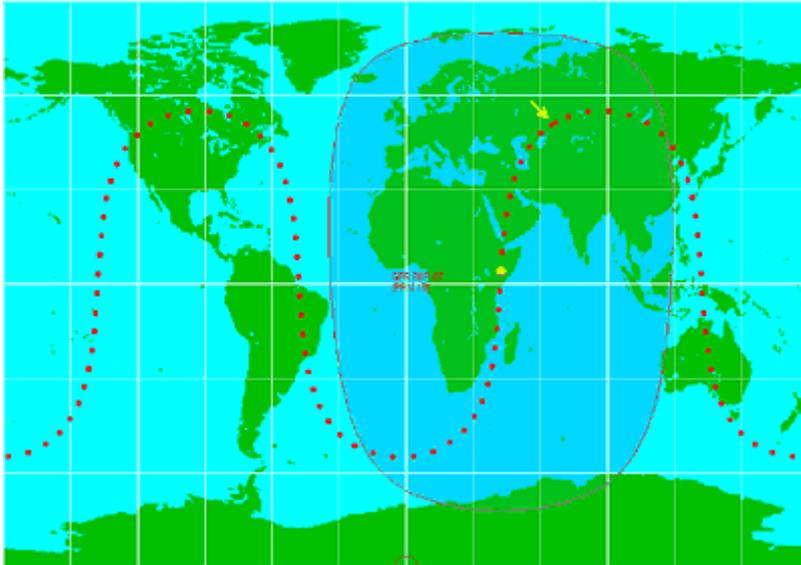


Inklination der Umlaufbahnen

Durch diese besondere Anordnung der Bahnen wird vermieden, dass sich überdurchschnittlich viele Satelliten über den Polen befinden (wie es beim TRANSIT-System mit auf Polbahnen verlaufenden Satelliten der Fall war), andererseits verlaufen die Bahnen nördlich genug, dass auch den Einsatz von GPS in polnahen Gebieten möglich ist. Weiterhin führt diese Anordnung auch zu einer relativ stabilen Konstellation, da Störfaktoren (z.B. Gravitationsfelder, Sonnenwinde) im Mittel auf alle Satelliten gleich einwirken.

Die Anzahl und Anordnung der Satelliten hat zur Folge, dass immer mindestens vier 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 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 Entfernungen auf der Darstellung der Bahnen auf dem oberen Bild ist in etwa maßstabsgetreu (Vergleich des Erdradius mit den Umlaufbahnen).

Die nachfolgende Grafik zeigt den Groundtrack (Subsatellitenbahn - Bahn auf der Erde, über dem der Satellit jeweils senkrecht steht) des Satelliten BIIR-07 (PRN 18) von 18.10.01 00:00 Uhr bis 19.10.01 00:00 Uhr. Der gelbe Pfeil zeigt jeweils die 00:00 Zeiten. Man sieht, dass sich die Umlaufzeit leicht (4 Minuten) verschiebt. Der gelbe Punkt zeigt den Subsatellitenpunkt um 21:30 Uhr. Der Satellit steht über Äthiopien. Die dazugehörige "Ausleuchtungszone", innerhalb derer der Satellit sichtbar ist, ist hellblau markiert. Die Grafik wurde mit dem FreeWare Programm [WinOrbit](#) erstellt (und leicht modifiziert).



Ground-Track (Subsatellitenbahn) des Satelliten GPS BIIR-07 (PRN 18) von 18.10.2001 00:00 Uhr bis 19.10.2001 00:00 Uhr

Wer sich die Umlaufbahnen der GPS (und auch anderer Satelliten) plastisch vor Augen führen möchte, dem sei folgender Link empfohlen: [J-Track 3D](#). Auf dieser Seite gibt es ein Java-Applet, das die Umlaufbahnen und Informationen von über 500 Satelliten darstellen kann.

Die Tracks der GPS-Satelliten lassen sich auch auf der Seite GPS Konstellation und Status einsehen.

Kontrollsegment (Bodenstationen)

Die Kontrolle über das GPS-System liegt vollständig in der Hand der US-Armee. Zur Überwachung der Satelliten dient eine "Master Control Station" sowie vier weitere Monitorstationen der U.S. Luftstreitkräfte auf Hawaii, den Ascension Islands, Diego Garcia und Kwajalein. Im August und September 2005 wurden noch weitere sechs Monitorstationen der NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) zum Überwachungsnetz hinzugefügt. Dadurch kann jeder Satellit rund um die Uhr von mindestens zwei Monitorstationen empfangen werden. Dies ermöglicht die genauere Überwachung der Umlaufbahnen und führt zu einer genaueren Beschreibung der Bahnen. Für den Endnutzer ergibt sich daraus eine etwas verbesserte Positionsgenauigkeit. In Zukunft sollen noch fünf weitere NGA Stationen hinzugefügt werden, so dass jeder Satellit immer von mindestens drei Stationen empfangen werden kann. Dadurch lässt sich eine wesentliche Verbesserung der Integritätsüberwachung des Systems erreichen.



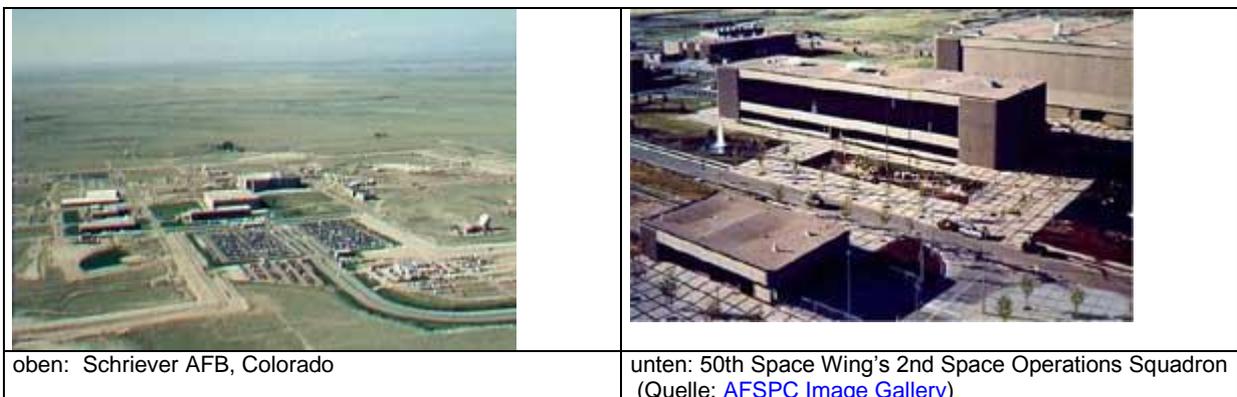
Position der Monitorstationen und der Master Control Station

(Weltkarte:NASA; <http://visibleearth.nasa.gov/>)



Satelliten-Tracking-Station auf Hawaii (Quelle: Schriever Air Force Base Satellite Flyer Vol. 6; No.12)

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.

Aktuelle Informationen zum Zustand des GPS-Systems finden sich [hier](#) und [hier](#) (englisch).

Benutzersegment (GPS-Empfänger)



Älteres GPS-Gerät (Magellan GPS 2000)

GPS-Satellitenempfänger lassen sich mittlerweile so kompakt bauen, dass sie sogar in eine Armbanduhr integriert werden können. Die meisten der heute angebotenen Geräte für den Privatgebrauch haben etwa die Größe eines Mobiltelefons. Alle heute angebotenen Geräte haben mindestens 12 Kanäle, d.h. sie können die Daten von bis zu 12 Satelliten gleichzeitig verarbeiten und auswerten. Ältere Geräte mussten die Auswertung teilweise nacheinander durchführen, wodurch die wesentlich langsamer und ungenauer waren, sowie empfindlicher auf Störungen reagiert haben. Geräte für den professionellen Einsatz (Vermessung, Militär) sind typischerweise etwas größer und aus verschiedenen Gründen wesentlich genauer.

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, aber es kommt der Wahrheit schon recht nah. Zusätzlich sendet der Satellit noch Informationen über seine Umlaufbahn (und die der anderen Satelliten). Diese Bahndaten (Ephemeriden- und Almanachdaten) werden vom GPS-Empfänger gespeichert und für spätere Rechnungen verwendet.

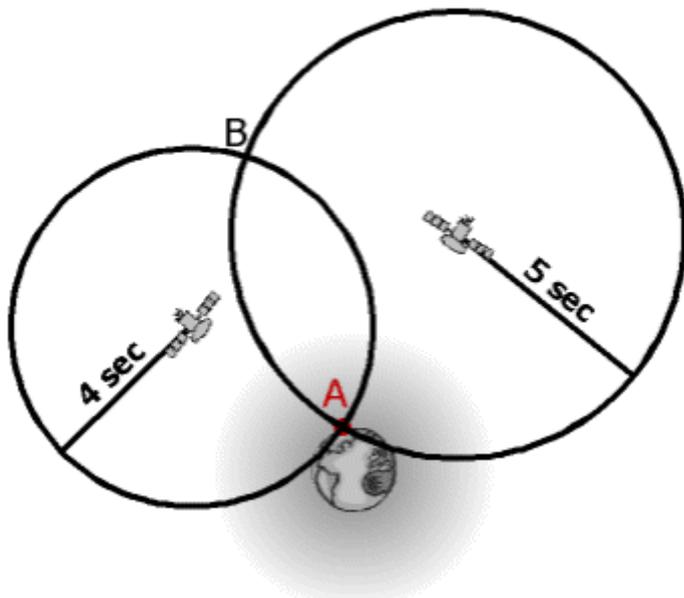
Um nun die Position zu bestimmen, vergleicht der GPS-Empfänger die Zeit, zu der das Signal ausgesandt wurde mit der Zeit, zu der das Signal empfangen wurde. Aus dieser Zeitdifferenz kann die Entfernung des Satelliten berechnet werden. Werden nun von weiteren Satelliten Messungen hinzugefügt, so kann die aktuelle Position durch Trilateration (Entfernungsmessung von drei Punkten aus) bestimmt werden. Mit wenigstens drei Satelliten kann der GPS Empfänger seine Position auf der Erdoberfläche bestimmen. Dies wird "2D position fix" (zweidimensionale Positionsbestimmung) genannt. Zweidimensional deshalb, weil der Empfänger davon ausgehen muss, sich direkt auf der Erdoberfläche (also einer rechnerisch zweidimensionalen Fläche) zu befinden. Mit Hilfe von vier oder mehr Satelliten kann ein "3D position fix", also die absolute Position im Raum oder eben zusätzlich die Höhe über der Erdoberfläche 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.

Vereinfacht liegt also der Positionsbestimmung mit Hilfe von GPS das gleiche Prinzip zugrunde, das man bereits als Kind genutzt hat, um die Entfernung eines Gewitters abzuschätzen. Hierbei wird einfach gezählt, welche Zeitdifferenz zwischen dem Einschlag des Blitzes (im Vergleich zur Schall- ist die Lichtgeschwindigkeit so hoch, dass man die Laufzeit des Lichts vom Einschlagpunkt zum Beobachter nicht berücksichtigen muss) und dem Eintreffen des Donners vergangen ist. Da Schall sich in Luft mit etwa 340 m/s ausbreitet ergibt sich so aus z.B. 3 Sekunden zwischen Blitz und Donner eine Entfernung von etwa 1 Kilometer.

Dabei machen wir allerdings noch keine Positionsbestimmung, sondern nur eine Entfernungsbestimmung. Mit mehreren Entfernungsbestimmungen lässt sich jedoch eine Positionsbestimmung durchführen. Um beim Beispiel mit dem Blitz zu bleiben würde das bedeuten, dass wenn mehrere Leute an unterschiedlichen Positionen, die natürlich bekannt sind, stehen und die Zeit zwischen Blitzeinschlag und Donner messen, die Position des Blitzeinschlags bestimmen könnten.

Im Folgenden nun eine Erklärung, wie die Positionsbestimmung beim GPS-System vonstatten geht. Zur Vereinfachung soll zunächst von einer zweidimensionalen Welt ausgegangen werden, da hier die Übersichtlichkeit um "Dimensionen" besser ist und sich das ganze auch vernünftig aufzeichnen lässt. Später kann das Gesehene dann leicht in die wahre dreidimensionale Welt übertragen werden.



Positionsbestimmung mit zwei Satelliten (2-dimensionale Welt)

In unserem Beispiel haben wir die Zeit, die ein Signal vom ersten der beiden Satelliten bis zu unserem Standpunkt benötigt mit 4 Sekunden bestimmt. (Dieser Wert ist natürlich unrealistisch hoch, aber das macht jetzt nichts. Tatsächlich ist die Laufzeit der Signale vom Satelliten zur Erdoberfläche bei einer Lichtgeschwindigkeit von 299 792 458,0 m/s etwa 0,07 Sekunden, aber das ändert ja nichts am Prinzip.) Wenn wir nur diese Information haben, können wir immerhin schon sagen, dass unsere Position irgendwo auf einem Kreis mit der "Entfernung" 4 Sekunden um den ersten Satelliten sein muss.

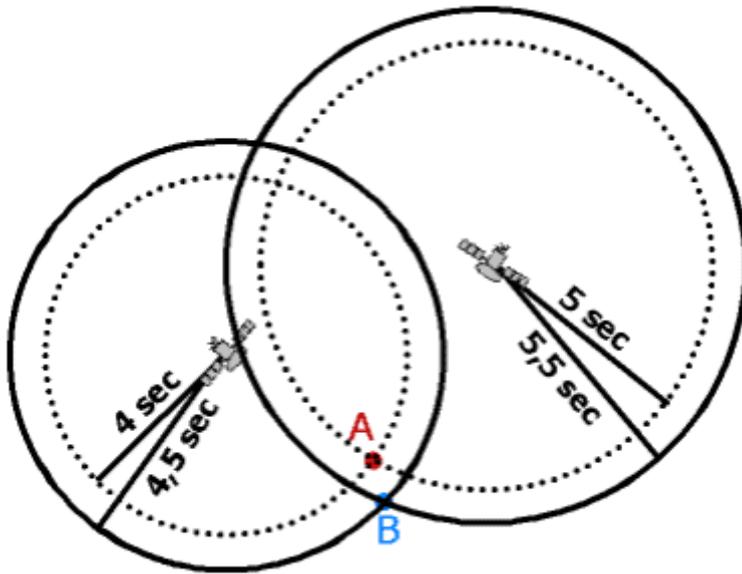
Wenn wir das ganze jetzt noch mit der Laufzeit eines zweiten Signals machen, bleiben zwei Schnittpunkte der Kreise als mögliche Positionen (Punkte A und B). Moment mal, brauchen wir nun nicht noch einen dritten Satelliten, schliesslich heisst es ja auch "Trilateration" und nicht "Dilateration"?

Nein, denn wir wissen ja bereits, dass wir uns wenigstens irgendwo in der Nähe der Erde befinden müssen (Punkt A) und nicht irgendwo weit draussen im Weltraum (Punkt B). Genau genommen haben wir damit unseren dritten "Satelliten" bzw. dritten Kreis, der mit den beiden anderen überlappen muss. Der im Bild grau hinterlegte Bereich ist der Bereich innerhalb dem das GPS-System in unserem Beispiel genutzt werden kann. Dieser Bereich ist jedoch sehr gross, da die Satelliten weit weg sind von der Erdoberfläche, so dass sich auch hoch fliegende Flugzeuge innerhalb dieses Bereichs befinden. Damit bleibt also nur ein einziger Punkt übrig, an dem wir uns befinden können und unsere Position ist genau bestimmt. Fertig!

Und für drei Dimensionen brauchen wir jetzt lediglich noch einen dritten Satelliten?

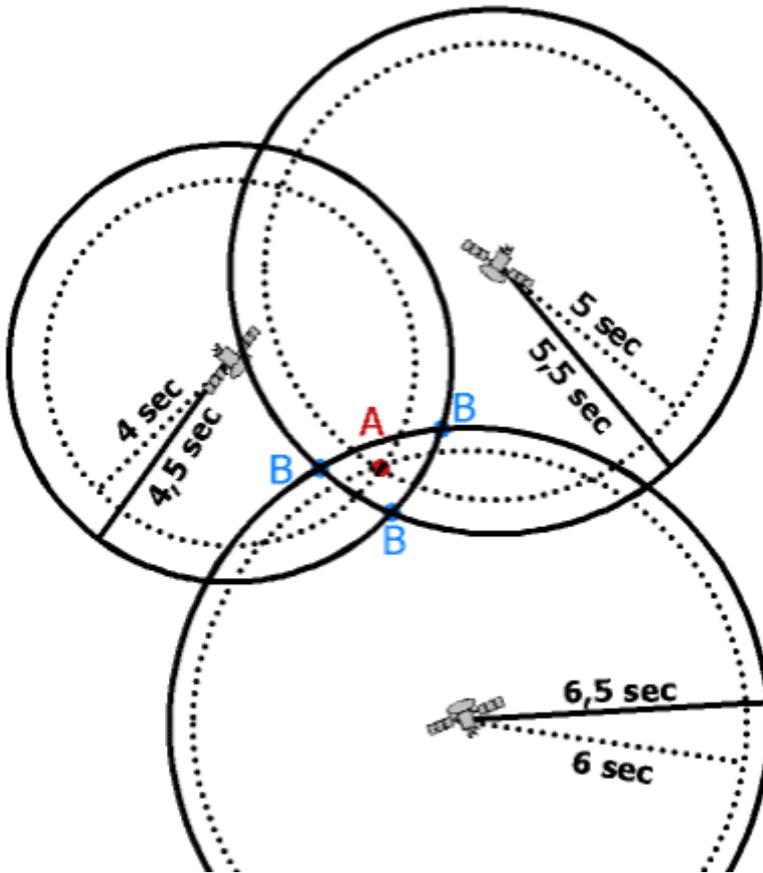
Im Prinzip ja, jedoch gibt es wie immer ein "Aber". Das Problem ist, die tatsächliche und exakte Laufzeit der Signale zu kennen. Die Satelliten übermitteln wie gesagt mit jeder Nachricht eine Art Zeitstempel, wann die Nachricht abgesandt wurde. Ausserdem wissen wir, dass die Uhren aller Satelliten absolut genau und synchron gehen, schliesslich sind Atomuhren an Bord. Das Problem ist jedoch die Uhr unseres GPS Empfängers. Kein GPS-Empfänger hat eine eingebaute Atomuhr, was ihn ungeheuer teuer machen würde. Unsere GPS-Empfänger haben "nur" Quarzuhren

und die gehen im Vergleich zu Atomuhren wirklich nicht sehr genau. Aber wie wirkt sich das nun in der Praxis aus?



2D Positionsbestimmung mit 2 Satelliten und angenommenem Uhrenfehler

Bleiben wir bei unserem Beispiel und nehmen an, die Uhr in unserem GPS Empfänger geht gegenüber den Uhren der Satelliten eine halbe Sekunden vor. Damit erscheint uns die Laufzeit der Signale von den Satelliten um 0,5 Sekunden länger. Das wiederum führt dann dazu, dass wir glauben am Punkt B anstatt am Punkt A zu sein. Die Kreise die sich in Punkt B schneiden werden im GPS-Wortschatz auch Pseudorange (Pseudoentfernungen) genannt. Diese werden so lange mit "Pseudo" bezeichnet, bis die Korrektur der Synchronisationsfehler (Bias) 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 eher mehr (als eher weniger) falsch ist und damit völlig unbrauchbar wäre. 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. Da keine Atomuhren in GPS-Empfängern zu finden sind, lässt sich das Problem anders auf elegante Weise lösen.



2D Positionsbestimmung mit 3 Satelliten und Korrektur des Uhrenfehlers

Zieht man nämlich 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 (Punkt A).

Betrachtet man den gleichen Fall aber unter der Voraussetzung, dass die Empfänger-Uhr eine halbe Sekunde vorgeht, so erhält man keinen eindeutigen Schnittpunkt mehr, sondern drei Schnittpunkte B aus je zwei Kreisen. Der Uhrenfehler fällt also sofort auf. Verschiebt man nun die Zeit der Empfängeruhr solange, bis aus den drei Schnittpunkten B ein Schnittpunkt A wird, so hat man den Uhrenfehler korrigiert und die Empfängeruhr läuft absolut synchron zu den Atomuhren der GPS-Satelliten. Der GPS-Empfänger wird zur "Atomuhr". Die Entfernungen zu den Satelliten, die als "Pseudorange" bezeichnet wurden, werden jetzt echte Entfernungsangaben und es wird auch klar, warum sie vorher nur als Pseudoentfernungen bezeichnet wurden.

In unserem Beispiel in der 2-dimensionalen Welt sind also die Signale von drei Satelliten nötig, um eine eindeutige Positionsbestimmung durchzuführen. In der Realität, die eine Dimension mehr hat, braucht man für eine 3D-Positionierung wie bereits erwähnt demnach vier Satelliten.

Warum hört man dann so oft, dass drei Satelliten ausreichen?

Man kann in der Praxis auch mit drei Satelliten eine Ortsbestimmung erhalten, aber nur eine zweidimensionale (2D-fix). Zweidimensional bedeutet, dass sich die zu bestimmende Position auf der Erdoberfläche befinden muss. Der für die Berechnung notwendige vierte Satellit wäre der Erdmittelpunkt und die zu diesem Satelliten bestimmte Entfernung wäre die Entfernung der Erdoberfläche vom Erdmittelpunkt

(6360 km). Somit hat man wieder vier gemessene Pseudoentfernungen aus denen die tatsächliche Position bestimmt wird. Aber eben mit der Einschränkung, dass der Empfänger immer davon ausgeht, dass man sich direkt auf der Erdoberfläche befindet. Erdoberfläche meint in diesem Fall das Erdgeoid, also Meereshöhe. Ist das nicht der Fall (ist man z.B. auf einem Berg), kommt es zu Fehlern bei der Bestimmung, da die Laufzeiten von den Satellitensignalen nicht stimmen.

Ausgesendete GPS-Signale

Die Art, wie mit Hilfe des GPS-Systems Positionen bestimmt werden und auch deren Genauigkeit 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.

Wahl der Trägerfrequenzen

Um die Datensignale zu transportieren wird zunächst eine geeignete Trägerfrequenz benötigt. Die Auswahl dieser Trägerfrequenz ist bestimmten Bedingungen unterworfen:

- Die Frequenz sollten unter 2 GHz gewählt werden, da Frequenzen darüber den Einsatz von Richtantennen in der Empfangseinheit erforderlich machen würden.
- Ionosphärische Verzögerungen sind in den Frequenzbereichen kleiner 100 MHz und größer 10 GHz enorm hoch.
- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen weicht bei Ausbreitung in Medien (also z.B. in Luft) umso stärker von der Lichtgeschwindigkeit (im Vakuum) ab, je tiefer die Frequenz ist. Dies würde bei sehr tiefen Frequenzen wiederum die Laufzeitberechnungen nachteilig beeinflussen.
- 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 gewählte Frequenz sollte in einem Bereich liegen, in dem die Signalausbreitung nicht durch Wetterphänomene (Wolken, Regen, Schnee usw.) bestört wird.

Aus diesen Überlegungen heraus hat sich die Wahl von gleichzeitig zwei Frequenzen als besonders geeignet herausgestellt, weshalb jeder der GPS-Satelliten zwei Trägersignale im Mikrowellenbereich überträgt, die als L1 und L2 bezeichnet werden (Die Bezeichnung L weist auf die Frequenz hin, die im L-Band liegt (L-Band: 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 nur von Empfängern die für den PPS (precision positioning code) vorgesehen sind (Zweifrequenz-Geräte, meist militärische Empfänger) verwendet.

Modulation der Trägersignale

C/A und P-Code

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 der Hauptkeule (also des stärksten Signals) von 2 MHz (P-Code auf L2: 20 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.

PRN-Nummern

Häufig werden die Satelliten vom Empfänger über PRN-Nummern identifiziert. Hierbei erhalten echte GPS-Satelliten Nummern von 1 - 32. WAAS/EGNOS-Satelliten und andere Pseudolites erhalten Werte darüber (siehe auch [hier](#)). Diese PRN-Nummern der Satelliten sind meist auf der Satellitenanzeigeseite des GPS-Empfängers wiederzufinden. Zur Vereinfachung des Satellitennetzwerks sind 32 verschiedene PRN Nummern zur Zuordnung für Satelliten vorhanden, obwohl nur 24 Satelliten für das System nötig würden und zunächst auch geplant waren. Seit längerem sind aber mehr als 24 Satelliten gleichzeitig aktiv, was die Verfügbarkeit, Ausfallsicherheit und Genauigkeit erhöht. Dadurch, dass mehr Nummern als Satelliten verfügbar sind, kann ein Ersatzsatellit gestartet und aktiviert werden, bevor der zu ersetzende Satellit tatsächlich ausfällt oder abgeschaltet wird. Für diesen Satelliten wird dann einfach eine der zusätzlichen Nummern verwendet.

Die erwähnten PRN-Codes sind nur scheinbar zufällig. Wären sie wirklich zufällig, so gäbe es 2^{1023} verschiedene Möglichkeiten für den PRN-Code. Von diesen eignen sich jedoch nur sehr wenige für die Kreuz/Autokorrelation, die zur Laufzeitmessung

benötigt wird (siehe Kapitel über die Entfernungsmessung [hier](#)). Diese 37 geeigneten Codes werden als GOLD-Codes bezeichnet (nach einem Mathematiker benannt). Bei diesen GOLD-Codes ist die Korrelation untereinander besonders schwach, wodurch eine eindeutige Identifikation ermöglicht wird.

Der C/A Code ist die Basis für alle zivilen GPS-Empfänger.

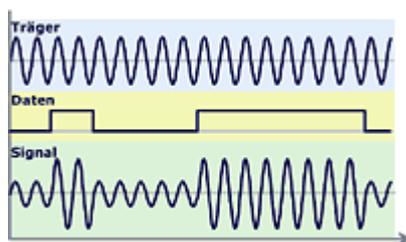
Der P Code (precise) moduliert sowohl die L1, als auch die L2 Trägerfrequenz und ist ein sehr langer 10,23 MHz Pseudozufallscode (sieben Tage werden verwendet, der Code selbst wäre aber 266 Tage lang).

Zur Absicherung gegen mögliche Störsignale eines Feindes verfügt der P-Code die Möglichkeit verschlüsselt übertragen zu werden. In diesem 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 nur verschlüsselt als Y-Code ausgesendet.

Übertragung der Daten

Im GPS-System werden die Daten durch Phasenmodulation auf das Trägersignal aufmoduliert. Diese Phasenmodulation dürfte im Gegensatz zu Amplitudenmodulation (AM) und Frequenzmodulation (FM) relativ unbekannt sein. Diese drei Arten der Modulation eines Trägersignals sollen deshalb kurz erläutert werden.

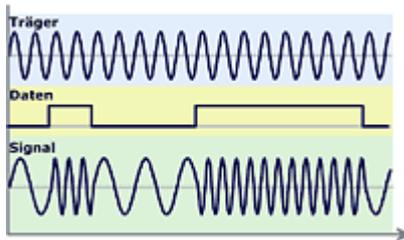
Amplitudenmodulation



Amplitudenmodulation eines
Datensignals auf einen Träger (Carrier)

Bei der Amplitudenmodulation wird, wie der Name schon sagt, die Amplitude, also die Stärke des Signals entsprechend dem anliegenden Datensignal verändert. Wendet man das Prinzip auf Schallwellen an, würde das heissen, man ändert die Lautstärke eines Tons, um so Daten zu übertragen. Mit zunehmender Abschwächung des Signals wird es immer schwieriger, die Daten aus dem Signal herauszufiltern. Diese Art der Modulation ist vom Mittelwellenradio her bekannt.

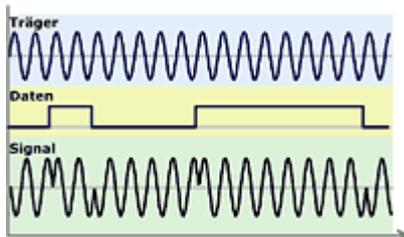
Frequenzmodulation



Amplitudenmodulation eines
Datensignals auf einen Träger (Carrier)

Bei Frequenzmodulation wird die Trägerfrequenz selbst durch Aufmodulieren des Datensignals verändert. Mit dem Beispiel der Schallwellen würde man also durch ändern der Tonhöhe bei konstanter Lautstärke Daten übertragen. Frequenzmodulierte Signale sind weniger anfällig gegen Störungen. Diese Art der Modulation ist vom UKW-Radio (FM) bekannt.

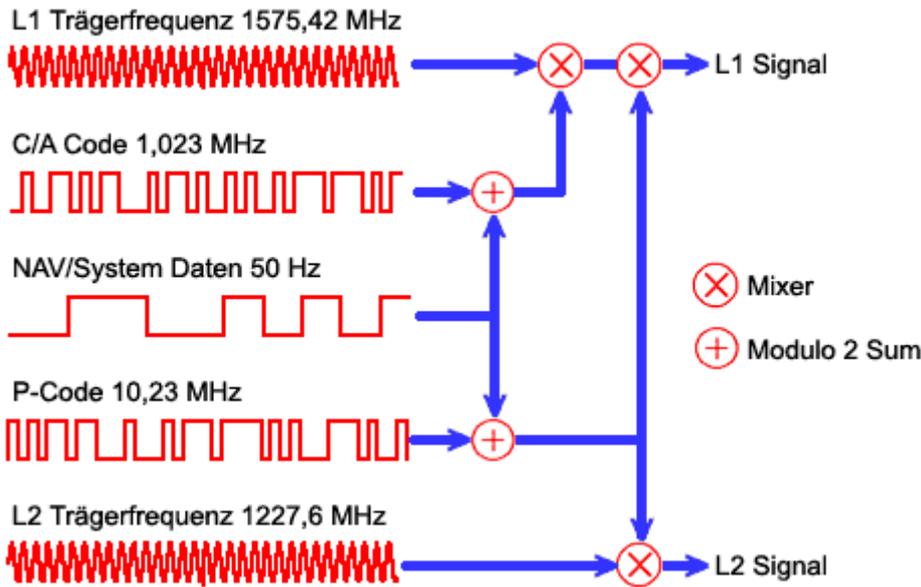
Phasenmodulation



Amplitudenmodulation eines
Datensignals auf einen Träger (Carrier)

Bei der Phasenmodulation wird bei Änderung des Datensignals die Sinusschwingung des Trägersignals abgebrochen und mit einer Phasenverschiebung von z.B. 180° (also einer halben Welle) wieder aufgenommen. Das Trägersignal kommt sozusagen aus dem Tritt. Diese Phasenverschiebung kann von einem geeigneten Empfänger erkannt und die Daten wieder extrahiert werden. Phasenmodulation führt zu einer Verbreiterung (spread spectrum) des Frequenzbereichs der Trägersignals. Dies sieht man in obigem Bild z.B. daran, dass bei einem Wechsel der Phase viel schneller "Wellenberge" oder "Wellentäler" aufeinanderfolgen als im ursprünglichen Trägersignal. Diese Art der Modulation eignet sich nur zur Übertragung von digitalen Daten.

Folgende Grafik zeigt die Zusammensetzung der von GPS-Satelliten ausgesendeten Signale. Der Aufbau der NAV/System Daten wird im Kapitel [Datensignalaufbau](#) beschrieben.



Zusammensetzung der Signale der GPS Satelliten (nach Peter H. Dana; mit freundlicher Genehmigung)

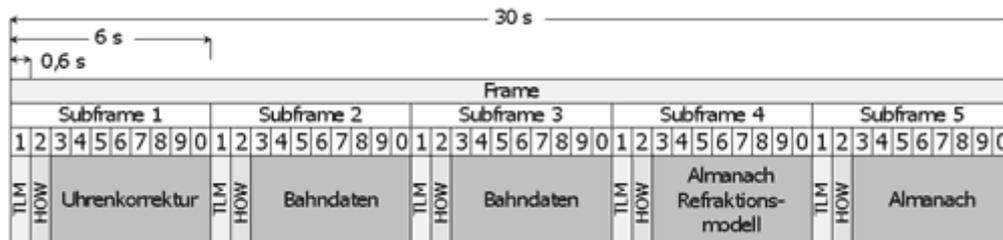
Hinweis: Modulo 2 Sum bedeutet, daß nach normalen arithmetischen Regeln summiert wird. Ist das Ergebnis jedoch größer 2, wird nur der nicht durch 2 teilbare Rest behalten. (0+0=0; 0+1=1; 1+0=1; 1+1=0).

Aufbau des Datensignals

Zusätzlich zum C/A-Code wird mit 50 bit/s die Navigationsnachricht 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 und daraus erhält der GPS-Empfänger sein Datum, die ungefähre Uhrzeit und die Positionen der Satelliten.

Das vollständige Datensignal besteht aus 37500 bit und es dauert demnach bei einer Übertragungsgeschwindigkeit von 50 bit/s ganze 12,5 Minuten bis es vollständig übertragen ist. Diese Zeit benötigt ein GPS-Empfänger bis zur ersten Positionsbestimmung wenn er noch keine Daten über die Satelliten gespeichert hat oder diese veraltet sind.

Das Datensignal ist in 25 Blöcke (frames) unterteilt, die jeweils 1500 bit lang sind und 30 Sekunden zur Übertragung brauchen.



Struktur der GPS-Navigationsdaten eines "frames"

Diese Blöcke sind wiederum in Teilblöcke (subframes) unterteilt (300 bit; 6 sec.), welche ihrerseits in je 10 Worte (word) untergliedert (30 bit; 0,6 sec.) sind. Das erste Wort jedes Teilblocks ist das TLM (telemetry word). Es enthält Informationen zur Aktualität der Ephemeridendaten. Darauf folgt das HOW (hand over word), welches die Anzahl der gezählten Z-Epochen enthält. Diese Daten beinhalten die Zeit seit dem letzten "Neustart" der GPS-Zeit vom jeweils vorherigen Sonntag 0:00 Uhr. Da das Signal des P-Codes eine Woche lang ist, dient dieses HOW militärischen Empfängern dazu, den "Einstieg" in den P-Code zu finden.

Die restlichen Daten des ersten Teilblocks enthalten Daten zum Zustand und Genauigkeit des sendenden Satelliten sowie Uhrenkorrekturwerte. Der zweite und dritte Teilblock enthält Parameter der Ephemeriden. Die Teilblöcke 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. Teilblock 4 enthält die Daten für die Satelliten 25 - 32, Ionosphärenkorrekturdaten, spezielle Nachrichten sowie UTC Zeitinformationen, Teilblock 5 enthält die Almanachdaten für die Satelliten 1 - 24 sowie Zeit und GPS-Wochennummer.

Die ersten drei Teilblöcke sind bei allen 25 Blöcken gleich, womit alle 30 Sekunden die wichtigsten Daten zur Positionsbestimmung übermittelt werden. Aus den Almanachdaten kann der GPS-Empfänger ersehen, welche Satelliten an der momentanen Position zu erwarten sind und beschränkt seine Suche auf diese. Damit kann eine schnellere Positionsbestimmung erreicht werden.

Wir hatten gesehen, dass das Datensignal Korrekturparameter für die Satellitenuhren enthält. Warum wird das benötigt, 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 zudem von der UTC-Zeit (oder Weltzeit), welche regelmäßig der Erddrehung angepaßt wird (Schaltsekunden).

Wenn ein Satellit die Signale nicht korrekt übermittelt oder in seiner Umlaufbahn instabil ist, kann er von der Kontrollstation als "ungesund" gekennzeichnet werden. Diese Information wird im Datensignal mit übertragen und ein guter Empfänger wird diesen Satelliten aus den Berechnungen ausklammern. Ein typischer Grund, warum ein Satellit als "ungesund" gekennzeichnet wird ist, dass seine Position korrigiert 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 die neue Umlaufbahn stabilisiert hat.

Die Speicherung der Ephemeriden- und Almanach-Daten im GPS-Empfänger führt dazu, daß es ja nachdem, wie lange ein GPS-Gerät keinen Empfang hatte, unterschiedlich lange dauert, bis die erste Positionsbestimmung verfügbar ist.

War der Empfang der Signale lediglich kurz unterbrochen (z.B. Tunnelfahrt, Wald) so spricht man von Wiedererfassung (engl. reacquisition). Dies dauert nur sehr wenige Sekunden.

Von einem Heisstart (Hot Start) spricht man, wenn Position und Uhrzeit bekannt sind, die Almanach-Daten und die Ephemeriden-Daten aktuell sind. Dieser Fall tritt ein, wenn das Gerät innerhalb der letzten 2 - 6 Stunden am etwa gleichen Ort eine Positionsbestimmung durchgeführt hat. Dabei dauert es etwa 15 Sekunden, bis eine Positionsbestimmung (engl. position fix) verfügbar ist.

Wenn die letzte Position bekannt ist, das Almanach vorhanden und die Uhrzeit im Empfänger stimmt aber die Ephemeriden veraltet sind, spricht man von einem Warmstart (Warm Start). Dabei müssen nur die Ephemeridendaten aktualisiert werden und es dauert etwa 45 Sekunden bis eine Positionsbestimmung verfügbar ist. Die Ephemeriden sind veraltet, wenn mehr als etwa 2 - 6 Stunden seit dem letzten Empfang von Daten zu den momentan sichtbaren Satelliten vergangen sind. Je mehr andere Satelliten seit dem letzten Einschalten am Himmel stehen desto länger dauert der Warmstart.

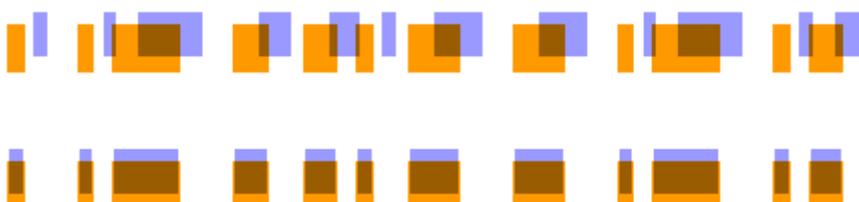
Sind weder Ephemeriden, noch Almanach-Daten noch die letzte Position bekannt, spricht man von einem Kaltstart (Cold Start). Es müssen zunächst alle Almanach-Daten der Satelliten abgewartet werden, was bis zu 12,5 Minuten dauern kann. Das gleiche Verhalten zeigen die Empfänger, wenn sie längere Zeit (Wochen) ausgeschaltet waren, ohne Batterie gelagert wurden oder mehr als etwa 300 km seit dem letzten Positionsfix bewegt wurde. Im letzten Fall müssen natürlich keine Daten abgewartet werden, aber da die Position sich so stark verändert hat, dass die "falschen" Satelliten am Himmel stehen, muss der Empfänger zunächst "blind" alle Satelliten suchen. Bei vielen Geräten lässt sich durch Eingabe des Datums und der ungefähren Position die benötigte Zeit für den Kaltstart verkürzen.

Wer jetzt alles noch **ganz** genau wissen will, sieht am besten [hier](#) nach (englisch).

Laufzeitmessung der Signale

Wie wir gehört haben, sendet jeder Satellit einen Pseudozufallscode (PRN) aus, der dem Empfänger bekannt ist. Das bedeutet, der Empfänger kann den gespeicherten PRN mit dem gerade empfangenen Code vergleichen.

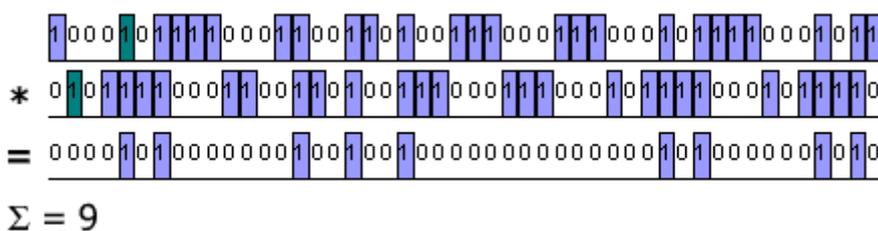
Nachfolgendes Bild zeigt zwei identische Codes. Ausgefüllte Felder sollen binär 1, weiße Zwischenräume eine 0 darstellen. Das violette Signal sei das Signal des Satelliten, das Orange das Signal des Empfängers. Man kann jetzt einfach bestimmen, wie weit man das Signal verschieben muss, damit man es direkt zur Deckung bringt. Aus der Verschiebung, die ja einer Zeit - nämlich der Signallaufzeit vom Satelliten zur Erde - entspricht lässt sich die Entfernung zum Satelliten berechnen.



Vergleich zweier Signale. Oben: verschoben; Unten: Zur Deckung gebracht.

Wie aber verschiebt man Signale, die sehr schwach sind und wo zudem noch alle Satelliten auf einer Frequenz senden, man also eigentlich ein heillooses Durcheinander empfängt? Für die Lösung derartige Probleme gibt es einen eleganten Algorithmus mit der Bezeichnung Autokorrelation. Dieser zeichnet sich durch eine große Unempfindlichkeit gegenüber Störungen aus.

Im folgenden soll das Verfahren anhand eines einfachen und deutlichen Signals erläutert werden. Oben sieht man jeweils einen Ausschnitt eines PRN-Codes eines Satelliten, in der Mitte den gleichen Code des Empfängers. Im Ersten Beispiel ist der Code des Empfängers noch "zu spät" dran, wie man am grünen Balken sieht. Bei der Autokorrelation multipliziert man die Signale nun miteinander. Hieraus ergibt sich das untere Signal. Jetzt summiert man das untere Signal auf, was im ersten Fall einen Wert von 9 (9 x 1 plus 39 x 0) ergibt.

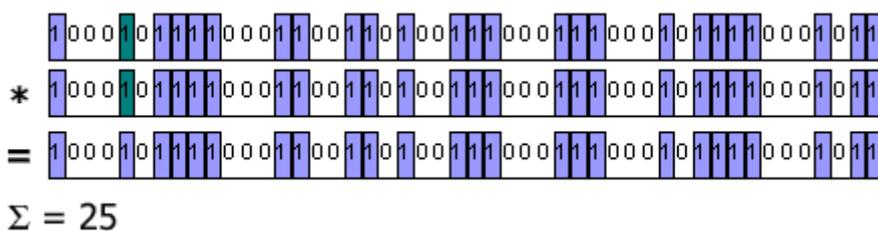


Obere Reihe: Signal des Satelliten.

Mittlere Reihe: Signal des Empfängers, dessen Signal ist gegenüber dem des Satelliten nach hinten verschoben.

Untere Reihe: Beide Signale multipliziert. Summiert man für jede Position das multiplizierte Signal erhält man in diesem Fall einen Korrelationswert von 9

Verschiebt man nun das Signal schrittweise um jeweils eine Einheit und führt den gleichen Prozess jedesmal durch, so erhält man einen Zahlenwert für jede Verschiebung.

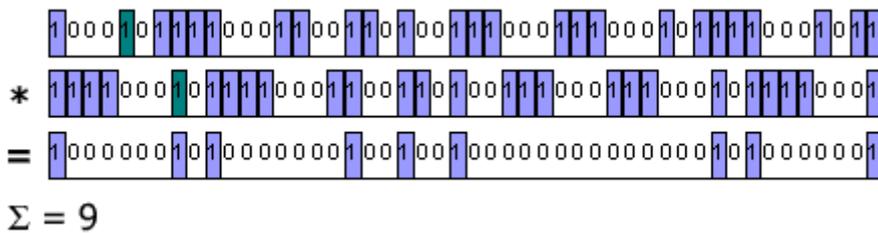


Obere Reihe: Signal des Satelliten.

Mittlere Reihe: Signal des Empfängers, dessen Signal genau deckungsgleich mit dem des Satelliten ist.

Untere Reihe: Beide Signale multipliziert. Summiert man für jede Position das multiplizierte Signal erhält man in diesem Fall einen Korrelationswert von 25.

Beim zweiten Beispiel liegt das Signal des Empfängers nun genau Deckungsgleich zum Signal des Satelliten. Wie man sieht ist die Summe am Ende deutlich größer als beim ersten Beispiel.

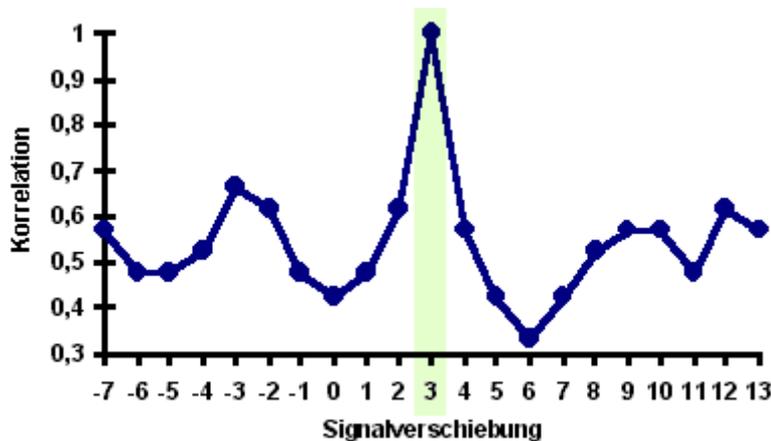


Obere Reihe: Signal des Satelliten.

Mittlere Reihe: Signal des Empfängers, dessen Signal ist gegenüber dem des Satelliten nach vorn verschoben.

Untere Reihe: Beide Signale multipliziert. Summiert man für jede Position das multiplizierte Signal erhält man in diesem Fall einen Korrelationswert von 9

Verschiebt man das Signal noch weiter, wie im dritten Beispiel geschehen, so wird die Summe wieder kleiner.



Korrelation der beiden Signale bei Verschiebungen von -7 bis 13

Die nebenstehende Grafik zeigt nun die Korrelationswerte nochmals für Verschiebungen von -7 bis 13. Deutlich ist zu sehen, wie die Korrelationsfunktion bei einer Verschiebung um 3 einen maximalen Wert erreicht (unsere oben gesehene 25. Die Funktion ist auf 1 normiert, was verdeutlichen soll, dass die Signale im Idealfall zu 100 % übereinstimmen können.) Wer die Signalkorrelation live sehen will, kann [hier](#) mal spielen.

In der Realität ist das Verfahren der Autokorrelation noch ein wenig komplexer. Beispielsweise wird durch die Bewegung des GPS-Empfängers das Signal durch den Dopplereffekt gestaucht oder gestreckt. Dies erlaubt zwar eine Geschwindigkeitsmessung auf Basis des Dopplereffekts erschwert aber die Korrelation, da die Signale nicht nur gegeneinander verschoben sondern auch noch gestaucht und gestreckt werden müssen.

Nun wollen wir das eben Gesehene auf die Dimensionen der GPS Signale übertragen. Wir haben gehört, dass der C/A-Code aus 1023 chips besteht, die mit einer Frequenz von 1,023 MHz gesendet werden, somit alle 1000 Mikrosekunden wiederholt werden. Bei einer Lichtgeschwindigkeit von etwa 300 000 km/s entspricht das einer Entfernung von 300 km. Das Signal wiederholt sich also sozusagen alle 300 km. Ein Balken (oder "Nichtbalken") der obigen Grafiken entspricht einem chip im GPS-Signal. Die von uns berechnete Signalverschiebung von 3 entspräche damit 3 chips oder 3 Mikrosekunden. Das entspricht einer Entfernung von 0,9 km.

Hier fallen jetzt zwei Dinge auf. Zum einen: Was soll eine Entfernung von 0,9 km bedeuten? Zum anderen wird der aufmerksame Leser sich fragen: Wenn man die Signalverschiebung nur auf 1 Mikrosekunde genau kennt, ist die Entfernung ja auch nur auf 300 m bekannt und wie kann GPS dann so genau sein? Die Antwort hierauf zuerst: Moderne GPS-Empfänger sind in der Lage, die Signalverschiebung auf bis zu 1 % eines Chips zu bestimmen, wodurch die Entfernung zum Satelliten im Idealfall auf 3 m genau berechnet werden kann.

Nun zur ersten Frage: Die Pakete des C/A-Codes sind nummeriert (z-count). Wenn ein Datenpaket empfangen und dekodiert wurde, ist für den Empfänger die Zeit bekannt, zu der dieses Paket gesendet wurde. Aus der Zeitdifferenz zwischen dem Senden und dem Empfangen wird die Entfernung (Pseudorange; siehe [hier](#)) berechnet.

Fehlerquellen bei GPS

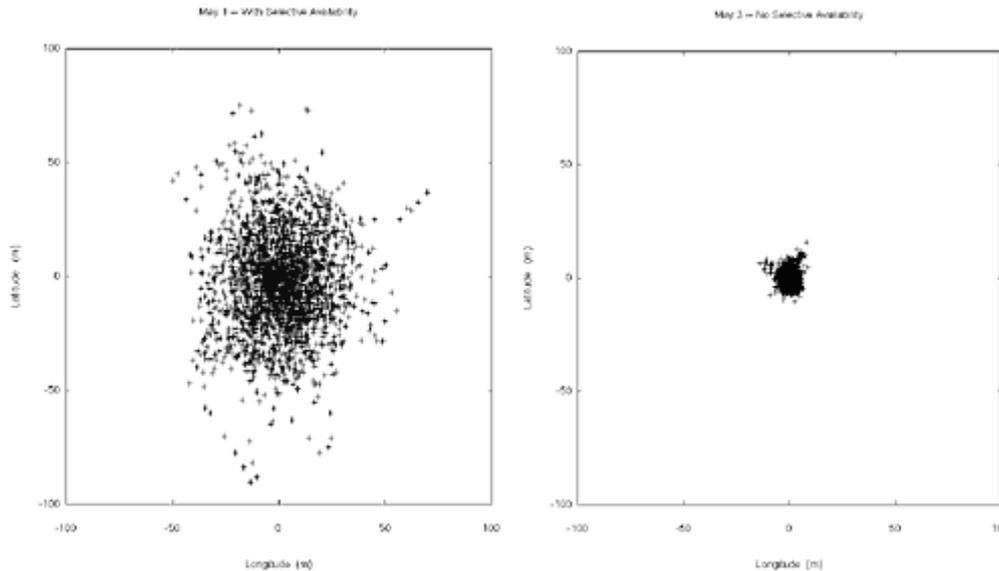
Selective Availability

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 Ephemeridendaten 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. So sollte es beispielsweise Terroristen unmöglich gemacht werden, kritische Einrichtungen in den USA mit selbst gebauten Fernlenk Waffen genau treffen. Paradoxerweise war genau diese SA bereits während des ersten Golfkriegs (1990) teilweise deaktiviert, da für die vielen dort befindlichen amerikanischen Truppen nicht genügend militärische Empfänger zur Verfügung standen und auf zivile Empfänger ausgewichen werden musste, wovon 10000 Stück eingekauft wurden (Es handelte sich übrigens um Geräte der Firmen Trimble und Magellan). 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.



Streuung der Positionsbestimmung mit ein- und ausgeschalteter "Selective Availability"

(Diagramme entnommen von <http://www.igeb.gov/sa/diagram.shtml> (Seite nicht mehr verfügbar)

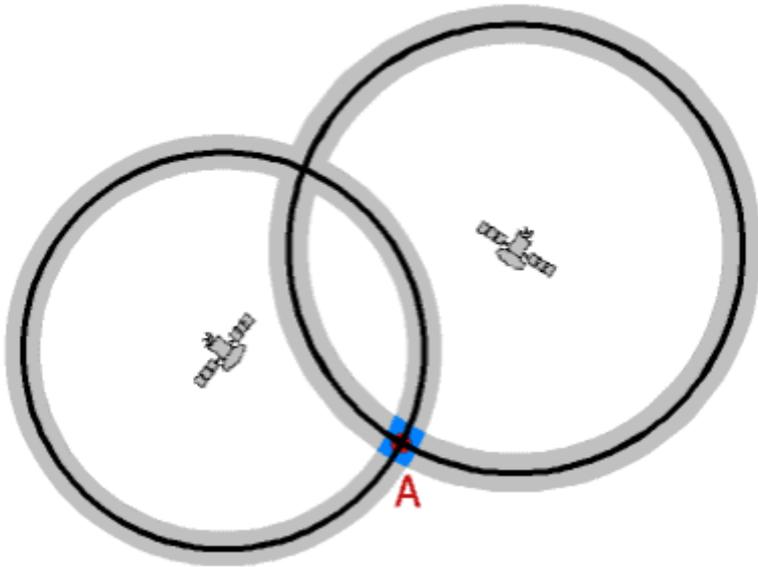
Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Milbert (NOAA))

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.

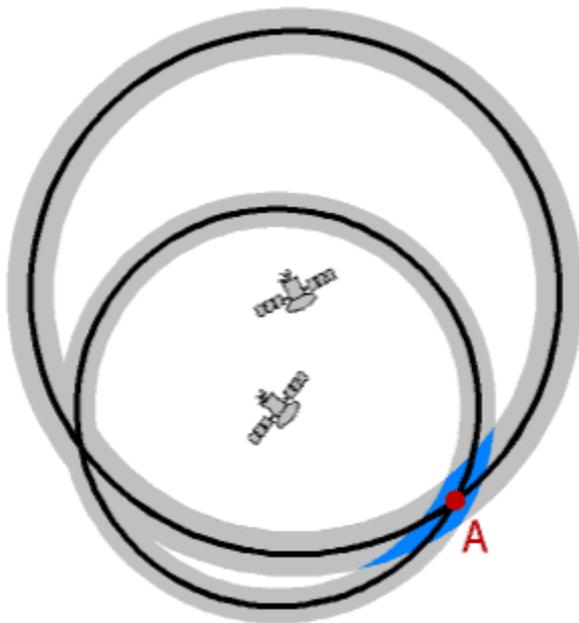
Wenn ein Empfänger beispielsweise gerade vier Satelliten empfängt und alle vier Satelliten sind beispielsweise nur im Nordwesten, so ergibt sich daraus eine "schlechte Geometrie". Unter Umständen kommt überhaupt keine Positionsbestimmung zustande denn wenn alle Entfernungsmessungen aus der gleichen Richtung erfolgen, kann keine Position bestimmt 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. Dies 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.



Geometrisch günstige Anordnung zweier Satelliten

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 ja aus verschiedenen in diesem Kapitel erklärten Gründen 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 sehr genau sein.



Geometrisch ungünstige Anordnung zweier Satelliten

Befinden sich die beiden Satelliten jetzt vom Betrachter aus gesehen eher mehr hintereinander, so ergibt die Schnittfläche der möglichen Positionen an denen man sich befindet eine wesentlich größere und 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

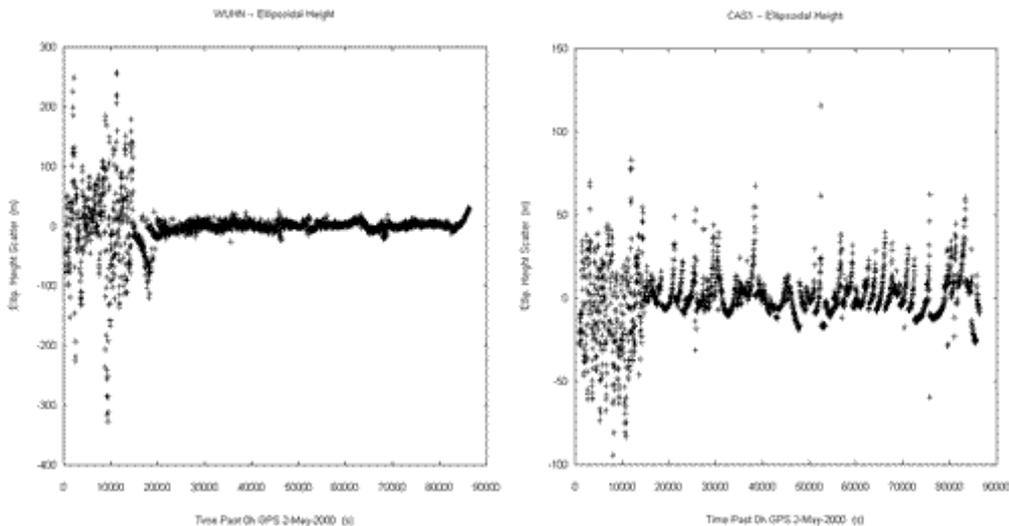
gut die Positionsbestimmung sein wird und ob überhaupt eine Positionsbestimmung möglich ist. Dies kann häufig sehr gut innerhalb von Gebäuden in Fensternähe beobachtet werden. Wenn noch eine Positionsbestimmung möglich ist, ist diese meist sehr ungenau. Je größer der verdeckte Bereich des Himmels ist, 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 und vielleicht ein paar Meter weiter wesentlich bessere Empfangsbedingungen herrschen würden. Viele Geräte zeigen ein Maß für die Genauigkeit der Messwerte an, die meist ein Kombinationswert verschiedener Faktoren ist und über deren genaue Berechnung die Hersteller nur ungern Auskunft geben. Für die "Güte" der Satellitengeometrie sind die DOP-Werte (dilution of precision; Verschlechterung der Genauigkeit) sehr verbreitet. Je nachdem, welche Daten bei der Berechnung herangezogen werden unterscheidet man zwischen verschiedenen DOP-Werte:

- GDOP (Geometric Dilution Of Precision); Gesamtgenauigkeit; 3D-Koordinaten und Zeit
- PDOP (Positional Dilution Of Precision) ; Positionsgenauigkeit; 3D-Koordinaten
- HDOP (Horizontal Dilution Of Precision); Horizontalgenauigkeit; 2D-Koordinaten
- VDOP (Vertical Dilution Of Precision); Vertikalgenauigkeit; Höhe
- TDOP (Time Dilution Of Precision); Zeitgenauigkeit; Zeit

So sind HDOP-Werte unter 4 sehr gut, über 8 jedoch schlecht. Die HDOP Werte werden schlechter, wenn sich die empfangenen Satelliten hoch am Himmel befinden. VDOP Werte hingegen sind eher schlechter, wenn sich die Satelliten sehr nahe am Horizont befinden und die PDOP Werte sind am besten, wenn sich ein Satelliten über Kopf und drei weitere gleichmäßig am Horizont verteilt befinden. Für eine gute Bestimmung sollte der GDOP-Wert nicht über 5 sein. Die PDOP, HDOP und VDOP Werte werden im [NMEA-Datensatz](#) \$GPGSA ausgegeben.

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.

Wie bereits weiter oben erwähnt, hängt der Fehler der Positionsbestimmung durch die Satellitengeometrie auch vom Breitengrad des Empfängers ab. Anhand von zwei Diagrammen kann dies veranschaulicht werden. Das linke Diagramm zeigt den Höhenfehler (anfangs noch mit SA eingeschaltet) aufgenommen in Wuhan (V. R. China), welches auf 30,5 ° 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 ° südliche Breite). Bedingt durch die dort zeitweise sehr 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 Positionsgenauigkeit dadurch, dass die Signale flacher durch die Atmosphäre laufen und somit eine "dickere" Atmosphäre "sehen", die zu zusätzlichen Fehlern führt (siehe [atmosphärische Effekte](#)).



Höhenfehler in verschiedenen Breitengraden.

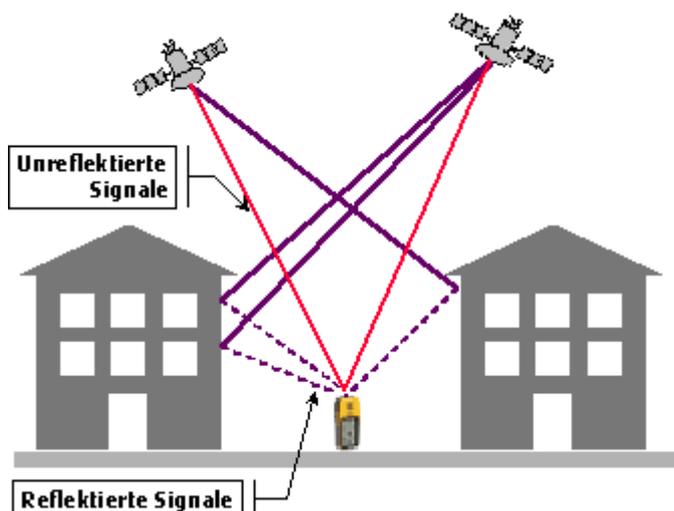
(Diagramme entnommen von http://www.ngs.noaa.gov/FGCS/info/sans_SA/world/.

Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Milbert (NOAA))

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 (Multipath)



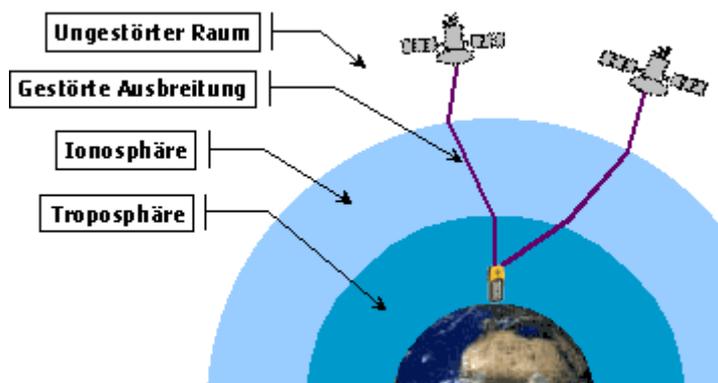
Störungen durch Reflektion der Signale

Der Mehrwegeeffekt hat nichts mit Rohstoffrecycling zu tun, es ist ein Effekt, der durch die Reflektion der Satellitensignale (Radiowellen) an Objekten zustande kommt und ist übrigens der gleiche Effekt, der Geisterbilder bei Fernsehbildern verursacht,

als noch die normale Dachantenne üblich war (die Generation der nicht Kabel- und Schlüsselverwöhnten kennt das noch).

Bei GPS-Signalen tritt dieser Effekt besonders stark 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 wenigen Metern, kann aber auch mehrere Kilometer betragen. Die von den Satelliten ausgestrahlten Signale sind rechtsherum polarisiert und die Antennen der Empfänger sind so konstruiert, dass nur diese Signale optimal empfangen werden. Bei Helix-Antennen kann man das sogar sehen, da die Drähte gedreht sind, daher der Name Helix. Bei reflektierten Signalen hingegen ändert sich meist die Polarisierungsrichtung und die Signale können von der Antenne nicht (so gut) erfasst werden. Es liegt also vor allem an der Konstruktion der Antenne, wie gut der Mehrwegeeffekt unterdrückt wird. Bei der Konstruktion von Patch-Antennen ist es übrigens schwieriger, die Unterscheidung für die unterschiedliche Polarisierung zu erhalten.

Atmosphärische Effekte



Gestörte Ausbreitung der Signale durch die Atmosphäre

Weiterhin zum Genauigkeitsfehler trägt die 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.

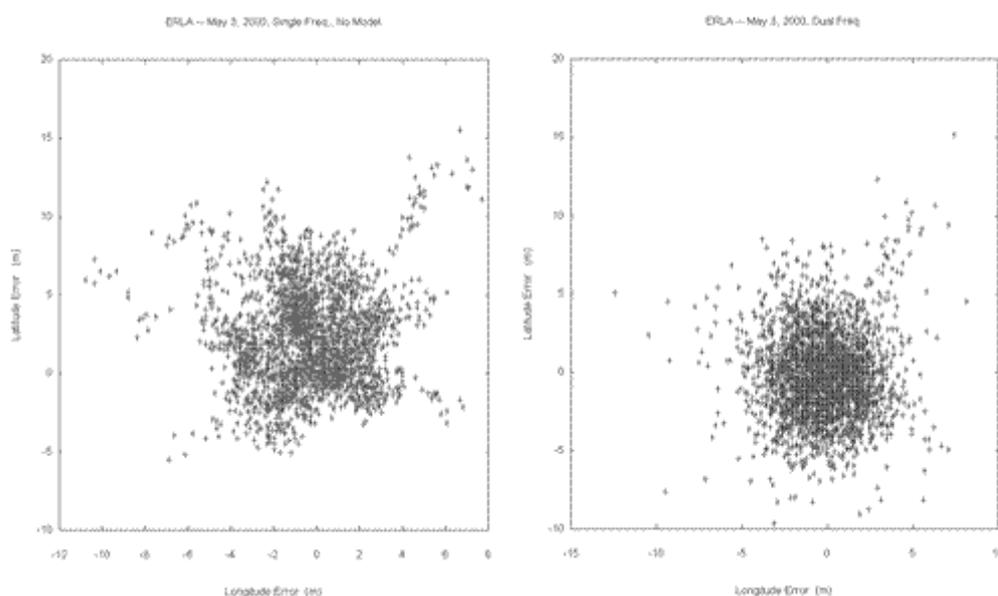
Diese Fehler werden größtenteils im Empfänger durch entsprechende Berechnungen kompensiert. Dies geschieht dadurch, dass man die typischen Geschwindigkeitsabweichungen bei tiefen und hohen Frequenzen während der Ionosphärendurchdringung an einem Standardtag zu Standardbedingungen kennt und bei allen 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 durch unterschiedliche Wetterlagen bedingten unterschiedlichen Wasserdampfkonzentrationen in der Troposphäre. Der hierdurch verursachte Fehler ist kleiner als der Ionosphärenfehler, lässt sich jedoch nicht herausrechnen und kann lediglich durch ein allgemeines Modell bei den Berechnungen angenähert werden.

Zur Veranschaulichung des Ionosphärenfehlers nun noch 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 Einfrequenz-Empfänger, rechts bei einem Zweifrequenz-Empfänger. 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.



Positionsbestimmung ohne und mit Atmosphärenkorrektur durch Verwendung der zweiten Frequenz. (Diagramme entnommen von http://www.ngs.noaa.gov/FGCS/info/sans_SA/iono.)

Mit freundlicher Genehmigung von Dr. Milbert (NOAA))

Durch Einführung von WAAS und EGNOS (siehe [hier](#)) ist es möglich, "Karten" mit dem Einfluss der Atmosphäre (Ionosphäre) 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 1 Meter Ungenauigkeit.

Relativistische Effekte

Nachfolgender Abschnitt soll keine Erklärung der allgemeinen oder speziellen Relativitätstheorie sein. Im täglichen Leben glaubt man immer, nichts von der Relativitätstheorie zu merken, aber sie haben beispielsweise einen wichtigen Einfluss auf das Funktionieren des GPS-Systems. Genau deshalb soll kurz erklärt werden, weshalb.

Die Zeit ist, wie schon erwähnt, bei der ganzen GPS-Navigation ein sehr kritischer Faktor und muss bis auf 20 - 30 Nanosekunden genau bekannt sein, um die gewollte Genauigkeit zu erreichen. Genau deshalb spielt die schnelle Bewegung der Satelliten (fast 12000 km/h) 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 7,2 Mikrosekunden (1 Mikrosekunde = 10^{-6} 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 nun 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. Und dieser Effekt ist etwa sechsmal so groß wie die durch die Geschwindigkeit hervorgerufene Zeitdilatation.

In der Summe gesehen scheinen die Uhren der Satelliten also insgesamt 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-Systeme etwas einfaches 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 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. Der Einfluss dieses Effekts ist sehr gering und kompliziert zu berechnen, da er richtungsabhängig ist, weshalb er nur in besonderen Fällen berücksichtigt wird. Wer das Ganze noch ein wenig ausführlicher wissen will, sollte [hier](#) nachsehen.

Insgesamt sieht die Fehlerbilanz des GPS-Systems etwa folgendermaßen aus, wobei die Werte keine festen Größen sind, 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
Mehrwegeeffekt	± 1 Meter
Störungen durch die Troposphäre	± 0.5 Meter
Rechnungs- und Rundungsfehler	± 1 Meter

Insgesamt ergibt sich daraus ein Fehler von ± 12 Metern. Mit aktivierter SA waren es hingegen noch etwa ± 100 Meter. Mit Korrektur durch Systeme wie WAAS und EGNOS, wodurch vor allem Ionosphäreneffekte aber auch Umlaufbahnen und Uhrenfehler reduziert werden, wird der Fehler auf etwa ± 3 - 5 Meter reduziert.

Für eine Erklärung der Begriffe Präzision, Genauigkeit und Richtigkeit siehe [hier](#).

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 empfangen 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.

Siehe auch [hier](#) für aktuelle Informationen zur lokalen Genauigkeit in Süddeutschland.

RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring)

Ein Problem bei GPS war bisher die fehlende Integritätsinformation. Das bedeutet, es war einem normalen Empfänger nicht möglich, fehlerhafte Signale von z.B. defekten Satelliten zu erkennen bevor diese von den offiziellen Monitorstationen auf "Nicht benutzbar" geschaltet wurden. Dies führte in seltenen Fällen kurzzeitig zu fehlerhaften Positionen. Für die meisten Benutzer ist das wenig kritisch, für die Luftfahrt war es ein Problem. Ein wichtiger Teil der DGPS und SBAS-Systeme (EGNOS, WAAS; siehe weiter unten und [hier](#)) war deshalb auch die Integritätsüberwachung und die Möglichkeit, Empfänger sofort über Probleme mit Satelliten zu informieren.

Für alle anderen haben moderne Empfänger eine Funktion die RAIM genannt wird und die den heute praktisch immer vorhandenen "Überschuss" an Satelliten für eine Plausibilitätsüberprüfung der Signale nutzt. Zur Positionsbestimmung werden die Signale von vier Satelliten benötigt. Stehen mindestens fünf zur Verfügung kann mit der zusätzlichen Information überprüft werden, ob die Daten "zusammenpassen", es können also Fehler zumindest entdeckt werden. Stehen die Signale von mindestens sechs Satelliten zur Verfügung, ist der Empfänger theoretisch in der Lage ein fehlerhaftes Signal aus der Berechnung auszuschliessen. Da heute bei freier Sicht zum Himmel meist sieben bis zwölf Satelliten empfangen werden können, lässt sich die Korrektur häufig auch in der Praxis anwenden. Gerade in der Seefahrt ist das eine willkommene Zusatzsicherheit. Ältere Empfänger hatten noch eine einfache Variante von RAIM, die nur Fehler erkennt, die neueren Empfänger können einzelne Signale aus der Berechnung wirklich ausschliessen. Welche Empfänger RAIM nutzen ist nicht ganz einfach herauszufinden, der Antaris 4 Chipsatz von u-blox unterstützt es beispielsweise und die Funktionen dazu können auch konfiguriert bzw. aktiviert oder deaktiviert werden.

Differentielles GPS (DGPS)

Mit Hilfe einer "Differenzielles 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 Bodenstationen sammeln und die Korrekturdaten errechnen. Diese Daten enthalten Korrekturinformationen für die Satellitenumlaufbahnen, Uhrendrift der Satelliten und Signalverzögerungen, die durch die Ionosphäre und Troposphäre 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 weiterreichender 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.

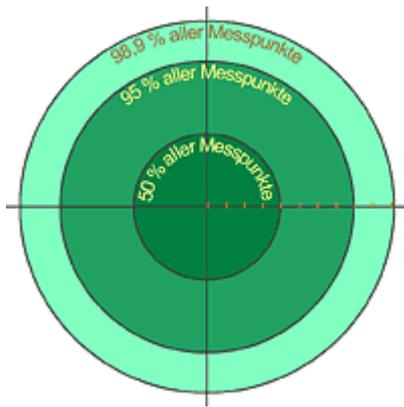
In Europa gibt es ein dem WAAS entsprechendes System namens EGNOS (Euro Geostationary Navigation Overlay Service - Europäischer Geostationärer Zusatz-Navigationsdienst) welches nach dem gleichen Prinzip arbeitet. Im asiatischen Raum ist ein japanisches System namens MSAS (Multi-Functional Satellite Augmentation System) in Planung. Da diese Systeme alle nach dem gleichen Prinzip arbeiten kann ein GPS-Empfänger der WAAS unterstützt auch von EGNOS und MSAS profitieren. Näheres zum WAAS/EGNOS-System [hier](#).

Übersicht über die zu erwartende Genauigkeit

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

Garmins Genauigkeitsangabe

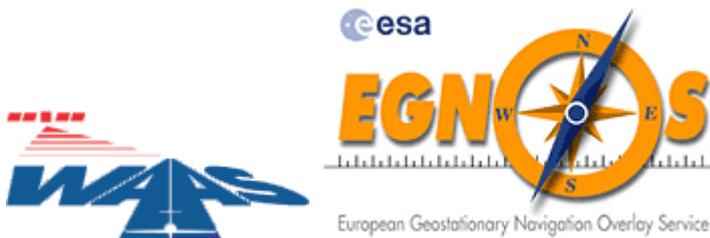
Die Genauigkeitsanzeige der Garmin-GPS sorgt häufig für Verwirrung. Was bedeutet nun eigentlich, wenn das Gerät beispielsweise anzeigt: **Genauigkeit: 4 m.** (Dies ist ein häufig zu erreichender Wert).



Genauigkeit der Positionsbestimmung

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.

WAAS/EGNOS



WAAS und EGNOS-Logos (Quellen: [FAA](#) und [ESA](#))

Sehr stark vereinfacht handelt es sich beim WAAS-System (WAAS = Wide Area Augmentation System; Erweiterungssystem für einen großen Bereich) um ein satellitengestütztes DGPS (Differenzial GPS). Das heisst, zum Empfang des Signals benötigt man keinen zusätzlichen Langwellenempfänger und es werden zur Signalübertragung keine zusätzlichen und zahlreichen Sendestationen gebraucht.

Unterschiede zwischen WAAS, EGNOS und MSAS

Das Prinzip ist bei allen drei Systemen das gleiche und die Systeme sind sogar miteinander kompatibel. 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. zahlreichen asiatischen Ländern entwickelt und betrieben wird. Während sich das WAAS-System nun bereits seit einigen Jahren im fortgeschrittenen Testbetrieb befindet und seit Januar 2003 die volle Betriebsbereitschaft erreicht hat (Initial Operational Capability; IOC), hat das EGNOS-System vor allem im Jahr 2002 große Fortschritte gemacht. Noch immer (Mai 2005) befindet es sich aber auch im Testbetrieb als ESTB (EGNOS satellite test bed). Die Entwicklung des MSAS hingegen erfuhr 1999 einen herben Rückschlag, nachdem der erste von zwei für diesen Dienst benötigten Satelliten beim Start verloren ging. Der für August 2004 vorgesehene Start des Ersatzsatelliten wurde auf unbestimmte Zeit verschoben um die Ursachen für den Fehler bei der Trägerrakete 1999 zu untersuchen. Aktuelle Informationen darüber sind aber rar.

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.

Wie die SBAS funktionieren

Zweck des Systems

Es dürfte nicht überraschen, dass WAAS, EGNOS und MSAS nicht dazu entwickelt wurden bzw. werden, um dem Wanderer oder Geocacher eine genauere Positionsbestimmung zu ermöglichen. Der eigentliche Hintergrund ist die Flugsicherung. Um als einziges Navigationsmittel zulässig zu sein, ist das GPS-System zum einen nicht genau genug und zum anderen ist keine zuverlässige und rechtzeitige Benachrichtigung des Nutzers über eventuelle Fehler oder Ausfälle möglich. Somit sind Flugzeuge speziell beim Landeanflug ohne oder mit schlechter Sicht heute auf ILS-Systeme (Instrument Landing System) angewiesen. Diese müssen aber mit hohem finanziellen Aufwand auf jedem einzelnen Flughafen installiert werden. Hier sollen die SBAS-Systeme in naher Zukunft eine Ergänzung sein und CAT I Anflüge (eingeschränkte Sicht, aber mindestens 550 m) ohne ILS zu ermöglichen. CAT III Anflüge (ganz ohne Sicht) werden allein mit den SBAS jedoch nicht möglich sein.

Infrastruktur und Funktionsweise

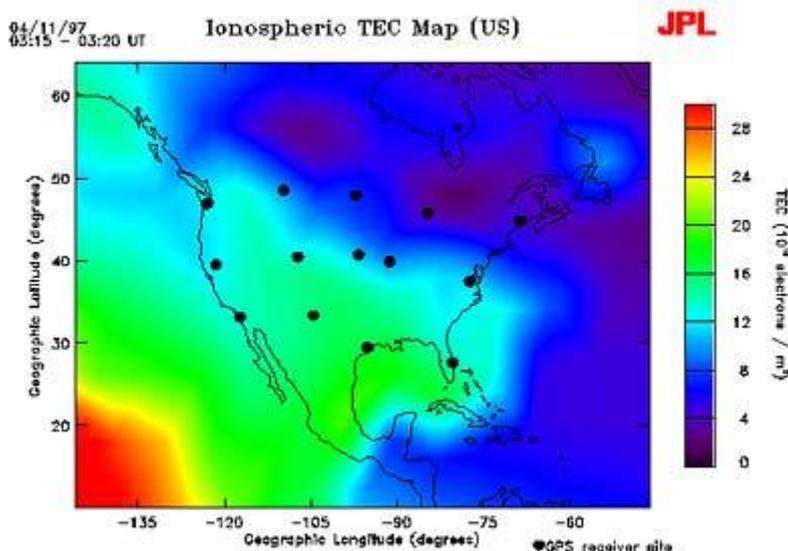
Die Zusatzsysteme sollen sowohl die Genauigkeit als auch die Zuverlässigkeit des GPS Systems erhöhen. Dazu werden an zahlreichen Orten in den USA (25), Europa (10 während des Testbetriebs, im Endausbau dann 34) bzw. im Pazifikraum GPS-Empfangstationen oder sogenannte RIMS (Ranging and Integrity Monitor Stations, Entfernungsmessungs und Integritätsbeobachtungs Stationen) aufgebaut. Die Position dieser Stationen muss sehr exakt bekannt sein. Exakt bedeutet, dass die Position der Antenne auf wenige Zentimeter genau bekannt ist. Diese Stationen empfangen nun das normale GPS-Signal (im Übrigen auch die Signale von GLONASS und später GALILEO). Hierdurch kann für jede einzelne Station bereits die Differenz zwischen der über GPS bestimmten und der tatsächlichen Position der Station bestimmt werden. Da die RIMS mit beiden GPS-Frequenzen (L1 und L2)

arbeiten, kann außerdem die Signalverzögerung durch die Ionosphäre für jeden einzelnen Satelliten bestimmt werden.

Weiterhin erhält man beim Empfang von mehr als vier Satellitensignalen überzählige Informationen, aus denen eventuelle Fehlfunktionen einzelner Satelliten, beispielsweise durch Uhrenfehler oder Umlaufbahnschwankungen, sehr schnell abgeleitet werden können. Die Daten aller RIMS werden nun an ein Central Processing Centre (Hauptrechenstation) weitergeleitet. Diese befinden sich für das ESTB in Toulouse (Frankreich) und Hønefoss (Norwegen). Wenn EGNOS vollständig in Betrieb geht, werden EGNOS-Kontroll/Rechenzentren (genannt MCC = Mission Control Centre) in Deutschland (Langen bei Frankfurt), Spanien (Torrejon bei Madrid), Italien (Ciampino bei Rom) und Großbritannien (Swanwick bei London) errichtet sein. Hier werden die Daten aller Stationen miteinander verrechnet und folgende Daten errechnet:

- Langzeitfehler der Satellitenpositionen
- Kurz- und Langzeitfehler der Satellitenuhren
- IONO Korrekturgitter
- Integritätsinformationen

Mit Hilfe der Integritätsinformationen können innerhalb von 6 Sekunden nach dem Auftreten von Problemen mit dem GPS-System die Empfänger darüber informiert werden.

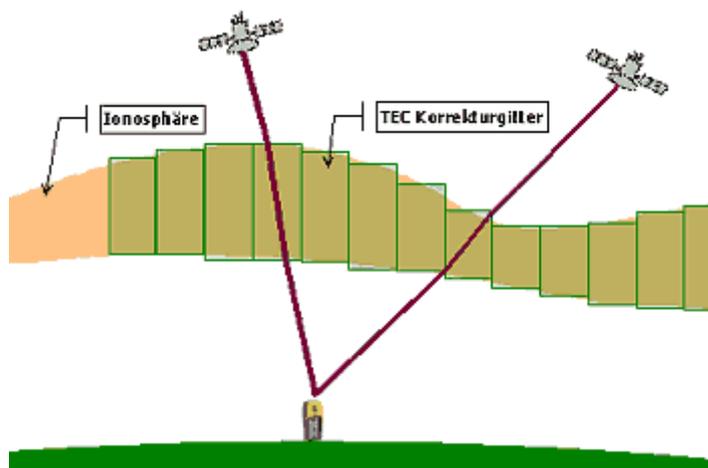


Beispiel einer TEC-Map der Ionosphäre über Nordamerika (Quelle: [JPL](#))

Das für zivile Nutzer wohl wichtigste Ergebnis der SBAS 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 = **T**otal **E**lectron **C**ontent) des Gebietes berechnet, welches von den Empfangsstationen abgedeckt wird. Mit etwas verminderter Genauigkeit lässt sich dies sogar über ein noch größeres Gebiet berechnen.

Diese ganzen Informationen werden nun an bestimmte geostationäre Satelliten gesendet. Für das EGNOS-Testsystem (ESTB) geschieht dies von Aussaguel (Frankreich, bei Toulouse) an den INMARSAT AOR-E und von Fucino (Italien) aus an INMARSAT IOR. Später mit EGNOS in Normalbetrieb wird von Aussaguel und Goonhilly (Großbritannien) zum Satellit AOR-E und von Fucino und Goonhilly zum Satelliten IOR-F5 gesendet. Von der Station Torrejon (Spanien) und Scanzano (Italien) werden Daten zum Satelliten Artemis gesandt. Dieser hat im Januar 2003 doch noch seine endgültige Position erreicht, nachdem er wegen Problemen mit der letzten Stufe der Ariane-Rakete beim Start im Juli 2001 beinahe aufgegeben werden musste.

Die geostationären Satelliten senden ein sehr ähnliches Signal wie die GPS-Satelliten auf der selben Frequenz diese. Damit können die geostationären Satelliten zum einen zur Positionsbestimmung verwendet werden und zudem werden die gesendeten Informationen im GPS-Empfänger dazu verwendet, die Genauigkeit der Positionsbestimmung zu verbessern.



Zweidimensional vereinfachte Darstellung des IONO-Korrekturgitters

Mit Hilfe der übertragenen Ionosphären-Karte kann nun für jedes Signal eines GPS-Satelliten, das zur Positionsberechnung verwendet wird, der Durchtrittspunkt (pierce point) 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-Empfänger nachts nach Mitternacht eine höhere Genauigkeit aufweisen als tagsüber. Die übrigen Funktionen zur Integritätsüberprüfung des GPS-Systems, die die SBAS-Systeme bieten, werden von Handheld-Empfängern vermutlich nie ausgewertet, da die notwendigen Berechnungen zu komplex sind und die Aussagen daraus vermutlich für den Normalbenutzer nicht von besonderem Interesse sind.

Unterschied zu normalem DGPS

In der Berechnung des Ionosphärenkorrekturgitters liegt für normale Nutzer der Hauptunterschied in der Funktionsweise zwischen Differential-GPS und WAAS. Beim DGPS vergleicht jede einzelne Referenzstation die über das GPS-Signal für sich bestimmte Position mit der bekannten Position. Hieraus wird der Entfernungsfehler zu jedem Satelliten und deren Änderungsrate (Pseudorange correction und Range

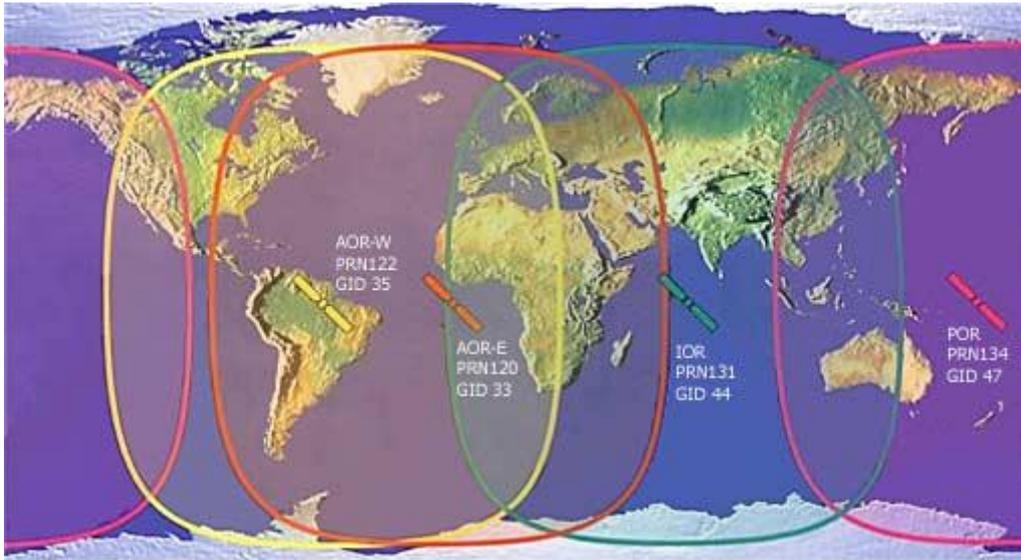
Rate Correction) errechnet und diese Information dann über eine bestimmte Langwellenfrequenz als Korrekturdaten ausgesendet. Ein DGPS-Empfänger empfängt nun diese Signale und wendet die Korrektur auf seine eigene Position an. Durch mit zunehmender Entfernung des Empfängers von der Referenzstation größerer werdende Unterschiede in den atmosphärischen Einflüssen, wird die Korrektur immer wenig exakt, je weiter entfernt man sich von einer solchen Station befindet. Nimmt die Entfernung zur Referenzstation zu, so durchläuft das Signal vom Satelliten zur Referenzstation andere Teile der Atmosphäre als das Signal vom Satelliten zum Benutzer. Weiterhin werden vom Benutzer teilweise Daten von ganz anderen Satelliten empfangen und ausgewertet als von der Referenzstation. Der Empfänger hat also eine andere Satellitensymmetrie und erhält andere Ergebnisse.

Die typische Reichweite von DGPS-Sender liegt bei etwa 70 - 200 km und in diesem Bereich ist auch die Korrektur noch gut. Das oben beschriebene Phänomen der Verschlechterung der Qualität der Korrektur mit zunehmender Entfernung von einem Korrektursender bei DGPS wird im englischen als "spatial decorrelation" bezeichnet.

Beim WAAS hingegen wird aus der Summe der Messungen aller Referenzstationen ein Korrekturgitter für das gesamte abgedeckte Gebiet berechnet. Jeder einzelne Empfänger korrigiert seine Position daraufhin mit Hilfe dieser Daten selbst. Die erreichbare Genauigkeit ist sogar höher als mit normalem DGPS und das Gebiet, für welches die Korrekturdaten gelten kann extrem vergrößert werden. Daher kommen auch die Worte "Wide Area" in der Bezeichnung WAAS. Befindet man sich jedoch auch bei den SBAS deutlich außerhalb des Einzugsgebietes der Korrekturstationen und empfängt beispielsweise in Europa die Korrekturdaten für Nordamerika, so wird der GPS-Empfänger im glücklichsten Fall die Standardionosphärenkorrekturen anwenden, die er gespeichert hat. In diesem Fall wird man keinen Unterschied zwischen aktiviertem und nicht aktiviertem WAAS/EGNOS bemerken. Im unglücklichsten Fall jedoch wird überhaupt keine oder eine falsche Ionosphärenkorrektur angewandt und die Position ist sogar schlechter als mit deaktiviertem WAAS/EGNOS. Wenn die Software des GPS-Empfängers korrekt programmiert ist, sollte dieser Fall jedoch nicht eintreten, da die SBAS-Systeme die Informationen über den Gültigkeitsbereich ihrer Daten in den ausgesendeten Signalen mitliefern.

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 momentan unter anderem einige 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 zur Ausstrahlung verwendeten Satelliten und deren "Footprint" also der Bereich, indem die Signale empfangen werden können. Bis zum Endausbau von EGNOS ändert sich hier allerdings noch einiges, speziell auch für die Abdeckung im europäischen Raum.



INMARSAT-Satelliten und deren Ausleuchtungsbereich

Die Bezeichnungen der Satelliten nochmals tabellarisch:

Satellitenbezeichnung	Satellit steht über	GPS PRN Nr.	Garmin Sat ID
INMARSAT 3 F2 (AOR-E) (Atlantic Ocean Region East)	Westafrika	120	33
INMARSAT 3 F4 (AOR-W) (Atlantic Ocean Region West)	Ostküste Brasiliens	122	35
INMARSAT 3 F1 (IOR) (Indian Ocean Region)	Indischer Ozean	131	44
INMARSAT 3 F3 (POR) (Pacific Ocean Region)	Pazifik	134	47
INMARSAT IOR-W (III-F5) (Indian Ocean Region West)	Afrika (Kongo)	126	39
Artemis	Afrika (Kongo)	124	37
MTSAT-1R (Multifunction Transportation Satellite)	Start Anfang 2003	129	42
MTSAT-2	Start Mitte 2004	137	50

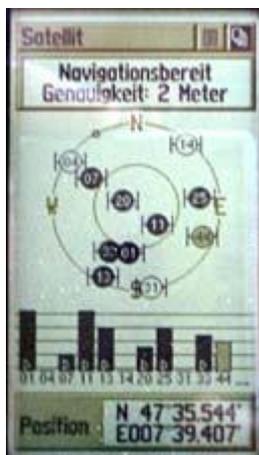
Wenn man also in Europa auf einem Garmin-GPS bei aktiviertem WAAS eine Korrektur mit anderen Satelliten als Nr. 33 oder Nr. 44 im Satelliten-Display findet, sollte man Vorsicht walten lassen. Speziell vor Nr. 35 sollte man sich "in Acht nehmen", da dieser unter bestimmten Umständen empfangen werden kann, aber nur Ionosphären Daten für Nordamerika ausstrahlt. Von den Korrekturdaten dieses Satelliten hat man keine Vorteile. Interessanterweise scheinen zumindest die Garmin-GPS keine Auswertung der Daten für den Gültigkeitsbereich der Signale durchzuführen.

Die Verteilung und Nutzung der Satelliten für EGNOS wird sich Anfang bis Mitte des Jahres 2004 nochmals verändern. Der Satellit ARTEMIS der ESA (European Space Agency, Europäische Weltraumbehörde) wird hinzukommen, AOR-E wird ab Mitte des Jahres nicht mehr verwendet und IOR wird in Richtung Pazifik verschoben.

Einen deutlichen Nachteil haben die auf geostationären Satelliten basierenden Korrektursysteme allerdings. Für den bodengebundenen GPSler befinden sich die

geostationären Satelliten alle im Süden und dort relativ nahe am Horizont. Befindet man sich beispielsweise in München, so steht AOR-E etwa 35° über dem Horizont, IOR hingegen nur 16°. Dadurch kann es sehr leicht zu Abschattungen durch Gebäude oder auch Bäume kommen. In bewaldeten oder hügeligen Gebieten wird man vermutlich nicht in den Genuss der EGNOS Korrekturen kommen. Hier macht sich negativ bemerkbar, dass das System eigentlich für die Luftfahrt gedacht ist, wo es keine Rolle spielt, wenn die Satelliten etwas tiefer stehen. Der Satellit III-F5, der für den EGNOS-Betrieb verwendet werden wird, wird von München aus etwa 35° über dem Horizont stehen. Wie der Empfang in Wäldern und Hügellandschaften ausfallen wird, wird sich zeigen.

WAAS, EGNOS und Garmin GPS



Satellitenseite des Garmin-Vista mit ESTB-Satelliten

Seit dem 1. April 2003 wird das EGNOS-Signal in "WAAS kompatibel" Format (SBAS mode 0/2) ausgestrahlt und es sind damit auch die Garmin-Empfänger in der Lage, das Signal zu verarbeiten.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Garmin-GPS das WAAS oder EGNOS-Signal nur verarbeiten können, wenn sich das Gerät nicht im Energiesparmodus befindet. Es reicht also nicht, die Option WAAS im Optionenmenü zu aktivieren, sondern man muss gleichzeitig auch in den Normal-Modus wechseln. Diese Tatsache ist ein Nachteil für die Verwendung von WAAS/EGNOS (zumindest mit Garmin-Empfängern). Im Normalmodus halten die Batterien der Garmin-Geräte nur etwa halb so lange wie im Energiesparmodus. Das Bild rechts zeigt die Satellitenseite eines Garmin Vista mit aktiver Differentialkorrektur durch EGNOS. Der Buchstabe "D" im Signalbalken der Satelliten zeigt an, dass für das Signal des entsprechenden Satelliten Korrekturdaten empfangen und verwendet werden. Mit einer angezeigten Genauigkeit von 2 Metern (RMS) ist die Positionsgenauigkeit entsprechend gut.

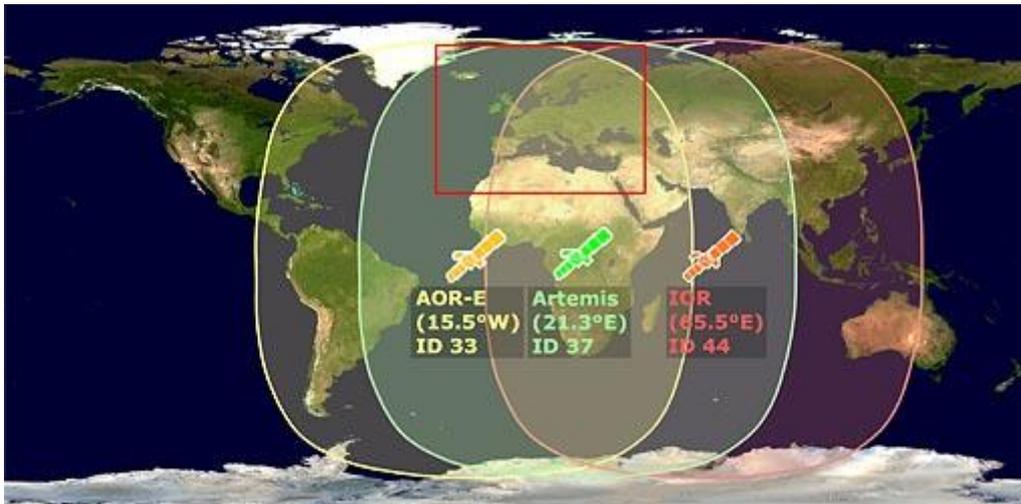
aktueller Status von ESTB/EGNOS

vom 20.07.2006:

Seit Juni 2006 läuft der Satellit Inmarsat-3-F1; IOR-W (PRN 126; ID 39) im regulären Betrieb von EGNOS und ab Juli 2006 wird ein kontinuierliches Signal ausgesendet. Damit kann EGNOS ganz normal wie auch WAAS verwendet werden. IOR-W wird zumindest in Süddeutschland auf einer angenehmen Höhe (z.B. München 34 ° über dem Horizont) empfangen.

Ende Juni 2006 wurde ESTB und damit die Übertragung vom Satelliten Inmarsat 3F2; AOR-E (PRN120; ID 33) gestoppt (30. Juni 2006; 12h02 UTC). Der Satellit sollte ab Juli im EGNOS-Betrieb senden, ich konnte ihn aber bisher nicht als solchen empfangen.

Der Satellit Artemis sendet zeitweise im Probebetrieb, wird auch manchmal als Satellit vom GPS-Gerät erkannt, bisher zumindest bei mir jedoch nicht ausgewertet. Es ist aber absehbar, dass er irgendwann voll sendet. Da er aber nahezu auf der gleichen Position steht wie IOR-W, wird die endgültige Aktivierung keine weiteren Vorteile bringen.



Position und Abdeckungsbereich der EGNOS-Satelliten

Für weiter Infos siehe [hier](#) (englisch).

Links

[WAAS-Seite](#) der FAA (Federal Aviation Administration); englisch

[ESA-Satellitennavigation](#); englisch

[EGNOS-Seite der ESA](#); englisch

[ESA-Liste der SBAS-fähigen \(WAAS und EGNOS\) GPS-Geräte als pdf-File](#) (Stand: 2006); englisch

[INMARSAT](#); englisch

Übersicht über das Galileo-System

Grundlagen

Das Galileo Navigationssystem wird wie GPS ein globales Satellitennavigationssystem sein. Das grundsätzliche Funktionsprinzip ist das gleiche und das System soll sogar mit GPS kompatibel sein. Zumindest mit der im Aufbau befindlichen weiterentwickelten Version von GPS. Im Unterschied zum GPS-System wird es jedoch nicht vom Militär sondern von zivilen Stellen betrieben kontrolliert. Es wird eine Reihe von Diensten mit garantierter Verfügbarkeit beim Galileo-System geben und ganz sicher ist auch, dass die bisher erhältlichen GPS-Empfänger nicht "einfach so" Galileo-kompatibel sein werden. Bei manchen neuen wird sich Galileo per Firmware-Update verwenden lassen, andere, ältere werden nie Galileo-kompatibel werden.

Sobald die ersten vier Satelliten des Systems für die Validierungsphase im Orbit zur Verfügung stehen, werden die Galileo-Dienste die teilweise auch mit GLONASS und GPS Daten kombiniert werden können stufenweise zur Verfügung gestellt werden.

Dienste des Galileo-Systems

Es sind folgende fünf Dienste geplant:

Allgemeiner Dienst (Open Service; OS)

Dieser Dienst, der kostenlos über die frei zugänglichen Signale zur Verfügung steht, wird über eine Positions- und Zeitgenauigkeit verfügen, die in der Leistung ähnlich wie andere Satellitennavigationssysteme (GPS, GLONASS) sein wird. Man kann heute von einer zu erwartenden Genauigkeit von etwa 4 Metern ausgehen.

Sicherer-Dienst (Safety-of-Life Service; SoL)

Dieser Dienst ist für überlebenswichtige Aufgaben gedacht (z.B. Flugverkehr) und gegenüber dem offenen Dienst darin erweitert, dass es rechtzeitige Warnungen (wenige Sekunden) im Falle von Genauigkeitseinschränkungen oder Ausfall von Satelliten gegeben werden. Es ist geplant für diesen Service die Verfügbarkeit zu garantieren.

Kommerzieller Dienst (Commercial Service; CS)

Im kommerziellen Dienst stehen zusätzliche zwei Signale zur Verfügung, die einerseits den Datendurchsatz erhöhen, andererseits die Genauigkeit erhöhen. Diese Signale werden verschlüsselt und gegen Gebühren genutzt werden können. Auch hier ist eine Verfügbarkeitsgarantie geplant. Die Genauigkeit soll bis 10 cm betragen.

Regulierter Dienst; Regierungsdienst (Public Regulated Service; PRS)

Dieser zugangsbeschränkte Dienst wird ausschliesslich für Benutzerkreise zur Verfügung stehen, die bei der Wahrnehmung von hoheitlichen Aufgaben beteiligt sind (Polizei, Küstenwache, Geheimdienste, Militär). Sowohl Genauigkeit als auch Zuverlässigkeit dieser Dienste soll besonders hoch sein. Zwei Signale mit verschlüsselten Codes werden zur Verfügung stehen.

Such- und Rettungsservice (Search and Rescue; SAR)

Galileo wird weltweite Such- und Rettungsmassnahmen dadurch unterstützen, dass es in das bestehende Netzwerk COSPAS-SARSAT und MEOSAR (Medium Earth Orbit Search and Rescue System) eingebunden wird. Die Satelliten des Galileo-Systems werden in der Lage sein, die Signale von Notsendern auf Schiffen, Flugzeugen und Personen zu empfangen und an die Nationalen Rettungszentren weiterzuleiten. Dadurch erhält eine Rettungsleitstelle genaue Informationen über den Ort des Notfalls. Zu jeder Zeit wird mindestens ein Galileo-Satellit das Signal empfangen können und erlaubt so eine Alarmierung in nahezu Echtzeit. Ausserdem wird es erstmals in bestimmten Fällen möglich sein, eine Antwort zum Notsender zurückzusenden.

Die Dienste im Einzelnen

Sehr viel genaues über diese Dienste ist noch nicht bekannt. Vieles wird sich sicherlich noch über die Nachfrage und die zu erwartenden Kosten definieren.

Allgemeiner Dienst (Open Service; OS)

Der allgemeine Dienst von Galileo ist für Anwendungen des Massenmarktes gedacht und damit eine direkte Konkurrenz oder auch Ergänzung zu GPS. Dieser Dienst wird zum modernisierten GPS-System (GPS III; ab 2010) so kompatibel sein, dass Empfänger die Daten beider Systeme verwenden können, denn beide System setzen das gleiche Datenformat (BOC1.1) ein. Galileo wird im Dienst OS Zeit- und Positionssignale liefern, die für den Benutzer kostenlos sind. Es werden jedoch für die Hersteller Lizenzgebühren fällig, womit anzunehmen ist, dass Galileo/GPS-Empfänger teurer sein werden als reine GPS-Empfänger. Für diesen frei zugänglichen Dienst stehen bis zu drei Signalfrequenzen zur Verfügung, jedoch werden die kostengünstigsten Empfänger wohl nur eines dieser Signale nutzen und

eine entsprechend eingeschränkte Genauigkeit liefern. Zum Standard werden sich aber wohl bald Zweifrequenzempfänger entwickeln, die eine Korrektur der Ionosphäreinflüsse erlauben. Gegenüber dem jetzigen GPS-System wird bei günstigen Empfängern in erster Linie eine Verbesserung der Abdeckung erreicht werden, da mit der Kombination von GPS und Galileo-Satelliten zu jeder Zeit mindestens 15 Satelliten verfügbar sein sollten. Dies wird besonders in Städten und bergigen Gegenden Vorteile bringen. Zweifrequenzempfänger werden eine höhere Genauigkeit liefern (ca. 4 m). Der frei zugängliche Dienst wird jedoch keine Integritätsinformationen des Systems oder Garantien irgendeiner Art beinhalten.

Es ist sogar so, dass nach langem Streit der Europäer mit den Amerikanern für Galileo nicht das störungsunempfindlichere Datenformat BOC1.5 eingesetzt wird, sondern BOC1.1. Grund war die Angst der Amerikaner, dass sonst das frei verfügbare Galileo-Signal in Krisenfällen nicht gestört werden kann. Zumindest nicht ohne ihr geplantes neue M-Signal, das ebenfalls BOC1.5 nutzt nicht auch zu stören. Dieser Kompromiss auf BOC1.1, erlaubt zwar maximale Kompatibilität zwischen Galileo und GPS, lässt aber alle Versprechungen und Ankündigungen mit Galileo ein verlässlicheres (weil nicht durch die US-Armee beeinflussbares) System zu haben relativ schwach dastehen. Lediglich der nur Staatsstellen zugängliche PRS-Dienst von Galileo ist störsicher.

Sicherer-Dienst (Safety-of-Life Service; SoL)

Der SoL-Dienst wird zertifiziert sein und die nötige Genauigkeit wird durch die Verwendung von Zweifrequenzempfängern erreicht. Unter diesen Voraussetzungen wird die spätere „Galileo Betriebsgesellschaft“ die Verfügbarkeit dieses Dienstes garantieren. Um diese Zuverlässigkeit zu erreichen wird der Dienst im Bereich der für die Flugnavigation reservierten Frequenzbereiche (L1: 1559 - 1591 und E5: 1164 - 1215 MHz) integriert sein.

Dieser Dienst soll die Sicherheit speziell dann erhöhen, wenn keine entsprechende Infrastruktur am Boden vorhanden ist (z.B. ILS für Landeanflug). Innerhalb dieses Dienstes findet auch das EGNOS seinen Platz, das dann wie WAAS der unabhängigen Überwachung des Galileo (und GPS) dient. Ein weltweit verfügbarer solcher Dienst kann sicherlich die Effizienz und Sicherheit von Luftfahrt- und Schifffahrtsunternehmen steigern.

Kommerzieller Dienst (Commercial Service; CS)

Der kommerzielle Dienst zielt auf Anwendungen, die eine höhere Genauigkeit benötigen als der offene Dienst bietet. Dieser zusätzliche Nutzen wird durch Zahlung von Gebühren geboten. Im kommerziellen Dienst werden gegenüber dem offenen Dienst nochmals zwei zusätzliche Signale im E6-Bereich (1260-1300 MHz) zur Verfügung stehen. Dieses Signalpaar wird verschlüsselt sein, der Zugang wird über die Empfänger kontrolliert. Somit wäre sowohl eine Abrechnung nach Zeit als auch eine Art Abonnement möglich.

Im kommerziellen Modus wird Datenübertragung (Systemdaten, nicht jedoch Kommunikation) möglich sein und bei anderen Signalen auftretende Zweideutigkeiten bei Differentialanwendungen werden so gelöst werden können. Die

entsprechenden Dienste sollen über Service-Provider zur Verfügung gestellt werden, die das Recht zur Verwendung der Signale vom Galileo-Betreiber kaufen. Es ist anzunehmen, dass vor allem für Vermessungsaufgaben dieser Dienst von Bedeutung sein könnte, falls das Kosten-Nutzen-Verhältnis sich rechnet.

Öffentlicher regulierter Dienst (Public Regulated Service; PRS)

Zusätzlich zu den für die Öffentlichkeit prinzipiell zugänglichen Diensten wird es noch einen besonders robusten und streng zugangskontrollierten Service für von den Regierungen autorisierte Anwendungen geben. Dieser regulierte Dienst wird für Polizei, Küstenwache und Zollbehörden aber auch Militärs zur Verfügung stehen. Der Zugang zu diesem verschlüsselten Dienst wird jedoch von zivilen Institutionen kontrolliert. Ein Zugang basierend auf einer Region oder Benutzergruppe wird durch in Europa gültige Sicherheitsrichtlinien gewährt.

Der öffentlich regulierte Dienst wird zu jedem Zeitpunkt und unter allen Umständen, auch in Krisenzeiten verfügbar sein. Das verschlüsselte Signal wird gegen Störung und Verfälschung gesichert sein und entspricht somit in etwa dem bestehenden militärischen GPS-Signal.

Such- und Rettungsservice (Search and Rescue; SAR)

Der Such- und Rettungsservice soll Europas Beitrag zum internationalen kooperativen Bestreben nach Rettungs- und Suchdiensten sein. Jeder Satellit wird einen Transponder enthalten, der Notsignale von Benutzern zu den Rettungsleitstellen (Rescue Coordination Center; RCC) weiterleitet, die dann die Rettungsaktion einleiten. Gleichzeitig kann das System dem Nutzer ein Rücksignal senden, das anzeigt, dass sein Notruf eingegangen und Hilfe auf dem Weg ist. Letztere Funktion ist eine Neuerung gegenüber dem bestehenden System, dass keine Rückmeldung an den Benutzer erlaubt.

Weitere Verbesserungen gegenüber dem heutigen COSPAS-SARSAT System aus bestehend aus vier niedrigfliegenden und drei geostationären Satelliten sind ein Nahezu-Echtzeitempfang des Notsignals überall auf der Erde (bisher ist die durchschnittliche Wartezeit eine Stunde); Genaue Lokalisierung des Notrufs (wenige Meter anstatt der momentan spezifizierten 5 km); Empfang des Signals durch mehrere Satelliten um Abschattungen durch das Gelände unter ungünstigen Umständen zu vermeiden.

Der Dienst wird in Abstimmung mit dem bestehenden COSPAS-SARSAT-System definiert und der Aufbau und Betrieb werden durch die IMO (International Maritime Organisation; Internationale Seeschiffahrts-Organisation) und ICAO (International Civil Aviation Organization; Internationale Zivile Luftfahrt-Organisation) geleitet.

