

NAVSTAR GPS

Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System

Raumgestütztes Funkortungssystem (space-based radionavigation system) unter der Kontrolle des Department of Defense (DoD) [Verteidigungsministerium der USA]. Systemoperator ist die U.S. Air Force (USAF).

GPS wurde ursprünglich ausschließlich für militärische Zwecke entwickelt, für autonome Navigation mit zwei Genauigkeitsstufen

- *SPS = Standard Positioning Service*
- *PPS = Precise Positioning Service.*

Die originäre Zielsetzung des GPS

Forderungen an das System:

Der Nutzer soll – ob in Ruhe oder Bewegung – überall auf der Erde oder nahe der Erdoberfläche

- *extrem genaue Informationen erhalten über*
 - *seine Position (dreidimensional),*
 - *seine Geschwindigkeit,*
 - *die Zeit*
 - *und diese Informationen sollen ständig geliefert werden.*
- *Wetterbedingungen sollen den Informationsfluss nicht beeinträchtigen,*
- *Grundlage soll ein einheitliches Bezugssystem sein,*
- *eine passive Nutzung (Einwegentfernungsmessung) muss möglich sein,*
- *unbegrenzte Nutzeranzahl,*
- *kostengünstig*
- *und Freund – Feind – Trennung muss möglich sein.*

Zeitlicher Ablauf der Entwicklung

Beginn 17. April 1973, Memorandum der Regierung der USA

1974 – 1979 Überprüfungsphase (Phase I)

Untersuchung der Konzeption, Prüfung, Überprüfung des militärischen Wertes, Kostenmodell, Start von Testsatelliten.

1979 – 1985 Entwicklungsphase (Phase II)

Technische Entwicklung des Systems, Start von Prototypsatelliten, Entwicklung der Empfangssysteme.

1985 – 1995 Ausbauphase (Phase III)

Komplett-Ausbau des Systems, Installation der ersten Block-II-Satelliten, Erreichen der ersten Betriebsbereitschaft (1993).

- *Freigabe von GPS für weltweite, kostenlose, zivile Nutzung (1993),*
- Volle Betriebsbereitschaft (Full Operational Capability, FOC – 17. Juli 1995.*

1995 – 2012 Modernisierungsphase

SA (Selective Availability – Selektive Verfügbarkeit) endgültig abgeschaltet – 02. Mai 2000, GPS zeigt im Kriegseinsatz Defizite – Modernisierung notwendig.

Bis 2012 kommt es zu größeren Veränderungen:

- Trennung von militärischem und zivilem Signal, neue Signale,
- Optimierung aller Segmente,
- Verwendung von steuerbaren und gebündelten Antennen,
- Erhöhung der Anzahl der Satelliten (30 Block II F/III).

Systembeschreibung

Das GPS-System wird in drei Hauptsegmente unterteilt:

- Raumsegment (Space Segment),
 - Die Konstellation der Satelliten des Systems und die Satelliten selbst.
- Kontrollsegment (Control Segment)
 - Die Bodenstationen,
 - Infrastruktur und Software für die Überwachung und den Betrieb des GPS-Systems.
- Nutzersegment (User Segment)
 - Alle GPS-Empfänger Weltweit und die dazugehörige Verarbeitungssoftware.

Ein weiterer Teil gewinnt zunehmend an Bedeutung:

- Bodensegment (Ground Segment)
 - Alle Permanent-Netze, die wesentliche Produkte für die Nutzer des Systems liefern.

Das Raumsegment

Das Raumsegment besteht aus mindestens 24 Satelliten, 21 Satelliten plus 3 Reservesatelliten. Zur Zeit sind 31 Satelliten aktiv. GPS-Satelliten sind multifunktionale Plattformen

- mit Radiosende- und -empfangseinrichtungen,
- Atomuhren, sehr stabile Zeitnormale (Genauigkeit ± 1 Sekunde in 1 Million Jahren),
- Bordcomputer,
- sonstigen Ausrüstungen für die Positionsbestimmung,
- Ausrüstungen ausschließlich für militärische Zwecke,
- sowie Antriebseinrichtungen.

Die Abstrahlungsleistung beträgt 50 Watt. Die Bewegungsgeschwindigkeit der Satelliten im raumfesten System beträgt etwa 4 km/s, daraus ergibt sich eine relative Geschwindigkeit zu Stationen auf der Erde von maximal 2,8 km/s (Geschwindigkeit der Erdumdrehung am Äquator ca. 0,45 km/s).

Die Satelliten werden in 6 Bahnebenen (A bis F), pro Ebene 4 (5) Satelliten in gleichen Abständen, angeordnet. Die Bahnneigung beträgt 55° mit einem Abstand der Bahnebenen in der Äquatorebene von 60° gegeneinander. Die Umlaufzeit der Satelliten beträgt $\frac{1}{2}$ Sternentag = $11^h 50^m$ eines Sonnentages. Damit erfolgt die Wiederholung des „ground tracks“ (Bodenspur) nach 1 Sternentag, also nach $23^h 56^m$ (2 Umläufen). Dies bedeutet, dass der gleiche Satellit jeden Tag etwa 4 Minuten früher über der gleichen Position steht.

Die große Halbachse der Satellitenbahn beträgt = 26 609 km.

Die mittlere Entfernung vom Erdmittelpunkt beträgt = 26 560 km.

Die mittlere Bahnhöhe über der Erdoberfläche beträgt = 20 200 km.

Signalaufbau

Alle Frequenzen, die in den GPS-Satelliten benötigt werden, werden aus der Grundfrequenz $f_0 = 10,23$ MHz ($\lambda_0 = 29,3052$ m) der Satellitenoszillatoren abgeleitet, sie stehen so in einer festen Beziehung zueinander – sie sind kohärent.

Trägersignale

Jeder GPS-Satellit strahlt permanent zwei Trägersignale (Carrier) aus

- Signal L_1 : Frequenz $f_1 = 1575,42$ MHz ($\lambda_1 = 0,1905$ m), $L_1 = [f_0 = 10,23 \text{ MHz} * 154]$
- Signal L_2 : Frequenz $f_2 = 1227,60$ MHz ($\lambda_2 = 0,2445$ m), $L_2 = [f_0 = 10,23 \text{ MHz} * 120]$

Die harmonischen Schwingungen können wegen Mehrdeutigkeitsproblemen nicht direkt zur Streckenmessung zwischen Empfänger und Satellit verwendet werden. Deshalb moduliert man diesen Trägern weitere Informationen auf.

Die Code-Signale

Die Codierung der Träger läuft für L_1 und L_2 unterschiedlich ab, aber nur weil auf L_2 weniger aufgepackt wird.

Die Phasen der Träger werden um 90° verschoben und in eine Sinus- und Cosinuswelle zerlegt und moduliert.

- Die Sinuswelle trägt den C/A-Code und die Navigationsdaten.
- Die Cosinuswelle trägt den P-Code und ebenfalls die Navigationsdaten.
- Beide Wellen werden anschließend summiert und über die Antenne abgestrahlt.

Der C/A-Code (Coarse/Acquisition) Grobcode

Jedem Nutzer zugänglich, $f = 1,023$ MHz ($\lambda = 293,05$ m), Periodenlänge einer Sequenz = 1 Millisekunde. Eindeutigkeit bei der Distanzbestimmung, Ausbreitungslänge = 300 km, erst danach Wiederholung des Codes.

Der P-Code (Precise) Feincode

Nur autorisierten Nutzern zugänglich, Voraussetzung für genaue Ortsbestimmung in Echtzeit, $f = 10,23$ MHz ($\lambda = 29,305$ m), Periodendauer der Sequenz = 266,4 Tage, jedem Satelliten jeweils 7 Tage zugeteilt, wegen der Länge der Sequenz ist die Distanzbestimmung immer eindeutig.

Der Y-Code

Ab den Block II Satelliten besteht die Möglichkeit, den P-Code mit dem W-Code zu modulieren (Taktung $f_0/20$, etwa 0,5 MHz) zu verschlüsseln, dies ergibt den Y-Code. Mit dieser Maßnahme wird nicht autorisierten Benutzern die vollständige Code-Information verwehrt.

Der Navigationsdaten-Code

Die Positionen der Satelliten müssen zum Zeitpunkt der Messung bekannt sein. Die erforderlichen Daten (Zeit- und Bahninformationen) werden laufend gesendet. Navigationsdaten werden den Trägern mit einer Frequenz von 50 Hz (50 Bit = 1/20 s pro Bit) und einer Zykluslänge von 30 Sekunden aufmoduliert. Die Daten werden ständig von jedem Satelliten übermittelt. Das vollständige Datensignal umfasst 37 500 Bit, bei einer Übertragungsgeschwindigkeit von 50 Bit/s benötigt die vollständige Übertragung 12,5 Minuten. Das Datensignal besteht aus 25 Datenblöcken (frames), ein Datenblock umfasst 1500 Bit.

Die Codes werden nach Maßgaben von pseudozufälligen Sequenzen (**P**seudo **R**andom **N**ois) der Werte +1 und -1 phasenmoduliert.

Pseudozufällig bedeutet: die Sequenzen haben einen periodischen Charakter, die Zufallsfolge wird nach einer bestimmten Anzahl von Elementen wiederholt.

Seit dem 02. Mai 2000 ist die Einschränkung der Verfügbarkeit abgeschaltet. Hierunter wurden folgende Prozesse verstanden:

SA (Selective Availability) – Grundfrequenz f_0 wird kurz- und langperiodisch verändert (δ -Process) und die Bahn- und Satellitenkorrekturdaten in den Navigationsdaten werden verfälscht (ε -Process).

A-S (Anti-Spoofing) P-Code wird mit unbekanntem W-Code überlagert, resultierender Y-Code nicht mehr nutzbar.

Mit den verfälschten Signalen war eine Absolutpositionierung nur mit einer Genauigkeit von etwa 100 m möglich.

Das Kontrollsegment

Das Kontrollsegment (militärisches Kontrollsegment) besteht aus der Hauptkontrollstation (Master Control Station) Schrievers AFB, ostwärts Colorado Springs, „Consolidated Space Operations Center“ (CSOC) und der Reserve MSC Gaithersburg, Maryland (in wenigen Stunden aktivierbar), sowie fünf Monitor- und vier Bodensendestationen (Grund Antenna).

Die Aufgaben des Kontroll Segments bestehen in der

- Kontrolle der Funktion des gesamten Systems,
- Beobachtung der Satellitenbewegungen,
- der Vorausberechnung der Satelliten-Ephemeriden und der Satellitenuhrparameter,
- der periodischen Aufdatierung der Navigationsnachricht für jeden Satelliten.

Zehn weitere Monitorstationen ergänzen das Kontroll Segment.

Die Nutzung von GPS

Es wird in Grundzügen folgendes Beobachtungsprinzip angewandt:

Nach dem Verfahren der Trilateration werden die Strecken zu den Satelliten anhand der Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen (Messprinzip) bestimmt. Dabei können die Satellitenorte zunächst als „Festpunkte“ betrachtet werden. Um die Distanz Empfänger – Satellit zu bestimmen, werden zwei Verfahrensweisen unterschieden.

Das GPS-Messkonzept Navigation (Bestimmung primärer GPS-Messgrößen bei der Codemessung)

Bei der autonomen Navigation – auch absolute Positionierung genannt, werden zur Messung die Signallaufzeitdifferenzen durch Codephasenvergleich für C/A- und P-Codes im Zeitpunkt t genutzt. Das Messverfahren basiert auf Kreuzkorrelation, Squaring bzw. P-W-Tracking. Messergebnis sind Code-Pseudostrecken aus der Multiplikation der Signallaufzeitdifferenzen mit der Lichtgeschwindigkeit in Meter. Die autonome Navigation ist das ursprüngliche Entwurfskonzept mit einer Positionierungsgenauigkeit von $>1m <20m$. Gegebenenfalls werden im Konzept des Differential GPS (DGPS) Korrekturdaten genutzt und eine Positionierungsgenauigkeit besser 0,5 m erreicht.

Das GPS-Messkonzept Geodäsie (Bestimmung primärer GPS-Messgrößen bei der Trägerphasenmessung)

Die Messung erfolgt durch die Summation der ganzzahligen Trägerwellenänderungen (integrierter Doppler) im Zeitraum $n \cdot \Delta t$ sowie Phasenvergleich auf L_1 und L_2 im Zeitpunkt t . Die Realisierung erfolgt mittels Signalmischung in der Phase Locked Loop (PLL). Messergebnis sind Trägerphasen-(Pseudo)Strecken mit unbekannter Anzahl ganzzahliger Wellenlängen in Zyklen. Hierbei wird das Genauigkeitspotenzial von GPS vollständig ausgeschöpft, es werden Positionierungsgenauigkeiten von $>1mm <10 cm$ erreicht. Eine Genauigkeitssteigerung ist noch durch Relativpositionierung und rechnerische Nachbearbeitung möglich.

Bezugssystem (Koordinatensystem für GPS) – erdfestes, geozentrisches Bezugssystem

World Geodetic System 1984 (WGS 84)

Das WGS 84 ist durch die geozentrischen Koordinaten der fünf Monitorstationen des Kontrollsegments festgelegt (Referenznetz des Kontrollsegments).

WGS 84 (G 873)

Seit dem 29. September 1996 (GPS Woche 873) werden Koordinaten verwandt, die den vom Internationalen Erdrotationsdienst (IERS) veröffentlichten ITRF 94 – Koordinaten besser als 5 cm angepasst sind.

Damit Datumstransformationen aus Satellitenbahnen abgeleitet werden können, müssen mindest folgende Festlegungen getroffen werden:

- Geometrische Festlegung des Referenzsystems,*
- Parameter des Erdschwerefeldes und*
- einige Fundamentalkonstanten*
 - Erdrotation,*
 - Lichtgeschwindigkeit,*
 - Geozentrische Gravitationskonstante.*

Positionen werden im Referenznetz des Kontrollsegments erhalten, dabei beträgt die Absolutgenauigkeit einige Dezimeter. Höhere Genauigkeiten können nur als Relativgenauigkeiten erreicht werden.

GPS-Systemzeit

GPS benutzt ein eigenes Zeitsystem in der Zuständigkeit des Systembetreibers. UTC und GPS-Systemzeit stimmen am 06. Januar 1980, 00:00 Uhr überein. Bei der GPS-Systemzeit handelt es sich um eine kontinuierliche Zeitskala, die nicht durch Schaltsekunden verändert wird. Die Zeitangabe erfolgt durch die GPS-Wochenummer und die Sekunde innerhalb der Woche. Die GPS-Woche beginnt beim Wechsel von Samstag auf Sonntag 00:00 Uhr. Seit 01. Januar 1999 beträgt die Differenz GPS-Systemzeit – UTC = 13 Sekunden. Die GPS-Systemzeit geht vor, die Differenz ist mit einer Genauigkeit von 100 μ s.

Beispiel für GPS-Systemzeit: Datum 28. April 2004, 09:00 Uhr MESZ, 07:00 Uhr UTC = GPS-Time: 1268 291.600.