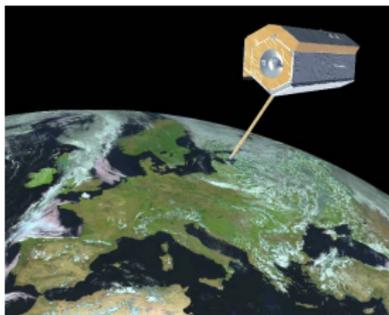


Positionsbestimmung im Weltraum mittels Distanzmessungen

Andrea Maier

Institut für Weltraumforschung
Abteilung für Satellitengeodäsie

Graz in Space
6.-7. September, 2012



Was ist eine Position?

- Lage eines Punktes im Raum (X,Y,Z) zu einem bestimmten Zeitpunkt

Wozu eine Position bestimmen?

- Erde:
 - ▶ Navigation an Land/auf See/in der Luftfahrt
 - ▶ Monitoring → Plattentektonik, Veränderung von Eismassen, Schwerfeld, ...
- Weltraum:
 - ▶ Satellitenbahn → wissenschaftliche Erkenntnisse (Atmosphäre, Sonneneinstrahlung, Schwerfeld, ...)

Wie wird eine Position bestimmt? Durch Messung der

- Laufzeit eines Signals von Station zu Satellit (**Distanzen**)
 - ▶ Global Navigation Satellite Systems (GNSS)
 - ▶ Satellite Laser Ranging (SLR)
- **Geschwindigkeiten** des Satelliten (Doppler Effekt)
 - ▶ Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS)
- **Richtungen** zum Satellit
 - ▶ Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Wie wird eine Position bestimmt? Durch Messung der

- Laufzeit eines Signals von Station zu Satellit (**Distanzen**)
 - ▶ Global Navigation Satellite Systems (GNSS)
 - ▶ Satellite Laser Ranging (SLR)
- **Geschwindigkeiten** des Satelliten (Doppler Effekt)
 - ▶ Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS)
- **Richtungen** zum Satellit
 - ▶ Very Long Baseline Interferometry (VLBI)



GPS
USA



GLONASS
Russia

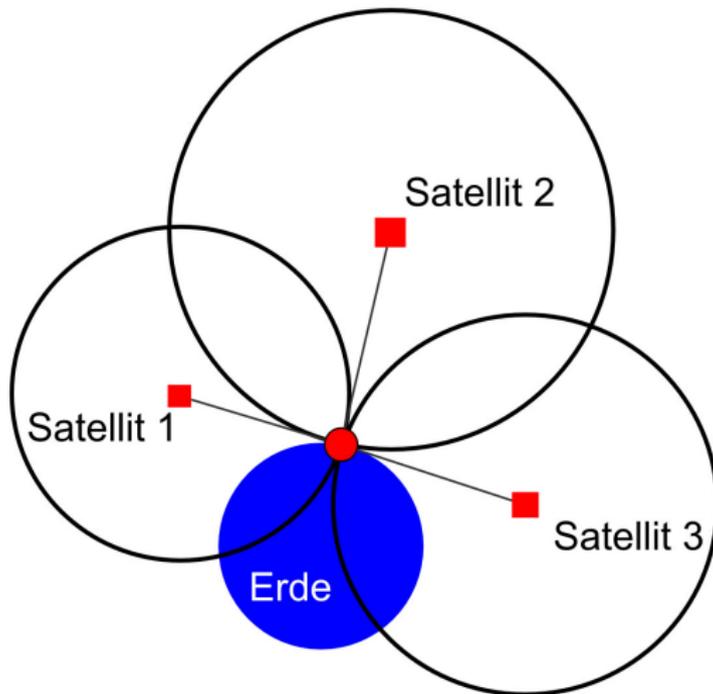


Galileo
Europe

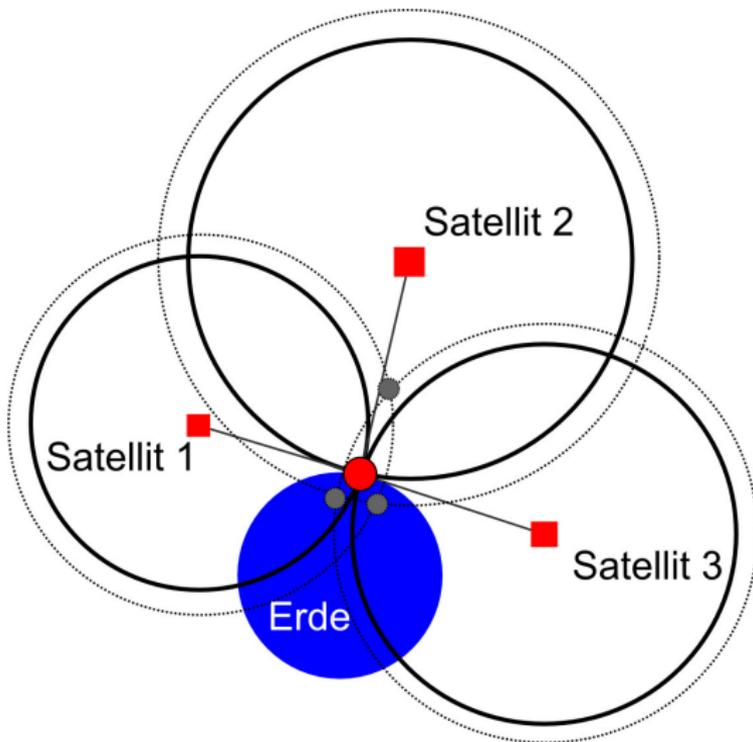


COMPASS
China

- Unbekannte? X,Y,Z

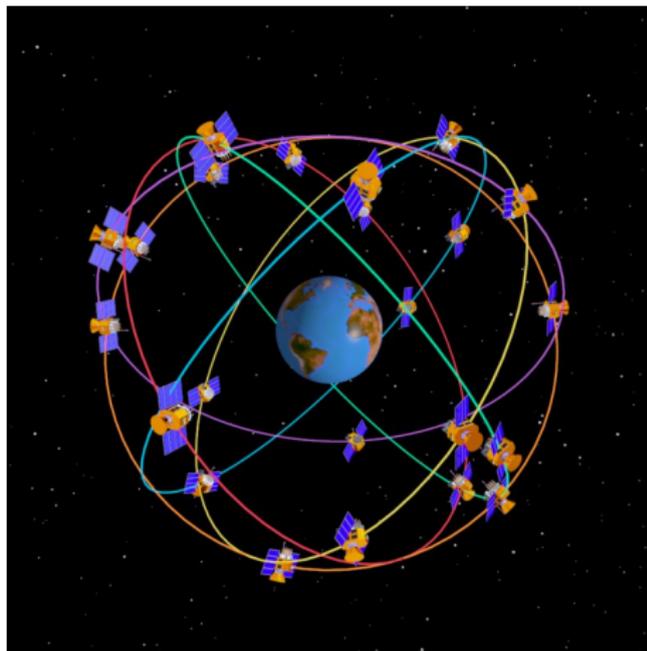


- Unbekannte? X,Y,Z, Empfängeruhrenfehler



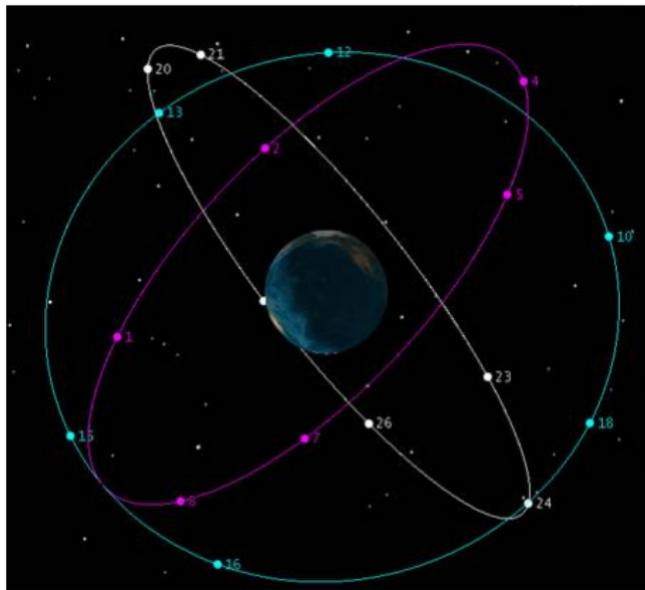
- **N**avigational **S**atellite **T**iming and **R**anging – **G**lobal **P**ositioning **S**ystem
- amerikanisches System
- für militärische Zwecke eingeführt
- kontrolliert vom US Department of Defense
- später für zivile Anwendungen freigegeben
- seit 1995 voll funktionsfähig
- Genauigkeit: 10m

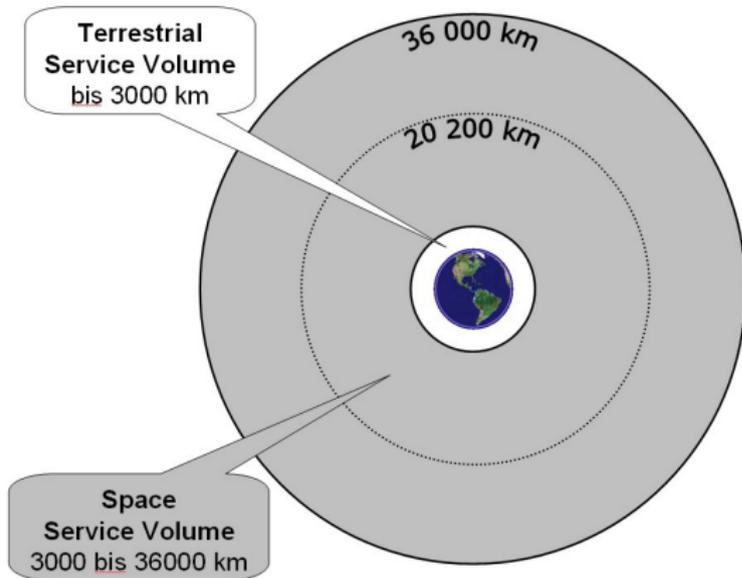
- aktuell 32 Satelliten
- 6 kreisförmige Bahnebenen
- pro Bahnebene mind. 4 Satelliten
- 55° Inklination
- Bahnhöhe: 20 200 km
- Umlaufzeit: 11 h 58 min



- initiiert von der Europäischen Kommission und der Europäischen Weltraumagentur
- für zivile Zwecke konzipiert
- von ziviler Einrichtung kontrolliert
- unabhängiges System
- Okt 2011: Launch der ersten 2 Satelliten
- Sep 2012: Launch von 2 weiteren Satelliten
- operationell planmäßig 2019
- Genauigkeit: 8m

- 30 Satelliten
- 3 kreisförmige Bahnebenen
- pro Bahnebene 9 Satelliten
+ 1 Ersatzsatellit
- Bahnhöhe: 23 260 km
- Umlaufzeit: 14 h 22 min





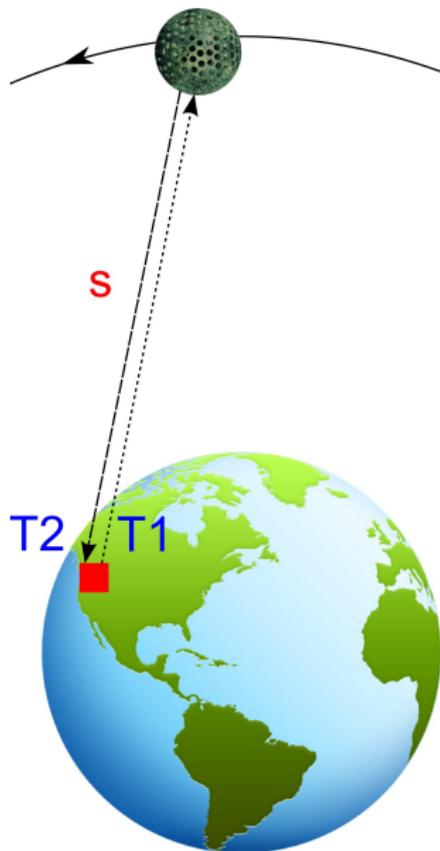
■ Terrestrial Service Volume

- ▶ einheitliche Signalstärke
- ▶ fast 100% Abdeckung
- ▶ hohe Genauigkeit

■ Space Service Volume

- ▶ Signalstärke schwankt
- ▶ zeitweise kein Signalempfang
- ▶ geringere Genauigkeit

⇒ GPS unzulänglich für Satelliten mit Bahnhöhen $> 3000\text{km}$

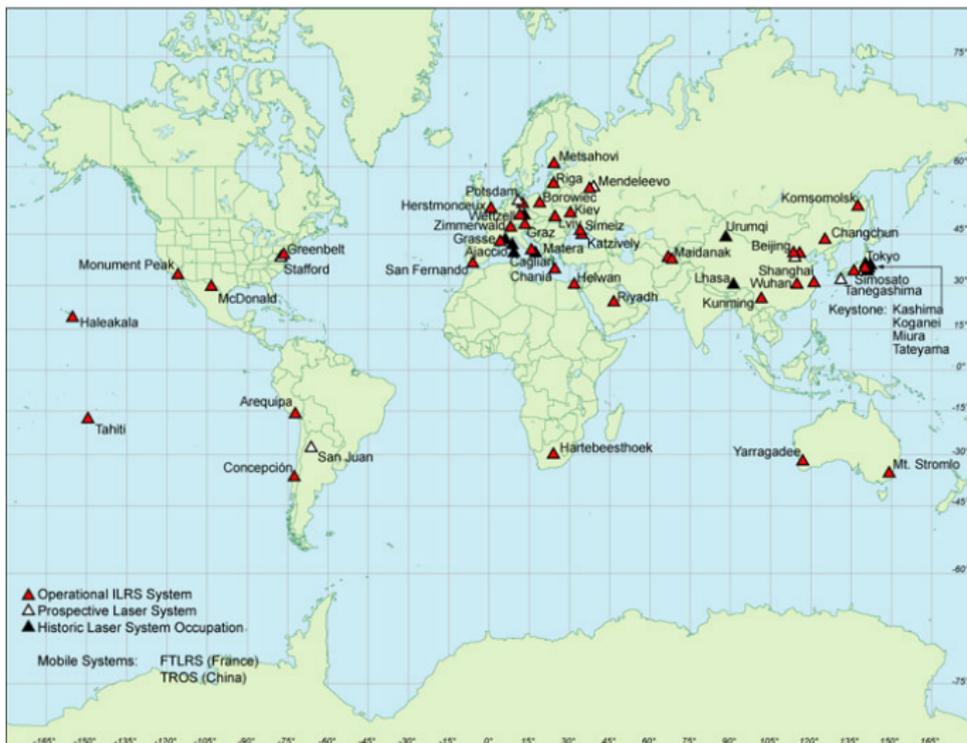


- seit 1975
- passiv
- gemessen:
Zeitpunkt des Sendens T_1 ,
Zeitpunkt des Empfangens T_2
- berechnet:
Einwegdistanz zwischen Station
und Satellit (s)

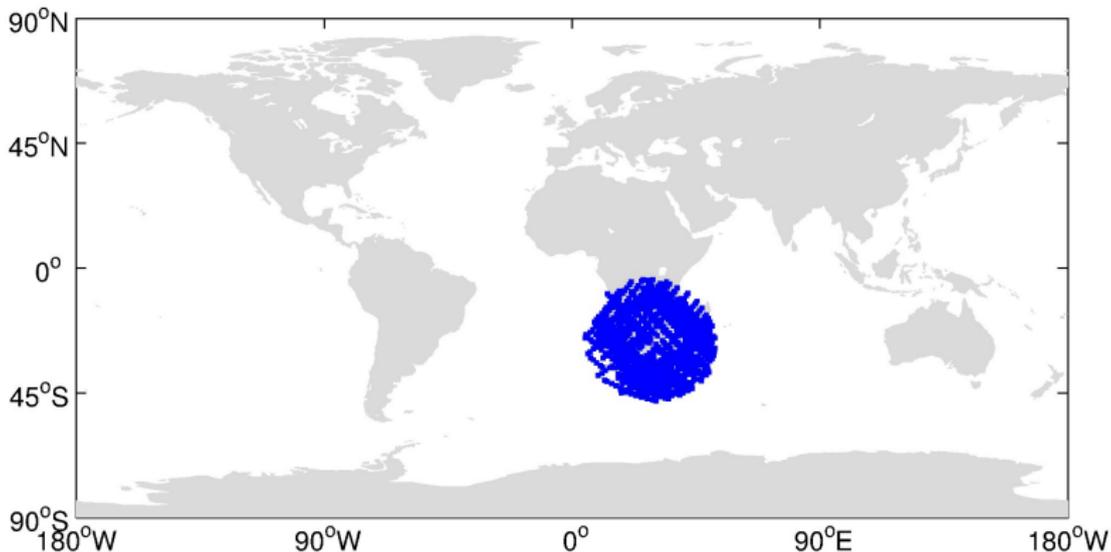
$$s = v \cdot t = c \cdot \frac{T_2 - T_1}{2}$$

- gesucht:
Position des Satelliten (X,Y,Z)
1 Messung \Rightarrow 1 Unbekannte

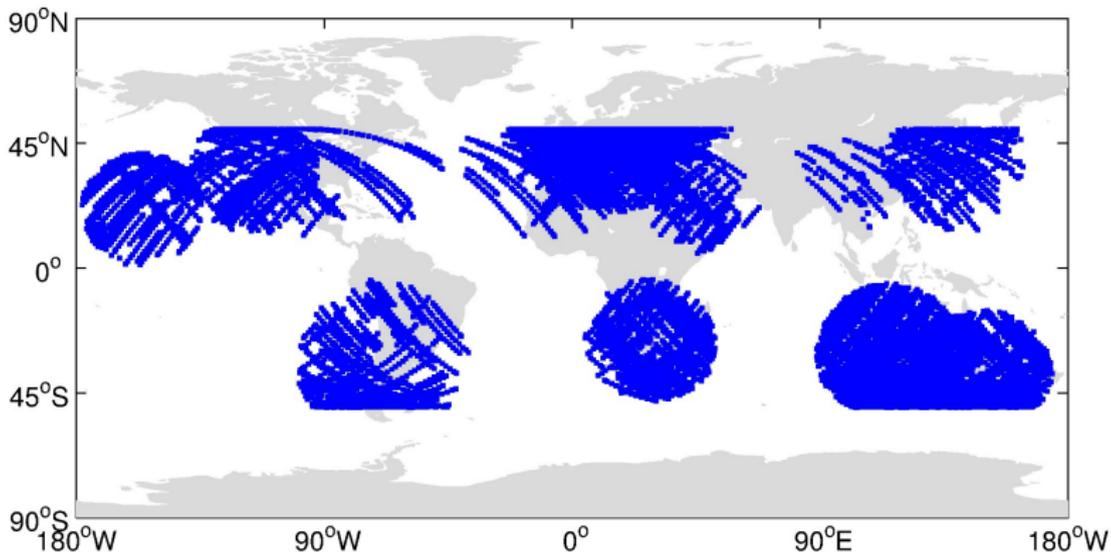
■ International Laser Ranging Network



- 1 Station beobachtet 1 Satellit (Zeitraum: 1 Monat)

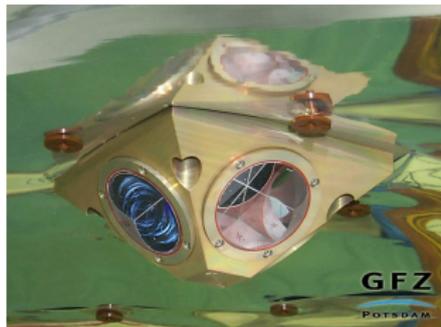


- n Stationen beobachten 1 Satellit (Zeitraum: 1 Monat)





LAGEOS 2



TerraSAR-X



COMPASS

Limitationen

- Reflektor muss zur Station ausgerichtet sein
- reflektierte Signalstärke ist distanzabhängig
- Messungen zu Retroreflektoren am Mond schwierig (360,000 bis 400,000 km)
- Positionsbestimmung im fernen Weltraum?

Wie wird eine Position bestimmt? Durch Messung der

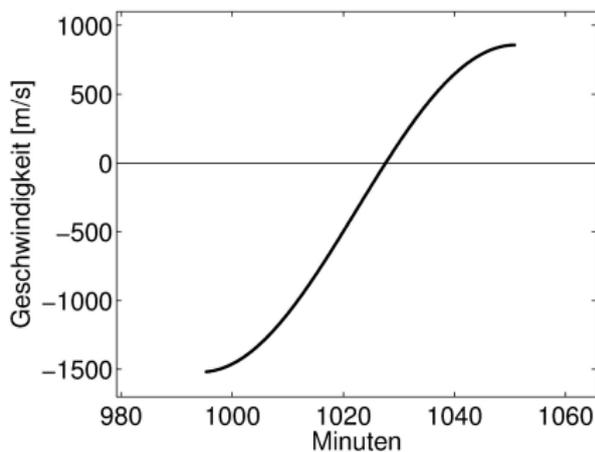
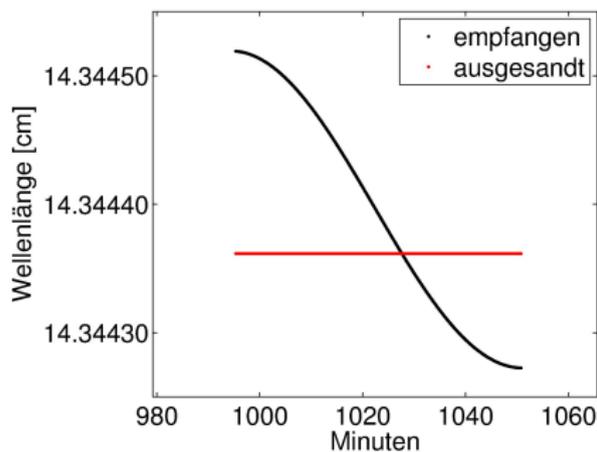
- Laufzeit eines Signals von Station zu Satellit (**Distanzen**)
 - ▶ Global Navigation Satellite Systems (GNSS)
 - ▶ Satellite Laser Ranging (SLR)
- **Geschwindigkeiten** des Satelliten (Doppler Effekt)
 - ▶ Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS)
- **Richtungen** zum Satellit
 - ▶ Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Doppler Effekt

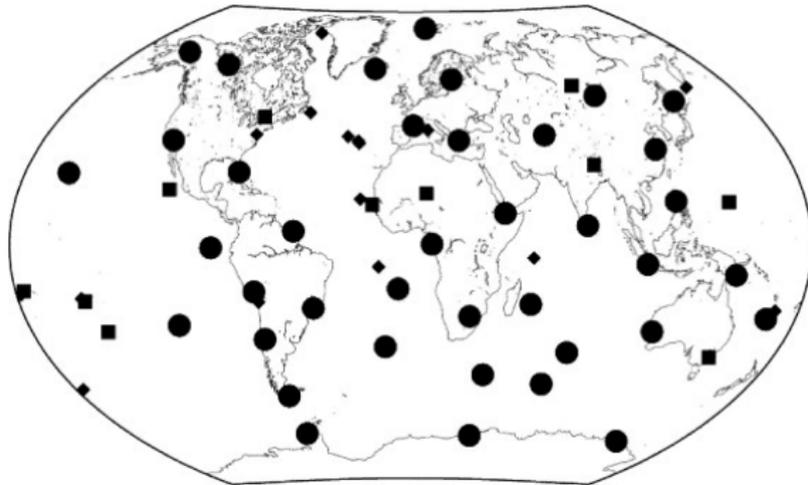
- benannt nach Christian Doppler (1803-1853)
- Quelle und Beobachter bewegen sich relativ zueinander \Rightarrow

empfangene Wellenlänge \neq gesandte Wellenlänge

- Doppler Effekt \Rightarrow Geschwindigkeit \Rightarrow Position



- seit 1998
- für präzise Bahnbestimmung von Altimetersatelliten entwickelt
- Antenne am Satellit empfängt Signale von Stationsnetzwerk
- Netzwerk umfasst ca. 60 Stationen weltweit
- Genauigkeit: 4 cm (Envisat)

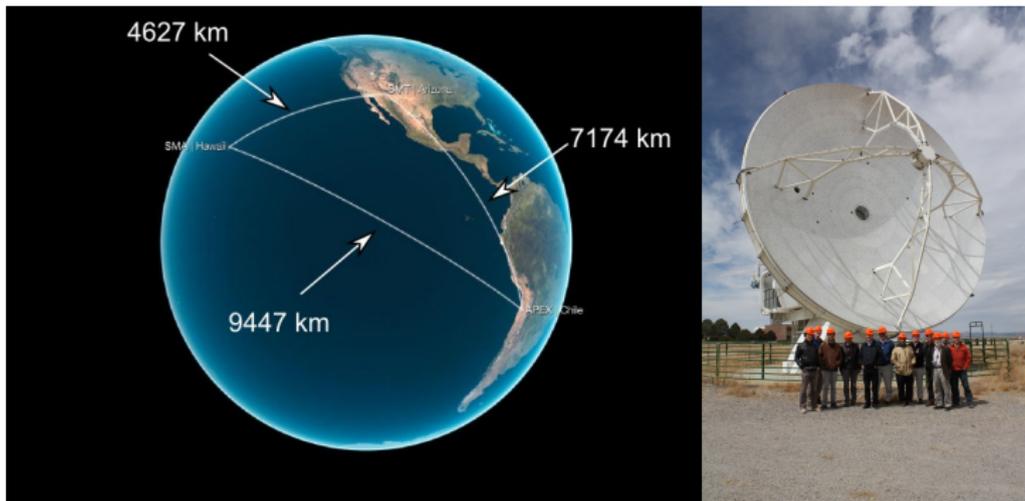


Wie wird eine Position bestimmt? Durch Messung der

- Laufzeit eines Signals von Station zu Satellit (**Distanzen**)
 - ▶ Global Navigation Satellite Systems (GNSS)
 - ▶ Satellite Laser Ranging (SLR)
- **Geschwindigkeiten** des Satelliten (Doppler Effekt)
 - ▶ Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS)
- **Richtungen** zum Satellit
 - ▶ Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Very Long Baseline Interferometry

- um 1960 entwickelt
- Radioteleskope werden auf die gleiche Radioquelle ausgerichtet
- lange Basislinien steigern die räumliche Auflösung
- Radiowellen kommen bei Stationen zu unterschiedlichen Zeitpunkten an \Rightarrow Winkel zur Radioquelle



Methoden		seit/ab	Genauigkeit	Anwendungen
GNSS	GPS	1995	10m	Navigation, Monitoring
	Galileo	2019	8m	
SLR		1975	2-3cm	Bahnbestimmung (erdnah)
Doppler		1957	4cm (Envisat) 100m (LRO)	Bahnbestimmung (erdnah, erdfern)
VLBI		1960	1km (Huygens)	Bahnbestimmung (erdfern), Kontrolle Doppler