

GPS

Arbeitskreis Schule Energie



Global Navigation Satellite System¹

Global Navigation Satellite System (GNSS), zu deutsch etwa *weltweites Navigationssatellitensystem*, ist die Bezeichnung für ein System zur Positionsbestimmung und Navigation auf der Erde und in der Luft durch den Empfang von Satellitensignalen und Signalen von Pseudoliten. Zunächst hieß es *Global Positioning System (GPS)*, heute ist mit GPS speziell das US-amerikanische System gemeint.

GNSS-Satelliten teilen über Funk ihre genaue Position und Uhrzeit mit. Zur Positionsbestimmung muss der Beobachter die Signale von mindestens vier unabhängigen Satelliten gleichzeitig empfangen. Durch Bestimmung der Laufzeit und Triangulierung leitet er daraus seine eigene Position ab.

Um die Signale mit mobilen und möglichst kleinen Empfangsgeräten (z.B. im Einsatz von Lenkwaffen) auffangen zu können, sind die Satelliten in erdnahen Orbits stationiert. Aus physikalischen Gründen ist mit der geringen Höhe über der Erdoberfläche eine Bahngeschwindigkeit verbunden, die erheblich über der Rotationsgeschwindigkeit der Erde liegt. Deshalb wird, um mindestens drei, besser vier Satelliten an jedem beliebigen Ort jederzeit zur Verfügung zu haben, eine sogenannte Konstellation von 24, besser 32 Satelliten benötigt. So lässt sich sicherstellen, dass der sich auf den Beobachter zu bewegende Satellit am Horizont für das Auge unsichtbar „aufgeht“, bevor der vorangegangene Satellit, vom Beobachter sich entfernend, am Horizont „untergeht“.

Stationäre Empfangsstationen verbessern die Positionsgenauigkeit, indem sie Korrektursignale (DGPS) an die Nutzer übermitteln. Satellitengestützte Zusatzsysteme, engl. *Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS)*, sind das europäische EGNOS, das US-amerikanische WAAS, das japanische MSAS und das indische GAGAN, die die Korrektursignale über geostationäre Satelliten abstrahlen. Das chinesische System Compass befindet sich noch im Aufbau, das indische System IRNSS noch in Planung.

Arbeitsweise

Triangulation

Eine Methode zur Positionsbestimmung ist die Triangulation. Vom eigenen Standort aus misst man den Winkel, unter dem zwei bekannte Objekte erscheinen. Dann befindet man sich irgendwo auf dem Kreis, der durch die Rotation des Scheitelpunkts um die Verbindungslinie zwischen den beiden Objekten aufgespannt wird. Meist steht man auf der Erde, weshalb zwei Bezugspunkte ausreichen. Um die eigene Höhe über der Erdoberfläche zu bestimmen, ist ein weiteres Referenzobjekt notwendig.

Triangulation bezeichnet in der optischen Messtechnik eine Methode zur Entfernungsmessung mit Licht.

¹ Aus: Wikipedia, freie Enzyklopädie

Prinzip

Prinzip der Triangulation in zwei Dimensionen:

Das Grundprinzip der Triangulation ist in der Abbildung rechts vereinfacht für den zweidimensionalen Fall dargestellt, unterscheidet sich aber im dreidimensionalen Fall nicht wesentlich.

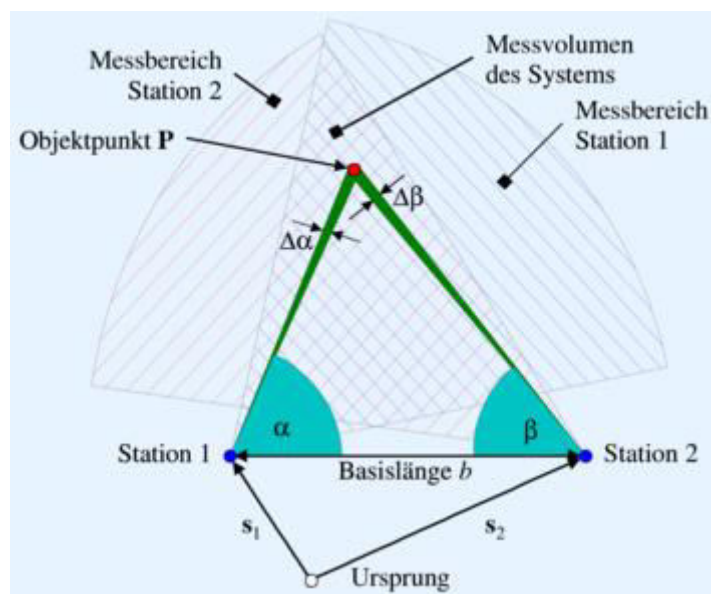
Von zwei verschiedenen Stationen an den Positionen \vec{s}_1 und \vec{s}_2 wird der zu bestimmende Zielpunkt \vec{P} angepeilt. Dabei erhält man die beiden Winkel α und β mit der Genauigkeit $\Delta\alpha$ und $\Delta\beta$. Unter Kenntnis der Basislänge b kann man dann die Koordinaten von \vec{P} relativ zum Koordinatenursprung bestimmen. Das Messvolumen des Gesamtsystems ist das Schnittvolumen der Messvolumina der Einzel-Messsysteme.

Vereinfacht könnte man auch sagen, dass von zwei Punkten auf einer Geraden, wobei der Abstand zwischen den beiden Punkten bekannt ist, Winkelmessungen zu beliebig anderen Punkten im Raum erfolgen, um deren Lage eindeutig zu bezeichnen.

Technische Umsetzung

In der klassischen technischen Umsetzung benutzt man einen Theodolit zur Bestimmung der Winkel. In der Landvermessung und bei der hochpräzisen Messung von Einzelpunkten ist das Verfahren immer noch Stand der Technik.

Aktive Verfahren nutzen eine Lichtquelle, zumeist einen Laser, der unter einem Winkel das Objekt beleuchtet dessen Oberfläche vermessen werden soll. Ein elektronischer Bildwandler, zumeist eine CCD- oder CMOS-Kamera oder ein PSD, registriert das Streulicht. Bei Kenntnis der Strahlrichtung und des Abstandes zwischen Kamera und



Lichtquelle kann damit der Abstand vom Objekt zur Kamera bestimmt werden. Die Verbindung Kamera-Lichtquelle sowie die beiden Strahlen von und zum Objekt bilden hierbei ein Dreieck, daher die Bezeichnung **Triangulation**. Wird das Verfahren rasterartig oder kontinuierlich bewegt durchgeführt, kann das Oberflächenrelief mit großer Genauigkeit, bei handelsüblichen Sensoren bis zu 0,01 mm, bestimmt werden. Projiziert man ein Muster z.B. eine Linie oder ein Streifenmuster, kann die Distanzinformation zu allen Punkten des Musters mit einem einzigen Kamerabild berechnet werden. Bei einer Linie spricht man auch von Lichtschnitt, Streifenmuster kommen in der Streifenprojektion zum Einsatz.

Satelliten-Triangulation

Bei der Standortbestimmung über Satelliten misst man keine Winkel, sondern Entfernungen. Kennt man den Abstand zu drei Satelliten bekannter Position, ist der eigene Standort nach Position und Höhe eindeutig festgelegt.

Messpraxis

Der Satellitenstandort ändert sich ständig und mit ihm die Entfernung des Satelliten zur Erde. Diese Parameter lassen sich deshalb vom Beobachter nicht direkt bestimmen. Dafür kennt der Satellit seine momentane Position, die die Bodenstation regelmäßig abgleicht. Die Entfernung vom Satelliten zum Beobachter erschließt sich aus der Signallaufzeit.

Der Satellit strahlt fortwährend seine Positionsdaten und ein Zeitsignal aus. Durch den Vergleich mit einer eigenen Uhr weiß der Beobachter, wie lange das Signal bis zu ihm gebraucht hat. Für eine Genauigkeit von 3 Meter muss die Zeitunsicherheit kleiner als 10 Nanosekunden ($<1 \cdot 10^{-8}$ s) sein.

Anstatt den Empfänger mit einer hochgenauen Atomuhr auszustatten, leitet man die Zeit aus den Zeitsignalen der Satelliten ab. Deshalb benötigt man zur Positionsbestimmung nicht nur drei, sondern vier Satelliten, um die vier Unbekannten *geographische Länge, geographische Breite, Höhe über der Erde* und *Zeit* abzuschätzen (Rechenbeispiel siehe GPS-Grundgleichungen)

Messfehler

Wie bei der Triangulation sollte das Volumen der Pyramide, die die Satelliten mit dem Beobachter an der Spitze aufspannen, möglichst groß sein. Liegen die Satelliten auf einer Linie, ist keine genaue Ortsbestimmung möglich.

Die Atmosphäre verändert die Signallaufzeit. Anders als bei der Troposphäre ist der Einfluss der Ionosphäre frequenzabhängig. Er lässt sich teilweise korrigieren, wenn der Empfänger Signale auswertet, die der Satellit auf unterschiedlichen Frequenzen sendet. Folgende Messfehler beeinflussen die Positionsgenauigkeit:

Quelle	Zeitfehler	Ortsfehler
Satellitenposition	6-60 ns	1-10 m
Ionosphäre	0-180 ns	0-30 m (?)
Troposphäre	0-180 ns	0-30 m (?)
Mehrwegeeffekte	0-6 ns	0-1 m
Zeitdrift	0-9 ns	0-1.5 m

Die Genauigkeit nimmt zu, wenn mehr als 4 Satelliten empfangen werden können. Wenn die Messung nicht zeitkritisch ist, lassen sich die Fehler nachträglich durch Vergleich mit Referenzmessungen weiter verringern, siehe auch Differential-GPS (DGPS).

Bezeichnungen

Die militärischen Systeme GPS der USA und das russische GLONASS nennt man Systeme der *ersten Generation*. Nach der Aufrüstung mit neuen Satelliten steht GPS der *zweiten Generation* voraussichtlich bis 2012 zur Verfügung. Es wird vergleichbar sein mit Galileo (siehe weiter hinten), das ebenfalls zur *zweiten Generation* gezählt wird. Im ESA-Sprachgebrauch steht *GNSS-1* für SBAS-Systeme, *GNSS-2* für Galileo und Systeme der zweiten Generation.

GPS-Technologie

Beim Global Positioning System (**GPS**) wird der Ort des Empfängers (genauer der Ort der Empfangsantenne) mit Hilfe der Entfernung zu mehreren Satelliten bestimmt. Ein Satellit reicht nicht, denn bei einer gegebenen Entfernung zu einem Satelliten kann sich der Empfänger irgendwo auf einer Kugeloberfläche mit dem Radius der Entfernung befinden, in deren Mittelpunkt der Satellit ist.

Wenn weitere Informationen bekannt sind, engt sich die Unbestimmtheit des Ortes ein. Wenn bekannt ist, dass der Empfänger auf der Oberfläche der Erdoberfläche ist, so kann sich der Empfänger nur auf dem Kreis befinden, der die Schnittlinie Erdoberfläche-Entfernungskugel ist. Ist bekannt, dass sich Sendeort und Empfänger auf einer Ebene befinden, ist ein Kreis die Schnittlinie der Kugeloberfläche mit der Ebene.

Bei zwei Entfernungen und zwei Kugelmittelpunkten ist der mögliche Ort des Empfängers schon eingeschränkt, da der Empfänger sich nur an Orten befinden kann, die sich gleichzeitig auf beiden Kugeloberflächen befinden. Diese Orte sind die Schnittlinie der beiden Kugeloberflächen. Die Schnittlinie zweier Kugeloberflächen ist ein Kreis im Raum. Kommt eine weitere Entfernung mit einem weiteren Kugelmittelpunkt hinzu, so ist der Empfängerort der Ort, wo sich alle drei Kugeloberflächen schneiden, denn nur an diesem Ort (ggf. auch zwei Orte) hat der Empfänger zu allen gegebenen Kugelmittelpunkten (Satellitenorte) die gegebenen Entfernungen.

Rechnerisch drückt sich das in einem kartesischen Koordinatensystem so aus: in diesem Koordinatensystem wird jeder Ort durch die Angabe von drei Koordinaten eindeutig bestimmt. Da für den gesuchten Ort dementsprechend drei Ortskoordinaten bestimmt werden müssen, sind drei Gleichungen erforderlich, um die drei unbekanntes Ortskoordinaten zu bestimmen. Die erforderlichen drei Gleichungen ergeben sich aus den Entfernungen zu den drei Kugelmittelpunkten (Satelliten).

Die Lösung der Gleichungen ist in realen Fällen immer möglich. Würden beliebige Orte und Entfernungen vorgegeben, so ergibt sich keine Lösung, wenn sich die Kugeloberflächen nicht schneiden - was bei realen Aufgaben aber immer der Fall ist.

Die Realisierung dieses Prinzip hat beim GPS zwei prinzipielle Schwierigkeiten:

- die Entfernung kann nicht direkt gemessen werden.
- die Satelliten bewegen sich (mit ca. 3,9 km/s), wodurch sich der Ort der Kugelmittelpunkte im Laufe der Zeit schnell verändert.

Zur Behebung der ersten Schwierigkeit benutzt man die Laufzeit des Signals, d.h. um wie viel später das Signal beim Empfänger ankommt - und rechnet in erster Näherung damit, dass sich das Signal mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit bewegt.

Als Beispiel für die Art der Entfernungsbestimmung ist die Entfernungsbestimmung beim Gewitter bekannt: Wenn man einen Blitz sieht (die Laufzeit des Blitzes ist zu vernachlässigen), wird bestimmt, wie lange es dauert, bis der Donner zu hören ist. Aus dieser Laufzeit des Donners wird mit Hilfe der Schallgeschwindigkeit die Entfernung bestimmt. Zu welcher Uhrzeit Blitz und Donner dem Empfänger bekannt werden, ist dabei unerheblich.

Diese einfache Laufzeitbestimmung analog der Differenz zwischen Blitz und Donner ist beim GPS etwas komplizierter, da dem Empfänger zunächst fehlt, wann das empfangene Signal ausgesandt wurde.

Beim GPS ist das so gelöst, dass das empfangene Signal seinen Sendezeitpunkt mitbringt - und zwar in Form der GPS-Systemzeit bei der Sendung.

Wenn der Empfänger die GPS-Systemzeit kennt, kann er die Laufzeit als die Differenz zwischen Sendeuhrzeit und Empfangsuhrzeit bestimmen. In der Regel kennt der Empfänger aber nicht seine Empfangszeit in der GPS-Systemzeit. Deshalb ist der Empfangszeitpunkt in der GPS-Systemzeit eine weitere Unbekannte zur Ortsbestimmung.

Da deshalb vier Unbekannte zu bestimmen sind, werden auch vier Gleichungen zur Bestimmung der vier Unbekannten (drei Ortskoordinaten und der Empfangszeitpunkt in der GPS-Systemzeit) benötigt. Diese vierte Gleichung erfordert die Hinzunahme der Entfernung zu einem vierten Satelliten.

Zur Erklärung, warum das möglich ist: Wird eine falsche Empfangszeit benutzt, so sind die Entfernungen zu den Satelliten auch falsch. Nimmt man von den vier falschen Entfernungen nur drei, lässt sich damit ein möglicher (falscher!) Ort des Empfängers bestimmen. Sogar die Wahl des Empfangszeitpunktes ist aber schon eingeschränkt - denn nur für bestimmte Entfernungsbereiche kann das System der drei Gleichungen gelöst werden: sind die Entfernungen zu falsch, schneiden sich nicht alle drei Kugeln. Außerdem sind die falschen Empfängerorte unterschiedlich - je nachdem, welche der drei Entfernungen aus den vier (falschen) Entfernungen gewählt wurden. Nur beim richtigen Empfangszeitpunkt sind alle Empfängerorte gleich und damit richtig. Deshalb muss das System der vier Gleichungen gelöst werden.

Die Kenntnis des Sendezeitpunktes ist auch noch aus einem weiteren Grund wichtig: Weil sich die Satelliten bewegen, muss der Sendeort zum Sendezeitpunkt bekannt sein. Der Satellit kann in dem kurzen Sendeaugenblick seine Koordinaten nicht übertragen. Deshalb wird zur Ortsbestimmung die Bahngleichung als Zeitfunktion benutzt. Die Konstanten, die die Bahngleichung enthält, werden mit dem Signal übertragen.

Zur Ortsbestimmung wurde in den vorher stehenden Text die Vakuumlichtgeschwindigkeit benutzt. Zur genauen Ortsbestimmung muss berücksichtigt werden, dass auf dem Weg zwischen Satelliten und Empfänger kein Vakuum herrscht. Im Nichtvakuum ist die Signalgeschwindigkeit geringer. Die Entfernung Satellit - Empfänger wird deshalb bei Benutzung der Vakuumlichtgeschwindigkeit zu groß berechnet. Wird trotzdem die Vakuumlichtgeschwindigkeit benutzt, muss die tatsächliche Laufzeit um die zusätzliche Ausbreitungszeit korrigiert werden. Da die Verzögerung hauptsächlich in der Ionosphäre erfolgt, nennt man das Ionosphärenkorrektur.

Zur Technik der Ortsbestimmung gehört auch die Berücksichtigung von Störungen - vermeidbare und unvermeidbare.

Damit ergeben sich folgende einzelne Abschnitte zur Beschreibung der technischen Seite des GPS:

Beschreibung des GPS-Signals

Wie vorstehend beschrieben, muss jeder Satellit seine Bahndaten und seinen Sendezeitpunkt seinem Sendesignal mitgeben. Diese Mitteilung erfolgt mit den C/A-Daten. Außerdem muss es dem Empfänger möglich sein, zu bestimmen, von welchem Satelliten das empfangene Signal stammt - obwohl alle Satelliten die gleiche Sendefrequenz benutzen.

Zur Erfüllung all dieser Anforderungen ist das GPS-Signal entwickelt. Zeitrelevant sind immer die Zeitpunkte des Beginns eines Signalteiles, wobei verschiedene Signalteile unterschiedliche Dauer haben - aber alle Signalteile sind gleichzeitig vorhanden.

Bezugszeit aller Signale ist Sonntag 0 Uhr. In den übertragenen Nachrichten ist auch die Nummer der Woche enthalten - aber die ist für die Ortsbestimmung nicht relevant.

Die nächste Signaleinheit ist der Subframe. Ein Subframe hat eine zeitliche Länge von 6 s und trägt zu Beginn eine Nachricht, wie oft 6 s seit Sonntag 0 Uhr am Sendebeginn des nächsten Subframes vergangen sind.

Die nächst kleinere Einheit ist das Word. Ein Subframe besteht aus 10 Worten. Diese kleinere Einheit Word besteht aus 30 Nachrichtenbits. 24 Bits tragen die Nachrichten direkt, am Schluss jedes Words sind sechs Paritybits vorhanden, um den fehlerfreien Empfang zu kontrollieren. Die einzelnen Wörter tragen keine Information über ihre Sendezeit, die Sendezeit des Wordanfangs ergibt sich durch Abzählen ihrer Stellung im Subframe. Ohne Abzählen wäre die Sendezeit des Wordanfangs um 0,6 s mehrdeutig.

Jedes Nachrichtenbit dauert 0,02 s (= 20 ms) und enthält natürlich auch keine weitere Information. Die genaue Zeitlage seines Beginns ergibt sich durch Abzählen innerhalb des Wortes. Ohne Abzählen wäre die Sendezeit des Beginns jedes Nachrichtenbits um 20 ms mehrdeutig.

Jedes Nachrichtenbit ist unterteilt in 20 Codeblöcke. Diese 20 Codeblöcke mit einer Dauer von 1 ms sind identisch und bestehen aus einer Unterbitfolge von je 1023 Unterbits. Zur Unterscheidung von den Nachrichtenbits werden diese Unterbits als Chips bezeichnet. Da jeder Codeblock 1 ms dauert und auch keine Nachricht tragen kann, muss seine Zeit wieder durch Abzählen bestimmt werden, innerhalb seines Bits, bzw. Words bzw. Subframes. Ohne Abzählen wäre die Sendezeit des Beginns jedes Codeblocks um 1 ms mehrdeutig.

Eine Folge von 1023 Chips kann auf 2^{1023} (ca. $8,99 \cdot 10^{307}$) Arten gebildet werden. Damit trotz der vielen Möglichkeiten die gewählte Folge für jeden Satelliten einzigartig ist, wird eine Folge aus den Gold-Codes benutzt. Gold-Codes haben eine Länge von $2^n - 1$ Bit. n ist dabei eine Ganzzahl, die bei GPS zu 10 gewählt wurde.

Im Empfänger wird für jeden empfangenen Satelliten eine identische Gold-Code-Folge erzeugt. Zunächst haben die empfangene und die im Empfänger selbst erzeugte Code-Folge keine zeitliche Beziehung. Um diese zeitliche Beziehung herzustellen, werden beide Folgen miteinander multipliziert und die Multiplikationsergebnisse addiert. Diese Prozedur wird als Kreuzkorrelation bezeichnet. Wenn der zeitliche Unterschied variiert wird, ändert sich die Summe. Die Summe wird maximal, wenn die Folgen zeitlich übereinstimmen. Die Code-Folgen wurden beim GPS so gewählt, dass gesichert ist, dass nur bei der richtigen Code-Folge und bei der richtigen Zeitverschiebung das Maximum auftritt (Einzigartigkeit). Die im

Empfänger erzeugte Code-Folge kann mit einem Zeitfehler < 1 ns an die empfangene Code-Folge, die vom Satelliten gesendet wurde, angepasst werden.

Durch das Abzählen in den Signaleinheiten und die Lage der momentanen Zeit im Codeblock ist der genaue Sendezeitpunkt bekannt.

Da jeder Codeblock gleichzeitig auch Träger der Nachrichtenbits sein soll, müssen sich die Codeblöcke unterscheiden, je nachdem, ob sie eine 0 oder 1 übertragen. Das geschieht dadurch, dass der Codeblock aus Einsen (mit dazwischenliegenden Nullen) oder aus Nullen (mit dazwischenliegenden Einsen) besteht. Mit dem Unterschied Einsen oder Nullen wird übertragen, ob der Codeblock das Nachrichtenbit 0 oder 1 überträgt. Dieses Vorgehen ist möglich, weil es für die Gold-Folge unerheblich ist, ob die Reihenfolge aus Einsen (mit dazwischenliegenden Nullen) oder umgekehrt besteht.

Modulation des GPS-Signals auf den Träger

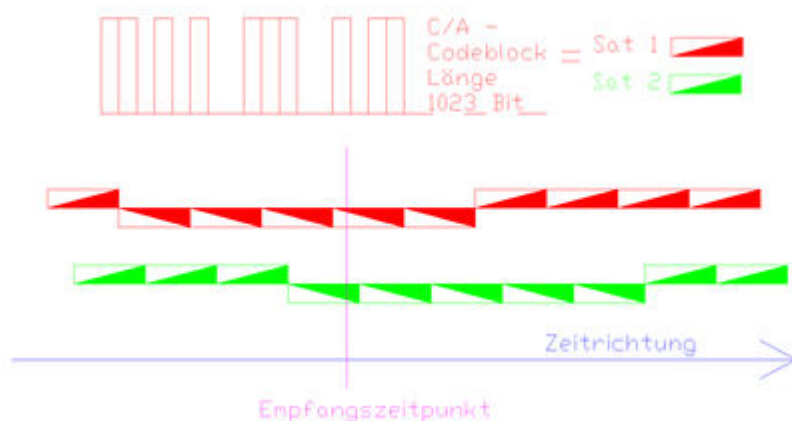
Das Signal hat die zwei Werte 0 und 1. So kann das Signal nicht direkt übertragen werden. Zur Übertragung wird eine Trägerfrequenz gesendet, deren Phase je nach Signalwert um 180° geändert wird. Bei einer 0 wird die Trägerfrequenz direkt, bei einer 1 die um 180° phasenverschobene Trägerfrequenz gesendet.

Bestimmung der Sendezeitpunkte

Wie schon erwähnt, erzeugt der Empfänger für jeden Satelliten eine eigene Codefolge und verschiebt diese Codefolgen so, dass jede Codefolge maximal mit dem dazugehörigen Satelliten übereinstimmt. Damit ist der Sendezeitpunkt jedes Satellitensignals bekannt.

Im Bild sind von den gleichzeitig empfangenen Satellitensignalen nur die Signale von zwei Satelliten dargestellt (rot und grün).

Ein Bit der GPS-Nachricht ist 20 Codeblöcke lang (von denen jeder 1023 Bit lang ist). Dargestellt ist das nur mit fünf Codeblöcken. Zu welcher Zeit der Empfänger die Auswertung vornimmt (magenta), ist nicht von Bedeutung. Welche Zeit an der blauen Zeitrichtung steht (Empfängerzeit), ist auch gleich. Für die Auswertung muss nur die Zeit des Beginns eines Codeblocks im Satelliten bekannt sein, und der Empfänger muss nur die Zeit zwischen Auswertzeitpunkt und Beginn eines Codeblocks messen. Die Sendezeit des Codeblocks wird durch Auswertung der Satellitennachricht bestimmt.



Die Verhältnisse am Empfänger beim Empfang der GPS-Satelliten

Die Bestimmung der Lage eines Codeblocks war schon beschrieben. Nach der Bestimmung der Lage des Empfangszeitpunkts innerhalb eines Codeblocks muss nun die Lage des Codeblocks zu Sonntag 0 Uhr bestimmt werden.

Dazu muss der Empfänger von der Einheit Codeblock rückwärts immer die größere Einheit bestimmen, um die Lage des Codeblocks zu Sonntag 0 Uhr bestimmen zu können:

- Zuerst wird bestimmt, bei welchen aufeinander folgenden Codeblöcken die Reihenfolge zwischen Einsen (mit dazwischenliegenden Nullen) und Nullen (mit dazwischen liegenden Einsen) wechselt. Dieser Wechsel ist der Anfang eines Nachrichtenbits. Damit ist der Abstand zu Sonntag 0 Uhr mit einer Unsicherheit von Vielfachen von 20 ms bestimmt.

Anmerkung: Ein Wechsel muss nicht nach spätestens 20 ms erfolgen, da es mehrere aufeinander folgende Nullen oder Einsen geben kann, sodass nicht alle 20 ms ein solcher Wechsel erfolgt. Aber in einer Dauer von 0,6 s (Dauer der Wordlänge) sind wegen der Paritätsbits mit Sicherheit mehrere Bitwechsel.

Nachdem die Bitgrenze erkannt ist, können die Bits empfangen und gespeichert werden. In dieser Bitfolge ist nun die Lage der Subframes zu bestimmen, von der jeder 300 bit lang ist.

- Danach wird die Lage eines Subframe identifiziert. Dazu braucht der Empfänger die doppelte Subframelänge, also mindestens 600 empfangene Bits, die er in 12 s empfängt.

Aus der gespeicherten Bitfolge nimmt der Empfänger einen Block von 600 Bits und sucht in diesem Block nach der Bitfolge 10001011. Diese Bitfolge ist im ersten Word jedes Subframe enthalten. Dieses erste Word wird als TLM-Word (=Telemetry-Word) bezeichnet. Die gesuchte Bitfolge, die im TLM-Word enthalten ist, wird als Preamble bezeichnet. Mit der Identifizierung dieser Bitfolge ist der Beginn jedes Subframe und jedes Wortes bekannt, da alle Wörter jeweils 30 bit lang sind. Da allerdings die Bitfolge 10001011 auch in der übrigen Nachricht auftreten kann, müssen zur Überprüfung, ob es wirklich der Beginn des TLM-Words ist, noch zwei Prüfungen erfolgen. Erstens: wenn es sich bei der gefundenen Bitfolge tatsächlich um die Preamble handelt, sind die 6 Paritybits am Ende jedes Words richtig, und zweitens muss alle 300 Bit (6 s) ein neuer Subframe kommen, der immer mit einem TLM-Word beginnt. Wenn die Prüfung erfolgreich ist, ist damit der Beginn jedes Subframes in der Empfängerzeit bekannt. Die Sendezeit jedes Framebeginns im Satelliten ist noch unsicher in Vielfachen von 6 s.

Anmerkung: Wenn der Empfänger eine ggf. falsche Identifizierung feststellt, wird in dem 600-Bit-Block nach einer weiteren 10001011-Folge gesucht und überprüft, ob es sich nun um die Preamble handelt.

Zur Identifizierung wie oft 6 s seit Sonntag 0 Uhr vergangen sind, wird das dem TLM-Word folgende HOW-Word (Hand over Word) ausgewertet. Die ersten 17 Bits des HOW geben die Zeit des Beginns des nachfolgenden Subframes als ganzzahlige Zählzahl von 6 sec seit Sonntag 0 Uhr an. Damit ist in der Empfängerzeit immer bekannt, wann jede Aussendung in der GPS-Zeit erfolgt, da die eben beschriebene Prozedur bei jedem empfangenen Satelliten erfolgt.

Damit ist in der empfangereigenen Zeit bekannt zu welchem Zeitpunkt das gerade (eben zur Empfängerzeit) empfangene Signal ausgesandt wurde.

Bestimmung der Satellitenorte zum Sendezeitpunkt

In der Satellitennachricht sind die Bahnparameter jedes Satelliten enthalten. Mit den Bahnparametern und der Sendezeit kann für jede Sendezeit der Satellitenort berechnet werden.

Orts- und Zeitbestimmung des Empfängers

Mit den jetzt bekannten Sendezeitpunkten und Sendeorten der empfangenen Signale zu einem bestimmten Zeitpunkt wird der Empfängerort bestimmt. Die Uhrzeit des Empfangszeitpunkts muss weder in der GPS-Systemzeit noch in der Empfängerzeit bekannt sein. Wenn die Empfängeruhr gestellt werden soll, wird dem Empfang die Empfängeruhrzeit t_0^* zugeordnet.

Dem benutzten Gleichungssystem reichen diese Daten aus, um die Empfängerkoordinaten und den Empfangszeitpunkt in der GPS-Systemzeit zu bestimmen. (GPS-Grundgleichungen) Nach Lösung der GPS-Grundgleichungen hat der Empfänger seine Koordinaten (genauer die Koordinaten seiner Empfangsantenne) und den Empfangszeitpunkt t_0 in der GPS-Systemzeit. Damit kann der Empfänger prinzipiell seine Empfängeruhr mit der Differenz $t_0^* - t_0$ auf die GPS-Systemzeit stellen (synchronisieren), aber das ist nicht notwendig. Notwendig ist es nur, wenn der GPS-Empfänger als Zeitnormal dienen soll. Da die GPS-Systemzeit nicht unbedingt genau mit der UTC-Zeit übereinstimmt, enthalten die Satellitennachrichten für diesen Zweck auch noch die Differenz zwischen UTC und GPS.

Berücksichtigung unvermeidbarer Störungen

Die Zeit könnte theoretisch noch genauer bestimmt werden durch Auszählen der Bits in den Codeblöcken. Beim Empfangssignal geht das nicht, weil den einzelnen Chips der empfangenen Codefolge ein starkes Rauschen überlagert ist. Ursache ist die geringe Sendeleistung der Satelliten und die notwendige große Empfängerbandbreite.

Die Sendeleistung der GPS-Satelliten ist wegen der begrenzten Möglichkeiten der Energieversorgung ähnlich wie bei Fernsehsatelliten nur gering. Der Empfänger muss wegen der schnellen Folge der Zeichen (ca. alle μs) eine große Bandbreite haben. Deshalb hat das Empfangssignal einen so hohen Rauschanteil, dass die gesuchten Signale z.T. im Rauschen untergehen.

Die Korrelation erfolgt deshalb in der Regel so, dass das verrauschte Signal mit der empfangereigenen Codefolge multipliziert wird. Die erforderliche Summation erfolgt mit dem multiplizierten Signal. Das ist ein Gleichsignal und deshalb kann es über eine längere Zeit summiert werden. Durch diese lange Zeit mittelt sich das Rauschen - und es bleibt nur ein kleiner Rest. Dadurch hebt sich das korrelierte Signal aus dem Rauschen heraus.

GPS-Grundgleichungen

Die GPS-Grundgleichungen kommen beim Global Navigation Satellite System zum Einsatz.

Die idealisierten GPS-Grundgleichungen

Der GPS-Empfänger befindet sich an einem Ort mit den Koordinaten x_0 , y_0 und z_0 und empfängt die Signale der Satelliten zur GPS-Systemzeit t_0 .

Die Idealisierung bezieht sich darauf, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit als konstant angenommen ist und die Ausbreitungsrichtung nicht gekrümmt wird.

Der Empfänger kann immer alle Satelliten, die sich im möglichen Empfangsbereich befinden, gleichzeitig empfangen, da die Satelliten ununterbrochen senden. Bei Mehrkanalempfängern wird das auch so durchgeführt, bei Einkanalempfängern werden die Satelliten nacheinander empfangen, dann sind diese Zeitunterschiede beim Empfang entsprechend zur Empfangszeit zu addieren oder beim Sendezeitpunkt zu subtrahieren.

Für die Berechnung des Empfangsortes werden die Empfangsdaten von mindestens 4 Satelliten benötigt. Bei mehr als 4 empfangenen Satelliten ändert sich am Rechengang wenig, allerdings sind die Gleichungen dann überbestimmt, da mehr Gleichungen als Unbekannte vorhanden sind. Gleichungssysteme mit mehr Gleichungen als Unbekannte werden in der Ausgleichsrechnung behandelt.

Das Signal des Satelliten n wird zur GPS-Systemzeit t_n ausgesandt und in der Idealisierung wird angenommen, dass sich das Signal mit der Lichtgeschwindigkeit c ausbreitet. Zur GPS-Systemzeit t_0 wird das Signal empfangen. Die Laufzeit des Signals ist also die Differenz zwischen den beiden Zeiten:

$$\Delta t = t_0 - t_n$$

Anmerkung: Wenn t_0 nicht in der GPS-Systemzeit verwendet wird, sondern in der empfängereigenen Zeit, ist ein Zeitfehler zwischen der empfängereigenen Zeit und der GPS-Systemzeit zu berücksichtigen. Da hier die Empfangszeit in der GPS-Systemzeit betrachtet wird, muss der Fehler der Empfängeruhr nicht berücksichtigt werden.

Aus der Laufzeit folgt die Entfernung:

$$\text{Entfernung} = \Delta t \cdot c = c(t_0 - t_n)$$

Die im Weiteren vorausgesetzten 4 verfügbaren Satelliten senden ihre Signale zur Systemzeit t_n an den Orten x_n , y_n , z_n aus. Dabei geht n von 1 bis 4. Die Signale werden am Ort x_0 , y_0 , z_0 empfangen. Mit dem räumlichen Pythagoras können mit diesen Ortsangaben die Entfernungen zwischen Satellit und Empfänger berechnet werden. Diese Entfernungen müssen gleich der Entfernung aus der Laufzeit sein.

Um keine Wurzeln zu benutzen, werden die Gleichungen in Quadratform geschrieben:

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & (x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2 = [c(t_1 - t_0)]^2 \\
 (2) \quad & (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2 = [c(t_2 - t_0)]^2 \\
 (3) \quad & (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 + (z_3 - z_0)^2 = [c(t_3 - t_0)]^2 \\
 (4) \quad & (x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2 + (z_4 - z_0)^2 = [c(t_4 - t_0)]^2
 \end{aligned}$$

Dieses Gleichungssystem ist zu lösen. Die Lösung liefert den Empfangszeitpunkt t_0 und die 3 Koordinaten x_0 , y_0 und z_0 .

Anmerkung 1: In der Literatur wird das Gleichungssystem oft mit einem Iterationsverfahren gelöst und dabei das Iterationsverfahren physikalisch interpretiert. Für $t_i - t_0$ wird dazu verwendet $\Delta t_i = t_i - t_0$. Die Iteration des Gleichungssystems erfolgt dann mit unterschiedlichen Startwerten. Entweder wird ein ungefährer Ort für den Empfänger angenommen und damit im ersten Iterationsschritt die Laufzeiten Δt_i für diesen Startort berechnet. Mit diesen Δt_i werden die Empfängerkoordinaten verbessert. Mit diesem verbesserten Ort werden genauere Laufzeiten bestimmt und mit diesen verbesserten Laufzeiten wieder verbesserte Koordinaten. Das zweite Iterationsverfahren nimmt als Startwert für die Laufzeiten einheitlich ca. 70 ms an. Im weiteren Berechnungsverlauf unterscheiden sich beide Iterationsverfahren nicht mehr. In der Regel ist nach 3 bis 4 Iterationen die Lösung ausreichend genau.

Anmerkung 2: Dieses Iterationsverfahren ist nicht notwendig, da, wie im Folgenden gezeigt wird, auch eine geschlossene Lösung möglich ist.

Ausmultipliziert ergeben die Gleichungen (1) bis (4):

$$\begin{aligned}
 (5) \quad & x_1^2 - 2x_1x_0 + x_0^2 + y_1^2 - 2y_1y_0 + y_0^2 + z_1^2 - 2z_1z_0 + z_0^2 = c^2t_1^2 - 2c^2t_1t_0 + c^2t_0^2 \\
 (6) \quad & x_2^2 - 2x_2x_0 + x_0^2 + y_2^2 - 2y_2y_0 + y_0^2 + z_2^2 - 2z_2z_0 + z_0^2 = c^2t_2^2 - 2c^2t_2t_0 + c^2t_0^2 \\
 (7) \quad & x_3^2 - 2x_3x_0 + x_0^2 + y_3^2 - 2y_3y_0 + y_0^2 + z_3^2 - 2z_3z_0 + z_0^2 = c^2t_3^2 - 2c^2t_3t_0 + c^2t_0^2 \\
 (8) \quad & x_4^2 - 2x_4x_0 + x_0^2 + y_4^2 - 2y_4y_0 + y_0^2 + z_4^2 - 2z_4z_0 + z_0^2 = c^2t_4^2 - 2c^2t_4t_0 + c^2t_0^2
 \end{aligned}$$

Nun wird die Gleichung 8 von den Gleichungen 5, 6, und 7 subtrahiert. Dadurch fallen alle quadratischen Unbekannten weg:

$$\begin{aligned}
 (9) \quad & x_1^2 - x_4^2 - 2(x_1 - x_4)x_0 + y_1^2 - y_4^2 - 2(y_1 - y_4)y_0 + z_1^2 - z_4^2 - 2(z_1 - z_4)z_0 = c^2t_1^2 - c^2t_4^2 - 2c^2(t_1 - t_4)t_0 \\
 (10) \quad & x_2^2 - x_4^2 - 2(x_2 - x_4)x_0 + y_2^2 - y_4^2 - 2(y_2 - y_4)y_0 + z_2^2 - z_4^2 - 2(z_2 - z_4)z_0 = c^2t_2^2 - c^2t_4^2 - 2c^2(t_2 - t_4)t_0 \\
 (11) \quad & x_3^2 - x_4^2 - 2(x_3 - x_4)x_0 + y_3^2 - y_4^2 - 2(y_3 - y_4)y_0 + z_3^2 - z_4^2 - 2(z_3 - z_4)z_0 = c^2t_3^2 - c^2t_4^2 - 2c^2(t_3 - t_4)t_0
 \end{aligned}$$

Umgeordnet wird daraus:

$$\begin{aligned}
 (12) \quad & 2(x_1 - x_4)x_0 + 2(y_1 - y_4)y_0 + 2(z_1 - z_4)z_0 = x_1^2 - x_4^2 + y_1^2 - y_4^2 + z_1^2 - z_4^2 - (c^2t_1^2 - c^2t_4^2) + 2c^2(t_1 - t_4)t_0 \\
 (13) \quad & 2(x_2 - x_4)x_0 + 2(y_2 - y_4)y_0 + 2(z_2 - z_4)z_0 = x_2^2 - x_4^2 + y_2^2 - y_4^2 + z_2^2 - z_4^2 - (c^2t_2^2 - c^2t_4^2) + 2c^2(t_2 - t_4)t_0 \\
 (14) \quad & 2(x_3 - x_4)x_0 + 2(y_3 - y_4)y_0 + 2(z_3 - z_4)z_0 = x_3^2 - x_4^2 + y_3^2 - y_4^2 + z_3^2 - z_4^2 - (c^2t_3^2 - c^2t_4^2) + 2c^2(t_3 - t_4)t_0
 \end{aligned}$$

Durch die Reduktion auf 3 Gleichungen für immer noch 4 Unbekannte ist dieses Gleichungssystem zunächst unterbestimmt. Es lässt sich daher interpretieren als funktionale Abhängigkeit der gesuchten Koordinaten von einer Variablen t_0 . Da es sich um ein lineares Gleichungssystem handelt, ist auch diese Abhängigkeit linear, d. h. sie hat die Form

$$(15) \quad x_0 = x_{00} + x_{0t}t_0 \quad y_0 = y_{00} + y_{0t}t_0 \quad z_0 = z_{00} + z_{0t}t_0$$

mit entsprechenden Konstanten x_{00} , x_{0t} usw. Setzt man diese Ausdrücke in die Gleichungen 12, 13 und 14 ein, und eliminiert damit die gesuchten Koordinaten, so enthalten sie außer der Variablen t_0 nur noch konstante Größen. Diese 3 Gleichungen müssen daher für die konstanten Terme und die Vorfaktoren von t_0 separat gelten. Man erhält damit die beiden Gleichungssysteme

$$(16) \quad 2(x_1 - x_{\perp})x_{00} + 2(y_1 - y_{\perp})y_{00} + 2(z_1 - z_{\perp})z_{00} = x_1^2 - x_{\perp}^2 + y_1^2 - y_{\perp}^2 + z_1^2 - z_{\perp}^2 - (c^2t_1^2 - c^2t_{\perp}^2)$$

$$(17) \quad 2(x_2 - x_{\perp})x_{00} + 2(y_2 - y_{\perp})y_{00} + 2(z_2 - z_{\perp})z_{00} = x_2^2 - x_{\perp}^2 + y_2^2 - y_{\perp}^2 + z_2^2 - z_{\perp}^2 - (c^2t_2^2 - c^2t_{\perp}^2)$$

$$(18) \quad 2(x_3 - x_{\perp})x_{00} + 2(y_3 - y_{\perp})y_{00} + 2(z_3 - z_{\perp})z_{00} = x_3^2 - x_{\perp}^2 + y_3^2 - y_{\perp}^2 + z_3^2 - z_{\perp}^2 - (c^2t_3^2 - c^2t_{\perp}^2)$$

$$(19) \quad 2(x_1 - x_{\perp})x_{0t} + 2(y_1 - y_{\perp})y_{0t} + 2(z_1 - z_{\perp})z_{0t} = 2c^2(t_1 - t_{\perp})$$

$$(20) \quad 2(x_2 - x_{\perp})x_{0t} + 2(y_2 - y_{\perp})y_{0t} + 2(z_2 - z_{\perp})z_{0t} = 2c^2(t_2 - t_{\perp})$$

$$(21) \quad 2(x_3 - x_{\perp})x_{0t} + 2(y_3 - y_{\perp})y_{0t} + 2(z_3 - z_{\perp})z_{0t} = 2c^2(t_3 - t_{\perp})$$

Es handelt sich um 2 lineare Gleichungssysteme mit der gleichen Koeffizientenmatrix. Ihre Lösungen werden nun in eine der Ausgangsgleichungen eingesetzt. Damit wird nach der Reduktion auf 3 Gleichungen wieder eine vierte davon unabhängige hinzugenommen, und damit die vorübergehende Unterbestimmtheit behoben. Man erhält z. B. durch Einsetzen in die vierte Ausgangsgleichung

$$(22) \quad (x_{\perp} - x_{00} - x_{0t}t_0)^2 + (y_{\perp} - y_{00} - y_{0t}t_0)^2 + (z_{\perp} - z_{00} - z_{0t}t_0)^2 = [c(t_{\perp} - t_0)]^2$$

Die Terme werden ausmultipliziert und nach Potenzen von t_0 geordnet:

$$(23) \quad A = (x_{\perp} - x_{00})^2 + (y_{\perp} - y_{00})^2 + (z_{\perp} - z_{00})^2 - [ct_{\perp}]^2$$

$$(24) \quad B = (x_{\perp} - x_{00})x_{0t} + (y_{\perp} - y_{00})y_{0t} + (z_{\perp} - z_{00})z_{0t} - c^2t_{\perp}$$

$$(25) \quad C = x_{0t}^2 + y_{0t}^2 + z_{0t}^2 - c^2$$

$$(26) \quad Ct_0^2 - 2Bt_0 + A = 0$$

Mit den Lösungen:

$$(27) \quad t_0 = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - AC}}{C}$$

Bei realistischen Ausgangsdaten ergeben sich stets zwei reelle Lösungen. Eine davon scheidet als unrealistisch aus, entweder weil sie vor den Sendezeitpunkten der Satelliten

liegt oder zu Positionen führt, die oberhalb der Satellitenbahnen liegen. Damit sind alle Werte bekannt, um die Koordinaten anzugeben.

$$(28) \quad x_0 = x_{00} + x_{0t}t_0 \quad y_0 = y_{00} + y_{0t}t_0 \quad z_0 = z_{00} + z_{0t}t_0$$

Die Winkel der Verbindungslinien zwischen dem zu vermessenden Punkt und den Referenzpunkten muss möglichst groß sein. Sind die Winkel zu klein, ist eine exakte Positionsbestimmung nicht möglich.

GPS: Global Positioning System (USA)



NAVSTAR-Satellit der zweiten Generation



Navigationssystemapps in Mobiltelefonen

Das **Global Positioning System (GPS)** ist ein satellitengestütztes Navigationssystem des US-Verteidigungsministerium zur weltweiten Positionsbestimmung. Das GPS-Satellitensystem löst das alte Satellitennavigationssystem Transit der United States Navy ab, ebenso die Vela-Satelliten zur Ortung von Atombombenexplosionen.

Die offizielle Bezeichnung ist „**N**avigational **S**atellite **T**iming and **R**anging - **G**lobal **P**ositioning **S**ystem“ (NAVSTAR-GPS). NAVSTAR wird manchmal auch als Abkürzung für „**N**avigation **S**ystem using **T**iming and **R**anging“ genutzt. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird das System häufig nur noch als GPS bezeichnet. GPS wurde am 17. Juli 1995 offiziell in Betrieb genommen.

Einsatzbereiche

GPS ist ursprünglich zur Positionsbestimmung und Navigation im militärischen Bereich (in Waffensystemen, Kriegsschiffen, Flugzeugen) usw. vorgesehen. Heute wird es jedoch hauptsächlich im zivilen Bereich genutzt: in der Seefahrt, Luftfahrt, durch Navigationssysteme im Auto, zur Orientierung im Outdoor-Bereich, im Vermessungswesen etc. Ebenso wird GPS nun auch im Leistungssport verwendet. Speziell für den Einsatz in Mobiltelefonen wurde das Assisted GPS (A-GPS) entwickelt.

Aufbau und Funktionsweise der Ortungsfunktion

Die Funktion (Orts- und Höhenbestimmung) des GPS wurde weiter oben beschrieben. Mit den GPS-Signalen lässt sich aber nicht nur die Position, sondern auch die Geschwindigkeit des Empfängers bestimmen. Dieses erfolgt im Allgemeinen über Messung des Dopplereffektes oder die numerische Differenzierung des Ortes nach der Zeit. Die Bewegungsrichtung des Empfängers kann ebenfalls ermittelt werden und als künstlicher Kompass oder zur Ausrichtung von elektronischen Karten dienen.

Damit ein GPS-Empfänger immer zu mindestens vier Satelliten Kontakt hat, werden insgesamt mindestens 24 Satelliten eingesetzt, die die Erde jeden Sternentag zweimal in einer Höhe von 20.183 km umkreisen. Jeweils mindestens vier Satelliten bewegen sich dabei auf jeweils einer der 6 Bahnebenen, die 55° gegen die Äquatorebene inkliniert (geneigt) sind und gegeneinander um jeweils 60° verdreht sind. Ein Satellit ist damit alle 23 Stunden 55 Min und 56,6 Sekunden über dem gleichen Punkt der Erde.

Ein Satellit hat eine erwartete Lebensdauer von 7,5 Jahren, doch funktionieren die Satelliten häufig deutlich länger. Um Ausfälle problemlos zu verkraften, wurden daher bis zu 31 Satelliten in den Orbit gebracht, sodass man auch bei schlechten Bedingungen 5 oder mehr Satelliten verwenden kann. Aktuell benötigt man 60 Tage für das Austauschen eines Satelliten; aus Kostengründen versucht man diesen Zeitraum auf 10 Tage zu senken und somit die Satellitenanzahl auf 25 zu reduzieren.

Die Signale werden auf zwei Frequenzen ausgesendet:

- Mit der so genannten **L1-Frequenz (1575,42 MHz)** wird der C/A-Code („Coarse/Acquisition“) für die zivile Nutzung, der verschlüsselte P/Y-Code („Precision/encrypted“) für die militärische Nutzung und eine Navigationsnachricht übertragen. Die 1500 bit lange Navigationsnachricht enthält alle wichtigen Informationen zum Sa-



GPS-Antenne

telliten (Datum, Identifikationsnummer, Korrekturen, Bahnen, aber auch den Zustand) und benötigt zur Übertragung ungefähr eine halbe Minute. GPS-Empfänger speichern diese Daten normalerweise zwischen. Zur Initialisierung der Geräte werden des Weiteren auch die so genannten Almanach-Daten übertragen, die die groben Bahndaten aller Satelliten enthält und zur Übertragung über zwölf Minuten benötigt.

- Die zweite Frequenz **L2-Frequenz (1227,60 MHz)** überträgt nur den P/Y-Code. Durch die Übertragung auf zwei Frequenzen können ionosphärische Effekte, die zur Erhöhung der Laufzeit führen, herausgerechnet werden.
- Momentan ist eine dritte **L5-Frequenz (1176,45 MHz)** im Aufbau. Sie soll die Robustheit des Empfangs weiter verbessern und ist vor allem für die Luftfahrt und Safety-of-Life-Anwendungen vorgesehen. Bei der derzeitigen Geschwindigkeit des Ausbaus ist mit einer Fertigstellung ab 2010 und einem Regelbetrieb ab 2013 zu rechnen.

Der gesendete C/A-Code ist eine pseudozufällige, 1023 Bit lange Kette, die bei jedem Satelliten eindeutig ist. Diese 1023 Bits lange Kette wird in 1 ms übertragen. Da die Bits nicht unmittelbar die Informationen tragen, werden sie in diesem Fall häufig als „chips“ bezeichnet. Durch dieses „pseudozufällige Rauschen“ (PRN: Pseudo Random Noise) sind die Signale weniger anfällig gegenüber Interferenzen und alle Satelliten können auf der gleichen Frequenz senden.

In den verwendeten Frequenzbereichen breitet sich die elektromagnetische Strahlung ähnlich wie sichtbares Licht fast geradlinig aus und wird dabei durch das Wetter (Bewölkung, Niederschlag) nur wenig beeinflusst. Deshalb - und durch die geringe Sendeleistung der GPS-Satelliten - ist für den besten Empfang der Signale eine direkte Sichtverbindung zum Satelliten erforderlich. In Gebäuden, Tunneln, Tiefgaragen etc. war ein GPS-Empfang bis vor kurzem nicht möglich. Neue Empfängertechnologien ermöglichen jedoch nun auch Anwendungen in Gebäuden. Auch zwischen hohen Gebäuden kann es durch mehrfach reflektierte Signale (Mehrwege-Effekt) zu Ungenauigkeiten kommen. Zudem ergeben sich z. T. große Ungenauigkeiten bei ungünstigen Satellitenkonstellationen, z. B. wenn nur drei dicht beieinanderstehende Satelliten aus einer Richtung zur Positionsberechnung zur Verfügung stehen. Für eine genaue Positionsermittlung sollten möglichst Satellitensignale aus verschiedenen Himmelsrichtungen empfangbar sein.

Für die zentrale Kontrolle des GPS ist die *50th Space Wing* des Air Force Space Command (AFSPC) der US Air Force auf der Schriever AFB, Colorado zuständig.

C/A-Code

Der für die Modulation des Datensignals im zivilen Bereich eingesetzte C/A-Code ist eine so genannte pseudozufällige Codefolge mit einer Länge von 1023 Bits. Die Sendebits einer Codefolge werden bei Spread Spectrum Modulationen als so genannte „Chips“ bezeichnet und tragen keine Nutzdateninformation, sondern dienen nur zum Empfang mittels Kreuzkorrelation. Diese 1023 Chips lange Folge hat eine Periodenlänge von 1 ms und die Chips-Rate beträgt 1,023 Mbps. Die beiden Codegeneratoren für die Gold-Folge bestehen aus jeweils 10 Bit langen Schieberegistern und sind vergleichbar mit linear rückgekoppelten Schieberegistern, wenngleich sie für sich einzeln nicht die maximale Folge ergeben. Die beim C/A-Code eingesetzten Generatorpolynome G_1 und G_2 lauten:

$$G_1 = 1 + x^3 + x^{10}$$
$$G_2 = 1 + x^2 + x^3 + x^6 + x^8 + x^9 + x^{10}$$

Die endgültige Gold-Folge (C/A-Codefolge) wird durch eine Codephasenverschiebung zwischen den beiden Generatoren erreicht. Die Phasenverschiebung wird bei jedem GPS-Satelliten unterschiedlich gewählt, so dass die dabei entstehenden Sendefolgen (Chips-Signalfolgen) orthogonal zueinander stehen - damit ist ein unabhängiger Empfang der einzelnen Satellitensignale möglich, obwohl alle GPS-Satelliten auf den gleichen Nominalfrequenzen L_1 und L_2 senden (so genanntes Codemultiplex, CDMA verfahren).

Im Gegensatz zu den pseudozufälligen Rauschfolgen aus linear rückgekoppelten Schieberegistern (LFSR) weisen die zwar ebenfalls pseudozufälligen Rauschfolgen aus Gold-Codegeneratoren bei entsprechender Auswahl der zugrundeliegenden Generatorpolynome wesentlich bessere Kreuzkorrelationseigenschaften auf. Dies bedeutet, dass durch die Codephasenverschiebung eingestellten unterschiedlichen Gold-Folgen mit gleichen Generatorpolynomen zueinander fast orthogonal im Coderaum stehen und sich damit kaum gegenseitig beeinflussen.

Die beim C/A-Code eingesetzten LFSR-Generatorpolynome G_1 und G_2 erlauben maximal 1023 Codephasenverschiebungen wovon ca. 25% zueinander eine in der GPS-Anwendung hinreichend kleine Kreuzkorrelation für den CDMA-Empfang aufweisen. Damit können neben den maximal 32 GPS-Satelliten und deren Navigationssignale weitere rund 200 Satelliten zusätzlich Daten auf der gleichen Sendefrequenz zu den GPS-Empfängern übertragen - dieser Umstand wird beispielsweise im Rahmen von EGNOS zur Übermittlung von atmosphärischen Korrekturdaten, Wetterdaten und Daten für die zivile Luftfahrt ausgenutzt.

Da die Datenrate der damit übertragenen Nutzdaten 50 bit/s beträgt und ein Nutzdatenbit genau 20 ms lang ist, wird ein einzelnes Nutzdatenbit immer durch exakt 20malige Wiederholung einer Gold-Folge übertragen.

Der zuschaltbare künstliche Fehler (*Selective Availability*) wird bei dem C/A-Code dadurch erreicht, dass die zeitliche Ausrichtung (Taktsignal) der Chips einer geringen zeitlichen Schwankung (Jitter) unterworfen wird.

P/Y-Code

Der längere und meist militärisch verwendete P-Code verwendet als Codegenerator so genannte JPL-Folgen. Er unterteilt sich in den öffentlich dokumentierten P-Code und den zur Verschlüsselung auf der Funkschnittstelle eingesetzten und geheimen Y-Code, welcher bedarfsmäßig zu- bzw. abgeschaltet werden kann. Die Kombination daraus wird als P/Y-Code bezeichnet. Die Verschlüsselung mit dem Y-Code soll einen möglichst manipulationssicheren Betrieb (engl. *Anti-Spoofing* oder AS-Mode) ermöglichen. Seit 31. Januar 1994 ist der

AS-Modus permanent aktiviert und es wird nicht mehr der öffentlich bekannte P-Code direkt übertragen.

Der P-Code wird aus vier linearen Schieberegistern (LFSR) der Länge 10 gebildet. Zwei davon bilden den so genannten X1-Code, die anderen beiden den X2-Code. Die X1-Code wird mit den X2-Code über XOR-Verknüpfungen so kombiniert, dass insgesamt 37 verschiedene Phasenverschiebungen 27 verschiedene Wochensegmente des P-Codes ergeben. Die Längen sind bei diesem Code wesentlich länger als beim C/A-Code. So liefert der X1-Codegenerator eine Länge 15.345.000 Chips und X2 eine Codefolge, die exakt um 37 Chips länger ist. Die Dauer bis sich der P-Code wiederholt ergibt sich daraus zu ca. 266 Tage (38 Wochen). Der P/Y-Code wird mit einer Chiprate von 10,23 Mcps gesendet, das entspricht der zehnfachen Chiprate des C/A-Codes. Er benötigt daher ein breiteres Frequenzspektrum als der C/A-Code.

Zur Unterscheidung der einzelnen GPS-Satelliten im P/Y-Code wird die sehr lange Codefolge von rund 38 Wochen Dauer in einzelne Wochensegmente aufgeteilt. Jeder GPS-Satellit hat einen genau eine Woche lang dauernden Codeabschnitt zugewiesen, und am Anfang jeder Woche (Sonntag 00:00 Uhr) werden alle P-Codegeneratoren wieder auf den Startwert zurückgesetzt. Damit wiederholt sich pro GPS-Satellit der P/Y-Code einmal pro Woche. Die Bodenstationen benötigen fünf Wochensegmente des in Summe 38 Wochen langen P-Codes für Steueraufgaben, 32 Wochensegmente sind für die Unterscheidung der einzelnen GPS-Satelliten vorgesehen.

Der C/A-Code dient dabei auch zur Umschaltung (so genanntes *Hand Over*) auf den P/Y-Code. Da die P-Codefolge pro GPS-Satellit eine Woche umfasst, wäre das direkte Synchronisieren einfacher Empfänger auf die P-Codefolge ohne Kenntnis der genauen GPS-Uhrzeit praktisch unmöglich. Einfache GPS-Empfänger, die den P/Y-Code verwenden, synchronisierten sich zuerst auf den C/A-Code, gewinnen aus den übertragenen Daten die notwendigen Umschaltinformationen wie Uhrzeit, Wochentag und andere Informationen, stellten damit ihre P-Codegeneratoren entsprechend ein und schalteten dann auf den Empfang des P/Y-Code um.

Moderne militärische GPS-Empfänger werden heute mit einer sehr viel größeren Anzahl Korrelatoren ausgestattet, ähnlich wie die im zivilen Bereich eingesetzt SiRF-III Chipsatz, wodurch es möglich ist, den P/Y-Code direkt auszuwerten. Diese Empfänger werden bei den Herstellern als "direct Y-code"-Empfänger bezeichnet. Diese Empfängergeneration macht es möglich, den C/A-Code zu stören, um die Nutzung von zivilen GPS-Empfängern durch gegnerische Kräfte beispielsweise zum Vermessen von Feuerstellungen zu verhindern. Da die Bandbreite des militärischen Signals ca. 20 MHz ist, können die 1-2 MHz Bandbreite des C/A-Codes, die zivil genutzt werden, gestört werden, ohne dass militärische Empfänger wesentlich beeinträchtigt werden. Das und die Annahme, dass heutige Konflikte regional begrenzt sind, führt zur Entscheidung, die künstliche Verschlechterung abzuschalten.

Die genauen Parameter für die Y-Verschlüsselung des P-Codes sind nicht öffentlich bekannt. Die Parameter der Navigationsdaten (Nutzdaten, Rahmenaufbau, Bitrate), die mittels P/Y-Code übertragen werden, sind allerdings exakt gleich zu den Daten, die mittels der öffentlich bekannten C/A-Codefolge übertragen werden. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass der Takt der P/Y-Codefolge im Satelliten grundsätzlich keinen künstlichen Taktfehler unterworfen wird und der P-Code auch die 10-fache Taktrate zum C/A-Code aufweist. Damit können P/Y-Empfänger die für die Positionsbestimmung wesentliche Information der Übertragungszeiten genauer gewinnen.

Weitere Aufgaben

Die GPS-Satelliten sind Teil des US-Programms *Nuclear Detection System* (NDS), früher *Integrated Operational Nuclear Detection System* (IONDS) genannt, eingebunden in das Verteidigungsprogramm *DSP* (Defense Support Program). Sie verfügen über Sensoren, für Infrarot- und Gammastrahlung, ebenso Detektoren für EMP. Damit sollen sie Atombombenexplosionen und Starts von Interkontinentalraketen mit einer Ortsauflösung von 100m registrieren.

Eine weitere Aufgabe des GPS Systems besteht in der Bereitstellung eines einheitlichen Zeitsystems. Die Uhren der Satelliten werden mehrmals täglich auf GPS-Zeit synchronisiert. Die von einem GPS-Empfänger empfangene Zeit ist zunächst die GPS-Zeit. In der Satellitennachricht ist aber auch die Abweichung zwischen GPS-Zeit und Koordinierter Weltzeit (UTC) angegeben. Mit der Genauigkeit der GPS-Zeit und der Angabe der Abweichung garantiert das System eine Abweichung von UTC um maximal eine Mikrosekunde, wenn die Laufzeit auch so genau bestimmt wird.

Geschichte

Das GPS-Programm wurde mit der Gründung des JPO (Joint Program Office) im Jahre 1973 gestartet. Der erste GPS-Satellit wurde 1978 gestartet. Im Dezember 1993 wurde die anfängliche Funktionsbereitschaft (Initial Operational Capability) festgestellt. Zu diesem Zeitpunkt waren 24 Satelliten im Einsatz. Die volle Funktionsbereitschaft (Full Operational Capability) wurde im April 1995 erreicht und am 17. Juli 1995 bekannt gegeben.

Um nicht-autorisierte Nutzer (militärische Gegner) von einer genauen Positionsbestimmung auszuschließen, wurde die Genauigkeit für Nutzer, die nicht über einen Schlüssel verfügen, künstlich verschlechtert (Selective Availability = SA, mit einem Fehler von größer 100 m). SA musste in den Block-II-Satelliten implementiert werden, weil der C/A-Dienst deutlich besser als ursprünglich erwartet war. Es gab aber fast immer vereinzelt Satelliten, bei welchen SA nicht aktiviert war, sodass genaue Zeitübertragungen möglich waren.



*Start eines GPS-Satelliten am
26. September 2005 an Bord
einer Delta-II-Rakete*

Am 1. Mai 2000 wurde diese künstliche Ungenauigkeit bei allen Satelliten abgeschaltet, so dass das System seitdem auch außerhalb des bisherigen exklusiven Anwendungsbereichs zur präzisen Positionsbestimmung genutzt werden kann. Dies führte unter anderem zum Aufschwung der Navigationssysteme in Fahrzeugen und im Außenbereich, da der Messfehler nun in mindestens 90 % der Messungen geringer als 10 m ist.

Am 25. September 2005 brachte eine Delta-II-Rakete den ersten GPS-Satelliten der Baureihe *GPS 2R-M (Modernized)* in den Weltraum. Die Antenne wurde verbessert und das Sendespektrum um eine zweite zivile Frequenz und zwei neue militärische Signale erweitert. Seit Dezember im Einsatz erweitert der neue Satellit die Flotte der funktionstüchtigen Satelliten auf 28 (Stand Januar 2006).

Satelliten

Übersicht über die GPS-Satellitenmodelle

GPS 1R (Von dieser Baureihe ist kein Satellit mehr aktiv.)

GPS 2R

Masse: 2030 kg

Elektrische Leistung: 1,13 kW

Geschätzte Lebensdauer: 10 Jahre

Transponder: 2x L-Band, 1xS-Band

GPS 2R-M

Start von GPS 2R-M1 (andere Bezeichnungen: Navstar 57, USA 183, GPS 2R-M1, GPS 2R-14): 25. Sept. 2005

Masse: 2060 kg

Kosten: 60 Mio EUR

GPS 3R

Genauigkeit der Positionsbestimmung

Kategorisierung

Es gibt die folgenden zwei **Dienstklassen**:

- **SPS (Standard Positioning Service)** ist für jedermann verfügbar und erreichte ursprünglich eine Genauigkeit von 100 m (in 95 % der Messungen). Seit Mai 2000 wurde die künstliche Ungenauigkeit vom US-Militär abgeschaltet; seitdem beträgt die Genauigkeit ca. 15 m.
- **PPS (Precise Positioning Service)** ist der militärischen Nutzung vorbehalten und ursprünglich auf eine Genauigkeit von 22 m (in 95 % der Messungen, die aktuelle Genauigkeit ist unbekannt) ausgelegt worden. Diese Signale werden verschlüsselt ausgestrahlt.
Eine Erhöhung der Genauigkeit (0,5 - 5 m) kann durch Einsatz von Differential-GPS (DGPS) erreicht werden.

Mit der vierten Ausbaustufe soll die bisherige globale Selective Availability, die bis zum 1. Mai 2000 durch eine globale künstliche Verschlechterung implementiert war, in Krisen- bzw. Kriegsgebieten durch lokale Störung des Empfangs der auch zivil zugänglichen Signale verwirklicht werden.

Des Weiteren sind einige satellitengestützte Erweiterungssysteme (**Satellite-Based Augmentation Systems, SBAS**) zur weiteren Verbesserung der Genauigkeit geplant, EGNOS in Europa und WAAS in den USA.

GPS nutzt eine eigene kontinuierliche Atomzeitskala, welche keine Schaltsekunden berücksichtigt. Seit Einführung von GPS im Jahr 1980 hat sich deshalb die Differenz zwischen der GPS-Zeit und der UTC aktuell (2006) auf 14 Sekunden aufsummiert. Der aktuelle Wert dieser Differenz wird im Nutzdatensignal des Systems übertragen.

Es gibt die folgenden zwei Verfahren, um mittels GPS eine Position zu bestimmen:

- **Code:** Dieses Verfahren ermöglicht eine recht robuste Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von weniger als 10 m. Alle preiswerten Empfänger nutzen dieses Verfahren. Mittels DGPS sind Genauigkeiten unter einem Meter möglich.
- **Code + Trägerphase:** Unter guten Empfangsbedingungen und mit präzisen Empfängern ist mit diesem Verfahren eine Genauigkeit von unter 5 m möglich. Die Genauigkeitssteigerung rührt aber nicht nur vom geringeren Rauschen der Trägerphasenmessung her, sondern auch von der Verwendung der zweiten Frequenz zur Ionosphärenmessung. Soll der Millimeter-Bereich erreicht werden, so ist dies bisher nur im DGPS-Betrieb möglich, weil auch die lokalen Effekte der Troposphäre berücksichtigt werden müssen.
In Fahrzeugen können zusätzlich Odometrie-Daten wie Geschwindigkeit und Beschleunigung genutzt werden, um die Position präziser zu bestimmen oder auch noch in Funklöchern wie z. B. Tunneln eine Position ermitteln zu können.

Effekte der Relativitätstheorie

Die Zeit, die die Atomuhren auf den GPS-Satelliten anzeigen, unterliegt den Effekten der relativistischen Zeitdilatation. Dabei hängt nach der allgemeinen Relativitätstheorie die Ganggeschwindigkeit einer Uhr vom Ort im Gravitationsfeld ab und nach der speziellen auch von ihrer Geschwindigkeit. Das höhere Gravitationspotenzial in der Satellitenbahn lässt die Zeit schneller vergehen, die Bahnbewegung der Satelliten relativ zu einem ruhenden Beobachter auf der Erde verzögert sie. In einer Flughöhe von ca. 3000 km heben sich beide Effekte gerade auf, in der GPS-Satellitenbahn überwiegt der gravitative Effekt um mehr als das 6-fache. Auf den Satelliten geht damit die Zeit vor. Der relative Gangunterschied zu einer irdischen Uhr liegt zwar bei nur $4,4 \cdot 10^{-10}$, er ist jedoch deutlich größer als die relative Ganggenauigkeit von Rubidium-Atomuhren, die besser ist als 10^{-14} .

Oft wird irrtümlich darauf hingewiesen, dass diese Gangunterschiede zu einem Positionsbestimmungsfehler von mehreren Kilometern pro Tag führten, wenn sie nicht korrigiert würden. Ein solcher Fehler würde aber nur dann auftreten, wenn die Positionsbestimmung über die Ermittlung der Abstände des GPS-Empfängers zu 3 Satelliten anhand eines Uhrenvergleichs mit einer Uhr im Empfänger erfolgte. In diesem Fall würde sich bei jeder dieser Abstandsbestimmungen ein Fehler von ca. 12 km pro Tag anhäufen. Gewöhnliche GPS-Empfänger sind aber nicht mit einer Atomuhr ausgestattet. Stattdessen werden die Zeitsignale (C/A-Code) der empfangbaren Satelliten ausgewertet, wobei für eine Positionsbestimmung mindestens 4 Satelliten erforderlich sind. Da alle Satelliten den gleichen relativistischen Effekten ausgesetzt sind, tritt ein Positionsbestimmungsfehler dieser Art hier gar nicht auf.

Damit die Satellitensignale des GPS außer zur Positionsbestimmung auch als Zeitstandard verwendet werden können, wird der relativistische Gangunterschied der Uhren allerdings kompensiert. Dazu wird die Schwingungsfrequenz der Satelliten-Uhren auf 10,229999995453 MHz verstimmt, so dass trotz der relativistischen Effekte ein synchroner Gang mit einer irdischen Uhr mit 10,23 MHz gewährleistet ist. Weitere relativistische Effekte wie z.B. der Sagnac-Effekt sind so klein, dass sie bei stationären Empfängern nicht gesondert berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus werden die Uhren mehrmals täglich synchronisiert, und damit auch alle sonstigen Effekte eliminiert, die einen synchronen Gang mit einer irdischen Uhr stören könnten.

Differential-GPS

Differential Global Positioning System (DGPS) ist eine Bezeichnung für Verfahren, die mehrere GPS-Empfänger zur Erhöhung der Genauigkeit verwenden. Bei dem Verfahren gibt es einen Empfänger, dessen Position bestimmt werden soll (Rover) und mindestens einen weiteren Empfänger, dessen Position bekannt ist (GPS-Basisstation). Eine Basisstation kann diverse Informationen über die Ursachen ermitteln, warum die mittels GPS bestimmte Position fehlerhaft ist, da deren Position bekannt ist. Mit diesen Informationen (Korrekturdaten) von einer Basisstation kann ein Rover seine Genauigkeit erhöhen. Die erreichbare Genauigkeit ist u. a. vom Abstand zwischen Rover und Basisstation abhängig.

Methoden des DGPS:

- Bei dem einfachsten Verfahren übermittelt die Basisstation ihren Positionsfehler an den Rover. Dieser korrigiert entsprechend seine Position. Dies funktioniert nur, wenn beide Empfänger die gleichen Satelliten auswerten (dies ist nur über kurze Distanz und in gleicher Umgebung der Fall).
- Bei der Methode der Pseudorange-Korrektur berechnet die Basisstation die Fehler der Strecken zu den Satelliten und übermittelt diese an den Rover. So ist auch eine Korrektur möglich, wenn von der Basisstation und dem Rover unterschiedliche Satelliten empfangen werden. Es sind Genauigkeiten <1 m möglich.

Die Übermittlung der Korrekturdaten von einer Basisstation zum Rover kann mittels Funk erfolgen. Ein Rover ist dann sofort in der Lage, seine Genauigkeit zu erhöhen. Auch im Nachhinein kann eine Korrektur erfolgen, wenn Rover und Basisstation alle Daten zur Positionsbestimmung aufzeichnen (Postprocessing).

Die Korrekturdaten können von einem Anwender selbst erzeugt werden (mittels eines zweiten GPS-Empfängers) oder von div. Anbietern bezogen werden (ALF, AMDS, SAPOS, ascos usw.).

Für die Bundesrepublik Deutschland werden Differential-Stationen von der Wasser- u. Schifffahrtsverwaltung betrieben. Diese Stationen arbeiten nach dem internationalen IALA-Standard und senden Korrekturdaten auf Mittelwelle für den Küsten- und Binnenbereich aus. Zentrale technische Behörde ist die Fachstelle der WSV für Verkehrstechniken in Koblenz.

Alternativen

Transit

Der Vorgänger des GPS von den USA (Sendefrequenz: 150 und 400 MHz). Entwickelt ab 1958, in Betrieb seit 1964 und zivil ab 1967 genutzt. Seit dem 31. Dezember 1996 als Navigationssystem außer Betrieb. (Da das System weitersendete, wurde es danach als Navy Ionospheric Monitoring System (NIMS) weiterbetrieben.)

GLONASS

Das russische Pendant zum amerikanischen NAVSTAR-GPS.

Euteltracs

Europäisches Positionssystem für Fernverkehr (sehr ungenau). Es sendet auf einer Frequenz von 10-14 GHz. Seit 1991 in Betrieb.

Galileo

Die ESA wurde von der EU beauftragt, von der Industrie ein europäisches System zur Satellitennavigation mit dem Namen Galileo entwickeln zu lassen. Die Entwicklungs- und Testphase wurde im Dezember 2004 in einem 4-Jahresvertrag an die Industrie vergeben. Nach Ablauf dieses Vertrages sollen 4 Galileo-Satelliten im All und der Großteil des Bodensegments installiert sein. Der ursprüngliche Zeitplan sieht wie folgt aus: Bis 2005 Entwicklungs- und Testphase, Aufbau des Satellitennetzes ab 2006, Inbetriebnahme ab 2008. (Stand Juli 2004)

Es wird mindestens vier Dienste (OS, CS, SoL, PRS) geben. Die zivile und kostenlose Positionsbestimmung (OS) wird eine Genauigkeit von 5-8 m bereitstellen. Beim SoL-Dienst wird zusätzlich noch Integrität, also die rechtzeitige Warnung des Nutzers, wenn der Positionierungsfehler größer als eine vorgegebene Schranke (12 m horizontal, 20 m vertikal) ist, bereitgestellt. Der PRS-Dienst wird die Bedürfnisse staatlicher Organisationen befriedigen. Im CS-Dienst können noch zusätzlich Informationen mit geringer Datenrate an Abonnenten übertragen werden.

MTSAT

Das *Multifunction Transport Satellite System* ist eine Entwicklung Japans (Frequenz 1,2 GHz). Noch in der Experimentierphase. (Stand 2003)

Beidou

Das Navigationssystem der Volksrepublik China (Sendefrequenz 1,4 GHz). Seit 2004 in Betrieb, allerdings beschränkt sich die Nutzung auf den asiatischen Bereich.

GPS und Datenschutz

Der Aufenthaltsort des Trägers eines GPS-Empfängers lässt sich, da die Geräte nur passiv arbeiten und keine Signale senden, nicht verfolgen. Für eine GPS-Überwachung benötigt man eine Kombination aus einem passiven GPS-Empfänger mit einem aktiven Sender, der die ermittelten Positionsdaten an Dritte weitergibt.

Der Einsatz eines so kombinierten Gerätes bietet bis dato unbekannte Überwachungsmöglichkeiten und wirft damit neue datenschutzrechtliche Probleme auf, etwa durch den Einsatz in der polizeilichen Überwachung oder in Diebstahlschutzsystemen.

Eine viel einfachere Bewegungsüberwachung lässt sich mittels GSM-Modulen erreichen (Telefone, OEM-Platinen, ...), da sich die GSM-Netzstruktur in kleine Unterzonen (rund 1-2 km² in der Stadt und 5-10km² auf dem Land] aufgeteilt ist. Versorgt werden die Unterzonen von den an den Rändern aufgestellten Sendestationen, deren Position sehr exakt bekannt ist. Die Unterzonengröße ergibt sich meist aus praktischen Gründen, dass ein gelegentlicher Wechsel zu nahen Nachbarstationen erfolgen kann, wenn etwa eine Station ausfällt, oder überlastet ist. Neben der sehr ungenauen Unterzonenkennung gibt es noch die Möglichkeit des Richtungssuchens und der Signallaufzeitinterpretation. Beim bestimmen der Senderichtung wird der Messempfänger (spez. Hardware nötig) gedreht, bis das anliegende Signal am stärksten anliegt. Die Signallaufzeitinterpretation ermöglicht eine Entfernungsbestimmung des Senders mit Genauigkeiten von bis zu wenigen Metern. Im Zweifelsfall ist es außerdem möglich die Senderposition mittels Dreieckspeilung zu bestimmen. Die stark vereinfachte Beschreibung findet täglich in allen GSM-Netzen Anwendung, da die Informationen für den normalen Netzbetrieb benötigt werden und somit vorhanden sind. Sie müssen nur gesammelt werden. Die Entfernungsbestimmung ist nur im aktiven Sendebetrieb möglich.

GPS wird von der deutschen Polizei für Ermittlungen eingesetzt. Es dient zur Überwachung bestimmter Fahrzeuge und Fahrer. Im April 2005 entschied das Bundesverfassungsgericht, dass der Einsatz des satellitengestützten Systems zur Überwachung in einem strafrechtlichen Ermittlungsverfahren nicht gegen das Grundgesetz verstoße. Der Zweite Senat wies mit diesem Urteil eine Verfassungsklage eines Ex-Mitglieds der Antimperialistischen Zellen (AIZ) zurück, der beanstandet hatte, eine zweieinhalb Monate andauernde Überwachung seines Fahrzeugs und dessen verschiedener Nutzer habe in übertriebener Weise in Grundrechte der Überwachten eingegriffen.

GPS in der Praxis



Handelsübliche zivile GPS-Geräte für Verbraucher eignen sich vor allem für den Einsatz im Auto und im "Outdoor"-Bereich. Handelsübliche GPS-Empfänger (GPS-Mäuse) verwenden meist das NMEA-Datenformat zur Ausgabe der Positionsdaten.

Im Auto

Hier handelt es sich um GPS-Geräte, die mit umfangreicher Landkarten- und Stadtplan-Software ausgestattet sind. Sie ermöglichen meist akustische Richtungsanweisungen an den Fahrer, der zu Beginn der Fahrt bloß den Zielort (z. B. Straßennamen) einzugeben braucht. Im Auto wird bei Festeinbauten ab Werk unterschieden zwischen Systemen, die Sprachausgabe mit Richtungsangaben auf einem LCD (meist im Autoradioschacht) kombinieren, sowie Sprachausgabe mit farbiger Landkartendarstellung, bei welcher der Fahrer besser räumlich sieht, wo er unterwegs ist.

In letzter Zeit haben PDA-Systeme starken Zuwachs erhalten, weil sie in jedem Fahrzeug sofort eingesetzt werden können, immer einen Farbbildschirm mitbringen, und über Lebensmittel-discounter zu volkstümlichen Preisen in regelmäßigen Aktionen verkauft werden.

Bei den meisten Festeinbauten ab Werk sowie neuesten PDA-Lösungen werden Verkehrsmeldungen des TMC-Systems automatisch mitberücksichtigt, sodass der Fahrer automatisch an Staus oder Behinderungen vorbei dirigiert wird.

Festeingebaute Systeme sind in der Regel zwar erheblich teurer als mobile Geräte in Form von z. B. PDAs, haben jedoch den Vorteil, dass sie mit der Fahrzeugelektronik gekoppelt werden und die Überbrückung in Bereichen ohne Empfang des Signals (z. B. in Tunneln) erheblich zuverlässiger arbeitet.

Der Vorteil der stark zunehmenden Navigation in Autos liegt darin, dass der Fahrer sich ganz auf den Verkehr konzentrieren kann, es ist ein Komfortmerkmal für den Fahrer navigiert zu werden. Auch kann ca. 1-3% Treibstoffverbrauch eingespart werden, wenn alle Fahrzeuge den optimalen Weg wählen würden.

Es darf jedoch auch nicht unerwähnt bleiben, dass vor allem Geräte mit graphischer Anzeige dazu neigen den Fahrer abzulenken und es daher vermehrt zu Unfällen aufgrund von Unachtsamkeit kommt.

GPS kann auch zur Diebstahlsicherung genutzt werden. Hierzu wird die GPS-Anlage mit einem GSM-Modem kombiniert. Das Gerät ist dann jederzeit per Handy ortbar. In Verbindung mit einem PC und entsprechender Software kann auch gleich die entsprechende Straße und der Ort abgelesen werden.

Im "Outdoor"-Bereich

GPS-Geräte eignen sich auch zum Einsatz am Fahrrad, beim Wandern (z. B. als kompaktes Gerät am Handgelenk) oder auf einem Boot. Der Funktionsumfang der im Handel erhältlichen Geräte richtet sich nach Anwendungsbereich und Preis. Schon einfache Geräte können heute nicht bloß die Längen- und Breitengrade anzeigen, sondern auch Richtungsangaben machen, Entfernungen berechnen und die aktuelle Geschwindigkeit angeben. Die Anzeige kann so eingestellt werden, dass ein Kompasssymbol ausgegeben wird, das nicht nach Norden, sondern in die Richtung zeigt, die vom Benutzer durch die Eingabe der Zielkoordinaten (*Wegpunkt*) angegeben worden ist. GPS-Geräte stellen hier eine Weiterentwicklung der klassischen Navigation mit Bussole (Kompass) und Karte dar. Hochwertige, moderne Geräte können neben Wegpunkten, Routen und Track Logs auch digitale Karten speichern und damit den aktuellen Standort auf einer Karte darstellen. Für den Outdoor-Bereich liegen für verschiedene Länder Topografische Karten im Maßstab 1:25.000 zur Nutzung mit dem GPS vor.

Wenngleich die "Outdoor"-GPS-Geräte dafür nicht primär gedacht sind, können selbst kleine Armbandgeräte in Autos oder in der Bahn (Fensterplatz) verwendet werden; der Empfang in Gebäuden ist jedoch mit diesen Geräten gewöhnlich nicht möglich.

Galileo (Satellitennavigation)

Galileo ist der Name des europäischen Satellitennavigationssystems, welches seit 2016 in Betrieb ist. Es soll weltweit Daten zur genauen Positionsbestimmung liefern und ähnelt im Aufbau dem US-amerikanischen NAVSTAR-GPS und dem russischen GLONASS-System. Allerdings wurde Galileo für zivile Zwecke konzipiert und unterliegt nicht, wie NAVSTAR-GPS und GLONASS, einer nationalen militärischen Kontrolle.



Galileo ist, entgegen früheren Planungen, zumindest zu dem dann modernisierten NAVSTAR-GPS-System (GPS III; ab 2010) kompatibel. Dies hat den Vorteil, dass durch die Kombination der GPS- und Galileo-Signale eine deutlich verbesserte Abdeckung, mit einer Verfügbarkeit von jederzeit bis zu 15 Satelliten, erreicht werden sollte.

Wie auch schon das NAVSTAR-GPS-System, ist Galileo nicht völlig frei nutzbar. Bei NAVSTAR-GPS sind genaue Positionsdaten dem amerikanischen Militär vorbehalten, bei Galileo kann gegen Bezahlung qualitativ unterschiedliche (*Daten-*)Dienste zur Positionsbestimmung in Anspruch genommen werden. Der Empfang des *Offenen Dienstes*, der dem Leistungsspektrum des jetzigen GPS ähnelt, ist kostenlos.

Grundlagen

Galileo basiert auf 28 Satelliten die in einer Höhe von etwa 23.260 km die Erde umkreisen, und einem Netz von Bodenstationen, die die Satelliten kontrollieren. Mobiltelefone o.ä. Empfangsgeräte können aus den Funksignalen der Satelliten die eigene Position mit einer Genauigkeit von wenigen Metern bestimmen. Bei Verwendung von Zusatzinformationen und/oder -diensten lässt sich ähnlich wie bei anderen satellitengestützten Navigationssystemen (GNSS) die Positionsgenauigkeit in den Zentimeterbereich steigern.

Der erste Testsatellit GIOVE-A wurde am 28. Dezember 2005 um 5:19 Uhr UTC vom Raumfahrtzentrum in Baikonur (Kasachstan) gestartet und hat um 12:51 UTC in 23.222 km Höhe seinen planmäßigen Betrieb aufgenommen. Das erste Navigationssignal übertrug GIOVE-A zu Testzwecken am 2. Mai 2007.

Der Probetrieb der ersten vier Galileo-Satelliten wird nicht vor 2008 aufgenommen werden. Die Gesamtkosten für die Bereitstellung beliefen sich bis zum Jahr 2020 auf 7,2 Mrd. Euro.

Geschichte

Brief von Paul Wolfowitz an die Minister der EU-Mitgliedsstaaten vom Dezember 2001, Teil der US-Lobbyingkampagne gegen Galileo

Galileo ist das erste von der Europäischen Union (EU) und der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) gemeinsam durchgeführte Projekt und Teil des TEN-Verkehrsprojektes. Die Finanzierung der Entwicklungsphase wird von beiden Organisationen zu gleichen Teilen übernommen. Am 27. Mai 2003 einigten sich die Mitgliedsstaaten der ESA nach langen Differenzen über die Finanzierung. Im Mai 2007 wurde bekannt, dass die EU-Kommission den privaten Betreibergesellschaften den Auftrag entziehen und das Projekt neu ausschreiben will.

Folgende Staaten außerhalb der Europäischen Union beteiligen sich ebenfalls:

- China ist mit 280 Mio. Euro am Projekt beteiligt, ein gemeinsames Trainingszentrum für Satellitennavigation wurde an der Pekingener Universität eröffnet.
- Indien konnte im Januar 2004 Verhandlungen aufnehmen und im September 2005 wurde eine Übereinkunft über Zusammenarbeit unterzeichnet. Im Oktober 2006 hatte Indien allerdings die Zusammenarbeit und die angebotene Mitfinanzierung von 300 Mio. Euro aufgrund sicherheitsrelevanter Aspekte wieder in Frage gestellt.
- Israel
- Marokko
- Saudi Arabien
- Schweiz (Mitglied der ESA) mit 30 Mio. Euro und liefert die extrem genauen Rb- u. H-Maser-Atomuhren
- Südkorea
- Ukraine



Folgende Staaten verhandeln über eine Teilnahme (nach Alphabet):

- Argentinien
- Australien (Stand 2007-01)
- Brasilien
- Chile
- Kanada
- Malaysia
- Mexiko
- Norwegen

Die Vereinigten Staaten standen und stehen dem Galileo-Programm skeptisch gegenüber, vor allem im Hinblick auf die Gefahren einer unkontrollierten militärischen Nutzung. Bedenken bezüglich einer technischen Beeinflussung des NAVSTAR-GPS-Systems konnten inzwischen ausgeräumt werden.

Projektphasen und Kosten

Planung (Erste und zweite Phase)

Die erste Projektphase zur Definition der Aufgaben finanziert die ESA mit ca. 100 Mio EUR. Die Planungs- und Definitionsphase schloss mit dem Start und der Inbetriebnahme zweier Testsatelliten und der zugehörigen Bodenstationen im Januar 2006 ab. Der Test der Sendefrequenzen musste vor dem 10. Juni 2006 erfolgen, weil sonst die Reservierung für die Galileo-Frequenzbänder bei der ITU verfallen wäre. Mit der Entwicklung, Start und Test von vier Galileo-Satelliten (*In Orbit Validation* IOV) endet die zweite Phase. Anfang 2003 vereinbarten die Raumfahrtagenturen Europas und Russlands, die GLONASS-Satelliten zum Test ausgewählter Teile des Galileo-Systems zu nutzen. Hierbei soll auch die Kompatibilität beider Systeme geprüft werden.

Technische Daten der Satelliten:

- Erster Testsatellit **Giove-A1**

Bezeichnung: *Giove-A (ital. Jupiter, bzw. Galileo In-Orbit Validation Element)*, Bezeichnung vor dem Start: GSTB-v2 A (*Galileo System Test Bed*)

Nutzlast: Signalgenerator, Rubidium-Atomuhren

Hersteller: Surrey Satellite Technology

Startmasse: 600 kg

Leistung: 700 W

Größe: 1,3 m × 1,8 m × 1,65 m

Gestartet: 28. Dezember 2005 6:19 Uhr MEZ

ID: COSPAR/WWAS Int Id: 2005-051A

ID: USStratCom Cat #: 28922

Träger: Sojus-FG/Fregat

- Zweiter Testsatellit **Giove-B**

Bezeichnung: Giove-B, bisherige Bezeichnung GSTB-v2 B

Nutzlast: Signalgenerator, Rubidium- und Wasserstoffmaser-Atomuhren

Hersteller: EADS-Astrium

Startmasse: 523 kg

Leistung: 943 W

Größe: 0,955 m × 0,955 m × 2,4 m

Starttermin: vorauss. Ende 2007

Träger: vorauss. Sojus-Fregat

- Dritter Testsatellit **Giove-A2**

Konstruktionsgleich zu Giove-A1. Entscheidung über den Bau Ende 2007, wenn Klarheit über den Start von Giove-B besteht.

- **Galileo-Satellit** (zum Vergleich)

Hersteller: vorauss. European Satellite Navigation Industries

Startmasse: 680 kg

Leistung: 1500 W (nach 12 Jahren)

Größe: 2,7 m × 1,2 m × 1,1 m

Starttermin: nicht vor 2008

Träger: Ariane 5, Sojus-Fregat

Lebensdauer: über 12 Jahre

Spannweite Solarpanels: 14,8 m

Die Kosten der zweiten Phase (Entwicklungsphase) von voraussichtlich 1,5 Mrd. Euro tragen die Europäische Union und ESA gemeinsam.

Innerhalb der ESA übernehmen Deutschland, Italien, Frankreich und Großbritannien jeweils 17,5 Prozent. Spanien trägt zehn Prozent der Kosten. Belgien zahlt 26,5 Mio. Euro, der Rest wird unter den übrigen 15 ESA-Mitgliedsstaaten aufgeteilt. Die übrigen 750 Mio. Euro kommen aus dem Haushalt für transeuropäische Netze der Europäischen Union (TEN). An TEN ist Deutschland über seine EU-Beitragszahlungen mit zirka 25 Prozent beteiligt und ist damit der größte Geldgeber für das Projekt. Die Phase C/D umfasst den Betrieb von drei bis vier funktionstüchtigen Satelliten, dem *Raumsegment*, und der Boden-Betriebseinrichtungen, dem *Bodensegment*. Das Bodensegment besteht aus untereinander vernetzten Empfangs- und Sendestationen (siehe dritte Phase).

Fertigstellung (Dritte Phase)

In der dritten Phase, der Errichtungsphase, wird das System fertig gestellt. Alle 30 Satelliten sind dann betriebsbereit und kommunizieren mit dem Bodensegment. Die Kosten werden auf mind. 2,5 Mrd. Euro veranschlagt, die zunächst der private Konzessionär (siehe unten) zu 70 Prozent, die öffentlichen Haushalte zu 30 Prozent übernehmen sollten (Public Private Partnership). Bis zuletzt hegte die Industrie Zweifel, wie sich die Navigationssignale vermarkten lassen sollten. Schließlich hatte im Mai 2007 die Politik ein Einsehen. Voraussichtlich werden die EU-Mitgliedsstaaten vorschlagen, Galileo im Auftrag der Europäischen Kommission von ESA bauen zu lassen.

Das komplette Bodensegment umfasst:

- zwei gleichberechtigte Kontrollzentren (GCC) in Oberpfaffenhofen (Deutschland) und eines in Fucino (Italien)
- zwei *Performance*-Center, die die Signalqualität evaluieren. Voraussichtlich werden sie an den Standorten der GCC eingerichtet.
- ein Kontrollzentrum in Spanien, das das *Safety-of-Life*-Signal kontrolliert und zusätzlich als Reserve-GCC dient.
- fünf Satelliten-Kontrollstationen (TTC) für die Satellitenkommunikation mit 13-Meter-Antennen im S-Band (2 GHz).
- 30 Signalkontroll-Empfangsstationen (GSS) zur Erfassung der Galileo-Signale im L-Band. Verrechnung der Daten alle zehn Minuten.
- neun Up-link-Stationen (ULS) zur Aktualisierung der ausgestrahlten Galileo-Navigationssignale, Kommunikation mit 3-Meter-Antennen im C-Band (5 GHz). Ausstrahlung von Satellitenpositions- und Zeitkorrekturen alle 100 Minuten.

Betrieb (Vierte Phase)

Die vierte Phase umfasst den Betrieb und die Wartung des Systems. Man rechnet mit Betriebskosten von ca. 220 Mio. Euro pro Jahr. Möglicherweise wird das System an einen privaten Betreiber übergeben, der das System in Lizenz betreibt.

Aufsichts-Organisationen und Betreiber

Am 25. Mai 2003 gründeten die EU und ESA das gemeinsame Unternehmen Galileo Joint Undertaking (GJU). Es koordiniert die Entwicklung des Galileo-Systems. Dazu gehören die ersten beiden Testsatelliten GSTB-V2 (Giove A und B), die Inbetriebnahme der ersten vier Satelliten der Konstellation in der IOV-Phase (In Orbit Validation) und die Integration von EGNOS in Galileo.

Das GJU sollte den Konzessionär für die Aufbau- und Betriebsphase von Galileo in einem offenen, mehrstufigen Ausschreibungsverfahren für die Dauer von 20 Jahren auswählen. Als Ergebnis des Ausschreibungsverfahrens liegt seit Oktober 2005 dem GJU das gemeinsame Angebot der beiden zunächst konkurrierenden Konsortien Eurely und iNavSat vor. Das Konzessionskonsortium vereinigt folgende Unternehmen (Stand 2007):

1. AENA (öffentliche spanische Einrichtung, die u. a. für Flugsicherung und Flughafenmanagement zuständig ist)
2. Alcatel
3. EADS Space
4. Finmeccanica
5. Hispasat
6. Inmarsat
7. Thales
8. Teleop
9. sowie dutzende weiterer assoziierter Unternehmen.

Zum Ende des Jahres 2006 wurde GJU liquidiert, ohne ihr Ziel, Galileo vorzubereiten, erreicht zu haben. Die Europäische GNSS-Aufsichtsbehörde (GSA) der Europäischen Kommission übernahm zum 1. Januar 2007 die Aufgaben des GJU. An ihr ist die ESA unmittelbar nicht mehr beteiligt. Die GSA führt die Verhandlungen mit dem Konzessionär fort und wird den Betrieb von Galileo überwachen.

Der Sitz der am 26. März 2007 gegründete Betreibergesellschaft GOC (Galileo Operating Company) wurde nach langem Ringen auf Frankreich (Toulouse) und Großbritannien (London) aufgeteilt. Das Zentrum in Toulouse ist für die Verwaltung und Geschäftsentwicklung zuständig, während in London die Betriebsverantwortung wahrgenommen wird. Während der Entwicklungsphase ist das Unternehmen European Satellite Navigation Industries Hauptauftragnehmer der ESA, die die System Anforderungen und Spezifikationen erstellt hat. Es baut unter anderem den Testsatelliten Giove-B.

Satellitenbahn

28 Satelliten umkreisen die Erde auf drei Bahnebenen mit einer Inklination von 56° in einer Walker-Konstellation (27/3/1). Pro Bahnebene sind neun Satelliten vorgesehen. Sie haben einen Abstand von 40° mit einer Abweichung von maximal 2° , entsprechend 1000 km. Bei einer Höhe von 23.616 km benötigen die Satelliten zehn Tage, um nach 17 Umläufen den Ausgangspunkt wieder zu erreichen.

Dienste

Folgende Dienste werden angeboten bzw. sind geplant:

Der **Offene Dienst** (*Open Service*, OS) steht in direkter Konkurrenz oder als Ergänzung zum GPS-System. Er soll ebenfalls frei und kostenlos empfangbar sein. Allerdings müssen Hersteller entsprechender Empfänger Lizenzgebühren entrichten. Der *Offene Dienst* ermöglicht die Ermittlung der eigenen Position auf wenige Meter genau. Zudem liefert er die Uhrzeit entsprechend einer Atomuhr (besser als 10^{-13}). Auch kann dadurch die Geschwindigkeit, mit der sich der Empfänger (z. B. in einem Kfz) fortbewegt, errechnet werden.

Er soll zwei Sendefrequenzen zur Verfügung stellen. Damit wird es mit Zweifrequenzempfängern möglich sein, Ionosphärenstörungen korrigieren zu können und die Position auf ca. 4 Meter genau zu bestimmen. GPS benutzt aus dem gleichen Grund ebenfalls zwei Sendefrequenzen (1227,60 MHz und 1575,42 MHz). Die höhere Anzahl der Satelliten, 27 gegenüber 24 bei GPS, soll die Empfangsabdeckung in Städten von 50 Prozent auf 95 Prozent steigern. Durch die Kombination beider Satellitensysteme dürfte jedoch noch eine deutlich bessere Abdeckung von jederzeit bis zu 15 Satelliten erreicht werden können. Garantien für die ständige Verfügbarkeit dieses Dienstes wird es aber voraussichtlich nicht geben.
(Frequenzbänder: 1164–1214 MHz und 1563–1591 MHz)

Der **Kommerzielle Dienst** (*Commercial Service*, CS) ist kostenpflichtig und soll verschlüsselt zusätzliche Sendefrequenzen und damit höhere Übertragungsraten von ca. 500 bit/s zur Verfügung stellen. So sind dann beispielsweise Korrekturdaten zur Steigerung der Positionsgenauigkeit um ein bis zwei Größenordnungen empfangbar. Er ist unter anderem auch für sicherheitskritische Anwendungen ausgelegt (z. B. Flugsicherung). Auch sind Garantien zur ständigen Verfügbarkeit dieses Dienstes geplant.
(Frequenzbänder: 1164–1214 MHz, 1260–1300 MHz und 1563–1591 MHz)

Der **Sichere Dienst** (*Safety-of-Life*, SoL) steht sicherheitskritischen Bereichen zur Verfügung, z. B. dem Luft- und dem Schienenverkehr. Er ist das Korrektiv zu den Risiken, die sich aus den kommerziellen Anwendungen (oben) ergeben können. Er bietet eine Warnung (wenige Sekunden) bevor das System, z. B. wegen ausgefallenen Satelliten oder bei Positionierungsfehlern nicht mehr genutzt werden sollte. Auch für diesen Dienst sind Garantien für die ständige Verfügbarkeit geplant.
(Frequenzbänder: 1164–1214 MHz und 1563–1591 MHz)

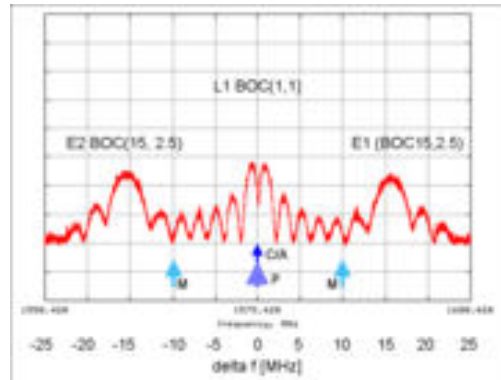
Der **Regulierte Dienst** oder *Staatliche Dienst* (*Public Regulated Service*, PRS) steht ausschließlich hoheitlichen Diensten zur Verfügung, also Polizei, Küstenwache oder Geheimdienst. Als Dual-Use-System wird es auch für militärische Anwendungen zur Verfügung stehen. Das ebenfalls verschlüsselte Signal ist weitgehend gegen Störungen und Verfälschungen gesichert und soll eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit bieten.
(Frequenzbänder: 1260–1300 MHz und 1563–1591 MHz)

Der **Such- und Rettungsdienst** (*Search And Rescue*, SAR) arbeitet mit COSPAS-SARSAT und MEOSAR zusammen und erlaubt eine schnelle und weltweite Ortung von Notsendern von Schiffen oder Flugzeugen. Auch soll eine Rückantwort von der Rettungsstelle an den Notrufsender erstmalig möglich sein.

Signal

Galileo nutzt gemeinsam mit GPS das Frequenzband *L1* bei 1575,42 MHz und *L5* bei 1176 MHz. Das Band *L2* bei 1227,6 MHz steht GPS allein zur Verfügung, für Galileo ist es das Band *E6* bei 1278,75 MHz. Das Spektrum zeigt das erste Testsignal von Giove-A, das eine Hochgewinn-Antenne im Januar 2006 empfangen hat.

Die Sendeleistung der Satelliten in 20.000 km Entfernung ist so gering, dass ein Navigationsempfänger, ausgestattet mit einer einfachen Stabantenne, fast nur Rauschen sieht. Er empfängt nicht nur das Signal eines Satelliten, sondern von mindestens vier, deren Signale dopplerverschoben sind. Hinzu kommen die Ausstrahlungen von GPS-Satelliten auf den gleichen Frequenzen.



Giove-A L1-Signal, gesendet im Januar 2006

Die Rückgewinnung der Navigationsdaten gelingt, da die Signale über einen großen Frequenzbereich gespreizt sind. Auf einer Frequenzbreite von 1 MHz, auf der sich rauschfrei 15 Mbps übertragen ließen und die Platz böte für mehr als 5 Radiostationen, sendet Galileo mit einer Bitrate von 50 bps, das sind 5–10 Buchstaben pro Sekunde.

Die Tabelle listet die Frequenzbänder, Frequenzen und Modulationsverfahren auf, die Galileo zur Verfügung stehen. Die beiden Spitzen des L1-Signals sind im Spektrum beschriftet, genauso die Seitenmaxima der Frequenzen E1 und E2. Die blauen Pfeile markieren die Lage der GPS-Signale im L1-Band. Dank der unterschiedlichen Modulation (BOC, BPSK) ist das Übersprechen der Signale gering.

Kompatibilität mit GPS

Nach jahrelangen Verhandlungen unterzeichneten am 26. Juni 2004 während des USA-EU-Gipfels in Newmarket-on-Fergus (Irland) der damalige US-Außenminister Colin Powell und der amtierende Vorsitzende der EU-Außenminister Brian Cowen einen Vertrag über die Gleichberechtigung der Satellitennavigationssysteme GPS, GLONASS und Galileo. Darin wird vereinbart, dass Galileo zu GPS kompatibel sein wird. Durch die Kombinationsmöglichkeit beider Systeme werden somit nach Abschluss des Aufbaus von Galileo insgesamt etwa 60 Navigationssatelliten zur Verfügung stehen.

Voraussetzung für den Abschluss des Vertrages war, dass die EU auf die mit einer stärkeren Bandspreizung ausgestatteten Kanalcodierung BOC (1, 5) (Binary Offset Carrier) verzichtet und stattdessen auch für die zukünftigen GPS-Satelliten vorgesehene BOC (1, 1) verwendet. Durch BOC (1,1) und die deutlich geringere Frequenzspreizung im Gegensatz zu BOC (1, 5) ist sichergestellt, dass bei einer breitbandigen Störung des Galileo-Signals im Ausmaß der zivilen Bandbreite es nicht gleichzeitig zu einer Störung des um rund Faktor 10 stärker bandgespreizten militärischen Signals von GPS führt. Denn es werden sowohl für die zivile als auch militärische Nutzung vorgesehene Codefolgen (Unterscheidung mittels Codemultiplex) die gleichen HF-Mittenträgerfrequenzen verwendet – die Unterscheidung erfolgt nur durch unterschiedliche Codierungsverfahren. Die dadurch bedingte *spektrale Überdeckung* zwischen BOC (1, 1) und dem militärischen GPS P/Y-Code bzw. M-Code beträgt nur rund 8%, während BOC (1, 5) zu einer über 50% spektralen Überdeckung geführt hätte. Rund 50% Decoderverlust sind allerdings für den sicheren Empfang des militärischen genutzten breitbandigen GPS-Code mit zu vielen Empfangsfehlern verbunden, während bei Störungen des schmalbandigen zivilen Navigationssignals ein Ausfall von nur rund 10% im militärischen Code unter anderem durch Fehlerkorrekturverfahren kompensiert werden kann.

Diese Anpassung in der Kanalcodierung von Galileo ermöglicht es neben dem C/A-Code vom GPS auch das zivile Galileo-Navigationssignal bei Bedarf in lokal begrenzten Gebieten durch spezielle GPS-Jammer zu stören, ohne dass dabei gleichzeitig das militärisch genutzte breitbandige GPS-Signal wesentlich beeinträchtigt wird.

Auf die erzielbare Positionsgenauigkeit hat die Verwendung von BOC (1, 1) bei Galileo keinen Einfluss.

Störsender

So genannte GPS-Jammer (engl. *jammer*: Störsender) werden, ähnlich wie beim GPS-System, wohl auch zum Stören der Galileo-Signale eingesetzt werden können. Diese überlagern, auf gleicher Frequenz, die Signale der Satelliten. Idealerweise werden dabei die gleichen Codefolgen, welche für das Codemultiplexverfahren verwendet werden, mit einem ungültigen Nutzdatenstrom übermittelt. Damit kann der Empfänger die eigentlichen Navigationsdaten vom Satelliten nicht mehr empfangen. Durch die Störung des Codemultiplexverfahrens durch nachgebildete Codefolgen kann mit wesentlich geringerer Sendeleistung seitens des Störsenders in den betreffenden Frequenzbereichen ein Ausfall der Übertragung erreicht werden als mit zu der Codefolge unkorreliertem Rauschen oder anderen unkorrelierten Störsignalen.

Auch können Varianten von Störsendern falsche Positionsdaten zur Verfälschung des Satellitensignals aussenden. Diese werden in Anlehnung an GPS auch als GPS-Faker bezeichnet. Gültige und plausible aber falsche Positionsdaten mittels Störsender zu erzeugen ist allerdings wesentlich aufwändiger als einfache GPS-Jammer. Denn dies erfordert unter anderem eine sehr genaue Zeitbasis am Störsender – im Regelfall ist dafür eine eigene Atomuhr nötig.

Galileo soll, zumindest in den kommerziellen Bereichen, eine Authentifizierung zur Erkennung gefälschter Positionsdaten anbieten.

Impressum:

ASE – Arbeitskreis Schule Energie
Weidachstraße 6
6900 BREGENZ
Tel.: +43 5574 601-72605
Email: ase@illwerkekv.at
Homepage: <http://ase.illwerkekv.at>