

Moderne Navigationsverfahren

Experimente zur Technik des GPS- Systems

Ulrich Schreiber
TU München

Orientierung ist wichtig...

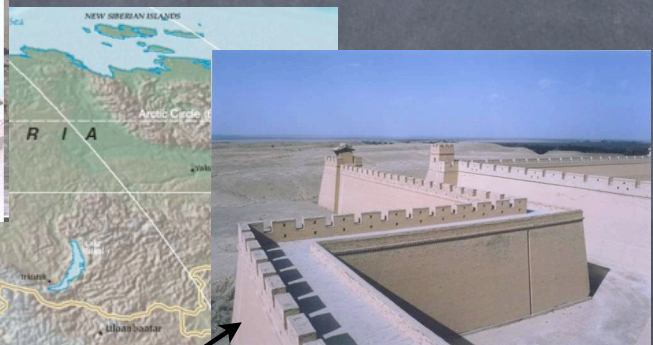


... um gefährliche Stellen
zu vermeiden



... um Territorien zu trennen

Nutzung von Handelswegen

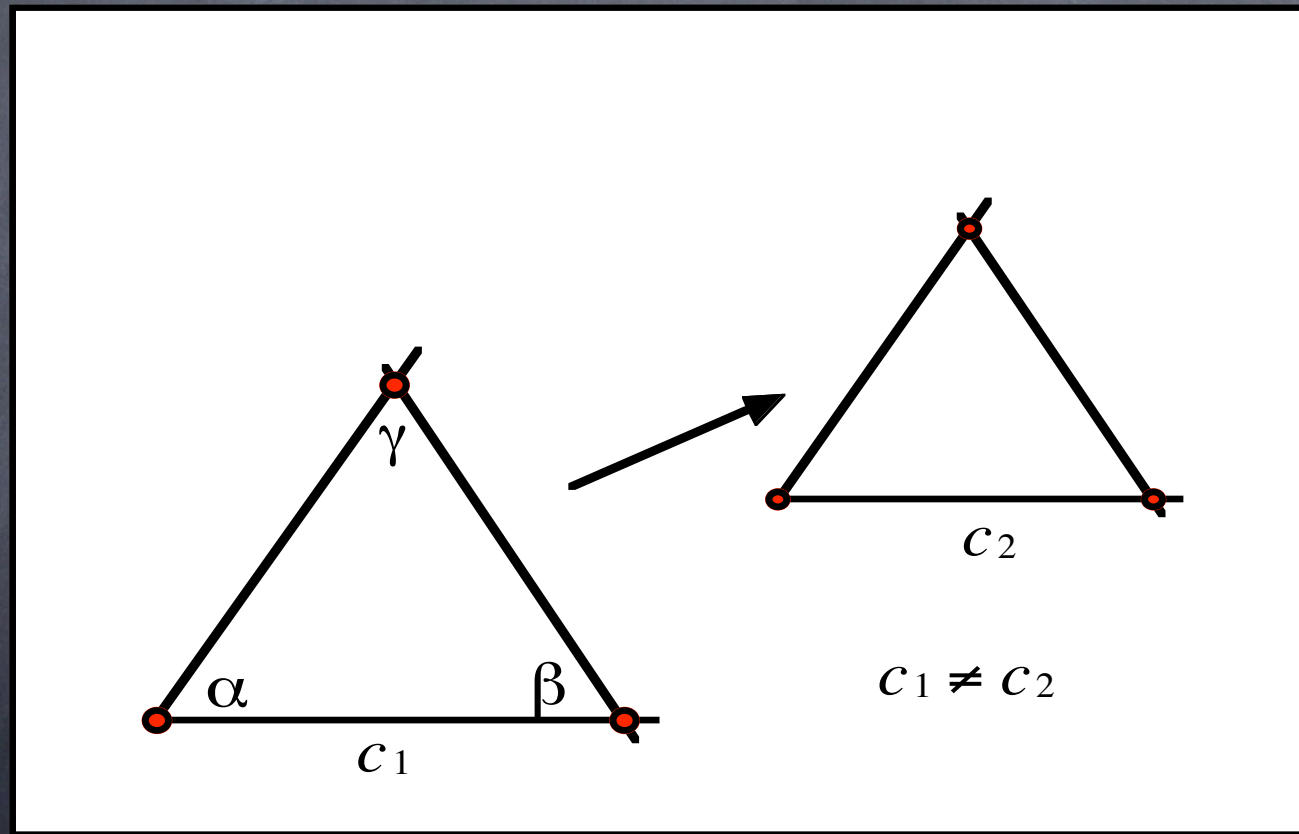


Historie der Vermessung

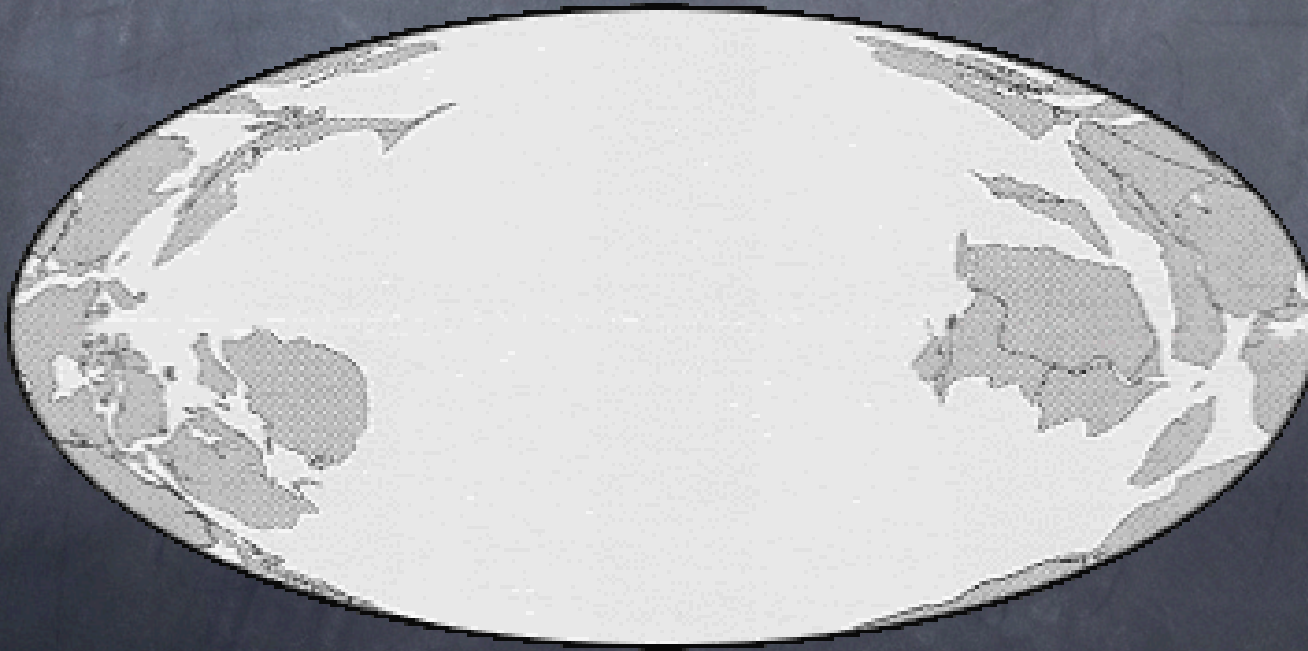


- Claudius Ptolemäus (ca. 100–175) wendet erstmalig Gesetzmäßigkeiten der Dreiecksberechnung auf Geografie an
- Anwendung in Europa erst Ende 16. Jahrh.
- Vertrag zur "Mitteleuropäischen Gradmessung" etabliert Triangulation 1864
- Triangulationspunkte waren meistens bedeutende Landmarken (Berge, Kirchen...)

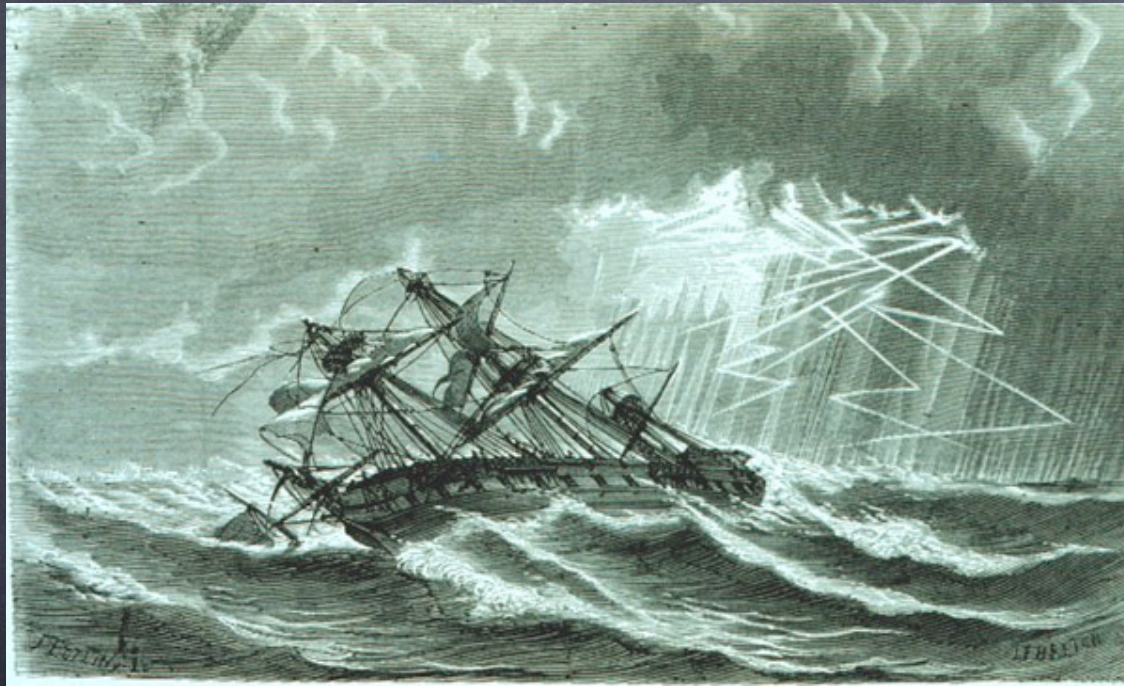
Triangulation, Trilateration und Maßstab



Die tektonische Plattenverschiebung
verändert die Oberfläche der Erde
kontinuierlich

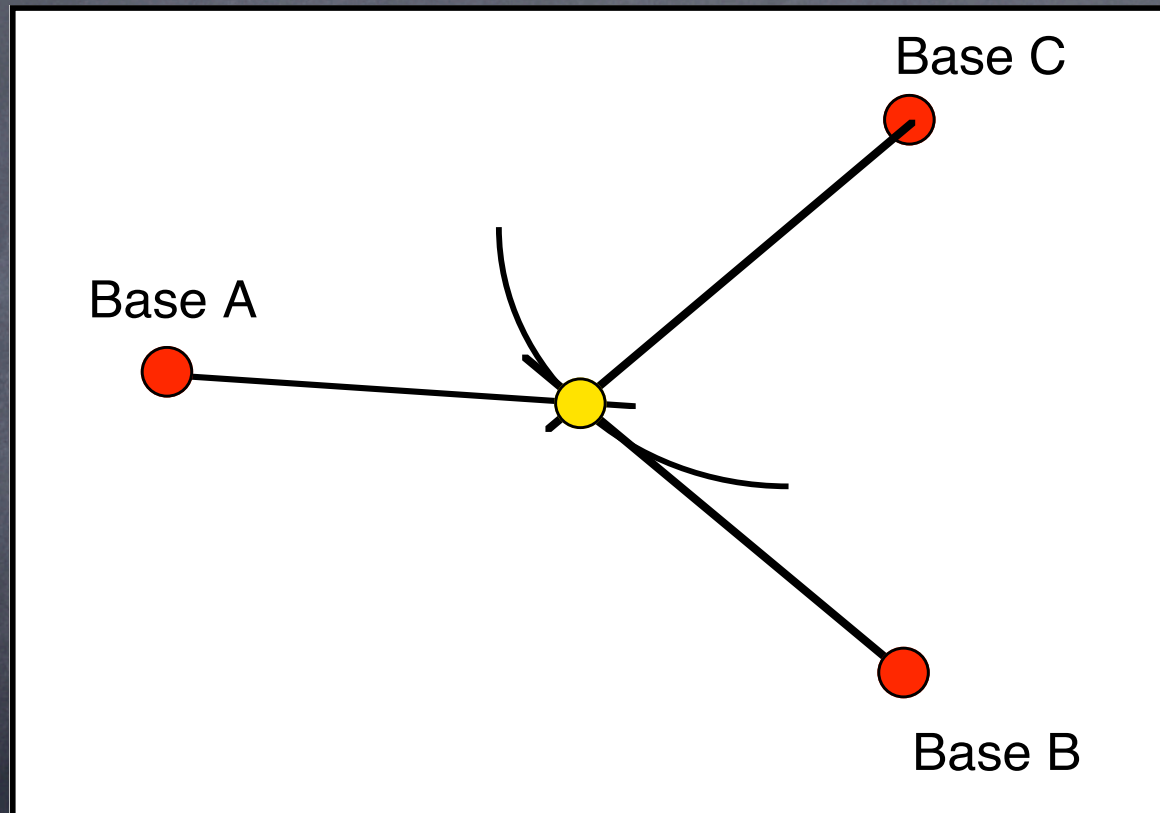


Schiffsnavigation



- ⦿ keine Landmarken
- ⦿ Strömungen
- ⦿ Geschwindigkeit unbekannt
- ⦿ Untiefen

Die Umkehrung der Methode ist dann "Positionierung"



Streckenmessungen zu bekannten Punkten

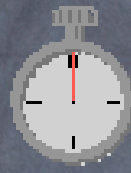
Technisch kann man Strecken leichter genau messen als Winkel

- Hochgenaue Triangulation ist schwierig wenn nicht optisch ausgeführt
- Optische Methoden sind nicht wetterunabhängig
- Was macht man bei Zielen hinterm Horizont



Man sucht sich "bewegliche" Fixpunkte
im Orbit - Satelliten

Pulslaufzeitverfahren



$$d = \frac{c \cdot t}{2}$$

Ein kurzer (Licht-) Puls breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und wird von einem Objekt reflektiert. Das empfangene Echo stoppt die Zeitmessung

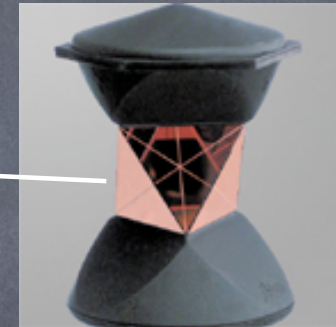
Praktische Anwendungen



Vermessung



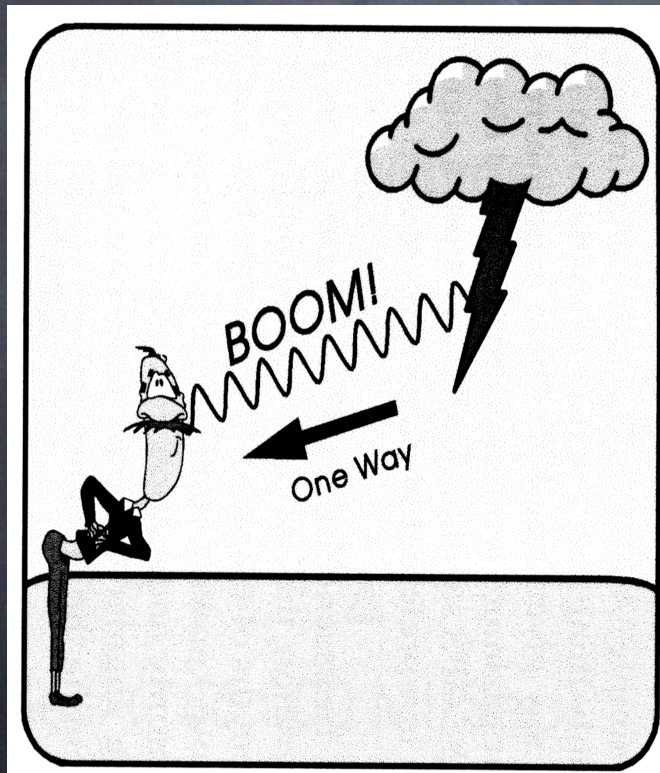
Straßenverkehr



Und noch ein Problem...

...das Benutzersegment soll einfach sein

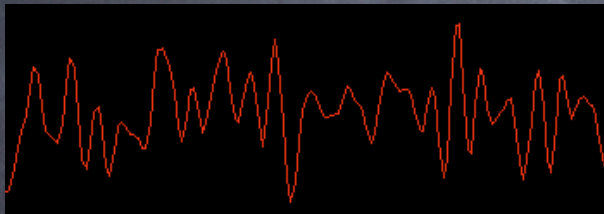
Alternative: 1-Weg Streckenmessung



- Der Ort des Satelliten ist bekannt
- Der Sender sendet einen Code zu einer exakt bekannten Zeit
- Der Empfänger bestimmt die Zeit an dem er den Code empfängt
- Der Empfänger kontrolliert seine Uhr um Fehler auszuschließen

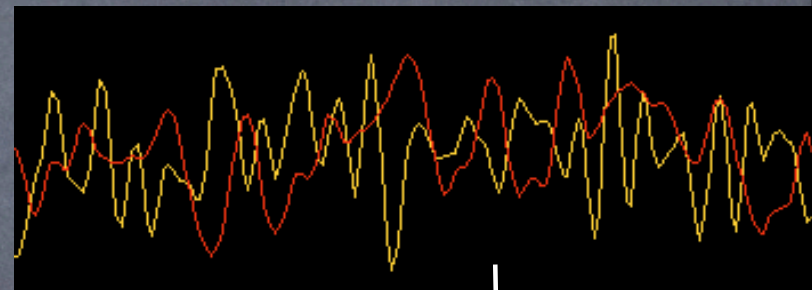
$$d = c \cdot t$$

Was heißt eigentlich Code Messung?

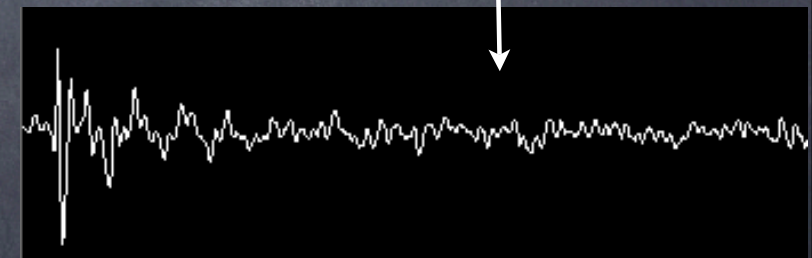


Satellit bei: $t = 0$

Wellen-
ausbreitung



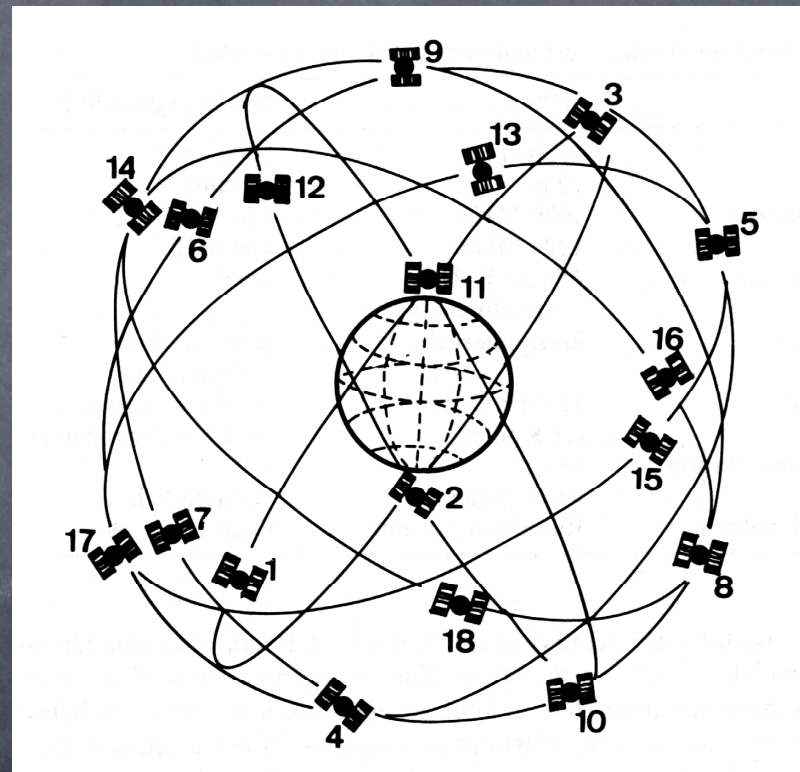
Empfängersignal
für $t = 0$



$\Delta t = \text{Laufzeit}$

Die vollständige Konstellation

- 24 + 2 Satelliten befinden sich auf 6 Bahnebenen
- Umlaufzeit: ca. 12 h
- 4 (oder mehr) Satelliten sind an jedem Ort gleichzeitig zu "sehen"



... weitere Überlegungen

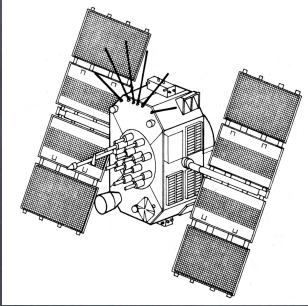
- Wir befinden uns auf einer sich drehenden Erde
- Satelliten haben Bahnen die fest im Raum liegen
- Daher müssen wir von einem System (raumfest) in ein anderes System (erdfest) transformieren

Apropos Erddrehung...

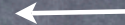
- Ein Punkt hier in Wetzell bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von rund 352 m/s nach Osten - das muß bei der Streckenberechnung berücksichtigt werden
- Von der Bahngeschwindigkeit der Erde mit ca. 18,6 km/s reden wir gar nicht.
- Zum Glück machen die Satelliten die ja mit...

Wie können wir das alles simulieren?

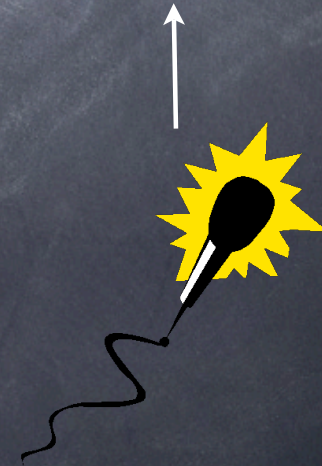
einfacher Satellit	Code Messungen
einfacher Empfänger	vergleichbare Qualität
anschauliche Signale	Phasenmessungen
einfaches Testfeld	Ionosphäreneffekte
	Qualitätsbegrenzung



Signal-
conditioner

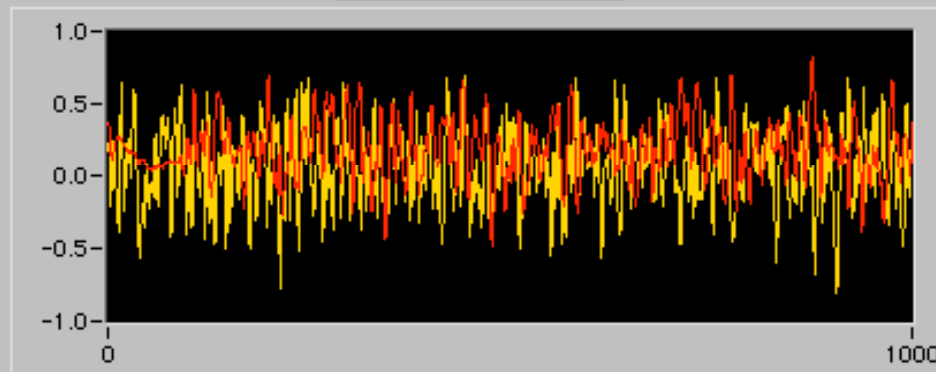


Sandbox for
LabVIEW
Modules

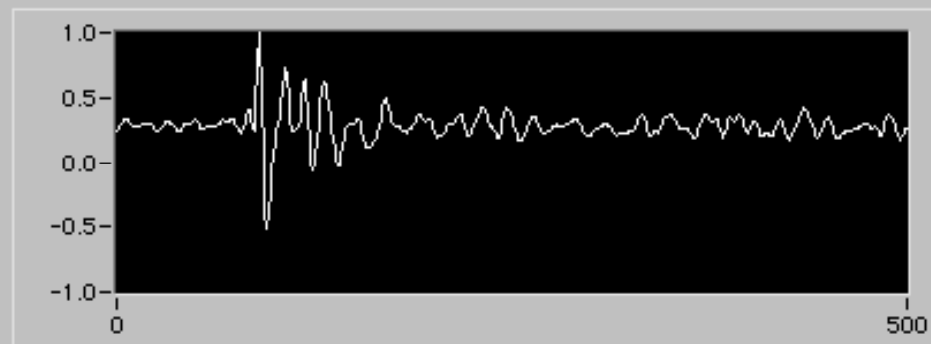


c/a Code Messungen

Time Domain Signal

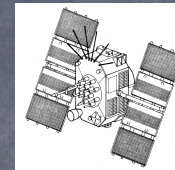


Cross Correlation Funktion



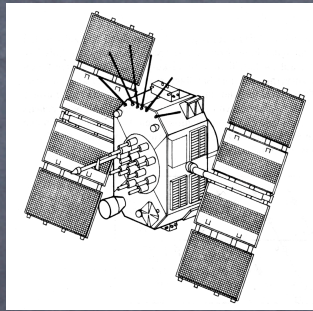
Es gibt da so einige Probleme

...wo ist der Anfang?



...und wo das Ende?

Die exakte Definition des Phasenzentrums ist ein dauerndes Problem

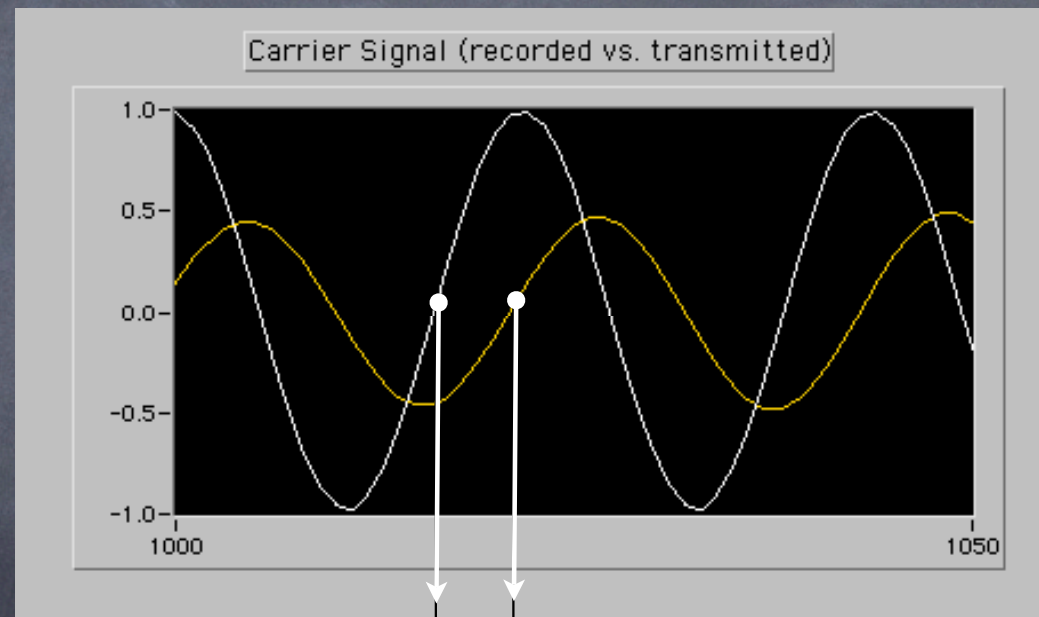


... am Satelliten



... und am Lautsprecher

Trägerphasenmessung



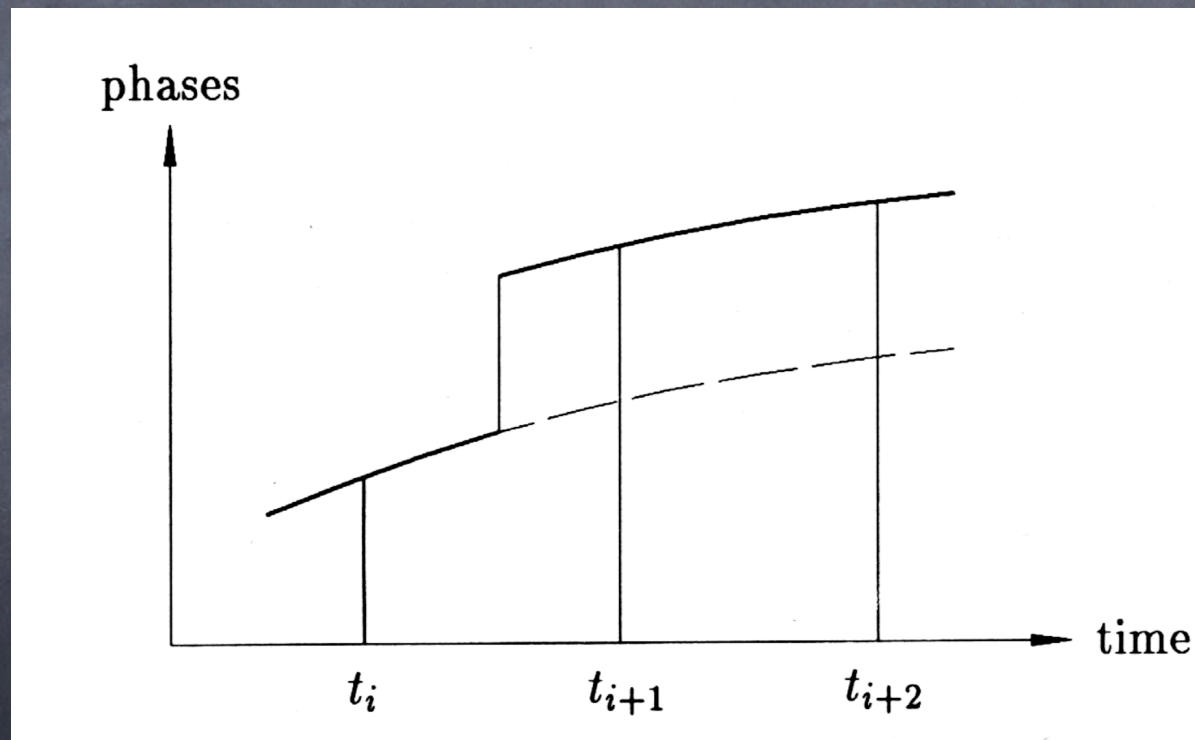
$$\delta\varphi = 78^\circ$$

$$\lambda_{1000\text{ Hz}} \approx 0.3646\text{ m} \rightarrow 1^\circ \approx 1\text{ mm}$$

Phasenmessungen

- beste Auflösung $1^\circ \approx 1 \text{ mm}$ in der Simulation
- Die Lösung wiederholt sich nach einer Wellenlänge
- In der Realität ist die Wellenlänge $\approx 20 \text{ cm}$
- In der Simulation ist die Wellenlänge $\approx 35 \text{ cm}$

das Ergebnis: Mehrdeutigkeiten



Atmosphäreneinfluß

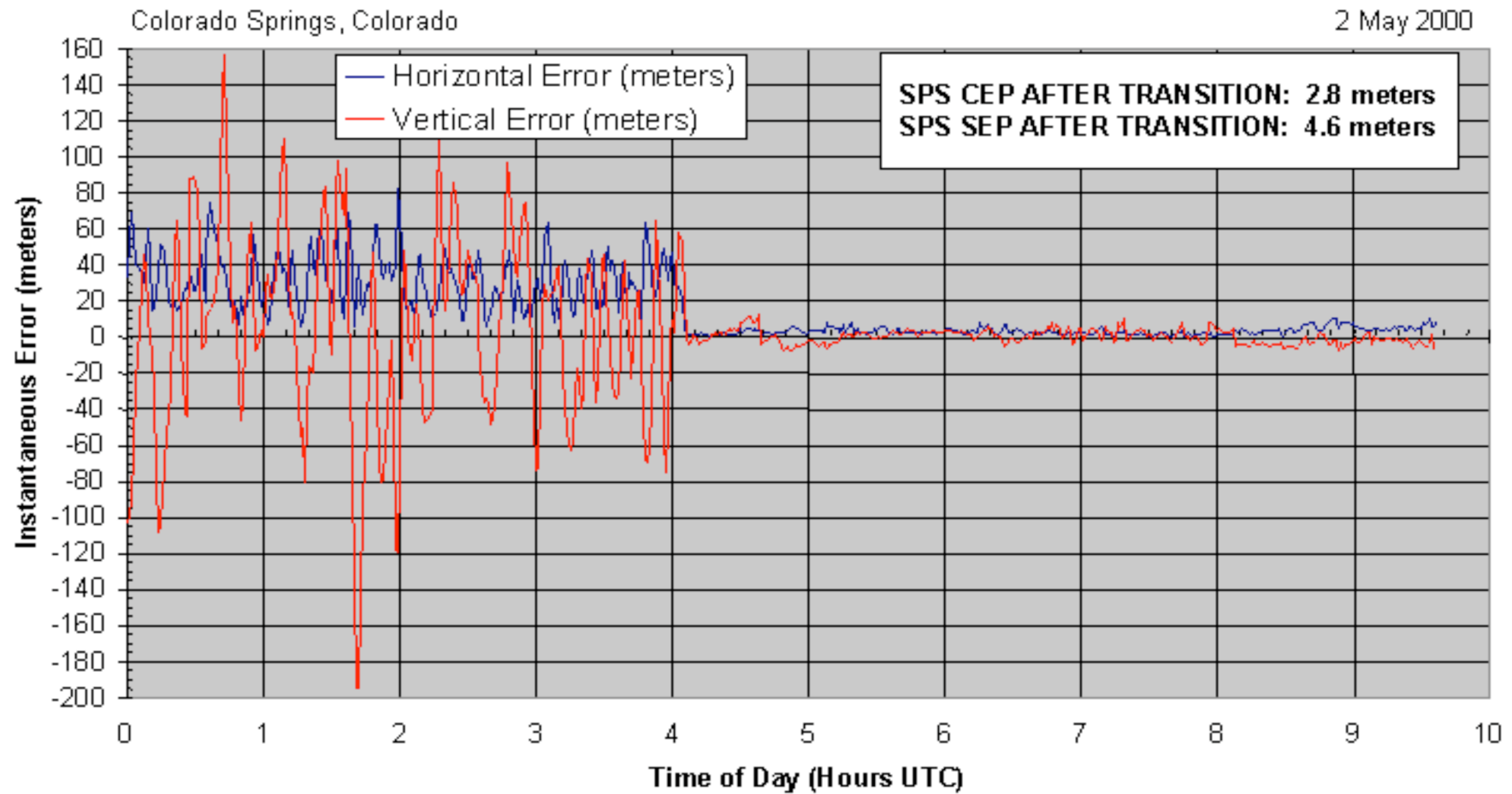
- Ionosphäre und Troposphäre verursachen zeitlich variable Laufzeitverzögerungen
- Das zeigt wie wichtig der Maßstab ist
- Durch Messungen auf 2 Frequenzen kann man diesen Einfluß (bis zu 9 m) korrigieren (Dispersion)
- Das wurde bei der Simulation auch berücksichtigt

Eingeschränkte Nutzbarkeit

- Wenn man die Satellitenposition unbemerkt verschiebt, dann verschlechtert sich die Streckenmessung
- Das kann durch eine Kontrollstation gemacht werden, ohne das der Nutzer es weiß
- Abhilfe: Differentielle Messungen



SA Transition -- 2 May 2000



Mehrwege-Ausbreitung

- nicht leicht vorhersagbar
- Das gleiche Signal wird mehrfach mit unterschiedlicher Verzögerung empfangen
- Die Korrelationsanalyse wird mehrdeutig
- besonders schwierig bei Autonavigation



Abhilfe: Verwendung von
Zusatzinformationen



Illustration der
Mehrwegeausbreitung

... und jetzt wird experimentiert