

Physik Referat

C. M. O'Brien-Organ

NGO 12; 00/01



Inhalt: 1.1. Frühere Navigationsmethoden

2. Auftrag des DoD (Department of Defence) zur Entwicklung des GPS
- 2.1. Verwendungsmöglichkeiten des GPS
 2. Funktionsweise des GPS
 3. Fehlerquellen bei der Positionsbestimmung und dessen Behebung
 4. Absichtliche Verfälschungen
 5. Differentiales GPS
3. Galileo, das europäische GPS

1.1.

Schon seit Menschengedenken versuchen die Menschen durch Navigation den Weg von A nach B zu vereinfachen und zu verkürzen. Aus dem Altertum sind Leuchfeuer bekannt, die diesem Zweck dienen. Im 13. Jh. wurde der Kompaß erfunden, der die Sache erheblich vereinfachte. In der Schifffahrt (neue Rechtschreibung!!!) wurde Astronavigation (Navigieren nach den Sternen) benutzt, um die sieben Weltmeere zu bezwingen. In den 20er Jahren entstand die Funknavigation und die Trägheitsnavigation, die besonders in der Fliegerei eingesetzt wird. Die Trägheitsnavigation, die für Transatlantikflüge benutzt wird, hat dabei eine Abweichung von 200m – 10km. Doch bei Landungen, besonders im schlechtem Wetter, ist dies weit zu ungenau. Das Instrumentenlandesystem (ILS) hilft hier mit einer Genauigkeit von 60cm vertikal und 4m horizontal.

1.2

1973 stellten die Amerikanischen Militärs, genauer gesagt das Department of Defence (DoD) den Auftrag nach einem Navigationssystem, das folgende Eigenschaften haben sollte:

- Satellitengestützt
- Weltweit einsetzbar
- Für alle Objekte, stehend oder sich bewegend
- Bei jedem Wetter verfügbar
- Passiv arbeitend (darf keine Signale aussenden)
- Möglichst schwer zu stören

Heraus kam NAVSTAR GPS (Navigation System with Timing and Ranging Global Positioning System), heute meist nur noch GPS genannt.

2.1.



Elektronischer Routenplaner

GPS wird heute in allen Bereichen verwendet: Im Auto, im Schiff, in der Luftfahrt (bisher nur als Ergänzung erlaubt), sogar in der Landwirtschaft und in der Landvermessung,

Nicht
Spielen!!

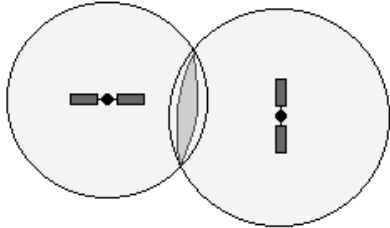


F-22

2.2. Doch wie funktioniert es, das GPS?

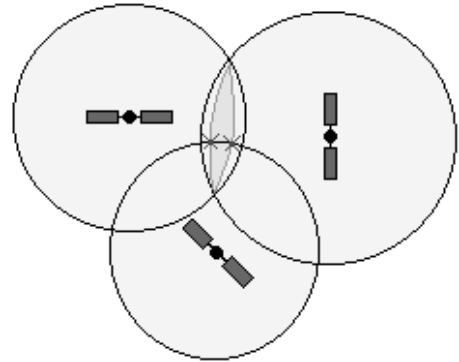
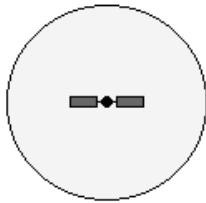
GPS besteht aus 24 Satelliten. Sie wurden gleichmäßig auf 4 Bahnen (55° geneigt) mit je 6 Satelliten verteilt. Diese Satelliten beschreiben in 20183km Höhe eine nahezu kreisrunde Bahn und vollbringen in 11h 56min eine Erdumrdrehung. Seit 1993 ist das System betriebsbereit (Block I Satelliten). Seit 1995 stehen die Nachfolgersatelliten (Block II/IIA) bereit.

Die Satelliten dienen als Referenzpunkte für die Ortsbestimmung auf der Erde. Mit der genauen Entfernung von drei Satelliten kann man die Position bestimmen. Mit der Entfernung zum ersten Satelliten ergibt sich eine Schale um diesen Satelliten, auf dem wir irgendwo sitzen. (\Leftarrow) Mit der Entfernung zum zweiten Satelliten, ergibt sich auch um diesen eine Schale. Die beiden Schalen schneiden sich in einem Kreis, auf dem wir sitzen. (\Rightarrow)



Mit der Entfernung zu einem dritten Satelliten

ergeben sich dann zwei Punkte. Eigentlich bräuchte man jetzt noch einen 4. Satelliten, doch einer der Punkte ist normaler Weise so abwegig (unmöglicher Standort, z. B. in 20 km Höhe oder eine unmögliche Geschwindigkeit), so dass nur ein Punkt übrig bleibt. Um nun die Entfernung zu bestimmen brauchen wir die Laufzeit der Signale,



$$\frac{s}{t}$$

die der Satellit aussendet. Über die bekannte Formel $v = \frac{s}{t}$ (Geschwindigkeit = Weg pro Zeit) könnten wir dann den Weg ausrechnen. Doch wie werden diese sehr kleinen Zeiten ($\approx 0,06s$) gemessen. Wir überlagern das Signal des Satelliten mit dem gleichen Signal des Empfängers. Durch die Strecke vom Satelliten zum Empfänger kommt das Signal des Satelliten später an. Die Signale sind leicht verschoben. Jetzt verzögern wir das Signal des Empfängers bis beide übereinstimmen. Die Verzögerung ist dann die Laufzeit.

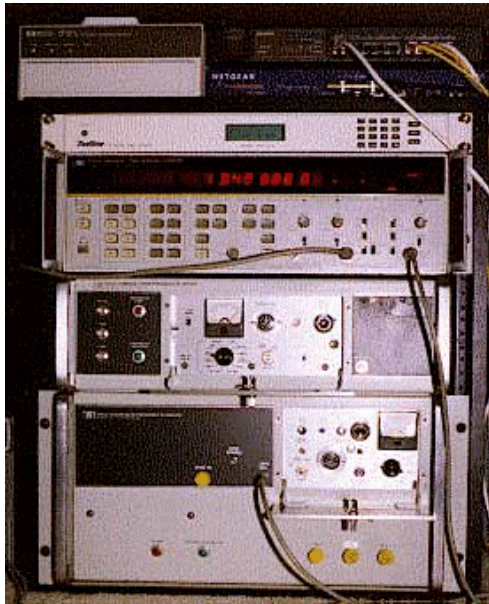


Damit sich das Signal nicht fehlerhaft überlagert oder durch falsche Signale gestört wird, ist der Code, der gesendet wird, sehr kompliziert. Er ist so kompliziert, daß er willkürlich (eng.: random) aussieht. Da er aber nur so aussieht, wird er „Pseudo- Random Code“ genannt. Nun brauchen wir die Ausgangspunkte der Signale, die Position des jeweiligen Satelliten. Immerhin schweben sie im All. Die GPS-Satelliten wurden zu diesem Zweck auf sehr genaue Bahnen gesetzt.

Der Satellit sendet seine Position per Almanach an den Empfänger. Da die Satelliten leicht von Ihrer Bahn abweichen (bedingt durch die sich ändernde Gravitation der Erde, die Gravitation des Mondes und dem Sonnenwind), werden die Positionen der Satelliten durchgehend an fünf Bodenstationen vom DoD auf den cm genau vermessen. Die Abweichung des Satelliten

wird dann über den Satelliten an den Empfänger gesandt.

2.3.



Um die genaue Entfernung zu bekommen, braucht man sehr genaue Uhren. Und sie müssen genau gleich laufen, da eine Verschiebung von nur einer tausendstel Sekunde eine Abweichung von ca. 200 m bedeutet. Im Satelliten werden daher Atomuhren verwendet. (\Leftarrow) Hier ergibt sich die Zeit durch die Schwingungen eines Atoms, meist Cäsium oder Rubidium. Diese gehen zwar in 300000 Jahren nur 1s falsch, Doch ist dies zu ungenau. Deshalb werden sie mit den Atomuhren auf der Erde verglichen, die durch den höheren Aufwand auch 100 mal genauer gehen. Der Fehler, der entdeckt wird, wird wieder über den Satelliten an den Empfänger gesandt. Von der Erde aus gehen die Uhren der Satelliten langsamer, da die Länge einer Schwingung der Atoms in der Uhr etwas länger dauert. (Relativitätstheorie von Einstein zwischen 1905 und 1916)

$$3,9 \frac{km}{s}$$

Die Zeit im Satelliten, der mit $\frac{m}{s}$ um die Erde saust, ist um 8 milliardstel Prozent gedehnt. Dieser Effekt wird aber dadurch ausgeglichen, daß die Uhr wegen der weitaus geringeren Gravitation um 53 milliardstel Prozent schneller geht. Insgesamt geht die Satellitenuhr also um 45 milliardstel Prozent schneller. Das wären in 10 Jahren 0,14s. Dies sind zwar kleine Werte, die aber mit der Geschwindigkeit des

$$\frac{m}{s}$$

Funksignals (Lichtgeschwindigkeit: $c \approx 300.000.000 \frac{m}{s}$) multipliziert werden müssen. Um diesen Fehler auszugleichen, werden die Satellitenuhren deshalb auf eine um ca. 0,0046 Hz niedrigere Frequenz eingestellt. Die Uhr des Empfängers muß jedoch auch so genau gehen. Wegen des Preises (\$50.000-100.000) und der Größe wäre hier eine Atomuhr ungeeignet. Deshalb hilft man sich hier mit einem weiteren Satelliten. Wenn drei Satelliten einen Punkt ergeben, weicht der vierte Satellit wegen des Fehlers etwas ab. Der Empfänger sucht dann einen Korrekturfaktor, um damit alle Werte zu verbessern. Danach ergeben die Daten der Satelliten nur noch einen korrekten Punkt. Dadurch reicht für den Empfänger eine normale Quarzuhr.

Doch auch die Atmosphäre stört die Genauigkeit. Durch die sich verändernde Atmosphäre, besonders in der Ionosphäre (50-100 km), verändert sich die Geschwindigkeit der Funksignale. Ohne Korrektur würde ein Fehler von etwa 50 m entstehen. Der Brechungskoeffizient hängt vom Quadrat der Frequenz ab (f^2). Deshalb wird das Signal im Satelliten auf zwei Signale im L-Band (Mikrowellenbereich) aufgeteilt. (L1=1575,42 MHz; L2=1227,6 MHz) Daraus kann man Rückschlüsse auf den Zustand der Atmosphäre machen um diesen Fehler zu korrigieren. Ein weiteres Problem bildet das „Multipath“. Das bedeutet, daß das Signal durch Gebäude oder Berge (im Hochschwarzwald besonders häufig!) abgedeckt oder reflektiert wird. Hierdurch ergeben sich falsche Entfernungen und Werte.

2.4.

Das größte Problem für den zivilen Benutzer ist aber das Militär als Besitzer. Aus Angst, dass Feinde das hochpräzise System gegen sie selbst einsetzen, verfälschen sie die Genauigkeit absichtlich. So gibt es zwei Sorten von GPS: Der P-Code (Precision) ist den Militärs der USA, deren Verbündeten, und einigen besonders Berechtigten vorbehalten. Der C/A-Code (Coarse/Access) steht allen offen. Jedoch ist hier die Auswertung der L2-Frequenz nicht möglich. Das heißt, die Verfälschung der Atmosphäre kann nicht behoben werden. Die Verschlüsselung wird als „Antispoofing“ (kurz: A-S; spoofing: veräppeln, spotten) bezeichnet. Zusätzlich gibt es noch das „Selective Availability“ (kurz: SA; wählerische Erhältlichkeit). Hierbei werden die Daten des Almanach, also die Position des Satelliten, verändert. Dies ergibt einen Fehler von ca. 70 m. Trotzdem sind mit dem C/A-Code noch Genauigkeiten von 100 m horizontal und 150 m vertikal möglich, mit dem P-Code sind es nur 20 bzw. 30 m, vermutlich sogar nur ca. 2 m.

Quelle	Ungenauigkeit	Erklärung
SA	0 - 70 Meter	Künstlicher Fehler von DoD
Ionosphäre	0 - 30 Meter	Atmosphärischer Fehler

Troposphäre	0 - 30 Meter	Atmosphärischer Fehler
Messungenauigkeit	0 - 10 Meter	z.B. durch verrauschte Signale
Clock Drift	0 - 1.5 Meter	Abweichung der Atomuhren
Multipath	0 - 1 Meter	durch Reflexionen

[Quelle: [Introduction to the GPS for GIS and TRAVERSE](#)

aus: http://roni.thenetzone.co.uk/index.ge.shtml#/DGPS_Introduction.ge.shtml]

2.5.

Diese Verfälschungen lassen sich aber leicht umgehen. (Ja, auf legale Weise) Dies wird „Differenciales GPS“ genannt. Hierbei wird ein Empfänger fest aufgestellt und seine Position genaustens bestimmt. Alle Abweichungen des Satellitensignals von der tatsächlichen Position sind dann der Fehler. Dieser wird an den „mobilen“ Empfänger weitergeleitet. Dieser korrigiert dann seine Angaben dementsprechend. Im Umkreis von etwa 100 km sind damit Genauigkeiten von ca. 1 m zu erreichen.

3.

Auch um den vom Militär gestellten Schikanen zu entkommen soll in Europa ein kommerzielles System, „Galileo“ genannt, aufgebaut werden. Dieses System ist mit den GPS kompatibel. Auf dem EU-Gipfel in Nizza Anfang Dezember 2000 wurde grünes Licht für die Entwicklung gegeben. Die Entwicklung und der Aufbau werden voraussichtlich bis 2008 andauern und 3,3 Milliarden Euro kosten.

Quellen: - „Physik im Wandel“ von Knut Urban / Günter Paul, erschienen im Rotbuch Verlag. (Von Herrn Rudolf geliehen, herzlichen Dank dafür)

- Private Homepage: http://roni.thenetzone.co.uk/index.ge.shtml#/DGPS_Introduction.ge.shtml
- „Satelliten – Blechbüchsen im All“ <http://swix.ch/solg/gps/index.htm>
- Dort: Auszug aus: B.Hofmann-Wellenhofetal „GPS in der Praxis“, erschienen im Springer Verlag
- Bild der F-22: Nasa www.nasa.gov

C.M.O'Brien-Organ
LK Physik
NGO 12; 00/01

Aktueller Nachtrag: Die US Air Force hat den Auftrag zum Entwurf der nächsten Generation von GPS erteilt. Dieses wird als GPS III (mit Block III Satelliten) bezeichnet. Wert: \$ 16 Milliarden. (Flug Revue 2/01)