

GPS – Global Positioning System

Jörn Clausen

joern@TechFak.Uni-Bielefeld.DE

Marty McFly: Then where the hell are they?

Dr. Emmett Brown: The appropriate question is '**When** the hell are they?'

Übersicht

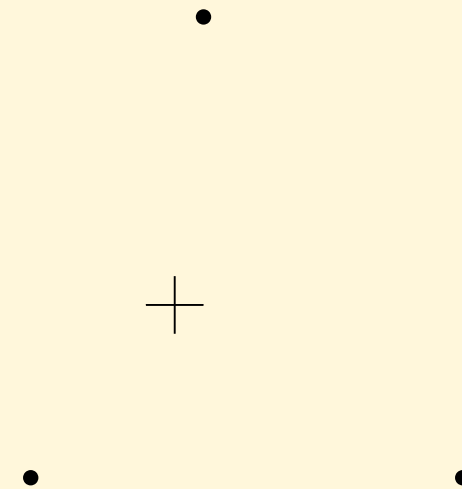
- **N**avigation **S**ystem using **T**ime and **R**anging – NAVSTAR
- Entwicklung, Aufbau und Funktionsweise
- Positionsbestimmung
- Signalstruktur
- Fehlerquellen und Korrekturen
- Weiterentwicklungen und Alternativen
- Anwendungen

Entwicklung von GPS

- 1970er Jahre vom DoD in Auftrag gegeben
- verschiedene Vorläufer-Systeme (Navy, Air Force)
- erste Satelliten 1978
- Initial Operational Capability (IOC): Dezember 1993
- Full Operational Capability (FOC): April 1995
- IGEB: Interagency GPS Executive Board (DoD und DoT)
- Navstar GPS Joint Program Office, Los Angeles
- U.S. Coast Guard Navigation Center, Alexandria, VA

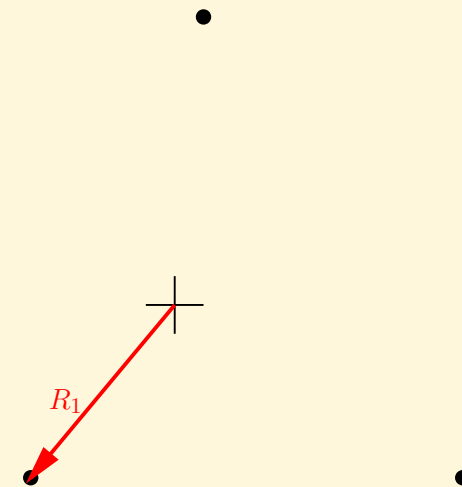
Funktionsweise

- prinzipielle Idee: Trilateration
- Satelliten senden Signal mit koordinierter Zeitinformation
- Empfänger ermittelt *range*
- benötigte Information:
 - genaue Position der Satelliten
 - genaues Zeitmaß
 - sonstige Umwelteinflüsse



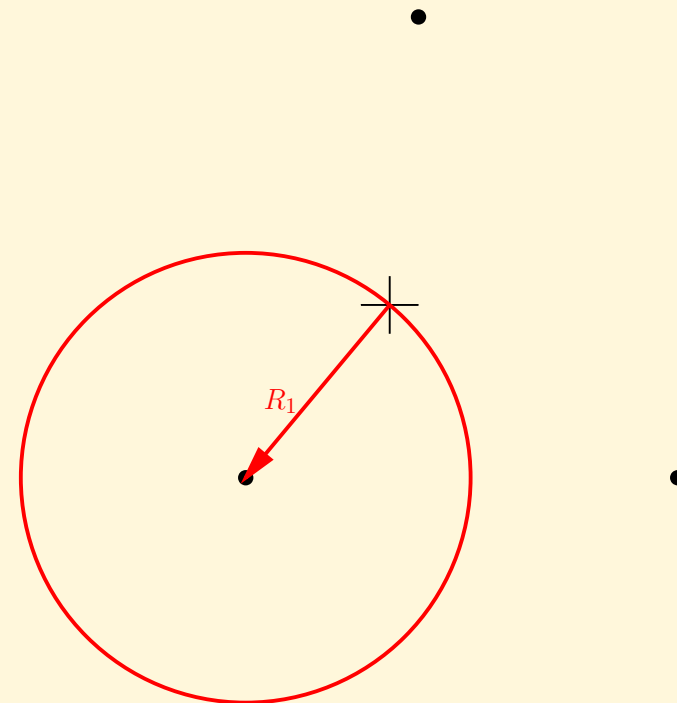
Funktionsweise

- prinzipielle Idee: Trilateration
- Satelliten senden Signal mit koordinierter Zeitinformation
- Empfänger ermittelt *range*
- benötigte Information:
 - genaue Position der Satelliten
 - genaues Zeitmaß
 - sonstige Umwelteinflüsse



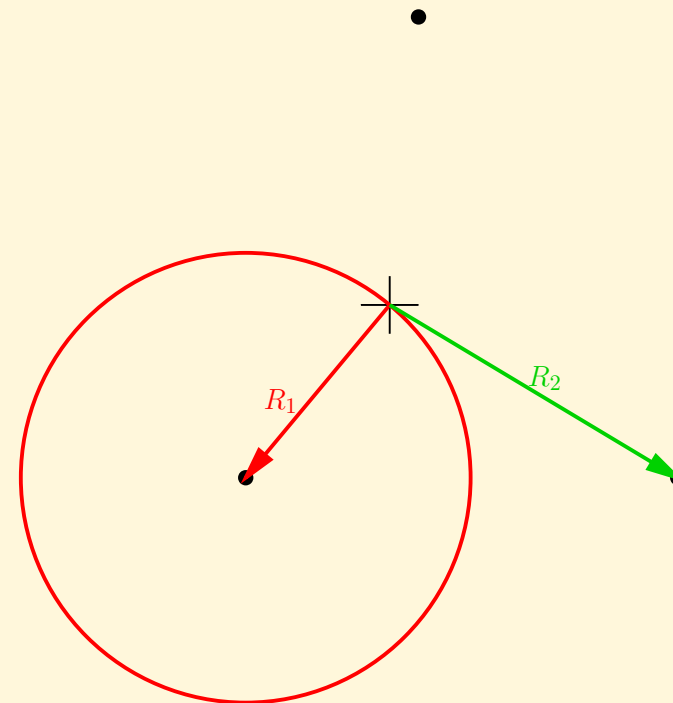
Funktionsweise

- prinzipielle Idee: Trilateration
- Satelliten senden Signal mit koordinierter Zeitinformation
- Empfänger ermittelt *range*
- benötigte Information:
 - genaue Position der Satelliten
 - genaues Zeitmaß
 - sonstige Umwelteinflüsse



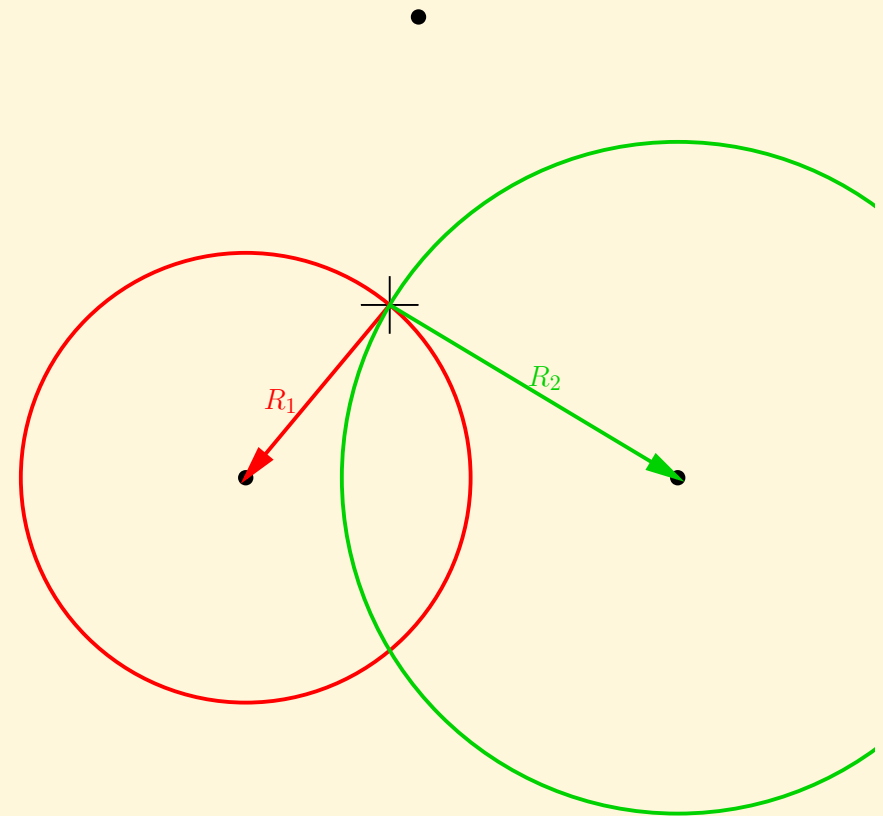
Funktionsweise

- prinzipielle Idee: Trilateration
- Satelliten senden Signal mit koordinierter Zeitinformation
- Empfänger ermittelt *range*
- benötigte Information:
 - genaue Position der Satelliten
 - genaues Zeitmaß
 - sonstige Umwelteinflüsse



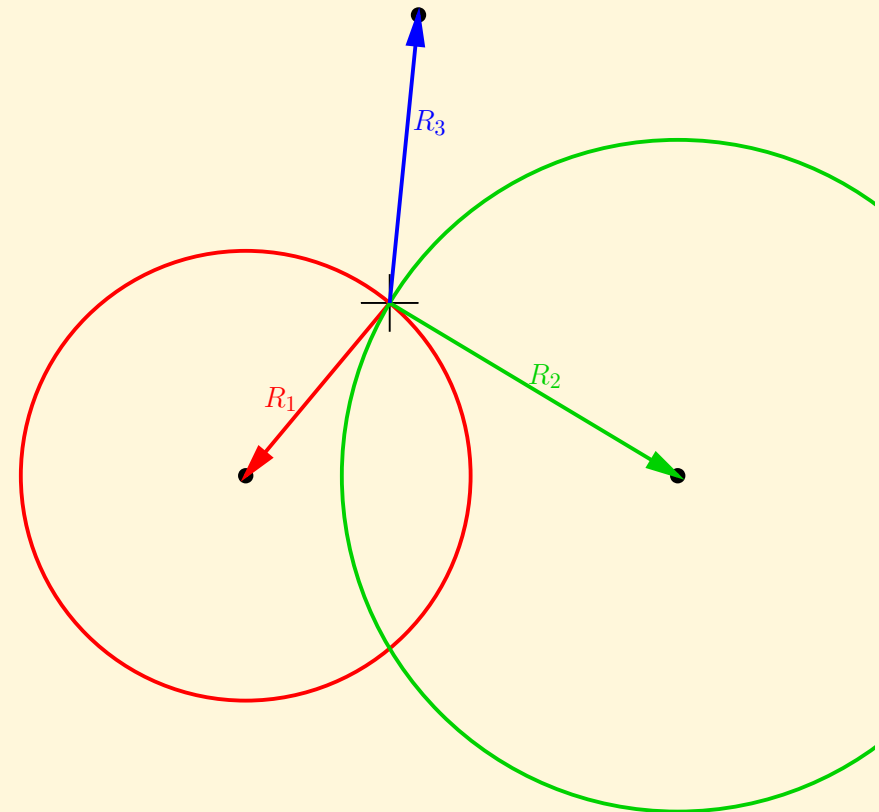
Funktionsweise

- prinzipielle Idee: Trilateration
- Satelliten senden Signal mit koordinierter Zeitinformation
- Empfänger ermittelt *range*
- benötigte Information:
 - genaue Position der Satelliten
 - genaues Zeitmaß
 - sonstige Umwelteinflüsse



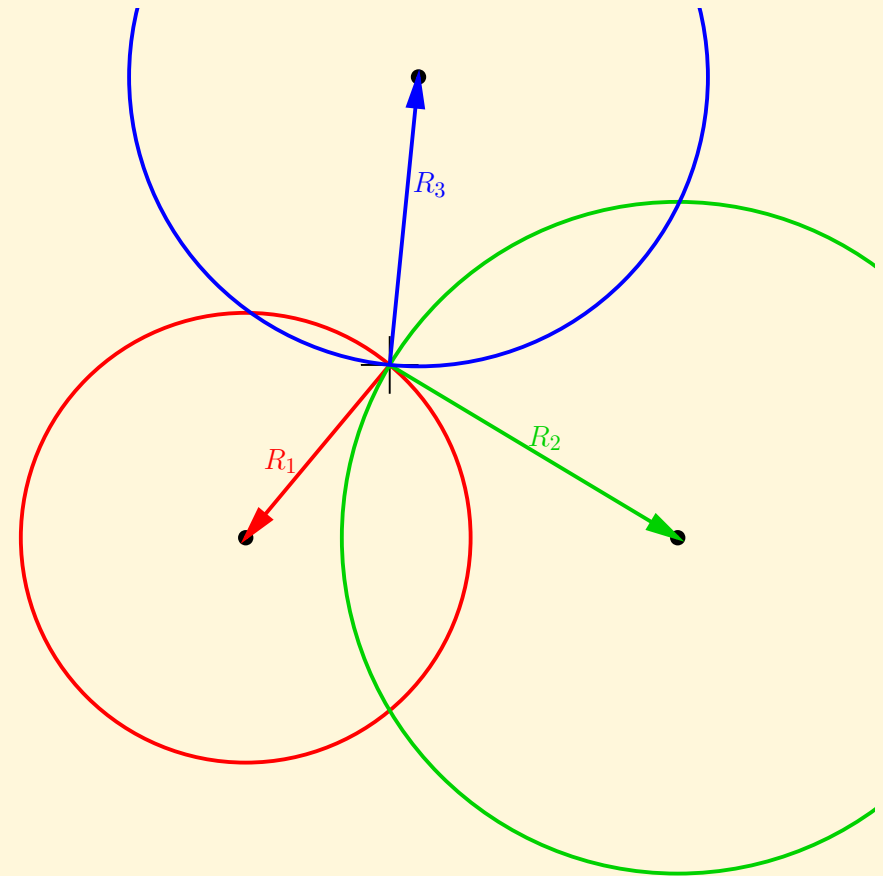
Funktionsweise

- prinzipielle Idee: Trilateration
- Satelliten senden Signal mit koordinierter Zeitinformation
- Empfänger ermittelt *range*
- benötigte Information:
 - genaue Position der Satelliten
 - genaues Zeitmaß
 - sonstige Umwelteinflüsse



Funktionsweise

- prinzipielle Idee: Trilateration
- Satelliten senden Signal mit koordinierter Zeitinformation
- Empfänger ermittelt *range*
- benötigte Information:
 - genaue Position der Satelliten
 - genaues Zeitmaß
 - sonstige Umwelteinflüsse



Aufbau von GPS

- Space Segment: *Konstellation* aus min. 24 Satelliten
- Control Segment: Überwachung und Steuerung der Konstellation
- User Segment: militärische oder zivile Endgeräte
- zwei Qualitäten:
 - Standard Positioning Service (SPS): zivile Nutzung
 - Precision Positioning Service (PPS): militärische Nutzung

Space Segment

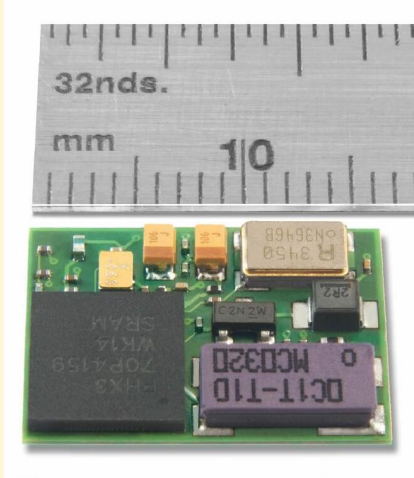
- Block II/IIA, Block IIR
- $a = 26600$ km, $e \approx 0$
- halb-synchrone Orbits
- $i = 55^\circ$, 6 Ebenen
- 4 Satelliten pro Ebene + Spares
- z.Z. 30 aktive Satelliten
- letzte Starts: 23.6.2004, 6.11.2004
- Cäsium- und Rubidium-Uhren



Control Segment



User Segment



Positionsbestimmung

- gesendetes Signal enthält Zeitinformation
- Problem: (genaue) eigene Uhrzeit unbekannt
- Meßwert: *pseudo range*

$$R_p = R_t + c\Delta t + d$$

Positionsbestimmung

- gesendetes Signal enthält Zeitinformation
- Problem: (genaue) eigene Uhrzeit unbekannt
- Meßwert: *pseudo range*

$$\begin{aligned} R_p &= R_t + c\Delta t + d \\ &= \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2} + c\Delta t + d \end{aligned}$$

Positionsbestimmung

- gesendetes Signal enthält Zeitinformation
- Problem: (genaue) eigene Uhrzeit unbekannt
- Meßwert: *pseudo range*

$$\begin{aligned} R_p &= R_t + c\Delta t + d \\ &= \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2} + c\Delta t + d \end{aligned}$$

- vier Unbekannte: $x_u, y_u, z_u, \Delta t$

Positionsbestimmung

- gesendetes Signal enthält Zeitinformation
- Problem: (genaue) eigene Uhrzeit unbekannt
- Meßwert: *pseudo range*

$$\begin{aligned} R_p &= R_t + c\Delta t + d \\ &= \sqrt{(x_s - x_u)^2 + (y_s - y_u)^2 + (z_s - z_u)^2} + c\Delta t + d \end{aligned}$$

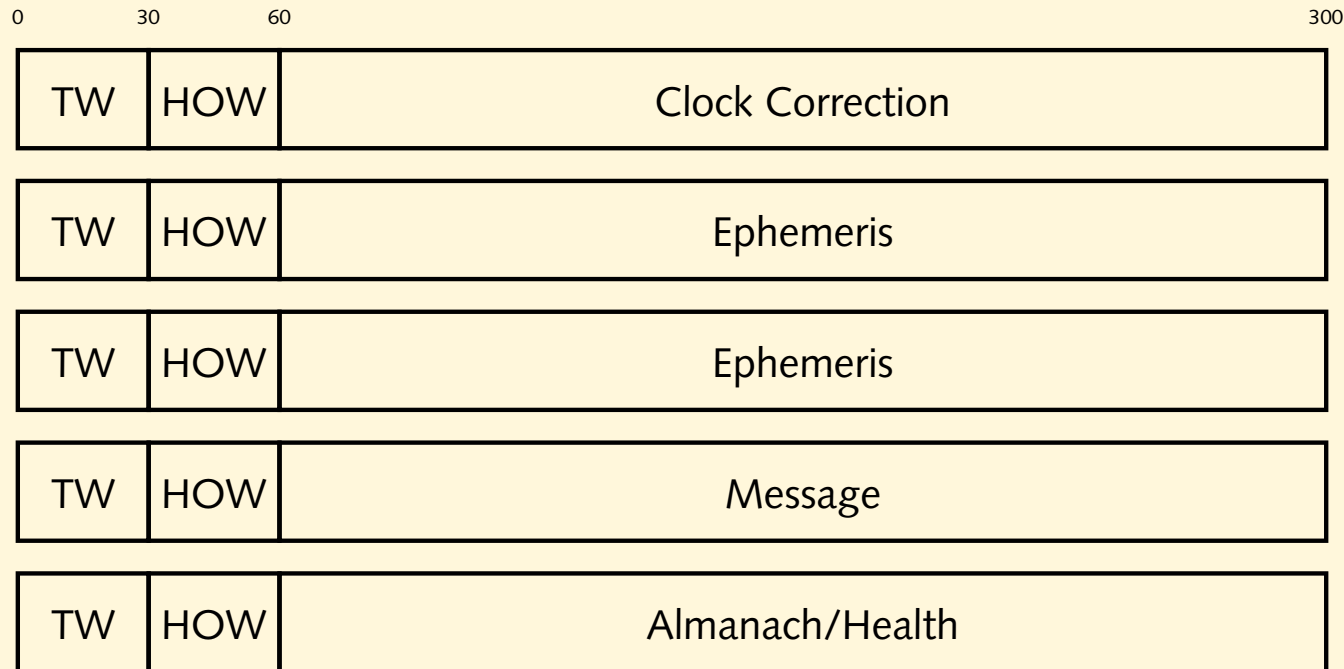
- vier Unbekannte: $x_u, y_u, z_u, \Delta t$

$$\begin{aligned} (R_{p1} - c\Delta t - d_1)^2 &= (x_{s1} - x_u)^2 + (y_{s1} - y_u)^2 + (z_{s1} - z_u)^2 \\ &\quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ (R_{p4} - c\Delta t - d_4)^2 &= (x_{s4} - x_u)^2 + (y_{s4} - y_u)^2 + (z_{s4} - z_u)^2 \end{aligned}$$

Signal

- mehrere Informationen in ein Signal kodiert
- zwei Frequenzen: L1 (1575,42 MHz) und L2 (1227,60 MHz)
- CDMA (Code Division Multiple Access)
- Satellit sendet *chip sequence* (PRN – Pseudo Random Noise)
- BPSK (Binary Phase Shift Keying)
- *ranging codes*:
 - coarse/aquisition (C/A) auf L1
 - precision (P) auf L1 und L2
 - *Anti-Spoofing*: Y-Code verschlüsselte Version des P-Code
- *navigation message*: mit 50 Hz auf C/A- und P-Code moduliert

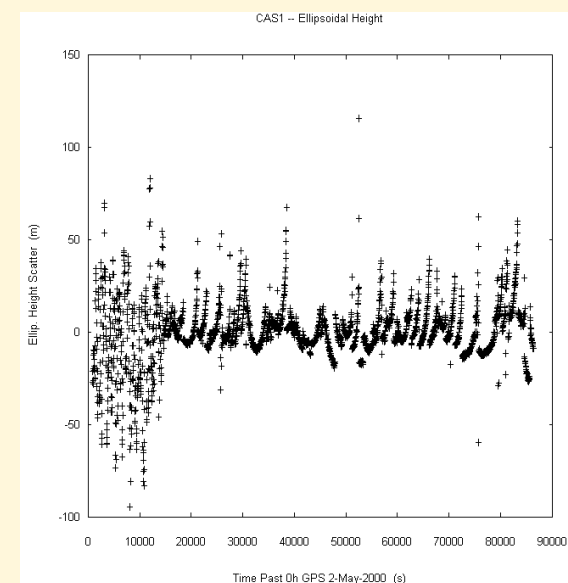
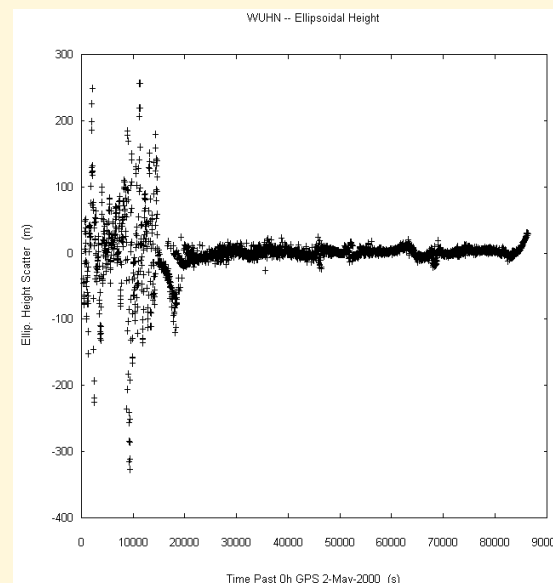
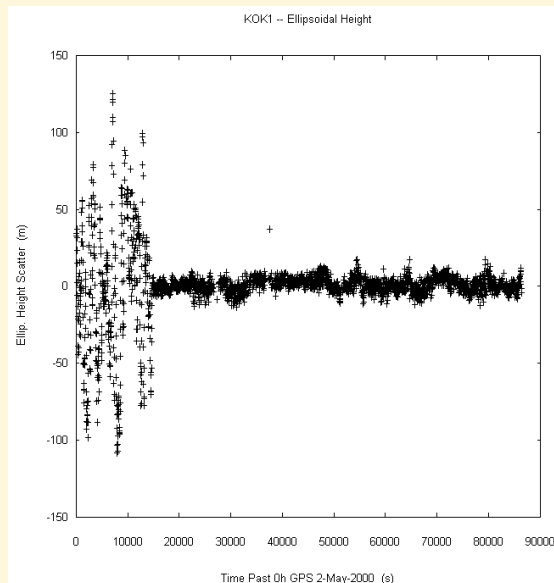
Navigation Message



- 25 frames, 5 subframes
- subframes 1–3 in jedem frame identisch
- minimale Daten nach 30 Sekunden, alle Daten nach 12,5 Minuten

Selective Availability

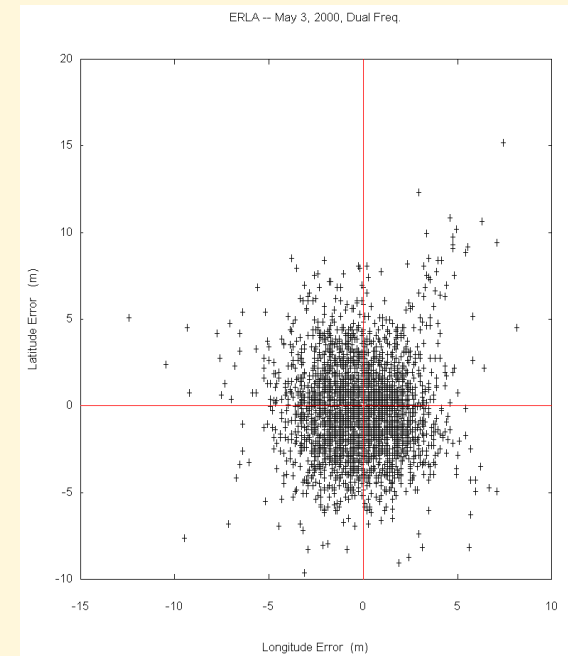
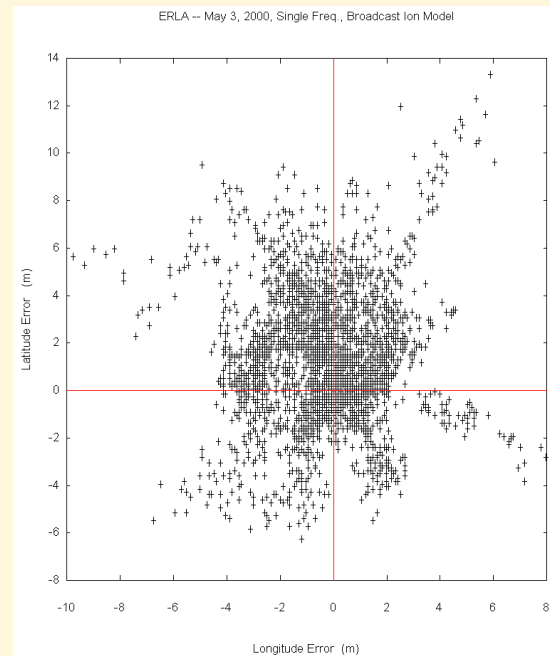
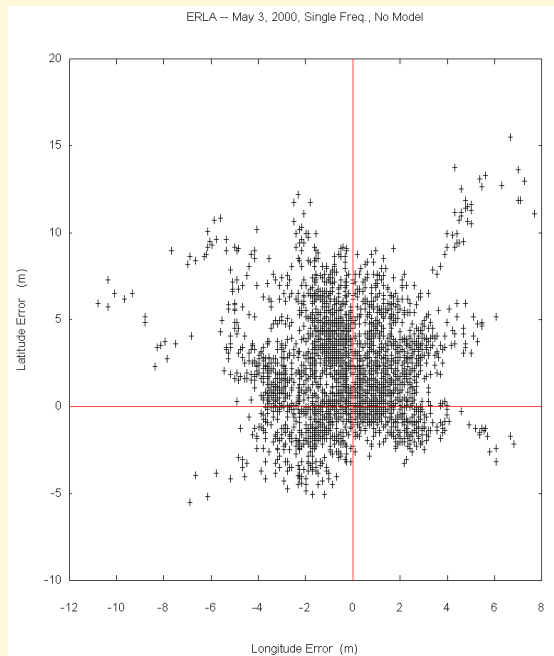
- absichtliche Verschlechterung der Daten (Zeit, Ephemeriden)
- Meßgenauigkeit mit SA ca. 100 m, ohne ca. 15 m
- 4. Juli 1991 bis 1. Mai 2000
- Option auf *Selective Deniability*



Atmosphärische Einflüsse

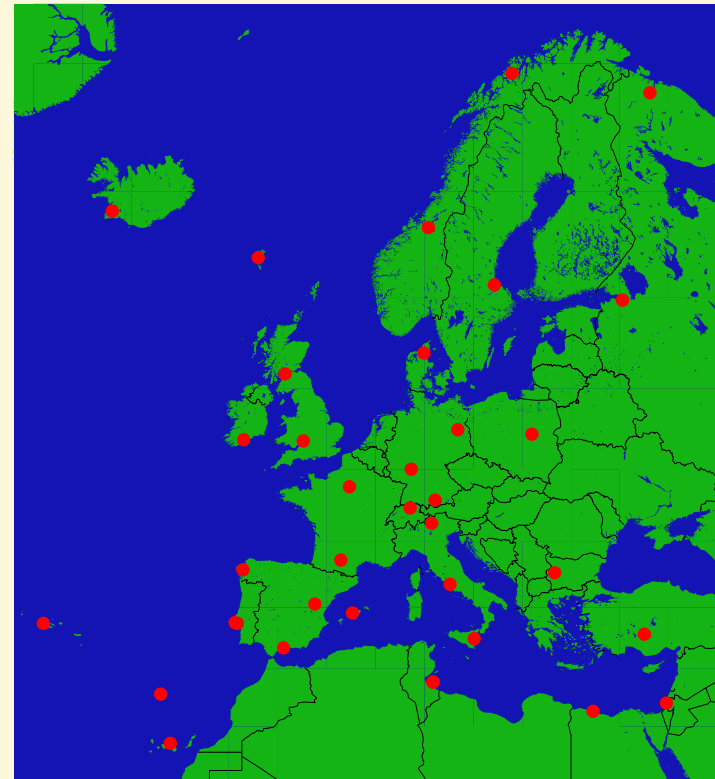
- Ionosphäre für ca. 50% der Ungenauigkeit von GPS verantwortlich
- Ionosphären­daten in Navigation Message
 - grobes Modell, nicht sehr zeitnah (wöchentliche updates)
- Laufzeitverzögerung abhängig von Signal-Frequenz
 - Vergleich von L1 und L2
- Vergleich mit Referenzempfänger
 - Differential GPS (DGPS)
- genaueres Ionosphären-Modell aus anderen Quellen

Genauigkeit von GPS



Augmentation Systems

- Idee: besseres Modell für Ionosphäre
- Verteilung der Daten:
 - Netz von terrestrischen Sendern
 - geostationäre Satelliten
- GPS-ähnliches Signal, eigene PRNs
- Satellite Based Augmentation System:
 - WAAS (Nordamerika)
 - EGNOS (Europa)
 - MSAS (Japan)



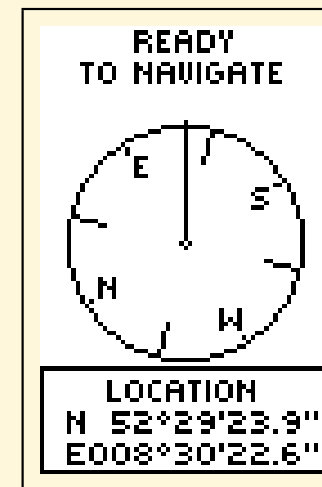
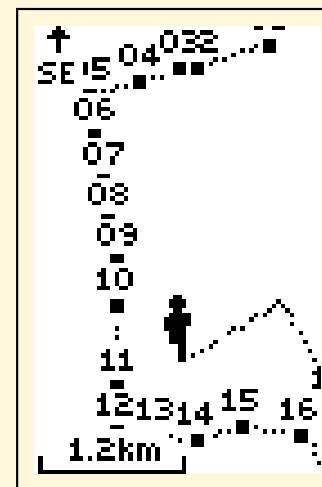
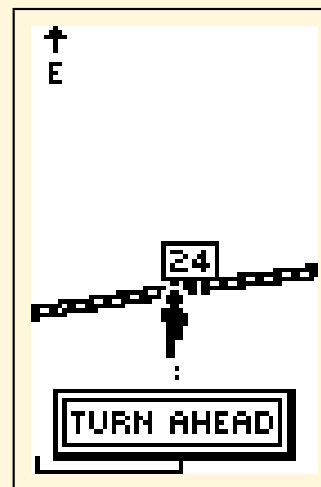
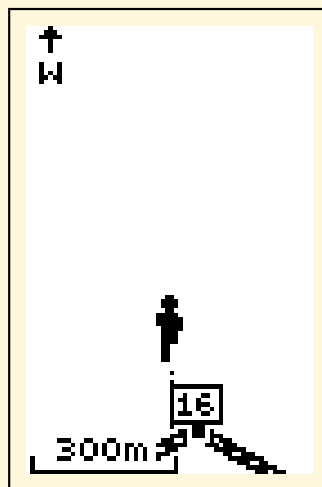
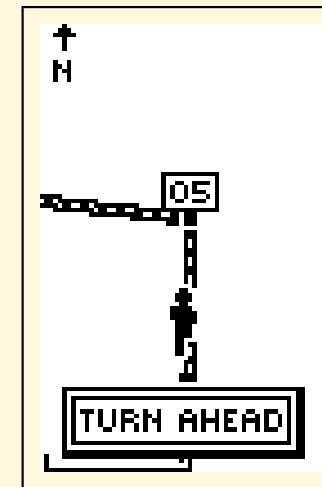
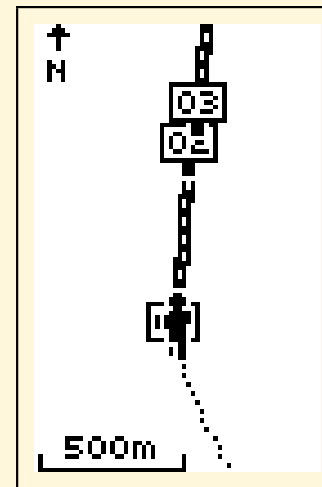
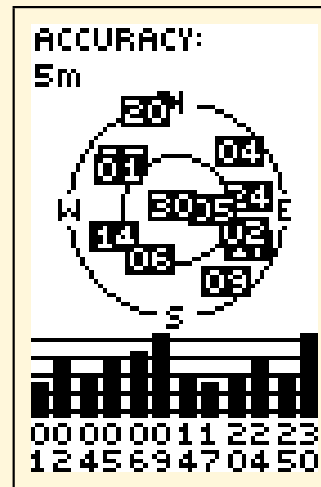
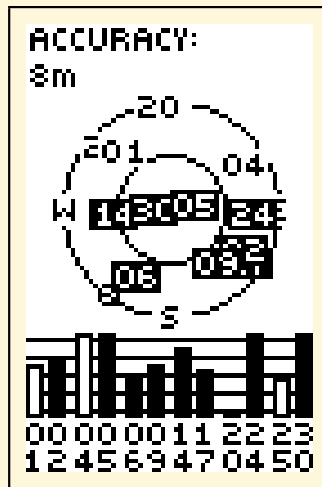
Neuerungen

- Forderung: Kompatibilität mit bestehenden Verfahren
- mittelfristige Neuerungen:
 - L2C-, M-, Interplex-Code: ab 2005 (Block IIR-M)
 - L5 (1176,45 MHz): ab 2006 (Block IIF)
 - insgesamt 7 Signale auf 3 Frequenzen
 - IOC 2010, FOC 2013
- langfristige Planungen:
 - L1C: Modernisierung von C/A
 - Koordination mit anderen GPSSs

Alternativen

- GLONASS (Sowjetunion bzw. Russland)
 - Globalnaya Navigacionnaya Sputnikovaya Sistema
 - nominell 24 Satelliten, derzeit 8 funktionsfähig
 - $i = 65^\circ$, 3 Ebenen
 - 2 Frequenzen, FDMA statt CDMA
 - kein Anti-Spoofing, keine Selective Availability
- Galileo (Europa)
 - 27 Satelliten + 3 Spares, 3 Ebenen
 - 11 Signale, öffentliche und kommerzielle Nutzung, SAR
 - Anti-Spoofing durch Signatur, Public-Key-Verfahren
 - erste Satelliten 2005, FOC 2008

Anwendungen



Kurze Unterbrechung . . .

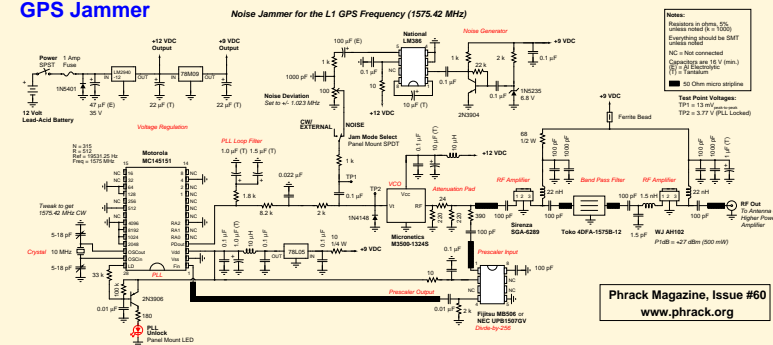
comp.risks

- erhöhte Gefahr von Kollisionen
- friendly fire
- Toll Collect
- GPS/Glonass Jammer für \$ 4000 (Januar 1998)

Stupid GPS Tricks



GPS Jammer



Anhänge

Stecknadelhaufen

- CDMA (Code Division Multiple Access)
- jeder Sender hat charakteristisches Bitmuster (*chip sequence*)

$$C_1 = (-1, -1, -1, -1)$$

$$C_2 = (+1, -1, +1, -1)$$

- Eigenschaften:

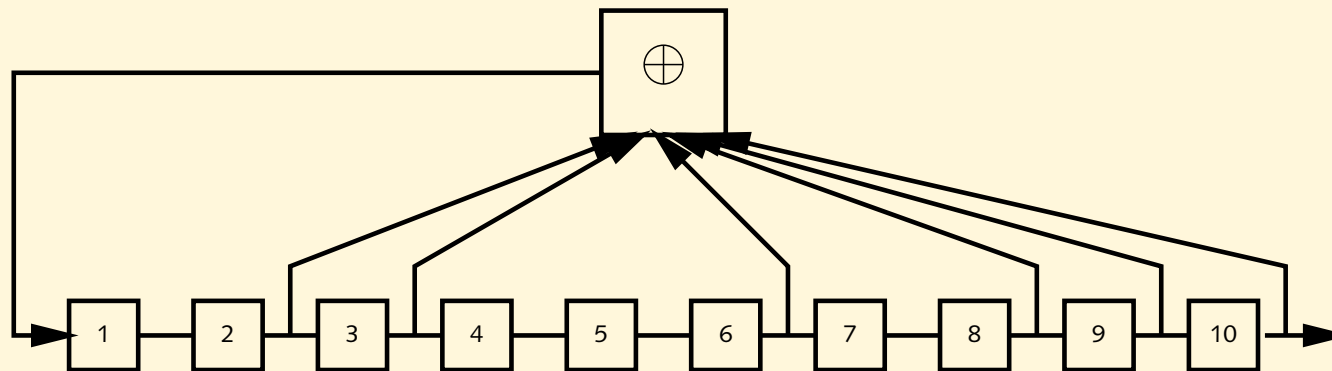
$$C_i \cdot C_i = 1 \quad C_i \cdot (-C_i) = -1 \quad C_i \cdot C_j = 0, \text{ für } i \neq j$$

- sende C für 1, $-C$ für 0
- Signal S ist Summe aller Bitmuster
- Bit von Sender i herausfiltern:

$$S \cdot C_i = (b_1 C_1 + \dots + b_i C_i + \dots + b_n C_n) \cdot C_i = b_i$$

Random Noise

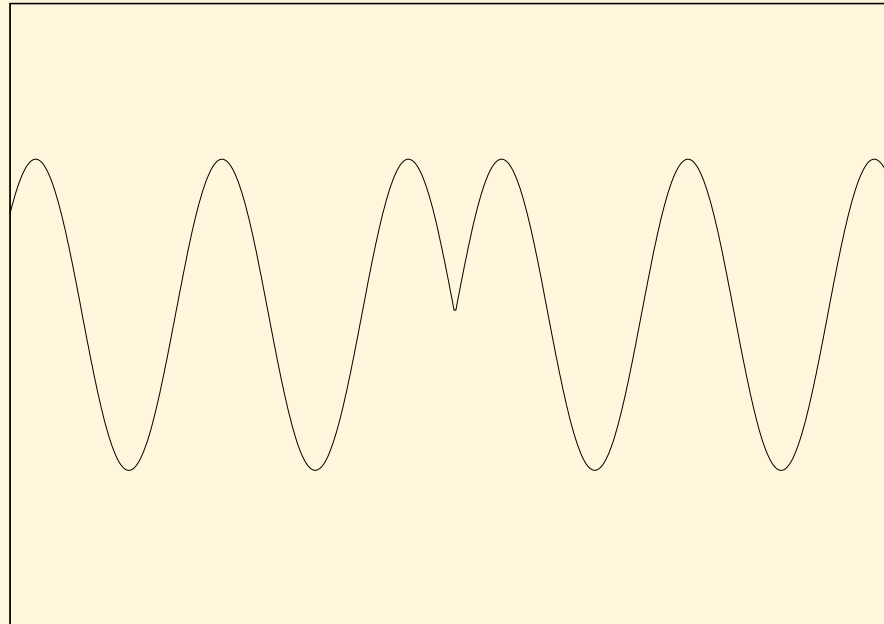
- C/A-Code: 1023 chips, 1,023 MHz, 1 ms Dauer
- 2 Gold-Codes durch *linear feedback shift registers*



- 36 verschiedene PRNs (Pseudo Random Noise)
- PRNs 1–32 für GPS-Satelliten, 33–36 für andere Sender
- P-Code: 15345000 chips, 10,23 MHz, 7 Tage Dauer

Signal-Erzeugung

- Datenstrom: Modulo-2-Summe aus Code und navigation message
- Kodierung per BPSK im L1- bzw. L2-Signal
- Binary Phase Shift Keying



Differential GPS

- Idee: viele Fehler identisch für benachbarte Empfänger
- Referenzempfänger an bekannter Position
- zwei Möglichkeiten:
 - nachträgliche Korrektur durch Verknüpfung der Messungen
 - online-Korrektur
- *Ranging-Code Differential*:
 - Messung der Differenz $R_p - R_t$ für jeden Satelliten
 - atmosphärische Fehler und Uhr-/Ephemeriden-Fehler
 - Empfänger muß Position der Referenzstation nicht kennen
- DGPS in Deutschland: Sender in Mainflingen, Telekom und BfK

Quellen

Einige der gezeigten Abbildungen stammen aus frei zugänglichen Quellen im WWW. Die Mehrzahl von ihnen dürfte einem Copyright unterliegen. Sollte ein Copyright-Inhaber Einwände gegen die Veröffentlichung innerhalb dieser Präsentation haben, möge er sich bitte an den Autor wenden.

Some of the images shown in this presentation were downloaded from publically available sources in the WWW. Most of them are probably copyrighted. If a copyright owner objects to the use and publication of his/her images in the context of this presentation, please contact the author.