

GPS - Woher und Warum?

Adaptiert aus einem Script von Prof. R. Thomä, Instituts für Kommunikations- und Meßtechnik an der Technischen Universität Ilmenau

Das Problem der Navigation besteht, seit der Mensch das erste mal begann zu reisen.

Landgestützte Funkortungs - und Navigationssysteme für die Luft- und Seefahrt sind seit Jahrzehnten in Betrieb. Die Ortungsverfahren beruhen entweder auf Peilung oder Laufzeitmessung.

Die Fortschritte in der Raumfahrt einerseits und in der Informationsverarbeitung mit Hilfe hochintegrierter Baüelemente andererseits haben es ermöglicht, ein satellitengestütztes Funkortungs - und Navigationssystem hoher Genauigkeit zu schaffen. 1981 wurde mit Versuchen dieses in den USA entwickelten Systems, "NAVigation System using Time And Ranging - Global Positioning System" - NAVSTAR-GPS, begonnen.

Seit Dezember 1993 läuft die offizielle Erprobung (IOC - Initial Operation Capability), freigegeben durch das Verteidigungsministerium der USA (DoD - Department of Defence).

Phase I	:	1974-1979	Überprüfungsphase
Phase II	:	1979-1985	Entwicklungsphase
Phase III	:	1985-1993	Ausbauphase

Tabelle 1: Aufbauphasen des GPS

Das GPS kann die Nutzer, deren Anzahl keiner Einschränkung unterliegt, weltweit mit der Position (geographische Länge, Breite und Höhe) und Zeitinformationen mit bisher unerreichter Genauigkeit versorgen, sofern eine Sichtverbindung zu mindestens vier Satelliten (Normalfall) besteht. Weiterhin kann aus den empfangenen Daten die Geschwindigkeit des Empfängers berechnet werden.

Funkortungssysteme sind seit langer Zeit Gegenstand umfangreicher Entwicklungsarbeiten. Dabei stand die Ortung als Mittel der Navigation im Mittelpunkt. Früher waren Sextant (Astronavigation), Magnetkompaß und Geschwindigkeitslot (Logge) die Mittel, mit denen Ortsbestimmungen vorgenommen wurden und nach denen dann die Navigation erfolgte. Während des 2. Weltkrieges kamen neuartige Funkortungssysteme zum umfassenden Einsatz, wie z.B. LORAN (Alliierte) und Sonne (Deutschland). Nach dem Krieg fanden die meisten Funkortungssysteme im zivilen Bereich ihre Anwendung, und die Weiterentwicklung beschränkte sich auf Verbesserungen. Erst mit der sog. Ölkrise 1973 kamen spontan Forderungen nach besseren und geeigneteren Ortungs- und Navigationssystemen auf. Für die Seefahrt wurden mit Rücksicht auf die großen Öltanker genauere und zuverlässigere Systeme für die weltweite Nutzung gefordert. Für die geophysikalische Exploration und den Aufbau von Förderplattformen wurden genauere Positionsangaben gefordert. Der Luftverkehr mit seiner stark gestiegenen Verkehrsdichte forderte Möglichkeiten zu einer schnellen und automatisierbaren Ortung als Voraussetzung für eine bessere Navigation. Die daraufhin einsetzende Entwicklung brachte die Einführung der Systeme LORAN-C und OMEGA. Doch erst mit der Einbeziehung der modernen, auf der Nutzung hochintegrierter Halbleiterbaüelemente basierenden elektronischen Informationsverarbeitung konnte eine neu Qualität der Funkortungssysteme erzielt werden.

Bereits 1960 wurde von der US-Navy ein Satellitennavigationssystem mit der Bezeichnung TRANSIT in Betrieb genommen. Seit 1967 wird es von zivilen Verkehrsteilnehmern benutzt. Nachteil von TRANSIT ist der eingeschränkte Versorgungsbereich (nur 4 Satelliten) und der große Abstand zwischen zwei Messungen von 30 - 110 min.

Das Äquivalent zu TRANSIT ist das von der ehemaligen SU entwickelte und eingesetzte System TSIKADA.

Das System TRANSIT soll nach Inbetriebnahme des Nachfolgesystems NAVSTAR-GPS (1993) außer Dienst gestellt werden. NAVSTAR-GPS ist das derzeit modernste zu Verfügung stehende Satellitennavigationssystem. Ein Äquivalent zu NAVSTAR-GPS ist das von der ehem. SU entwickelte System GLONASS.

Nach Beendigung des kalten Krieges wurde das System NAVSTAR-GPS vom Verteidigungsministerium der USA (DoD - Department of Defence) für die zivile Nutzung unter Inanspruchnahme der temporären bzw. territorialen Abschaltung bei Krisensituationen freigegeben. Weiterhin wurde die mögliche Genauigkeit für den kommerziellen bzw. zivilen Nutzer durch SA (Selektive Availability = künstliche Verschlechterung) und AS (Anti Spoofing = Störschutz) auf 100 m für 95 % (2σ) bezogen auf 24h für die Positionsbestimmung eingeschränkt. Die Verlässlichkeit der Geschwindigkeitsmessung beträgt 0,2 m/s. Aus diesen Gründen planen derzeit mehrere europäische Staaten ein ergänzendes, rein ziviles Satellitensystem für Positionsbestimmungen.

Die steigenden Wachstumsraten des Marktes für die zivile GPS-Nutzung zeigen den Bedarf und die Möglichkeiten dieses Systems. Die automatische sichtunabhängige Landung von Linienflugzeugen, die Zielführung von Fahrzeugen in unbekanntem Städten, die Verfolgung von Fahrzeugen bei Diebstahl, und die präzise Landvermessung, wobei selbst plattentektonische Bewegungen durch Positionsvergleich bestimmt werden können, sind dafür Beispiele. Nicht zu vergessen ist dabei jedoch die Tatsache, daß das GPS eine Technik darstellt, die zur Steuerung von Lenkwaffen und der Positionsbestimmung von militärischen Fahrzeugen entwickelt worden ist.

Das Grundprinzip des GPS

Das bei NAVSTAR-GPS angewandte Ortungsverfahren beruht auf dem Prinzip der Entfernungsbestimmung durch Messung der Laufzeit von Signalen zwischen dem Nutzer und je einem von mehreren Bezugspunkten (hier Satelliten), deren Positionen genau bekannt sind. Dieses Prinzip findet seit langem in landgestützten Funkortungssystemen, wie z.B. DME (Distance Measuring Equipment) und Sekundärradar, Anwendung.

Im folgenden soll auf die Positionsbestimmung, wie sie bei GPS praktiziert wird, näher eingegangen werden.

Positionsbestimmung

Der geometrische Ort aller Punkte im Raum, die von einem Bezugspunkt die gleiche Entfernung p haben, ist die Oberfläche einer Kugel; oberhalb einer Ebene (z.B. als eben angenommene Erdoberfläche) ist der geometrische Ort die Oberfläche einer Halbkugel und in der Ebene (z.B. Erdoberfläche) ein Kreis mit dem Radius p und dem Bezugspunkt als Mittelpunkt. Der geometrische Punkt kann zur Ortung benutzt werden, wenn die Koordinaten des Bezugspunktes bekannt sind. Die Oberflächen von Kugel und Halbkugel sind dann Standflächen, der Kreis eine Standlinie, auf denen sich das zu ortende Objekt befinden muß. Die gesuchte Position liegt im Schnittpunkt von mindestens drei Standflächen (im Raum) bzw. im Schnittpunkt von mindestens zwei Standflächen (in der Ebene). Zur Ortung eines Objektes in der Ebene müssen also zwei Entfernungen p_1 und p_2 zu zwei Bezugspunkten S_1 und S_2 , deren Koordinaten x_1, y_1 und x_2, y_2 bekannt sind, gemessen werden. Der Schnittpunkt der beiden Kreise mit den Radien p_1 und p_2 und den Mittelpunkten S_1 bzw. S_2 ist der zu bestimmende Standort P mit den Koordinaten x_p, y_p (Abbildung 1).

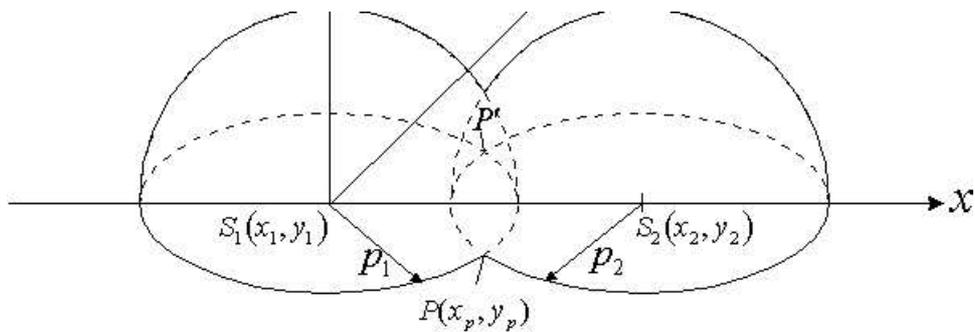


Abbildung 1: Zweidimensionales Orten eines Objektes in der Horizontalebene

Der zweite Schnittpunkt P' ist ein mathematisch möglicher, ortungsmäßig jedoch unrealer Standort. Würde sich das zu ortende Objekt nicht in der Horizontalebene, sondern oberhalb befinden, dann liegt der Standort auf dem Halbkreis (Standlinie), der die Ebene in den Punkten P und P' berührt. Zur Bestimmung des Standortes ist dann eine zusätzliche Standfläche erforderlich, die durch eine dritte Entfernungsmessung p_3 zu einem dritten Bezugspunkt gewonnen wird. Das gleiche gilt natürlich auch für den Fall, daß sich die drei Bezugspunkte und das zu ortende Objekt im Raum befinden (Abbildung 2). In diesem Fall sind alle Punkte durch drei Koordinaten gegeben. D.h., der Schnittpunkt von drei kugelförmigen Ausbreitungswellen (z.B. 3 Satelliten - S_1, S_2, S_3) stellt die gesuchte Position dar.

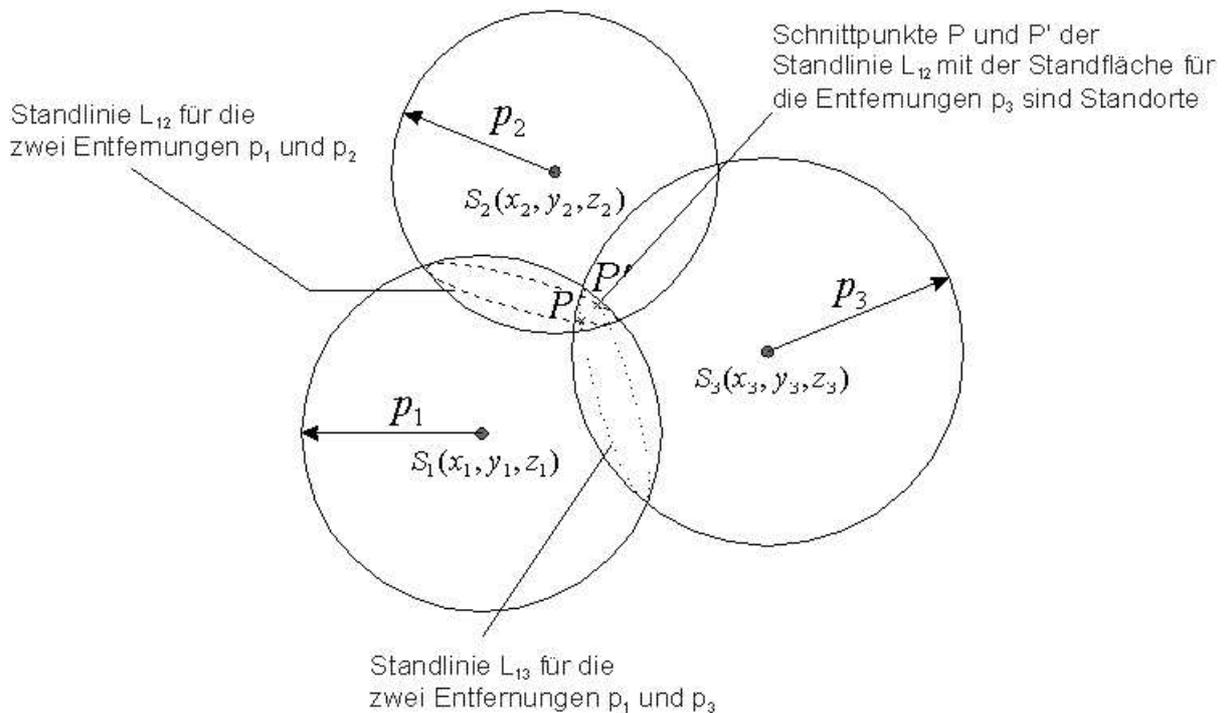


Abbildung 2: Dreidimensionales Orten eines Objektes im Raum

Die funktechnische Entfernungsmessung beruht auf der Messung der Laufzeit eines Signals auf dem Weg zwischen Bezugspunkt und Objekt, dessen Standort bestimmt werden soll. Das Produkt aus Laufzeit T und bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit c (Lichtgeschwindigkeit) der Wellen ist die gesuchte Entfernung p .

$$p = c \cdot T \quad (0.1)$$

Die Entfernungsmessung erfolgt beim NAVSTAR-GPS nach dem Einwegverfahren. Dadurch wird der Nachteil der Zweiwegverfahren (z.B. DME, TACAN und Sekundärradar), die Sättigung der Reflexionstransponder, und der damit begrenzten Teilnehmerzahl, bzw. bei passiver Rückstrahlung die geringe Empfangsleistung (z.B. Reflexion am Flugzeug - Primärradar) vermieden.

Das Meßsignal wird dabei im Satelliten (Bezugspunkt) erzeugt, ausgestrahlt und nach Durchlaufen der zu messenden Strecke vom Nutzer empfangen (Abbildung 3).

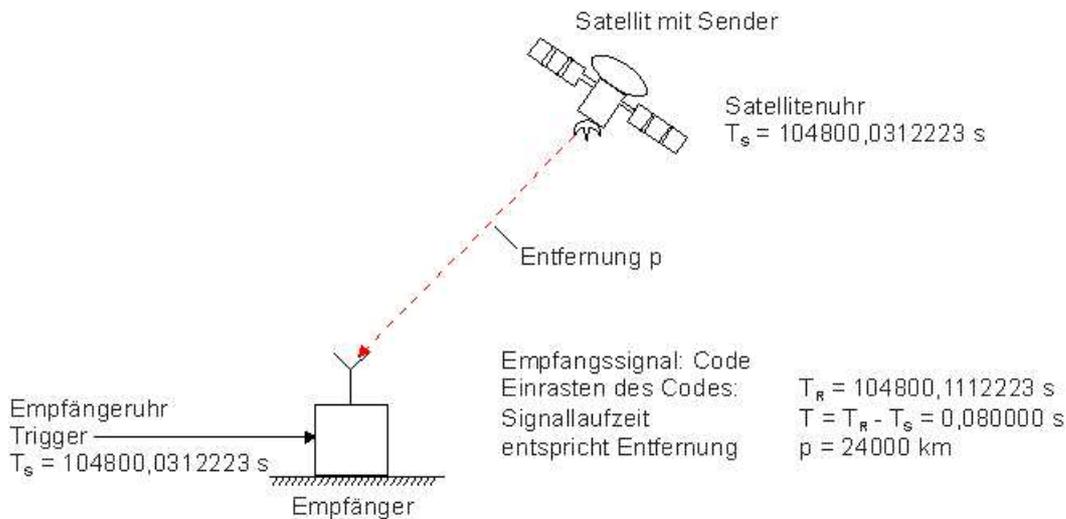


Abbildung 3: Prinzip der Entfernungsmessung - Einwegmessung

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung hängt dabei von der Genauigkeit der Entfernungsmessung ab und diese wiederum von der Genauigkeit der zu Verfügung stehenden Uhrzeit bzw. Zeitbasis.

Gemessen wird die Laufzeit auf Grund der momentanen Uhrzeiten ("Zeitstempel") bei Ausstrahlung des Signals im Satelliten und bei Empfang durch den Nutzer. Eine genaue Zeitmessung setzt voraus, daß die Uhren beim Nutzer und in den Satelliten synchron und mit hoher Genauigkeit laufen. Ein Zeitunterschied von $1\mu\text{s}$ ergibt z.B. einen Entfernungsfehler von 300m. Für eine Betriebsdauer von 10 Tagen entspricht das einer Uhrzeittoleranz von 10^{-12} . Ein derartiger Wert läßt sich nur mit einem Atomfrequenznormal erzielen. Wegen des technischen Aufwandes und der Kosten ist deren Einsatz nur in den Satelliten und nicht beim Nutzer möglich. Um die bei der Verwendung weniger genauer "Uhren", z.B. quarzstabilisierte Oszillatoren, beim Nutzer auftretende Zeitabweichungen und damit entsprechende Entfernungsfehler zu eliminieren, wird bei NAVSTAR-GPS eine Zeitkorrektur vorgenommen, welche Bestandteil des Meßvorganges ist. Für diese Zeitkorrektur (Synchronisation der Empfänger- und Satellitenuhren) ist ein vierter Satellit notwendig.

Es wurde dargelegt, daß zur Positionsbestimmung eines Ortes im Raum prinzipiell drei Entfernungen zu drei Satelliten, deren Koordinaten bekannt sein müssen, zu messen sind.

Bei NAVSTAR-GPS gibt es mehrere umlaufende Satelliten (21 aktive Satelliten + 3 Reservesatelliten).

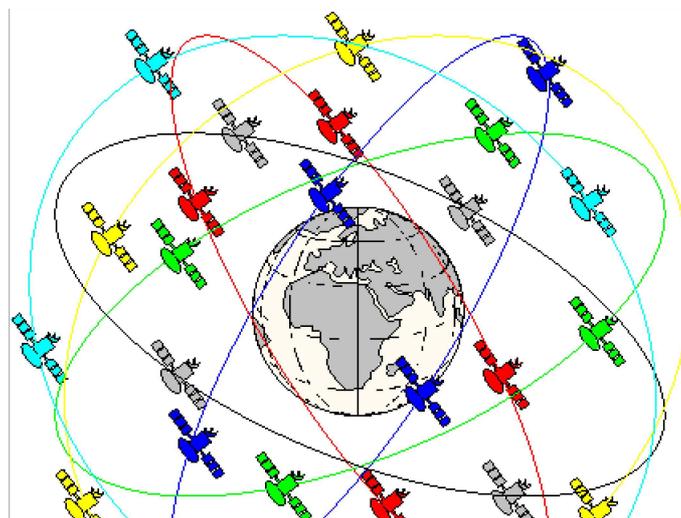




Abbildung 4: Konstellation der Satelliten (21 + 3) von NAVSTAR-GPS

Während für die Positionsbestimmung (drei Koordinaten) des Nutzers grundsätzlich nur drei Entfernungsmessungen erforderlich sind, muß zur Ermittlung der Zeitabweichung der Uhrzeit T des Nutzers (aus Kostengründen kein Atomnormal im Empfänger) und zur Eliminierung der dadurch entstehenden Meßfehler eine vierte Entfernungsmessung zu einem vierten Satelliten erfolgen. Daher müssen für eine genau Positionsbestimmung vom Nutzer die Signale von mindestens vier Satelliten quasi gleichzeitig empfangen werden. Durch die Satellitenanordnung des GPS wird gewährleistet, daß fast auf der ganzen Erdoberfläche gleichzeitig vier Satelliten empfangen werden können. Die Anzahl der sichtbaren Satelliten ist aber wiederum eine Funktion der Elevation (Erhebungswinkel über dem Horizont). Eine Simulation zur Anzahl der sichtbaren Satelliten unter verschiedenen Elevationen (15° und 45°) ist hier dargestellt.

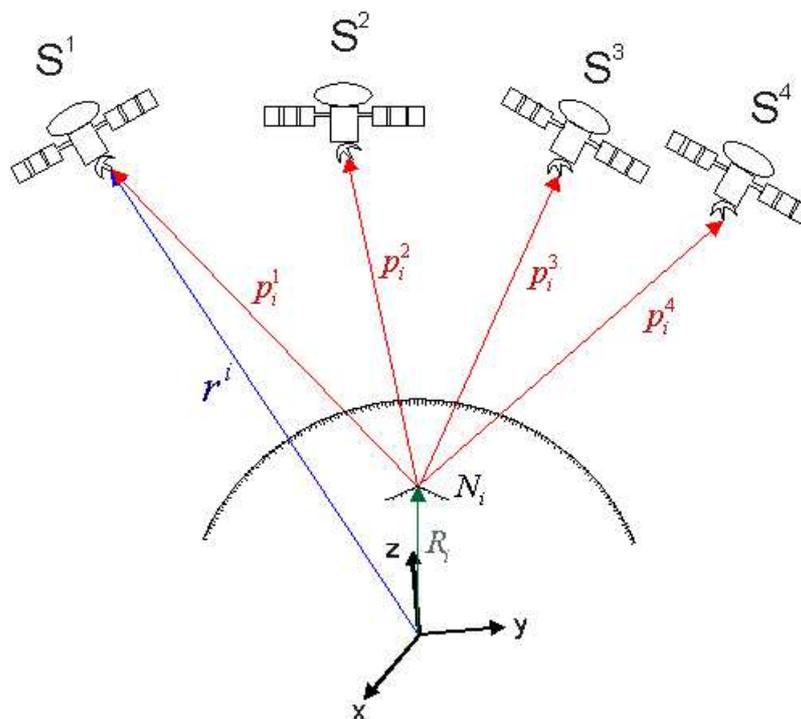


Abbildung 5: Distanzmessung (pseudorange) bei GPS

Die vier Entfernungsmessungen führen zu folgenden vier Gleichungen:

$$p_1 = \sqrt{(x_p - x_1)^2 + (y_p - y_1)^2 + (z_p - z_1)^2} + \Delta p + e_i \quad (0.2)$$

$$p_2 = \sqrt{(x_p - x_2)^2 + (y_p - y_2)^2 + (z_p - z_2)^2} + \Delta p + e_i \quad (0.3)$$

$$p_3 = \sqrt{(x_p - x_3)^2 + (y_p - y_3)^2 + (z_p - z_3)^2} + \Delta p + e_i \quad (0.4)$$

$$p_4 = \sqrt{(x_p - x_4)^2 + (y_p - y_4)^2 + (z_p - z_4)^2} + \Delta p + e_i \quad (0.5)$$

$$\Delta p = c \cdot \Delta T \quad (0.6)$$

mit:	p_1 bis p_4	Pseudodistanzen (pseudo ranges)
	x_p, y_p, z_p	Koordinaten des zu bestimmenden Ortes des Nutzers
	x_i, y_i, z_i	Koordinaten des Satelliten $i, i = 1,2,3,4$
	p	Abweichung der Entfernung (resultierend aus Uhrenfehler)
	T	Zeitabweichung der Uhrzeit des Nutzers
	e_i	zusätzliche Fehler im System

Aus den Gleichungen (0.2) bis (0.6) lassen sich die vier Unbekannten x_p, y_p, z_p und T berechnen.

Ein weiterer Vorteil dabei ist, daß in dem Moment, in welchem die erste Lösung der Navigationsgleichung vorliegt, alle Navigationsempfänger weltweit auf die Systemzeit synchronisiert sind. Dadurch ist es möglich, weltweit eine hochgenau Zeit zu Verfügung zu stellen.

Jeder Satelliten strahlt zwei Frequenzen L_1 und L_2 aus dem L-Band (1000...2000 MHz) aus.

Diese Frequenzen sind für alle Satelliten des GPS gleich. Zwei Träger werden verwendet, wobei diese unterschiedliche Informationen (Codes) beinhalten. Gleichzeitig läßt sich aus den Laufzeitunterschieden der beiden Träger die Elektronendichte der Ionosphäre berechnen. Damit kann die in der Ionosphäre auftretende Laufzeitverzögerung (Refraktion - längerer Weg durch Brechung), die das Ergebnis der Entfernungsmessung verfälscht, bestimmt und die Entfernungsmessung korrigiert werden. Die Frequenzen der Träger sind von den in den Satelliten befindlichen Atomfrequenznormalen (derzeit Cäsiumuhren) abgeleitet. Die beiden Träger übertragen die Positionsinformation mit den aufmodulierten Codesequenzen, die für jeden Satelliten spezifisch sind und damit eine Selektion ermöglichen. Die Codesequenzen sind ebenfalls aus den Atomfrequenznormalen abgeleitet. Die von den Satelliten ausgestrahlten modulierten Träger werden vom Empfänger des Nutzer aufgenommen, demoduliert und ausgewertet. Die Signallaufzeit wird aus den Codesequenzen durch Vergleich mit den im Empfänger erzeugten Codesequenzen in einem Korrelationsprozeß (Verschiebung - KKF) gewonnen. Aus den so bestimmten Signallaufzeiten von vier Satelliten werden die Entfernungen berechnet und aus ihnen und den bekannten Koordinaten der Satelliten die Position (x_p, y_p, z_p) des Nutzers.

Die Koordinaten der Satelliten (x_i, y_i, z_i) erhält der Nutzer durch die von den Satelliten mit zusätzlicher Modulation der Codesequenzen übermittelten sog. Navigationsmitteilungen.

Unabhängig von der Positionsbestimmung kann der Nutzer seine Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung ermitteln. Dazu werden die Dopplereffektverschiebungen gemessen, die durch die Relativbewegungen des Nutzers gegenüber den drei Satelliten entstehen.

Die beiden Träger L_1 und L_2 der Satelliten sind, wie bereits erwähnt, mit den satellitenspezifischen Codesequenzen, die der Laufzeit- bzw. der Entfernungsmessung dienen, moduliert. Diese Codesequenzen sind selbst mit einem Bitstrom moduliert, der die Navigationsmitteilungen enthält. Das sind Informationen, die von den einzelnen Satelliten dem Nutzer übermittelt werden, der sie zur Berechnung der Koordinaten seines Ortes benötigt.

Dazu gehören:

- Koordinaten der Positionen der Satelliten im Moment der Ausstrahlung dieser Mitteilung
- Ephemeriden der Satelliten (Bahnparameter)
- Korrekturwerte für die Satellitenuhren
- Korrekturwerte für die Wellenausbreitung in der hohen Atmosphäre
- Almanach (Sammlung von Daten sämtlicher Satelliten, nach denen der Nutzer die Wahl der jeweils günstigsten Satelliten treffen kann)

Für die Positionsbestimmung können je nach Genauigkeitsanforderung und zu Verfügung stehender Technik unterschiedliche Größen des GPS - Signals ausgewertet werden:

- Codephase (*pseudorange*)

- Dopplercount
- Trägerphase

Grundprinzip des DGPS

Eine Ausnutzung des NAVSTAR-GPS bis zur Grenze der theoretischen Leistungsfähigkeit ist mit dem Differential-GPS (DGPS), (ausgenommen Trägerphasenauswertung), zu erreichen.

Die Grundidee besteht darin, das Beobachtungsdifferenzen frei von vielfältigen Fehlereinflüssen, wie sie bei Einzelmessungen mit gleichem Vorzeichen und Betrag auftreten, sind. Um dies zu realisieren wird mit Hilfssendern gearbeitet. Dabei wird die Position der DGPS - Sende- / Empfangsstation sehr genau vermessen. Die mit dieser Station empfangenen bzw. berechneten Positionsdaten werden mit den tatsächlichen (bekannten) Positionsdaten verglichen und zu einem Korrekturwert verarbeitet. Dieser wiederum wird z.B. über einen Funkkanal (z.B. LW) mehreren mobilen Empfängern zu Verfügung gestellt, siehe Abbildung 6 "Prinzip des DGPS bei der Fahrzeugnavigation".

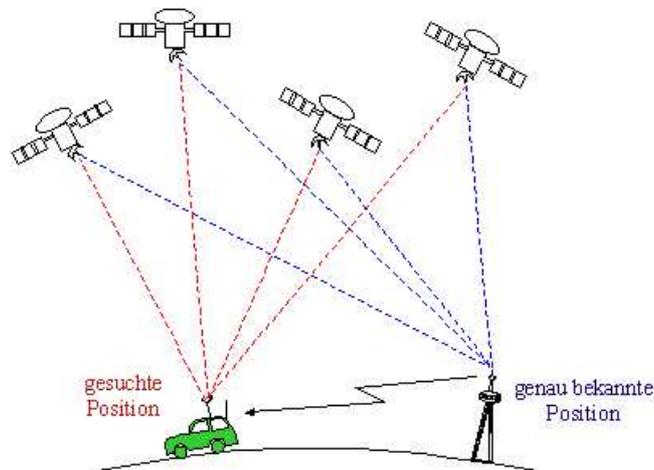


Abbildung 6: Prinzip des DGPS bei der Fahrzeugnavigation

Eine Voraussetzung dafür ist jedoch, daß diese Empfänger in der Lage sind, DGPS-Signale zu verarbeiten, und dadurch ihre eigene Positionsbestimmung zu optimieren. Diese Meßanordnung wird unter dem Begriff Differential-GPS (DGPS) geführt.

Fehlerquelle	Abs. Fehler	Differential C/A Code			
		0 [km]	200 [km]	1000 [km]	2000 [km]
Satellitenuhr	3,0	0	0	0	0
Bahndaten	2,7	0	0,1	0,5	1,0
Satelliten	31,7	0	0	0	0
Ionosphäre	6,0	0	1,4	3,1	4,3
Troposphäre	1,8	0	1,8	1,8	1,8
Empfänger	0,7	1,0	1,0	1,0	1,0
üRE (RMS)	33,3	1,0	2,5	3,8	4,8
Genauigkeit in der Ebene *	100,0	3,0	7,5	11,4	14,4

* Angabe in Metern: 2 sigma = 95%: HDOP = 1,5
 üRE = User Equivalent Range Error: RMS = Root Mean Square

Tabelle 2: Fehlerausgleich durch DGPS

Real Time Differential GPS über Langwelle

Das Real Time Differential GPS über Langwelle ist ein Gemeinschaftsvorhaben des Instituts für Angewandte Geodäsie, Außenstelle Potsdam, und der Deutschen Telekom AG und wird sich voraussichtlich zu einem kommerziell angebotenen DGPS-Dienst etablieren.

Nach umfangreichen Testmessungen mit Real Time Differential GPS im Institut für Angewandte Geodäsie Frankfurt am Main, Außenstelle Potsdam, wurde zur Funkausstellung 1995 in Berlin der Abschluß einer Entwicklung vorgestellt, welche die bundesweite Bereitstellung von DGPS/RTCM-Korrekturdaten (RTCM - Radio Technical Commission for Maritime Services) zum Ziel hat. Es sind zwei Komponenten, auf die sich diese Entwicklung stützt:

1.

Die Nutzung der Langwelle in Verbindung mit modernen Übertragungs- und Modulationsverfahren, welche die Überdeckung eines Gebietes größer als Deutschland durch den Betrieb eines einzigen Langwellensenders ermöglicht, nur geringe Abschattungen aufweist und den Einsatz kleiner, preiswerter Spezialempfänger gestattet. Perspektivisch ist deren Integration in den GPS-Empfänger vorgesehen.

2.

Die Bildung und Übertragung von DGPS-Korrekturdaten im standardisierten RTCM-Format, Version 2.0, und ihre Übertragung im Radio-Data-System (RDS) seit März 1995. Das Radio-Data-System ist hardwaremäßig realisiert und arbeitet mit einem standardisierten Format.

Die Korrekturdaten stehen in Echtzeit einem unbegrenzten Nutzerkreis zur Verfügung. Sie werden von der Sendefunkstelle Mainflingen (bei Frankfurt am Main) über 123,7 kHz RDS - codiert ausgestrahlt. Aus einem entsprechendem Langwellen - Empfänger können sie unmittelbar einem RTCM - fähigen GPS - Gerät zugeführt werden (RS232).

Real Time Differential GPS mit einem Genauigkeitslevel < 5 m ist ein Hilfsmittel für Ortungs- und Navigationsaufgaben. Diese Genauigkeit genügt vielen Anforderungen bei der Fahrzeugnavigation (Straßen-, Schiffs- und Flugverkehr), beim Flottenmanagement (Transport- und Taxiunternehmen), bei Rettungs- und Sicherheitsdiensten (Polizei, Feuerwehr, Krankentransport, Technisches Hilfswerk), in der Landwirtschaft, im Umweltschutz, bei der Container- und Lagerverwaltung und bei dem großen Spektrum der Geoinformationssysteme.

Real Time Differential GPS nutzt differentielle Techniken. Am Referenzpunkt werden durch den Vergleich gemessener (instantaner) Koordinaten mit den Sollwerten (Europäisches Referenzsystem EUREF) die DGPS-Korrekturdaten bezüglich der Entfernung der Satelliten (*pseudorange* und *pseudorange rate corrections*) berechnet.

Unter der Voraussetzung, daß am Ort des Nutzers eine Reihe von Fehlereinflüssen (Ionosphäre, Zeit, Satellitenbahn) die gleiche Größenordnung hat wie am Referenzpunkt, wird eine Positionsverbesserung errechnet. Gleichzeitig wird auch der SA - Effekt (*Selected Availability*) eliminiert, der die Genauigkeit des GPS - Systems einschränkt.

Die mit einem GPS-Empfänger auf einer Feldstation gemessenen Entfernungen zu den Satelliten werden gemeinsam mit den über Langwelle zu empfangenen Korrekturwerten zur Positionsbestimmung verwendet. Dadurch ist deren Unsicherheit von ca. 100 m auf < 5 m (2 sigma) reduziert. Vergleichsmessungen auf Punkten des genauesten Vermessungsnetzes der Bundesrepublik Deutschland haben diese Genauigkeiten bestätigt.

Auf der Basis einer Vereinbarung zwischen dem Institut für Angewandte Geodäsie in Frankfurt am Main und der Deutschen Telekom AG werden Konzepte realisiert, die 3 Ausbaustufen vorsehen. Nach dem Start und einer Demonstration auf der Internationalen Funkausstellung Berlin, im August 1995, wird eine Testphase folgen. In einer sich anschließenden Aufbauphase sind die Stabilisierung sowie die Absicherung und Überwachung (Monitorstation) in Verbindung mit einer Anzahl von Gerätedoppelungen und dem Einsatz einer neuen Software geplant. Die 3. Phase (Betrieb) wird auch eine Weiterentwicklung des Real Time Differential GPS einschließen.

Technische Konzeption des NAVSTAR-GPS

Das System NAVSTAR-GPS umfaßt die in Abbildung 7 genannten Segmente.

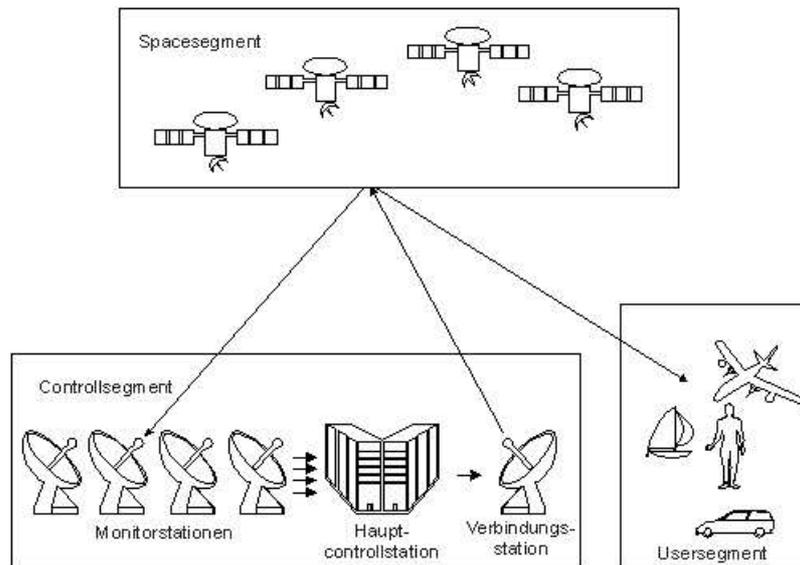


Abbildung 7: Segmente des GPS

Technische Realisierung der Signallaufzeitbestimmung / Entfernungbestimmung

Neben der Aufgabe des Codes den Satelliten eindeutig zu identifizieren, dient er gleichzeitig für die Laufzeitbestimmung der Signale und damit der Entfernungbestimmung. Die Phasenverschiebung, die notwendig ist, um die im Empfänger erzeugte Kopie des Codes mit dem ankommenden Signal zu synchronisieren (Korrelation), ist gleichzeitig ein Maß für die Signallaufzeit vom entsprechenden Satelliten zum Empfänger. Dazu zählt man im einfachsten Fall die Verschiebungen um einen Chip, die notwendig sind, die in Abbildung 8 dargestellte Synchronisation zu erreichen.

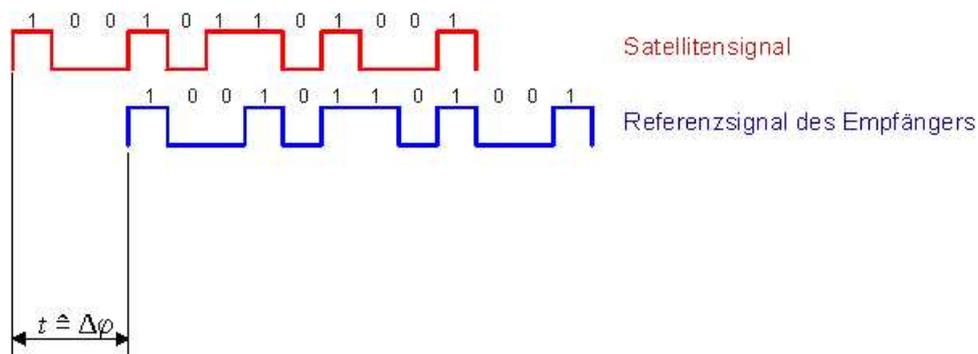


Abbildung 8: Code- bzw. Chipverschiebung zur Laufzeitbestimmung

Da die Chiplänge bekannt ist, folgt daraus unmittelbar eine Laufzeitdifferenz bezogen auf den im Empfänger erzeugten Vergleichscode.

Weltraumsegment (spacesegment)

Satellitenanzahl:	24 (21 + 3 Reserve)
Satelliten Typ:	Block II Satelliten (Größe: 5,20m / Masse: 862 kg)
Lebensdauer:	konzipiert für 5 Jahre (im Mittel)
Flughöhe:	20.183 km (MEO - medium earth orbit)
Bahnanzahl:	6 (4 Satelliten pro Bahn)

Sichtbarkeit:	4 Satelliten an jedem Ort der Erde
Inklination:	55° bezogen auf den Äquator
Erdumlaufdauer:	12h (früher 11h 58 min)
Energieversorgung:	Solarenergie mit Raumlagereregelsystem (Pufferung durch Akku)
Antenne:	Trägerausstrahlung mit annähernder Rundcharakteristik (omnidirektional)

Bodenkontrollsegment

Die Satelliten sind so konzipiert, daß ihre Funktionen automatisch ablaufen und sie sich selbst kontrollieren. Um jedoch ein Maximum an Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei der Positionsbestimmung zu gewährleisten, werden die Satelliten durch ein Kontrollzentrum überwacht.

1 x Hauptstation Colorado Springs (Uploading Station - Master Control Station)

deren Aufgaben sind:

- Steuerung und Kontrolle der Verbindungs - und Kontrollstationen
- Berechnung der Ephemeriden für jeden Satelliten
- Berechnen der Daten für das Almanach
- Berechnen der Korrekturen für die "Uhren" in den Satelliten
- Zusammenstellen von Zeit- und Formatdaten

3 x Verbindungsstationen Ascension Islands

Diego Garcia
(Kwajalein)

5 x Kontrollstationen Colorado Springs (MCS = Monitorstationen)

Ascension
Kwajalein
Hawaii
Diego Garcia

Die Nachrichtenverbindung Boden - Satellit über die Verbindungsstationen für die Aktualisierung der Satelliten alle 24 (8) Stunden arbeitet im S-Band [2...4 GHz].

Nutzersegment (GPS-Empfänger)

Das Nutzersegment umfaßt alle Nutzer mit ihren verschiedenartigen GPS-Empfängern.

Funktionen eines GPS-Empfänger:

- Träger L₁ und L₂ empfangen
- C/A-Code von jedem der vier empfangsgünstigsten Satelliten erfassen (Signalacquisition) und demodulieren
- Codesequenz - Synchronisation vollziehen
- Satellitendaten (Navigationsmitteilung) aus dem C/A-Code demodulieren
- Übergabe des C/A-Code - Signals zum P-Code - Signal (sofern erwünscht)
- P-Code von jedem der vier empfangsgünstigsten Satelliten erfassen (Signalacquisition) und demodulieren
- Berechnung der Pseudodistanz von jedem der vier Satelliten
- Berechnung der Zeitabweichung
- Messen der Dopplereffrequenzverschiebung zur Berechnung der Eigengeschwindigkeit
- Pseudodistanzen, Zeitabweichungen, Dopplereffrequenzverschiebungen und Satellitendaten an den Navigationsprozessor transferieren

Je nach Anwendungsfall werden im Navigationsprozessor die Daten zu folgenden Angaben verarbeitet

und gegebenenfalls mit anderen Ortungs- und Navigationssystemen verknüpft:

- erdbezogene dreidimensionale Koordinaten des momentanen Standortes des Nutzers (z.B. WGS 84)
- zielweisende Informationen
- Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung
- Kurs- und Entfernungsangaben zu wählbaren Punkten (Zielführungssysteme, Pathfinder)
- Uhrzeitangaben (globale Systemzeit sehr hoher Genauigkeit)

Die für die Genauigkeit der Entfernungsmessung maßgebende Funktion liegt in dem Vorgang des Erfassens (*Acquisition*), Nachführung, Synchronisation und Einrasten der Codesequenzen im Rahmen eines Korrelationsprozesses. Für den Empfänger ist es relativ einfach, den C/A-Code zu erfassen, und auf ihn einzurasten. Die für das Einrasten erforderliche Phasenverschiebung wird als Laufzeit bzw. Pseudolaufzeit bezeichnet. Sie beinhaltet die Abweichung der Uhr des Nutzers sowie die Laufzeitverzögerungen in der Ionosphäre. Mit dem C/A-Code wird eine Genauigkeit erreicht (100m), die der Laufzeit eines Bruchteils der reziproken Taktfrequenz entspricht.