

## Vorlesung zur Veranstaltung Vermessungskunde

### Skript Teil 8: GNSS



Ein **Globales Navigationssatellitensystem** (engl. *Global Navigation Satellite System*) oder **GNSS** ist ein System zur Positionsbestimmung und Navigation auf der Erde und in der Luft durch den Empfang der Signale von Navigationssatelliten und Pseudoliten (= Technische Hilfsmittel, die Satelliten ersetzen).

Um Sinn und Problematik von GNSS zu verstehen, müssen zunächst die Zusammenhänge der Koordinatensysteme erläutert werden.

Geodätische Koordinatensysteme haben i.d.R., im Gegensatz zu mathematischen Koordinatensystemen, in der Vermessung die y-Achse als Rechtsachse und die x-Achse als Hochachse.

Häufig findet man folgende synonyme Bezeichnungen:

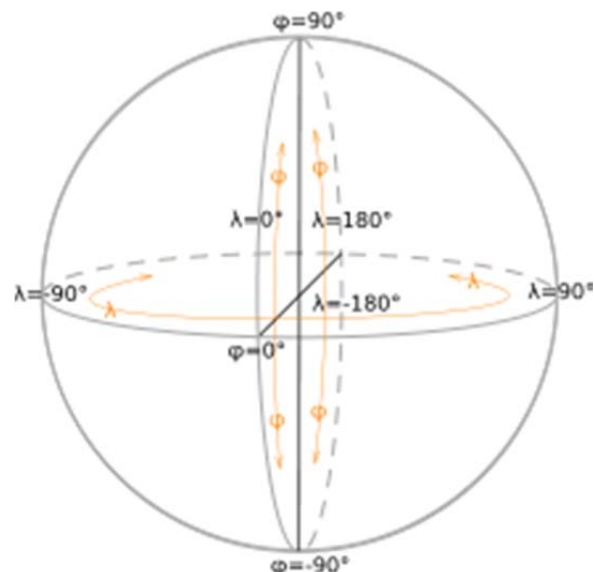
x-Wert, Hochwert, Nordwert, North und  
y-Wert, Rechtswert, Ostwert, East

Das Lage- und das Höhensystem werden in der Vermessung häufig getrennt voneinander betrachtet. In großräumigen Bereichen entwickeln sich hieraus oft sehr komplexe Problemstellungen der Koordinatentransformation (s. Abschnitte Nivellement und Koordinatentransformationen). In kleinräumigen Bereichen wird die Trennung nach Höhe und Lage vernachlässigt, so dass in diesen Fällen in (lokalen) kartesischen Koordinatensystemen gerechnet wird.

### Geographische Koordinaten

Mit den geographischen Koordinaten (geographische Breite und geographische Länge) lässt sich die Lage eines Punktes auf der Erde beschreiben. Die Erde wird dabei in 360 Längengrade ( $\lambda$  von  $180^\circ$  W bis  $180^\circ$  O) und 180 Breitengrade ( $\varphi$  von  $90^\circ$  N bis  $90^\circ$  S) aufgeteilt. Längengrade (Meridiane) verlaufen durch Nord- und Südpol, Breitengrade parallel zum Äquator.

Geographische Koordinaten werden häufig im Sexagesimalsystem angegeben, d. h. 1 Grad ist unterteilt in sechzig Minuten und 1 Minute in 60 Sekunden.



Während der Abstand zwischen zwei Breitenkreisen immer konstant 111.3 km beträgt, variiert der Abstand zwischen zwei Längengraden in Abhängigkeit von der geografischen Breite:

Am Äquator ist er ebenfalls 111.3 km, an den Polen hingegen 0 km. Genauer gesagt, berechnet sich der Abstand  $dL$  zweier Längengrade nach der Formel

$$dL = 111.3 * \cos\varphi$$

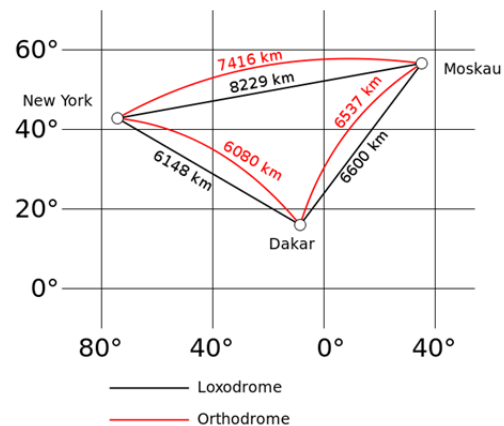
Berechnungen in geographischen Koordinatensystemen sind recht aufwendig. Zum einen muss immer die oben gezeigte Breitenabhängigkeit berücksichtigt werden. Zum anderen gibt es drei unterschiedliche Strecken zwischen zwei Punkten auf der Oberfläche, die besondere Bedeutung haben.

Zunächst gibt es die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten. Diese läuft durch die Erde und nicht entlang der Oberfläche. Sie ist deshalb nur selten gesucht.

Die zweite Verbindung ist die, bei der eine (Himmels-)Richtung exakt eingehalten wird. Man nennt diese Verbindung Loxodrome. Sie war früher wichtig in der Seefahrt.

Die kürzeste Verbindung zweier Punkte auf der Oberfläche wird durch die Orthodrome dargestellt. Orthodrome lägen bei einer Kugel auf einem Großkreis mit dem Kreismittelpunkt im Kugelmittelpunkt. Flugzeuge nutzen, wenn möglich, Orthodrome.

Die Berechnung von Abständen zweier Punkte für alle drei genannten Fälle ist, wenn sie exakt erfolgen soll, nicht trivial und soll deshalb hier nicht erläutert werden.



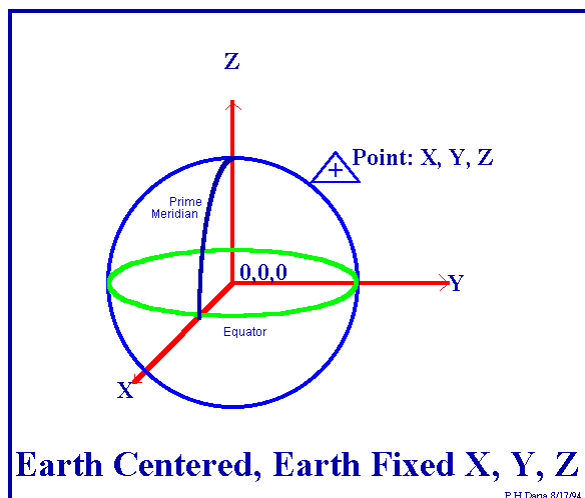
## Kartesische Koordinaten

Die Nutzung von kartesischen Koordinaten X, Y, Z setzt die Kenntnis eines Referenzellipsoides voraus. Ein Referenzellipsoid legt die Länge der Halbachsen und die Lagerung des Koordinatensystems fest.

Es gibt lokal best-angepasste Referenzellipsoide und globale Referenzellipsoide.

Für Deutschland sind insbesondere das Bessel-Ellipsoid (lokal) und das WGS84 (global) von herausragender Bedeutung.

Kartesische Koordinaten sind für Berechnungen einfacher zu handhaben als geographische Koordinaten. Man erhält kartesische Koordinaten aus geographischen Koordinaten durch folgende Berechnung, sofern beide Systeme dasselbe Geozentrum aufweisen und in Richtung der Rotationsachse (Z) sowie des Nullmeridians (X) ausgerichtet sind:



$$\begin{aligned}
X &= (N_\varphi + h) \cos \varphi \cdot \cos \lambda; \\
Y &= (N_\varphi + h) \cos \varphi \cdot \sin \lambda; \\
Z &= (N_\varphi(1 - \varepsilon^2) + h) \sin \varphi;
\end{aligned}$$

mit

*a*- große Halbachse (Parameter des Referenzellipsoids)

*b*- kleine Halbachse (Parameter des Referenzellipsoids)

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

$$N_\varphi = \frac{a}{\sqrt{1 - \varepsilon^2 \sin^2 \varphi}}$$

$\varepsilon$  nennt sich numerische Exzentrizität und  $N_\varphi$  Krümmungsradius des Ersten Vertikals, d.h. der Abstand des Lotfußpunktes vom Schnittpunkt des verlängerten Lots mit der Z-Achse.

Orthodrome und Loxodrome lassen sich hiermit jedoch auch nicht einfacher berechnen.

Die Rückrechnung von kartesischen, geozentrischen Koordinaten in geographische Koordinaten ist wesentlich aufwendiger, da sich oben stehende Gleichungen nicht einfach nach  $\lambda$  und  $\varphi$  auflösen lassen.

## Kartenprojektion

Zur sinnvollen Handhabung müssen die Koordinaten an der Erdoberfläche in eine Ebene abgebildet werden. Leider ist es nicht möglich, eine Kugel verzerrungsfrei in eine Ebene abzubilden. Um die Verzerrungen so gering wie möglich zu halten und gleichzeitig die Winkel zumindest im Kleinen zu erhalten, hat sich die Mercator-Projektion als zweckmäßig herausgestellt.

Hierbei wird ein Projektionszylinder mit der mittleren Krümmung der Längengrade und der Mittelachse in der Äquatorebene in den Erdkörper gelegt.

Bei der **Gauß-Krüger-Projektion** berührt der Zylinder die Erde am Bezugsmeridian (Mittelmeridian), bei der **UTM-Projektion** handelt es sich um einen Schnittzylinder, der die Erde im Abstand von 180,5 km vom Bezugsmeridian schneidet.



## Gauß-Krüger-Koordinaten

Gauß-Krüger-Koordinaten decken jeweils 3° breite Streifen ab. Breitere Streifen wären wenig sinnvoll, da zum Rand der Streifen die Abbildungsverzerrung immer größer wird. Die Gauß-Krüger-Koordinaten (GK-Koordinaten) haben ihren Ursprung im Schnittpunkt von Bezugsmeridian und Äquator. Die eine Koordinate zählt vom Ursprung positiv nach Osten (Rechtswert, Y), die andere Koordinate positiv nach Gitternord (Hochwert, X). Man liest die Rechts- und Hochwerte wie in jedem kartesischen Koordinatensystem ab, also parallel zu den

Achsen und nicht zu den jetzt bogenförmig verlaufenden Linien der Längen- und Breitenkreise.

Die Rechts- und Hochwerte werden in der SI-Einheit Meter angegeben. So gibt der Hochwert die Entfernung vom Äquator auf dem längentreu abgebildeten Mittelmeridian bis zum Ordinatenfußpunkt und der Rechtswert die (verzerrte) Entfernung vom Mittelmeridian bis zum Punkt an. Um negative Werte bei den Rechtswerten zu vermeiden, wird zu diesem Wert beim Gauß-Krüger-Meridianstreifensystem in Deutschland ein konstanter Wert von 500.000 m addiert.

Dem Rechtswert wird noch die Kennziffer des Mittelmeridians voran geschrieben (Kennziffer 0 = 0°-Meridian, 1 = 3°-Meridian, 2 = 6°-Meridian etc.); also auf Position der siebten Vorkomastelle. Bei der Nennung von Koordinaten werden diese üblicherweise in der Reihenfolge *Rechtswert* und *Hochwert* angegeben.

Beispiel: Der Paradeplatz in Mannheim hat folgende Koordinaten

- geografisch (WGS84): 49° 29' 13.6" N / 8° 27' 58.6" E
- Gauß-Krüger: Rechtswert 3461404 m, Hochwert 5483498 m

Aus dem Rechtswert ist durch die Kennziffer "3" ersichtlich, dass als Bezugsmeridian 9° Ost verwendet wird. Da 461404 kleiner als 500000 ist, ist ersichtlich, dass die Position 38.596 m westlich des Bezugsmeridians liegt.

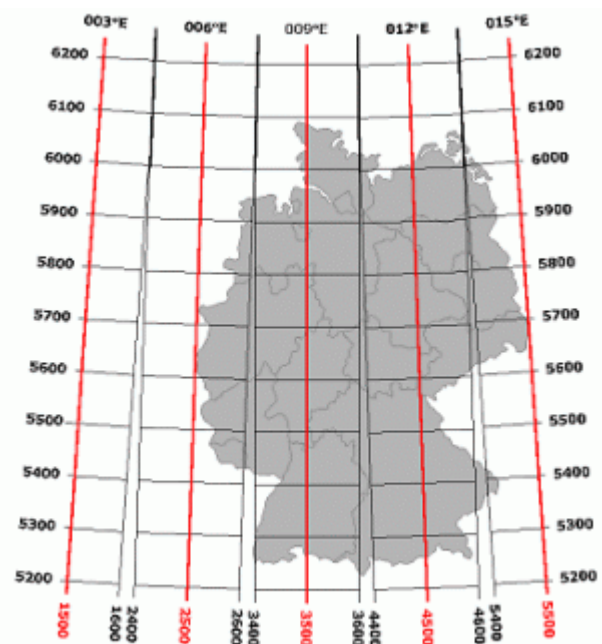
Jedes System hat nach einem Beschluss der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) vom Jahr 1966 nach beiden Seiten eine Ausdehnung von 1° 40', so dass sich zwei benachbarte Systeme mit einem 20 Längenminuten (im Mittel etwa 23 km) breiten Streifen überdecken. In dieser Überlappungszone werden für jeden Punkt die Koordinaten im jeweiligen Meridianstreifen und die Koordinaten des benachbarten Meridianstreifens angegeben.

Dadurch sind geodätische Messungen und Berechnungen in gewissen Umfang auch über den Meridianstreifenrand hinaus möglich, ohne den Streifen wechseln zu müssen.

## 1.1 UTM-Koordinaten

Das UTM-Koordinaten- und das Gauß-Krüger-Meridianstreifensystem benutzen bis auf einen Maßstabsfaktor die gleichen Abbildungsgleichungen (transversale konforme Zylinderabbildung) zur Verebnung der Oberfläche des Erdellipsoids.

Der hauptsächliche Unterschied besteht darin, dass dem Gauß-Krüger-Meridianstreifensystem in Deutschland das Bessel- oder das Krassowski-Ellipsoid zugrunde liegen und 3° breite Meridianstreifen verwendet werden, während sich UTM-Koordinaten auf das WGS84- bzw.



das GRS80-Ellipsoid beziehen und 6° breite Meridianstreifen benutzen. Mit wachsender Streifenbreite nehmen bei dieser konformen Abbildungsart die Streckenverzerrungen zum äußeren Rand der Streifen hin erheblich zu. Zum Ausgleich der durch die breiteren Meridianstreifen bedingten stärkeren Längen- und Winkelverzerrungen an den Zonenrändern wird beim UTM-System ein Maßstabsfaktor von 0,9996 angebracht. Der Mittelmeridian wird dadurch um den Faktor 0,9996 (40 cm / km) verkürzt dargestellt. Dieser Faktor ist so erheblich, dass er unbedingt berücksichtigt werden muss, da alle gängigen Messinstrumente viel genauer sind. Auch bei Bauwerken wie Brücken macht sich ein Unterschied von 4 cm auf 100 m bemerkbar. Mit zunehmendem Abstand vom Mittelmeridian nach Osten oder nach Westen verringert sich diese Verkürzung aufgrund der anwachsenden Abbildungsverzerrung innerhalb der Zone. Bei 180,5 km Abstand (hier schneidet der Abbildungszyylinder die Erde) verschwindet die Längenverzerrung.

Es wäre grob fehlerhaft Strecken, die aus UTM-Koordinaten berechnet werden pauschal durch Verwendung eines konstanten Maßstabsfaktor von  $1:0,9996 \approx 1,0004$  in „richtige“ Strecken zu verwandeln. Da der Maßstabsfaktor davon abhängt, wie weit man sich vom Bezugsmeridian entfernt, muss dies in der Berechnung berücksichtigt werden. Sofern Anfangs- und Endpunkt der Strecke ähnliche Rechtswerte haben, kann für die Berechnung der „UTM-Strecken“ aus realen Strecken folgende Formel verwenden:

$$S_{\text{UTM}} = S_{\text{real}} * 0,9996 * (1 + (RW - 500 \text{ km})^2 / 2 r^2)$$

darin ist RW der mittlere Rechtswert der beiden Streckenendpunkte in km und r der mittlere Krümmungsradius des WGS84-Ellipsoides ( $r = 6.382 \text{ km}$ ).

Die Umkehrung (Berechnung der realen Strecken aus „UTM-Strecken“) ergibt sich zu:

$$S_{\text{real}} = S_{\text{UTM}} * 1,0004 / (1 + (RW - 500 \text{ km})^2 / 2 r^2)$$

Bei Strecken mit großer Ost-Westausdehnung kann die Formel nicht verwendet werden, da die Maßstabsänderung nicht linear mit der Änderung des Rechtswertes erfolgt. Exakte Berechnungsformeln für diesen Fall findet man in der Fachliteratur.

Des Weiteren muss darauf hingewiesen werden, dass die Formel nur streng gilt, wenn die Punkte eine ellipsoidische Höhe (nicht NN-Höhe!) von 0 haben.

Ansonsten muss noch eine Höhenreduktion erfolgen.

$$S_{\text{reduziert}} = S_{\text{real}} * [1 - h_{\text{ell.}} / r]$$

Strukturelle Unterschiede zwischen beiden Systemen bestehen in den verschiedenen Vorgehensweisen bei der Benennung der Streifen und der Koordinaten. Da das UTM-System ursprünglich als Meldesystem für das amerikanische Militär eingeführt wurde, ist die Benennung bei UTM *planquadratorientiert* im Gegensatz zur *streifenorientierten* Bezeichnung im GK-System. Die Koordinatenwerte beim UTM-System sollte man zur Abgrenzung zu denen des Gauß-Krügersystems (Rechts- und Hochwert) am besten mit East und North bzw. Ost- und Nordwert bezeichnen.

In Deutschland erfolgt derzeit ein Übergang von den Gauß-Krüger-Koordinaten (Potsdam-Datum, Bessel/Krassowski-Ellipsoid) auf das UTM-System unter Bezug auf das ETRS89 mit dem GRS80-Ellipsoid. In der Öffentlichkeit ist die Problematik, insbesondere der komplizierten Berücksichtigung eines Maßstabsfaktors, bisher noch nicht „angekommen“.

## Arbeitsweise eines GNSS

GNSS-Satelliten teilen über Funk ihre genaue Position und Uhrzeit mit. Zur Positionsbestimmung muss ein Empfänger die Signale von mindestens vier Satelliten gleichzeitig empfangen. Im Empfangsgerät werden dann die vier Signallaufzeiten (von den Satelliten zur Empfangsantenne) errechnet. Daraus werden dann die aktuelle Position (inklusive der Höhe) und die genaue Empfängeruhrzeit ermittelt.

Bei der Standortbestimmung über Satelliten misst man de facto die Laufzeiten der Signale von mindestens vier Satelliten. Jede dieser (Pseudo-)Entfernungen definiert eine Kugelfläche um den zugehörigen Satelliten, auf der sich der Empfänger befindet. Zwei Kugelflächen schneiden sich in einem Kreis und drei Kugelflächen ergeben maximal zwei Punkte als Schnittmenge (wenn man vom geometrischen Fall eines gleichen Radius und Mittelpunkts absieht, was in diesem technischen Kontext nicht möglich ist). Einer davon befindet sich einige tausend Kilometer von der Erdoberfläche entfernt und kann somit verworfen werden; der andere stellt die gesuchte Position des Empfängers dar. Ein vierter Satellit wird benötigt, um die Abweichung zwischen den Uhren der GNSS-Satelliten und der des Empfängers zu ermitteln und aus den gemessenen Laufzeiten herauszurechnen, d. h. die Pseudoentfernungen in tatsächliche Entfernungen umzurechnen.

## Systemaufbau

Ein GNSS besteht i.d.R. aus drei Segmenten:

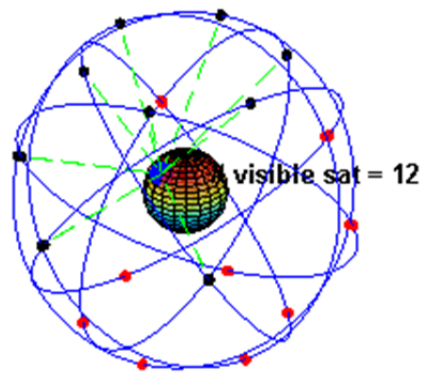
- *Satelliten im Weltraum*: Satelliten umkreisen in regelmäßigen Intervallen die Erde (oder Teile davon) und senden Signale, die mit geeigneten Empfängern registriert werden. Hierzu ist jeder Satellit mit einer Uhr, einem Mikroprozessor, einem Sender und einer Antenne ausgestattet.
- *Kontrollstation*: Die Bahnkoordinaten der Satelliten werden von der Erde aus bestimmt, die Satelliten senden kontinuierlich Signale und Zusatzinformationen aus, die von den Anwendern für die Positionierung, in der Geodäsie zur *Koordinatenbestimmung* bzw. zur Navigation (Kurs, Geschwindigkeit) verarbeitet werden.
- *Nutzer*: Empfang der Signale von mindestens 4 Satelliten, Messung der Pseudo-Laufzeiten, Berechnung der Position und Systemzeit.

## Global Positioning System - GPS

Der folgende Text befasst sich mit dem US-Satellitensystem NAVSTAR GPS, dem meist verbreiteten GNSS.



NAVSTAR-Satellit der zweiten Generation



Bewegung der Satelliten über der Erde

**Global Positioning System (GPS)**, offiziell **NAVSTAR GPS**, ist ein globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung und Zeitmessung. Es wurde seit den 1970er-Jahren vom US-Verteidigungsministerium entwickelt und löste ab etwa 1985 das alte Satellitennavigationssystem **NNSS** (Transit) der US-Marine ab, ebenso die Vela-Satelliten zur Ortung von Atombombenexplosionen. GPS ist seit Mitte der 1990er-Jahre voll funktionsfähig und stellt seit der Abschaltung der künstlichen Signalverschlechterung (Selective Availability) am 2. Mai 2000 auch für zivile Zwecke eine Ortungsgenauigkeit in der Größenordnung von oft besser als 10 Meter sicher. Die Genauigkeit lässt sich durch Differenzmethoden (Differential-GPS / DGPS) in der Umgebung eines Referenzempfängers auf Werte im Zentimeterbereich oder besser steigern. Mit den satellitengestützten Verbesserungssystemen (SBAS), die ebenfalls zur Klasse der DGPS Systeme gehören, werden bis auf die Polargebiete kontinentweit Genauigkeiten von einem Meter erreicht. GPS hat sich als das weltweit wichtigste Ortungsverfahren etabliert und wird in Navigationssystemen weitverbreitet genutzt.

Die offizielle Bezeichnung ist „**Navigational Satellite Timing and Ranging - Global Positioning System**“ (NAVSTAR GPS). NAVSTAR wird manchmal auch als Abkürzung für „**Navigation System using Timing and Ranging**“ genutzt. GPS wurde am 17. Juli 1995 offiziell in Betrieb genommen.

### **Einsatzgebiete**

GPS war ursprünglich zur Positionsbestimmung und Navigation im militärischen Bereich (in Waffensystemen, Kriegsschiffen, Flugzeugen) usw. vorgesehen. Ein Vorteil ist dabei, dass GPS-Geräte nur Signale empfangen und nicht senden. So kann navigiert werden ohne dass der Feind Informationen über den eigenen Standort erhält. Heute wird es jedoch vermehrt auch im zivilen Bereich genutzt: in der Seefahrt, Luftfahrt, durch Navigationssysteme im Auto, zur Positionsbestimmung und -verfolgung im ÖPNV, zur Orientierung im Outdoor-Bereich, im Vermessungswesen etc. In der Landwirtschaft wird es beim so genannten Precision Farming zur Positionsbestimmung der Maschinen auf dem Acker genutzt. 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



### *Das GPS-Messsystem: Antenne und Empfänger*

GPS basiert auf Satelliten, die mit kodierte Radiosignale ständig ihre aktuelle Position und die genaue Uhrzeit ausstrahlen. Aus den Signallaufzeiten können spezielle GPS-Empfänger dann ihre eigene Position und Geschwindigkeit berechnen. Theoretisch reichen dazu die Signale von drei Satelliten aus, welche sich oberhalb ihres Abschaltwinkels befinden müssen, da daraus die genaue Position und Höhe bestimmt werden kann. In der Praxis haben aber GPS-Empfänger keine Uhr, die genau genug ist, um die Laufzeiten korrekt messen zu können. Deshalb wird das Signal eines vierten Satelliten benötigt, mit dem dann auch die genaue Zeit im Empfänger bestimmt werden kann.

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 Sterntag zweimal in einer mittleren Bahnhöhe von 20.200 km umkreisen. Jeweils mindestens vier Satelliten bewegen sich dabei auf jeweils einer der sechs Bahnebenen, die  $55^\circ$  gegen die Äquatorebene inkliniert (geneigt) sind und gegeneinander um jeweils  $60^\circ$  verdreht sind. Ein Satellit ist damit zweimal in 23 Stunden 55 Minuten und 56,6 Sekunden über demselben Punkt der Erde und jeden Tag etwa vier Minuten früher auf dieser Position.

Ein Satellit hat eine erwartete Lebensdauer von 7,5 Jahren, doch funktionieren die Satelliten häufig deutlich länger (im Schnitt bisher fast 15 Jahre). Um Ausfälle problemlos zu verkraften, wurden daher bis zu 32 Satelliten in den Orbit gebracht, sodass man auch bei schlechten Bedingungen fünf oder mehr Satelliten verwenden kann. Aktuell benötigt man 60 Tage für das Austauschen eines Satelliten; aus Kostengründen versucht man, diesen Zeitraum auf zehn Tage zu senken.



## Gesendete Daten

Das Datensignal mit einer Datenrate von 50 bit/s und einer Rahmenperiode von 30 s wird parallel mittels Spread Spectrum Verfahren auf zwei Frequenzen ausgesendet:

- Auf der **L1-Frequenz (1575,42 MHz)** werden der C/A-Code („Coarse/Acquisition“) für die zivile Nutzung, und orthogonal dazu der nicht öffentlich bekannte P/Y-Code („Precision/encrypted“) für die militärische Nutzung eingesetzt. Das übertragene Datensignal ist bei beiden Codefolgen identisch und stellt die 1500 Bit lange Navigationsnachricht dar. Sie enthält alle wichtigen Informationen zum Satelliten, Datum, Identifikationsnummer, Korrekturen, Bahnen, aber auch den Zustand, und benötigt zur Übertragung 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 enthalten und zur Übertragung über zwölf Minuten benötigen.
- Die zweite Frequenz **L2-Frequenz (1227,60 MHz)** überträgt nur den P/Y-Code. Wahlweise kann auf der zweiten Frequenz auch der C/A-Code übertragen werden. Durch die Übertragung auf zwei Frequenzen können ionosphärische Effekte, die zur Erhöhung der Laufzeit führen, herausgerechnet werden, was die Genauigkeit steigert.
- 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. Der Regelbetrieb sollte 2013 starten, hat sich aber auf unbestimmte Zeit verzögert.

## 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.

Die endgültige 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).

Die beim C/A-Code eingesetzten LFSR-Generatorpolynome erlauben maximal 1023 Codephasenverschiebungen, wovon ungefähr 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.

Der zuschaltbare künstliche Fehler Selective Availability, der seit dem Jahr 2000 nicht mehr eingesetzt wird, wurde bei dem C/A-Code dadurch erreicht, dass die zeitliche Ausrichtung (Taktsignal) der Chips einer geringen zeitlichen Schwankung (Jitter) unterworfen wurde. Die regionale Störung von GPS-Signalen wird durch das US-Militär durch Jammer erreicht und macht damit GPS nicht in jedem Fall zu einem verlässlichen Orientierungsmittel, da nicht verlässlich feststellbar ist ob und wie weit GPS-Signale von den tatsächlichen UTM/MGRS-Koordinaten abweichen.

### **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.

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.

### **Ausbreitungseigenschaften des Signals**

In den verwendeten Frequenzbereichen breitet sich die elektromagnetische Strahlung ähnlich wie sichtbares Licht fast geradlinig aus, wird dabei aber durch Bewölkung oder Niederschlag nur wenig beeinflusst. Dennoch ist auch aufgrund der geringen Sendeleistung der GPS-Satelliten für den besten Empfang der Signale eine direkte Sichtverbindung zum Satelliten erforderlich. In Gebäuden war ein GPS-Empfang bis vor kurzem nicht möglich. Neue Empfängertechnik ermöglicht jedoch nun unter günstigen Bedingungen 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, zum Beispiel wenn nur drei dicht beieinander stehende Satelliten aus einer Richtung zur Positionsberechnung zur Verfügung stehen. Für eine exakte Positionsermittlung sollten mindestens vier Satellitensignale aus möglichst 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.

### **Kategorisierung**

Es gibt zwei Dienstklassen:

- **Standard Positioning Service (SPS)** ist für jedermann verfügbar und erreicht eine Genauigkeit (engl. *accuracy*) von ca. 15 m horizontal (in 95 % der Messungen). Nach stetigen Verbesserungen vor allem durch den sukzessiven Ersatz älterer Satelliten durch Nachfolgemodelle wird aktuell eine Genauigkeit von 7,8 m horizontal garantiert (in 95 % der Messungen).

Mit der vierten Ausbaustufe soll in Krisen- bzw. Kriegsgebieten eine künstliche Verschlechterung (Selective Availability) durch lokale Störung des Empfangs verwirklicht werden.

- **Precise Positioning Service (PPS)** ist der militärischen Nutzung vorbehalten und ursprünglich auf eine Richtigkeit von 22 m (in 95 % der Messungen; die aktuelle Richtigkeit ist unbekannt) ausgelegt worden. Die aktuell realisierte Genauigkeit liegt aufgrund verbesserter Auswertelgorithmen deutlich besser (<1m). Diese Signale werden verschlüsselt ausgestrahlt.

Eine Erhöhung der Genauigkeit (0,01–5 m) kann durch Einsatz von DGPS (Differential-GPS) oder satellitengestützten Erweiterungssystemen (**Satellite-Based Augmentation Systems, SBAS**) erreicht werden.

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 (2009) auf 15 Sekunden aufsummiert (UTC-Zeit + 15 Sekunden = GPS-Zeit). 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 verwenden 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 sowie Richtungsdaten (z. B. Differential-Odometer, Drehratensensor) verwertet werden, um die Position präziser zu bestimmen oder auch noch in Funklöchern wie z. B. Tunneln eine Position ermitteln zu können. Da diese Daten nur von den in der Fahrzeugelektronik implementierten Sensoren gemessen und an das Navigationssystem übermittelt werden können, ist diese höhere Präzision derzeit nur von festeingebauten Navigationssystemen zu erreichen.

In wie weit sich die Nutzung einer dritten Frequenz (GPS-Satelliten der neuesten Generation) auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung auswirkt, muss sich noch zeigen.

## **Relativistische Effekte**

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

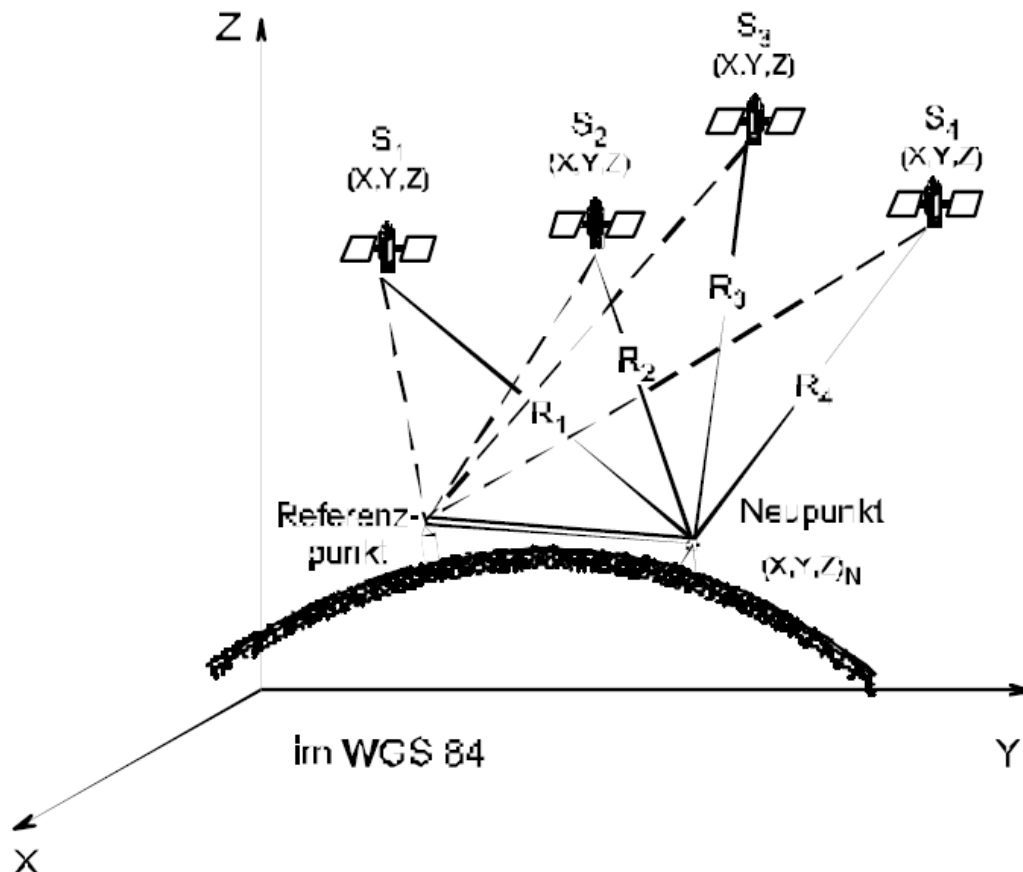
Zeit schneller vergehen, die Bahnbewegung der Satelliten relativ zu einem ruhenden Beobachter auf der Erde verzögert sie. In einer Flughöhe von ca. 3.000 km heben sich beide Effekte gerade auf, in der GPS-Satellitenbahn überwiegt der gravitative Effekt um mehr als das 6-fache. Auf den Satelliten geht damit die Zeit vor. Der relative Gangunterschied ( $= \Delta t/t$ ) 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 als  $10^{-14}$  sind.

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 drei 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 wird die präzise Zeit am Empfangsort auch aus dem C/A-Code der empfangenen Satelliten bestimmt. Aus diesem Grund sind für eine 3D-Positionsbestimmung mindestens vier Satelliten erforderlich (vier Laufzeitsignale zur Bestimmung von vier Parametern, nämlich drei Ortsparametern und der Zeit). Weil alle Satelliten den gleichen relativistischen Effekten ausgesetzt sind, entsteht hierdurch ein vernachlässigbarer Fehler bei der Positionsbestimmung, weil sich dieser Fehler nur über den Laufzeitunterschied auswirkt.

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 sind so klein, dass sie bei stationären Empfängern nicht gesondert berücksichtigt werden müssen.

### **Relative Messverfahren: Differential-GPS**

Differential Global Positioning System (DGPS) ist eine Sammelbezeichnung für Verfahren, die simultan mehrere GPS-Empfänger einsetzen, um die Genauigkeit zu erhöhen. DGPS macht sich das Faktum zunutze, dass die zu einem bestimmten Zeitpunkt wirksamen Fehler des GPS-Systems auf nahegelegenen Messpunkten fast dieselben sind, sodass sie in der *Differenz* herausfallen.



*Absolute und relative Positionierung mit GPS*

Um Genauigkeiten für die Nutzung von GPS in der Geodäsie zu erreichen, sind Messungen von zwei Frequenzen notwendig sowie die Bestimmung von 3D-Koordinatendifferenzen zwischen zwei Stationen. Damit erreicht man Genauigkeiten im cm bis mm-Bereich, da die Systemunsicherheiten, wie die Bahnfehler oder atmosphärische Einflüsse für den Differenzvektor (baseline vector) herausfallen.

Bei diesem differentiellen GPS (DGPS) werden die Koordinaten der Punkte nicht mehr absolut sondern in Relation zu einer Referenzstation, deren Koordinaten bekannt sind, bestimmt.

Für die Positionierung im dm-, cm- oder mm-Bereich ist der Übergang von den geometrisch eindeutigen Code-Informationen zur Messung der Phasen der Trägerwellen

- L1 = 1575,42 MHz  $\triangleq$  19 cm (C/A und P-Code aufmoduliert)
- L2 = 1227,60 MHz  $\triangleq$  24 cm (P-Code aufmoduliert)

erforderlich. Diese Wellenlängen können bis auf 1 mm aufgelöst werden, sind jedoch nur innerhalb der einfachen Wellenlänge eindeutig. Daraus ergibt sich das Problem der Mehrdeutigkeit der Lösung, das für hochgenaue Positionierungen die Hauptschwierigkeit bei der Übertragung von Korrekturdaten und in der Auswertung darstellt.

Man verwendet einen oder mehrere Empfänger, deren Position bestimmt werden soll (Rover), und mindestens einen weiteren Empfänger, der auf einem genau bekannten Vermessungspunkt aufgestellt wird (GPS-Basisstation oder Referenzstation). Auf der Basisstation werden die momentan wirksamen Messfehler des Systems ermittelt, die vor allem auf Uhr- und Bahnfehler der Satelliten und Einflüsse der Ionosphäre entfallen. Mit

diesen Informationen (Korrekturdaten) der Basisstation kann ein Rover-Empfänger seine Genauigkeit erhöhen, da er praktisch denselben Messabweichungen unterliegt.

Die erreichbare Genauigkeit hängt vor allem vom Abstand zwischen Rover und Basisstation ab, aber auch von der Satellitenkonstellation.

### **Offline-Methode (Postprocessing)**

Man kann die Messdaten (die empfangenen Satellitensignale) entweder für eine nachträgliche Auswertung aller Messpunkte aufzeichnen (*offline*) oder die Positionskorrekturen der Basisstation *online* an alle Rover übermitteln. Erstere Methode wurde vor allem in der Anfangszeit von GPS verwendet, ist aber bis heute für genaue Vermessungsnetze in Gebrauch. Die Berechnung erfolgt durch einen räumlichen Netzausgleich, der entweder auf den Signal-Laufzeiten oder auf ihrer Phasenmessung beruht. Wenn Genauigkeiten von dm...m ausreichen, genügt auch die Ausgleichung der von den Empfängern direkt berechneten Positionen.

Für weit ausgedehnte Vermessungsnetze kann es notwendig sein, diese in überlappende Abschnitte zu unterteilen, die sogenannten Sessions. Mit den vorhandenen Empfängern wird ein Teil der Punkte und ein bis drei Referenzpunkte gleichzeitig eingemessen; mittels letzteren kann das gesamte Netz a posteriori einheitlich ausgeglichen werden. Auch eine nachträgliche „Anfelderung“ einzelner Netzteile ist möglich.

### **Online-Methoden (Korrektursignale)**

Im Allgemeinen werden jedoch die Korrekturdaten der Referenzstation(en) direkt an alle Empfänger gefunkt oder – im Falle regionaler Permanentstationen – auch über das Internet verbreitet.

Durch telefonische oder Funkübertragung der Korrekturdaten einer Basisstation kann jeder Rover sofort seine Ortungsgenauigkeit erhöhen. Eine feinere Korrektur kann auch im Nachhinein erfolgen, wenn Rover und Basisstation alle Daten zur Positionsbestimmung aufzeichnen (Postprocessing).

Die Korrekturdaten können vom Anwender selbst erzeugt werden, wenn ein zweiter GPS-Empfänger vorhanden ist. Um aber auf Zweitgeräte verzichten zu können, haben viele Länder permanente Referenzstationen eingerichtet, die von Anwendergruppen oder der amtlichen Landesvermessung betrieben werden (z. B. das SAPOS-Netz der deutschen Bundesländer). Dadurch sind auch mit nur einem Empfänger hochgenaue Positionsbestimmungen möglich, bei entsprechender Hardware sogar praktisch in Echtzeit.

- Für Deutschland wurde SAPOS-HEPS (Hochpräziser Echtzeit Positionierung-Service) entwickelt. Er bietet eine Lagegenauigkeit von ca. 1–2 cm und eine Höhengenauigkeit von ca. 2–3 cm.

Für Messungen im SAPOS-System benötigt man Roverausrüstung mit einem geodätischen, RTK fähigen GNSS-Empfänger, sowie ein Modem / Handy für den Empfang der SAPOS-Daten. Man kann sich dabei (unter Beibehaltung von Satellitenkontakt und Handyverbindung) von Punkt zu Punkt bewegen, ohne den Empfänger jedes Mal neu initialisieren zu müssen.

Dies ermöglicht flexibles Arbeiten und man erhält sofort die Koordinate eines Punktes im ETRS-Koordinatensystem. Als Beobachtungszeit pro Punkt genügen 5–20 Sekunden. Vorteil: Wirtschaftlichkeit durch geringen Zeit- und Personalaufwand. Koordinaten direkt erhältlich ohne innendienstliche Nachbearbeitung. Keine Abhängigkeit von Tageszeit oder Wetter.

Nachteil: Koordinatenbestimmung im Landesvermessungssystem ist nur durch Koordinaten-Transformation möglich.

- In anderen Ländern wurden ähnliche Datendienste aufgebaut, die entweder amtlich, von Vermessungsdiensten oder von EVUs betrieben werden. In Österreich sind es v.a. Kraftwerksbetreiber und das DGPS der Ingenieurbüros, in der Schweiz das swipos der Landestopografie, in Deutschland neben Sapos Anbieter wie ALF, AMDS oder ascos.
- 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.
- Bei sehr genauen Messungen wird auch die Phasenlage der Satellitensignale ausgewertet. Dadurch sind Genauigkeiten von  $\pm 1$  bis  $\pm 10$  mm pro km Abstand zur Basisstation erreichbar.
- Auf dem Meer ist geringere Genauigkeit ausreichend, doch eine Verbreitung über Radio nützlich. Für die Bundesrepublik Deutschland werden Differential-Stationen von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung betrieben. Sie 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.

## **Datenformate**

Als Standardformat von GPS-Daten dient das RINEX-Format, eine Standard- und Formatdefinition, die einen freien Austausch von GPS-Rohdaten ermöglichen soll. Für den Austausch von GPS-Daten in Echtzeitanwendungen ist das RTCM-Format von Bedeutung. Häufige Verwendung findet auch das NMEA-Format

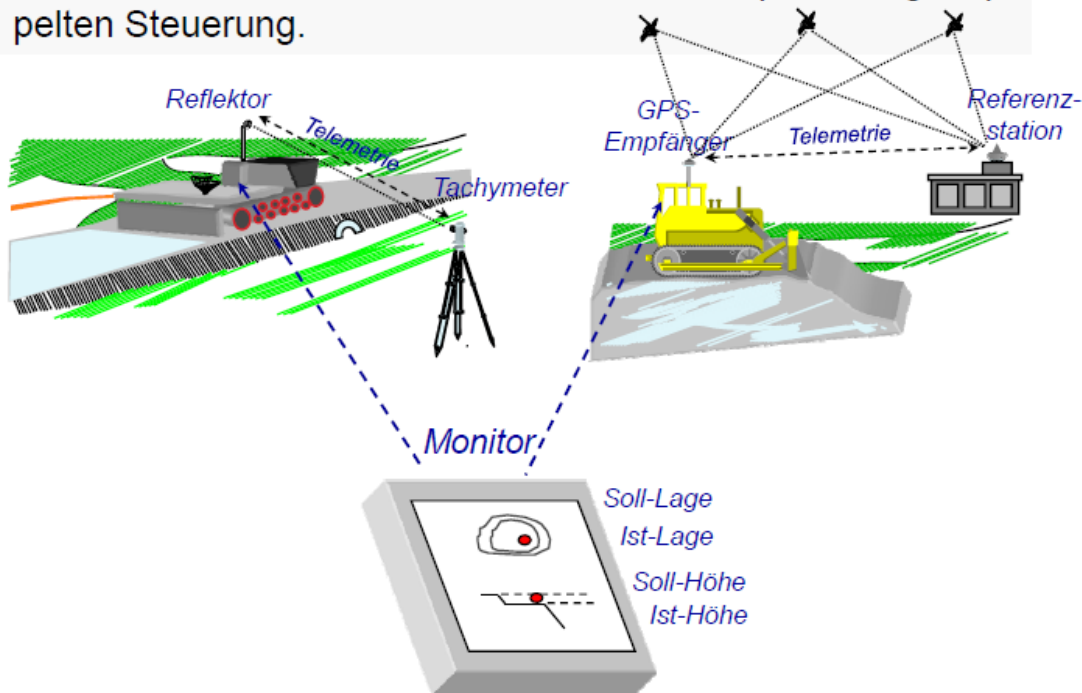
Neben diesen Basisformaten speichern die GPS-Geräte unterschiedlicher Hersteller die GPS-Ergebnisse (Routen, Tracklogs und Wegpunkte) häufig in eigenen proprietären Dateiformaten. Als allgemeine Austauschformate bieten sich das gpx-Format und das Google Earth eigene .kml-Format an. Eine Konvertierung zwischen verschiedenen Formaten erlaubt die freie Software GPSTabel.

## Einsatz von GPS

Wesentlich ist der Hinweis, dass GPS nur bei guten „Himmelsfreiheit“ eingesetzt werden darf. Neben Gebäuden oder anderen Sichthindernissen treten häufig „Mehrwegeeffekte“ (multi-path) auf, die zu falschen Ergebnissen führen. In geschlossenen Räumen sind richtige GPS-Messungen unmöglich, selbst wenn ein Empfang angezeigt wird. Die Qualität des Empfangs lässt sich durch die „dop-Werte“ (Dilution of Precision) anzeigen.

Beispiel zum Einsatz von GPS im Straßenbau:

In einigen Fällen wird die Absteckung zur elektronischen, nahezu vollautomatischen und mit dem Bauprozess gekoppelten Steuerung.



Das Beispiel (Quelle: Skript Prof. Przybilla) zeigt den Einsatz von GPS zur Bau-Maschinensteuerung. Folgende wesentliche Vereinfachungen sind getroffen:

Eigentlich würden mindestens vier Satelliten für den GPS-Empfang benötigt; außerdem sind zur vollautomatischen Maschinensteuerung mehrere Antennen an der Bau-Maschine notwendig.

GNSS-Satelliten senden nicht nur ein Radiosignal, sondern auch die exakte Position des Senders. Aus der Lokalisierung der Signalquelle und einem Vergleich mit der bekannten Position ergeben sich Hinweise auf die Beschaffenheit des Ausbreitungsmediums.

Mittels Radio-Okkultation lassen sich mit GPS-Signalen Beobachtungen der Atmosphäre durchführen und mit GNSS-R Beobachtungen zur Beschaffenheit von Wasseroberflächen.

So werden auch Wettervorhersagen teilweise mit Auswertung von GPS-Signalen gestützt.



## Messfehler

Aus den Raumkoordinaten können die geographische Länge, geographische Breite und die Höhe über dem definierten Referenzellipsoid berechnet werden. Zu beachten ist jedoch, dass die verwendeten Koordinatensysteme von anderen gängigen Koordinatensystemen abweichen können, so dass die ermittelte Position von der Position in vielen, insbesondere älteren Landkarten bis zu einigen hundert Metern abweichen kann. Auch die per GNSS ermittelte Höhe und die Höhe „über dem Meeresspiegel“ können vom tatsächlichen Wert (Geoid) um etliche Meter abweichen.

Wie bei der Triangulation sollte das Volumen der Pyramide, die die Satelliten mit dem Beobachter an der Spitze aufspannen, möglichst groß sein; ansonsten verringert sich die erreichbare Positionsgenauigkeit (Dilution of Precision (DOP)). Befinden sich die Satelliten mit dem Empfänger in einer Ebene, das heißt vom Beobachter gesehen scheinbar auf einer Linie, ist keine Ortsbestimmung möglich. Eine solche Konstellation tritt jedoch praktisch nie auf. Ebenso sind schlechte Ergebnisse zu erwarten, wenn Satelliten „nahe am Horizont“ liegen. Es gibt Programme, die den optimalen Aufnahmezeitpunkt vorherberechnen.

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. Für die zurzeit üblichen kommerziellen GPS-Empfänger steht nur ein Signal zur Verfügung. In der Vermessung werden überwiegend Zweifrequenzempfänger eingesetzt.

Die Schwankungsbreite der Anzahl der freien Elektronen in der Ionosphäre verursacht einen Ortsfehler von bis zu 30m. Um ihn auf unter 10m zu reduzieren, übermitteln GPS-Satelliten 6 Parameter, die den aktuellen Ionosphärenzustand beschreiben. Kurzfristige Szintillationen lassen sich damit nicht korrigieren.

Positionsgenauigkeit bei unkorrigierten Messwerten (*User Range Error (URE)*):

Quelle	Zeitfehler	Ortsfehler
Satellitenposition	6–60 ns	1–10 m
Zeitdrift	0–9 ns	0–1,5 m
Ionosphäre	0–180 ns	0–90 m
Troposphäre	0–60 ns	0–10 m
Mehrwege-Effekt	0–6 ns	0–10 m

Die satellitenbedingten Fehler, also Satellitenposition und Zeitmessung, werden im Englischen als *Signal-In-Space USR (SISURE)* bezeichnet, die Fehler bei der Wegausbreitung *User Equipment Range Error (UERE)*.

Die Genauigkeit nimmt zu, wenn mehr als vier Satelliten empfangen werden können. Diese Messung wird dann überbestimmte Ortung genannt. Die Fehler lassen sich nachträglich durch Vergleich mit Referenzmessungen bis auf wenige Zentimeter verringern. Mit Differential-GPS (DGPS) ist auch ein Abgleich in Echtzeit möglich.

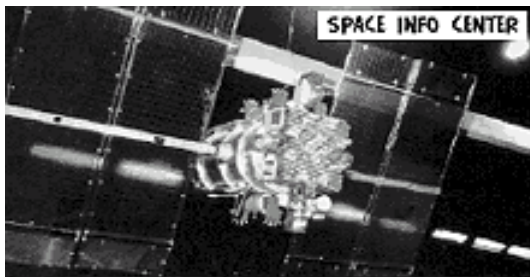
Wertet man außerdem noch die Phasen der Satellitensignale aus, lassen sich auch dynamisch relative Genauigkeiten von wenigen Zentimetern erreichen.

## Alternativen

Alternativ zu GPS gibt es insbesondere folgende Systeme:

### GLONASS

GLONASS (russisch: ГЛОНАСС, als Akronym für *Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema* ‚Globales Satellitennavigationssystem‘) ist ein Satellitennavigationssystem, das vom Verteidigungsministerium der Russischen Föderation betrieben und finanziert wird.



*Uragan-Satellit für das GLONASS-System*

### Geschichte

GLONASS ähnelt in Aufbau (Raumsegment, Bodenstationen, Nutzer/Empfänger) und Funktionsweise dem US-amerikanischen NAVSTAR-GPS. Bei den Bodenstationen ist zu beachten, dass diese sich ausschließlich auf dem Gebiet der ehemaligen Sowjetunion befinden, was keine optimale Verteilung darstellt. Technisch basiert GLONASS auf ähnlichen Prinzipien wie GPS. Die parallele, unabhängige Entwicklung der beiden gleichwertigen Systeme während des Kalten Krieges erfolgte aus militärstrategischen Gründen.

Die Entwicklung des Systems begann 1972. Die ersten drei Satelliten starteten am 12. Oktober 1982, das System ist am 24. September 1993 offiziell als betriebsbereit erklärt worden. Der Vollausbau, bestehend aus 21 Standard- und drei Reservesatelliten, wurde 1996 erreicht.

Im Jahr 1998 war die Anzahl jedoch schon auf 13 gesunken und verringerte sich bis 2001 auf nur sieben Satelliten. Ab 2002 begann die Anzahl der funktionsfähigen Satelliten wieder anzusteigen. Das Problem dabei war die hohe Ausfallrate aufgrund der sehr kurzen Lebensdauer der einzelnen Uragan-Satelliten von nur drei Jahren. Seit 2001 werden auch verbesserte Uragan-M-Satelliten mit einer Lebensdauer von sieben Jahren eingesetzt.

Im Januar 2003 kamen die Leitung der ESA und Roskosmos überein, die GLONASS-M-Satelliten zum Testen von Hardware für das zukünftige System Galileo der EU zu nutzen.

Am 12. September 2008 ordnete der Ministerpräsident von Russland, Wladimir Putin den Ausbau von GLONASS für 67 Milliarden Rubel (1,8 Milliarden Euro) an.

Zu einem Rückschlag für das Projekt kam es am 5. Dezember 2010, als drei mit einer Trägerrakete von Baikonur gestartete Satelliten in den Pazifik stürzten. Eine neue Uragan-K-

Generation mit geringerer Startmasse und einer Lebensdauer von zehn Jahren befindet sich in der Testphase; am 4. November 2011 wurden drei dieser Satelliten ins Orbit gebracht.

Aktuell sind 25 Satelliten im Sende-Einsatz, wobei ein Satellit als „Reserve“ fungiert. Die Planung sieht 30 Satelliten vor, die sich auf drei Orbits mit jeweils acht Satelliten und zwei Reservesatelliten verteilen. Ob dieser Plan eingehalten werden kann, ist fraglich, da am 2. Juli 2013 bei einem Absturz einer Proton-M-Rakete erneut drei GLONASS-Satelliten zerstört wurden.

Dass für den Vollausbau von GLONASS mehr Satelliten benötigt werden als für GPS liegt an den unterschiedlichen Satellitenbahnen. GLONASS- und GPS-Daten können von GPS-Empfängern parallel empfangen und verarbeitet werden. Mittlerweile gibt es bereits Smartphones, die beide Signale empfangen können (z.B. iPhone 4S, Motorola Razr Maxx, Nokia Lumia 900), wobei hierfür zwei unterschiedliche Empfängerchips benötigt werden, was die Kosten steigen lässt. Für vermessungstechnische Anforderungen eignen sich insbesondere Daten der Uranan-K-Satelliten. Ein Problem ist, dass ein Korrekturdatensystem (SDCM) für GLONASS erst in Planung ist.

### **Euteltracs**

Europäisches Positionssystem für Fernverkehr (sehr ungenau). Es sendet auf einer Frequenz von 10–14 GHz und ist seit 1991 in Betrieb. Genutzt wird es z.B. im Flottenmanagement von Speditionen; mittlerweile ist es mit GPS kombinierbar.

### **Galileo**

EU und ESA haben gemeinsam die Entwicklung eines europäischen Systems zur Satellitennavigation für überwiegend zivile Anwendungen mit dem Namen Galileo vorangetrieben. Das System soll auf drei Frequenzen senden und somit den neuesten GPS-Satelliten entsprechen. Die Entwicklungs- und Testphase wurde im Dezember 2004 in einem 4-Jahresvertrag an die Industrie vergeben. Nach Ablauf dieses Vertrages sollen 32 Galileo-Satelliten im All und der Großteil des Bodensegments installiert sein. Der ursprüngliche Zeitplan sah wie folgt aus: Bis 2005 Entwicklungs- und Testphase, Aufbau des Satellitennetzes ab 2006, Testphase ab 2008.

Dieser Plan konnte jedoch nicht ansatzweise realisiert werden. Im Mai 2007 wurde bekannt, dass die EU-Kommission den privaten Betreibergesellschaften den Auftrag. Die Finanzierung erfolgt nun nur durch öffentliche Gelder, wobei auch nicht EU-Staaten beteiligt sind. Interessant ist, dass auch China und Indien zu den Geldgebern zählen, da sie eigene GNSS entwickeln.

Bis Ende 2008 waren allerdings erst die beiden Testsatelliten Giove-A1 und Giove-B im All. Auf einen dritten Testsatelliten wurde verzichtet. Der Start des ersten Testsatelliten musste frühzeitig erfolgen, da die Sendefrequenzen bis zum 10. Juni 2006 getestet werden mussten, weil sonst die Reservierung für die Galileo-Frequenzbänder bei der Internationalen Fernmeldeunion (ITU) verfallen wäre.

Die ersten beiden „richtigen“ Satelliten wurden am 21. Oktober 2011 mit russischen Raketen in ihre Umlaufbahn gebracht. 2014 sind zwei Satelliten aufgrund eines Defektes der Trägerrakete nur in eine ca. 17.000 km hohe Umlaufbahn gebracht worden (statt ca. 23.500 km). Außer diesen beiden „falsch“ fliegenden Satelliten sind zurzeit 9 Satelliten richtig arbeitend im Weltraum und sechs Satelliten, die auf ihre Inbetriebnahme warten.

Am 15.12.2016 wurde vermeldet, dass Galileo „produktiv“ läuft – warum dies nicht früher erfolgte, ist nicht veröffentlicht (GPS wurde mit weniger Satelliten in Betrieb genommen).

Der Endausbau des Systems umfasst 30 Satelliten und sollte schon lange erreicht sein; mittlerweile ist er auf das Jahr 2020 verschoben.

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, z. B. Polizei und Luftfahrt. 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). Es handelt sich um die Ergänzung von GPS durch Satelliten, die nur über Japan (und Australien) „kreisen“. Seit 2003 befindet sich das System mit einem Satelliten in der Experimentierphase – es soll 2017 durch zwei weitere Satelliten fertig gestellt werden.

### **Beidou (Compass)**

Beidou ist das Navigationssystem der Volksrepublik China (Sendefrequenz 1,4 GHz). Ursprünglich hieß das System Compass, aber der Begriff Beidou, der eigentlich nur der Name der Satelliten ist, hat sich mittlerweile durchgesetzt. Seit 2004 ist es im Test-Betrieb für China, seit Ende 2011 im Test-Betrieb für große Teile Asiens und den Pazifikraum; ein globaler Aufbau mit 35 Satelliten ist bis 2020 geplant.

Zurzeit sind 17 Satelliten in Betrieb ein weiterer in Testbetrieb und einer steht unmittelbar vor Inbetriebnahme. Eine öffentliche Nutzung ist nicht geplant, jedoch sollen außer staatlichen Stellen auch chinesische und ausländische (?) Unternehmen die Daten nutzen dürfen.

Beidou stand wegen der Nutzung annähernd gleicher Frequenzen in direkter Konkurrenz zu Galileo. Die ersten Galileo-Satelliten mussten 2004 in den Weltraum gebracht werden, da sonst die Reservierung der Frequenzen verfallen wäre. Die Beidou-Frequenzen wurden daraufhin so geändert, dass Störungen beider Systeme durch Frequenzüberlagerungen nicht zu befürchten sind. Auch die Gefahr, dass Galileo nicht in vollem Umfang mit den geplanten Frequenzen eingesetzt werden kann (insbesondere im asiatischen Raum) besteht nicht mehr. Interessant ist, dass China auch (in geringem Umfang) an Galileo beteiligt ist.

### **IRNSS**

Das indische System IRNSS befindet sich noch in Planung.

*Hinweis zu Quellen und Urheberrechten:*

*Alle Zeichnungen und einige Textpassagen sind dem Internet entnommen und dürfen nicht ohne Zustimmung des Urhebers veröffentlicht werden.*