



---

# Die Vermessung der Welt – mit Quasaren

Johannes Böhm

28. Oktober 2022



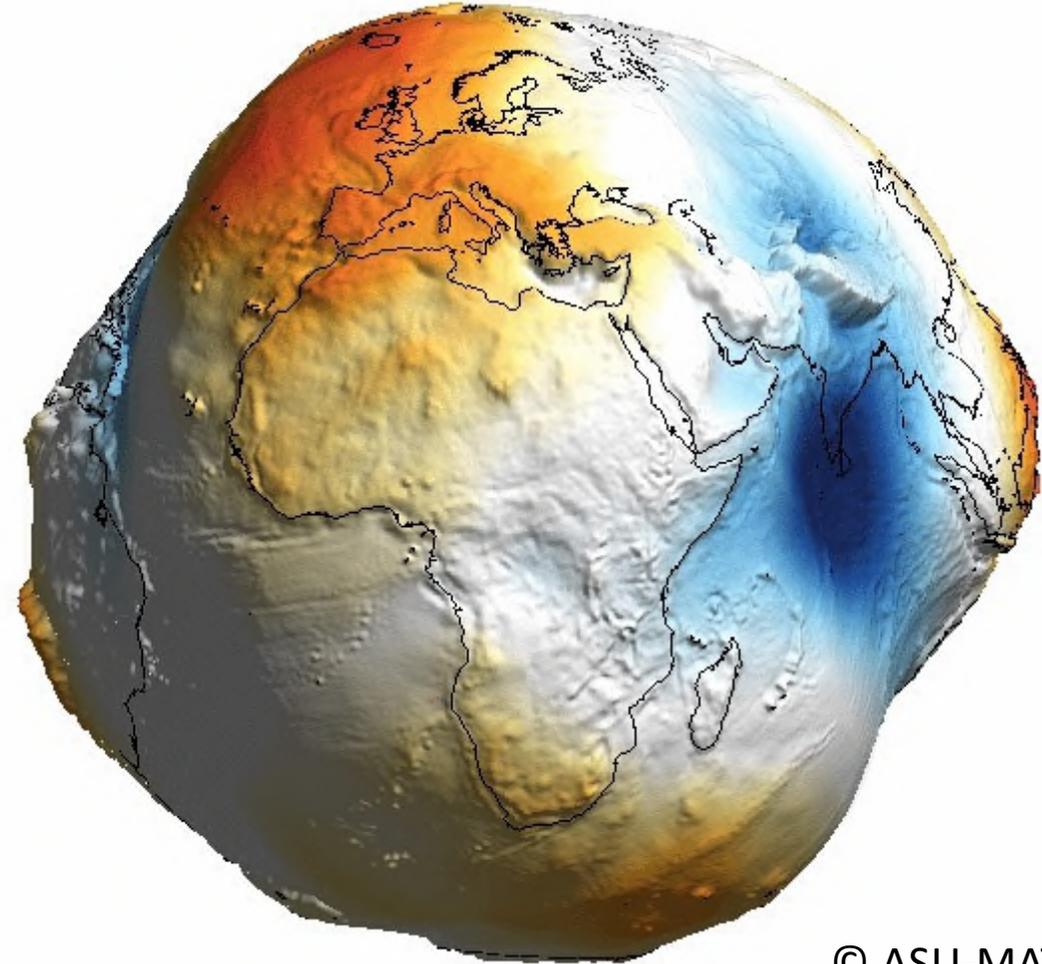
TU Wien  
Department of Geodesy and Geoinformation  
Research Division Higher Geodesy

# Höhere Geodäsie

---

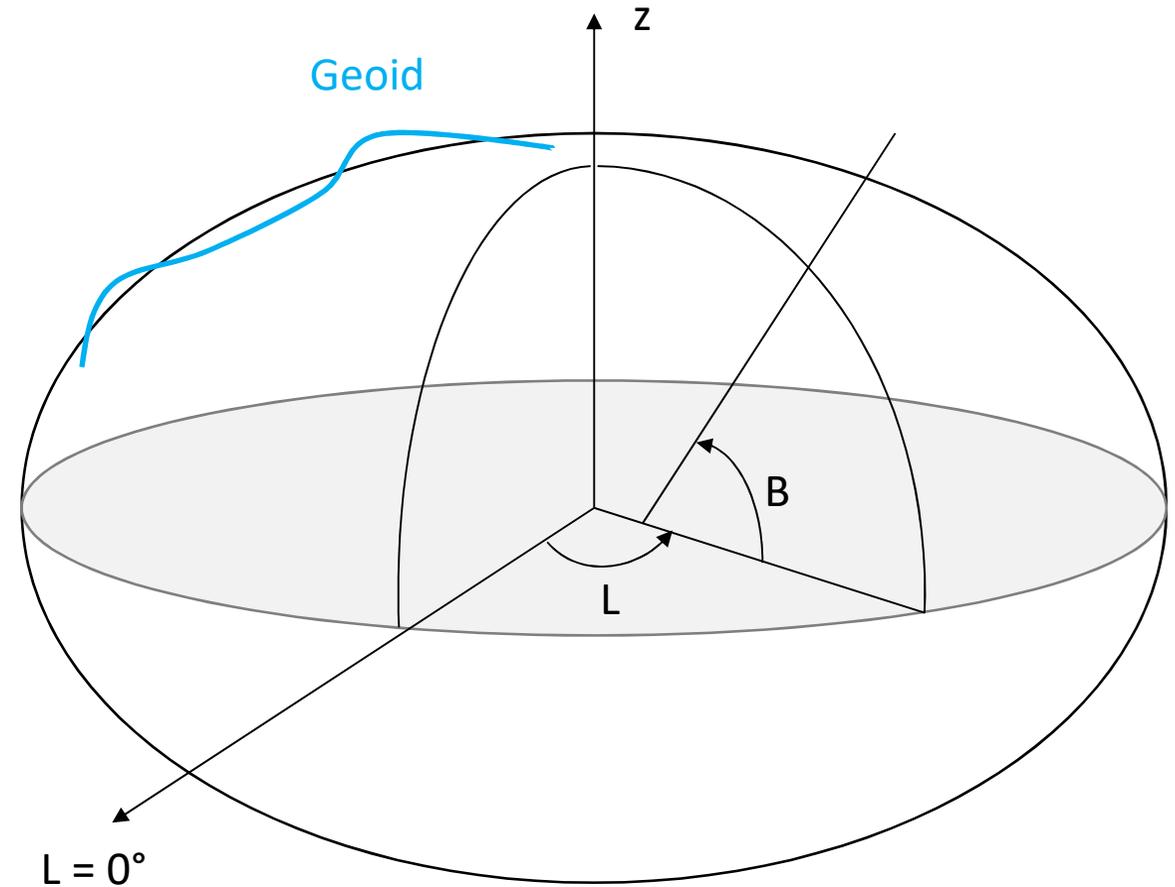
- Figur der Erde
  - Rotation der Erde
  - Erdschwerefeld
- 
- Wo bin ich?
  - Wie spät ist es?
  - Wohin fließt das Wasser?

Geoid: Potential  $W = V + F = \text{const.}$



# Höhere Geodäsie

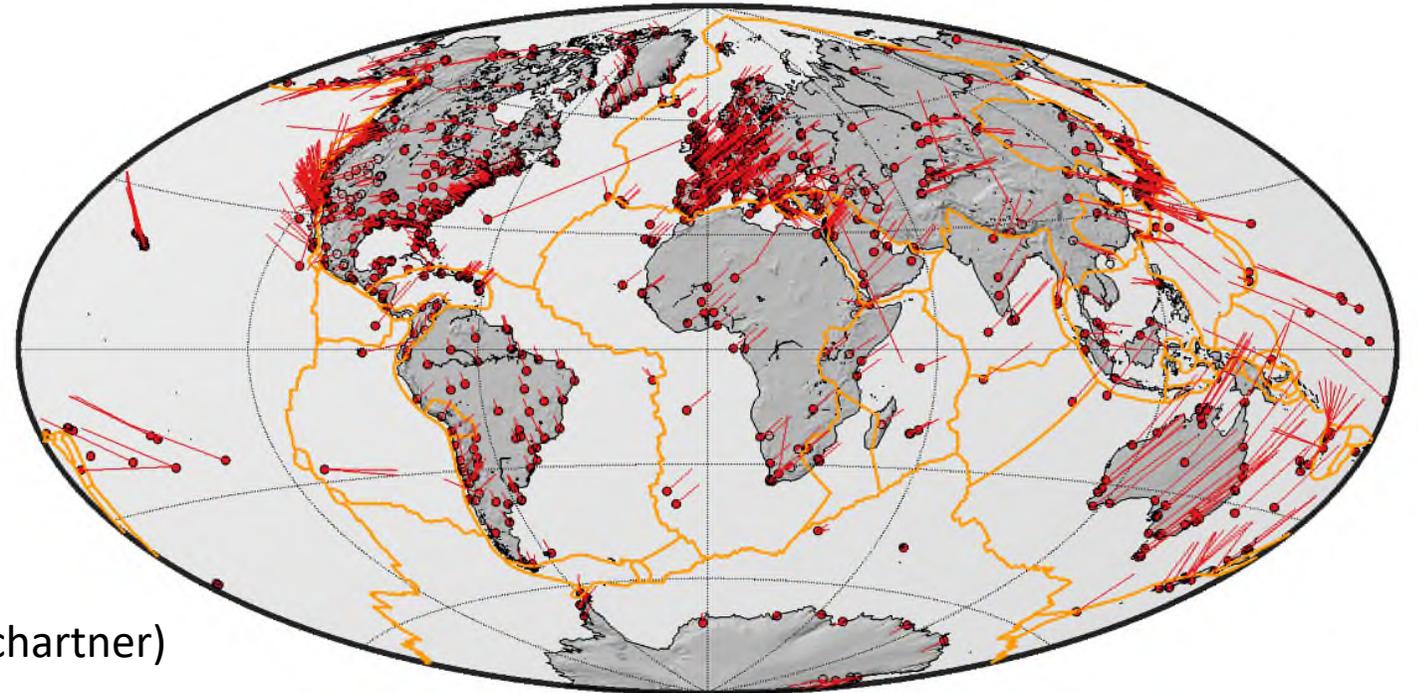
- „Wir legen Koordinatensysteme in die Erde“
  - Erdfeste Referenzsysteme
    - Ursprung
    - z-Achse
    - x-Achse
    - Ellipsoid
    - ..



# Höhere Geodäsie

---

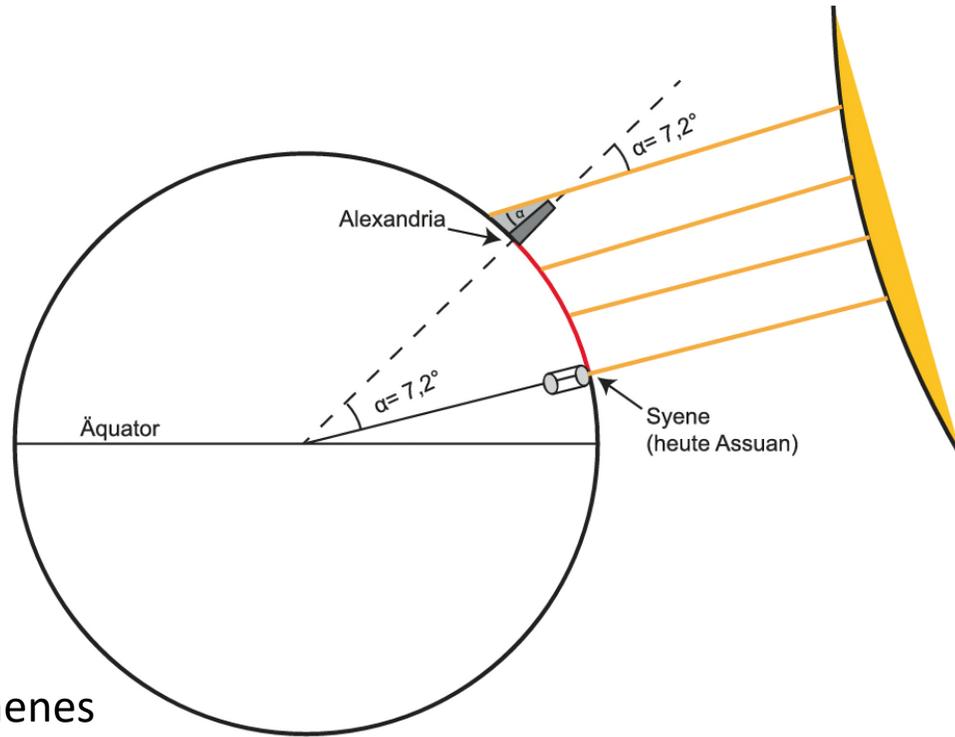
- Wir verwenden Geodätische Weltraumverfahren
  - Globale Satellitennavigationssysteme (GPS, Galileo, GLONASS, Beidou, ..)
  - Satellite Laser Ranging
  - Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
  - Very Long Baseline Interferometry



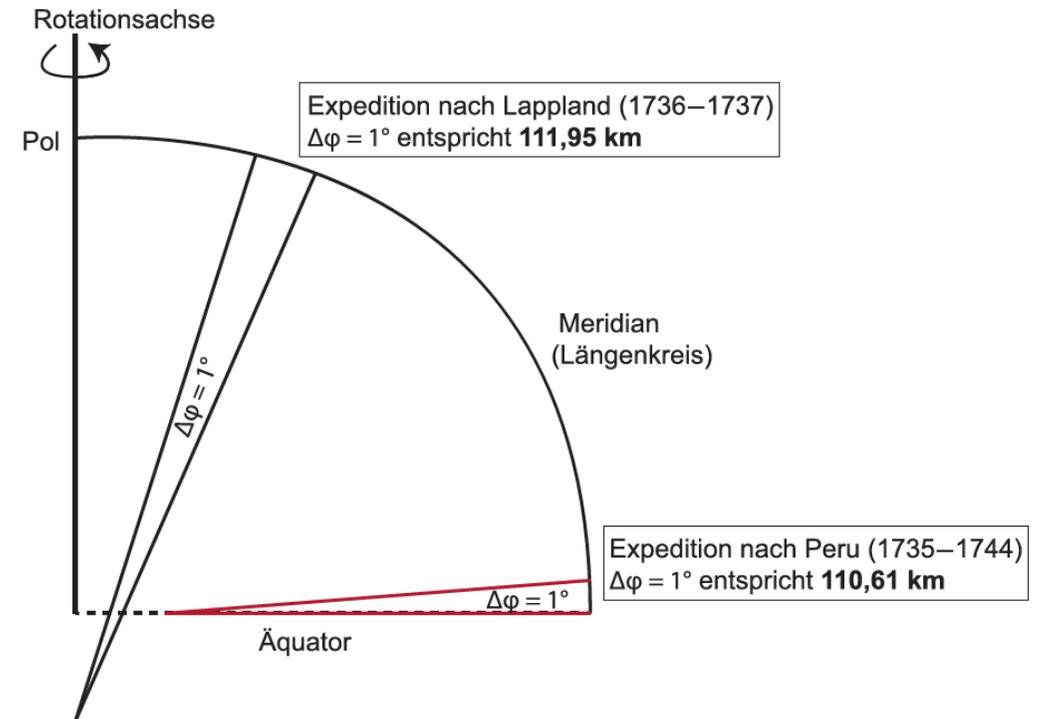
(Schartner)

# Höhere Geodäsie

- Erdmessung damals mit Sternen ...



Eratosthenes  
(276-196 v. Chr.)



(Angermann et al., 2021)

# Höhere Geodäsie

---

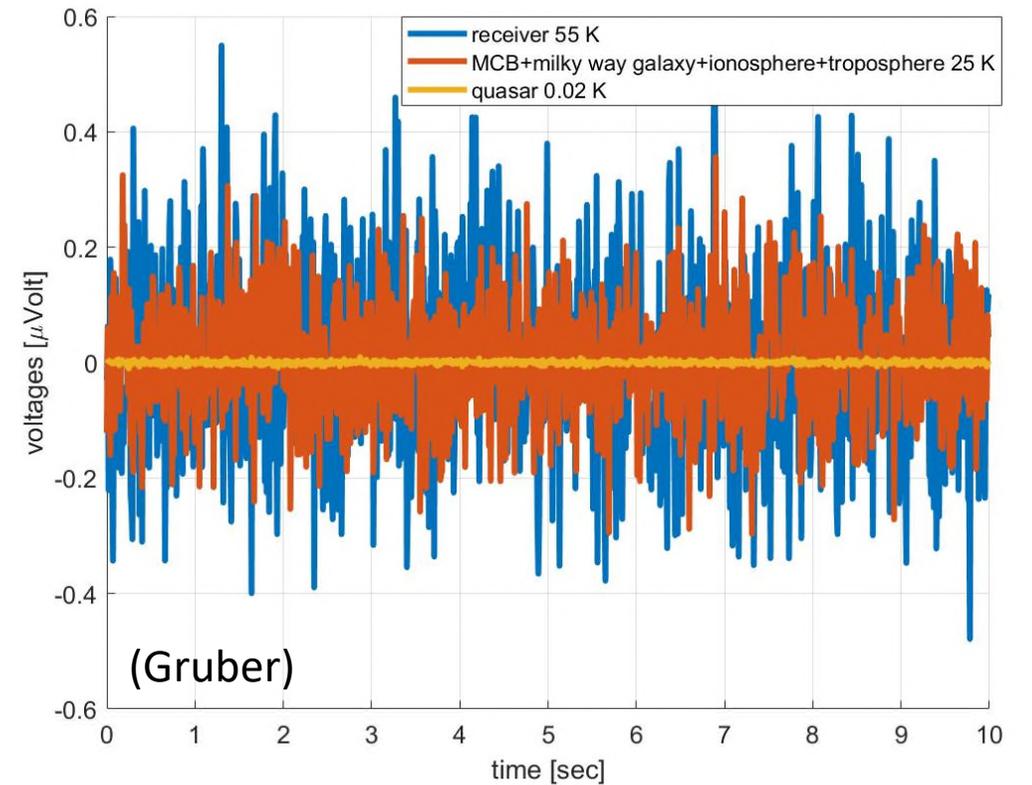
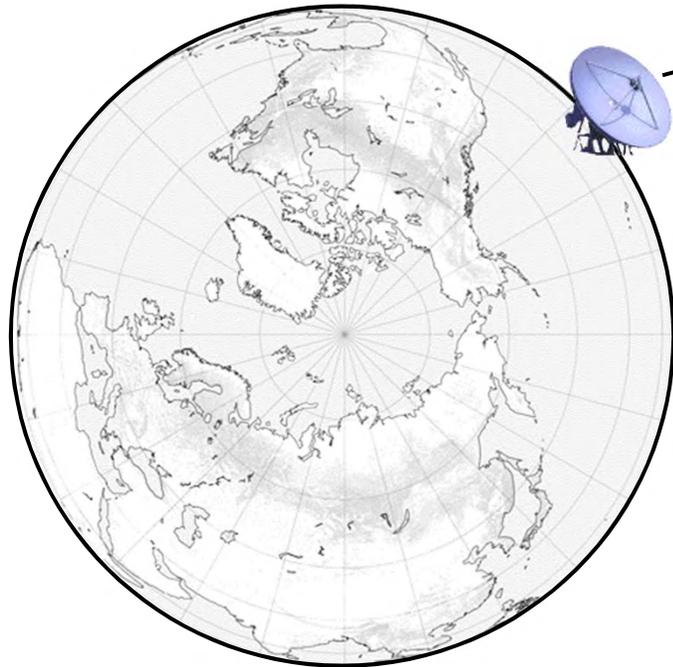
- ... mit Quasaren



# Very Long Baseline Interferometry (VLBI)



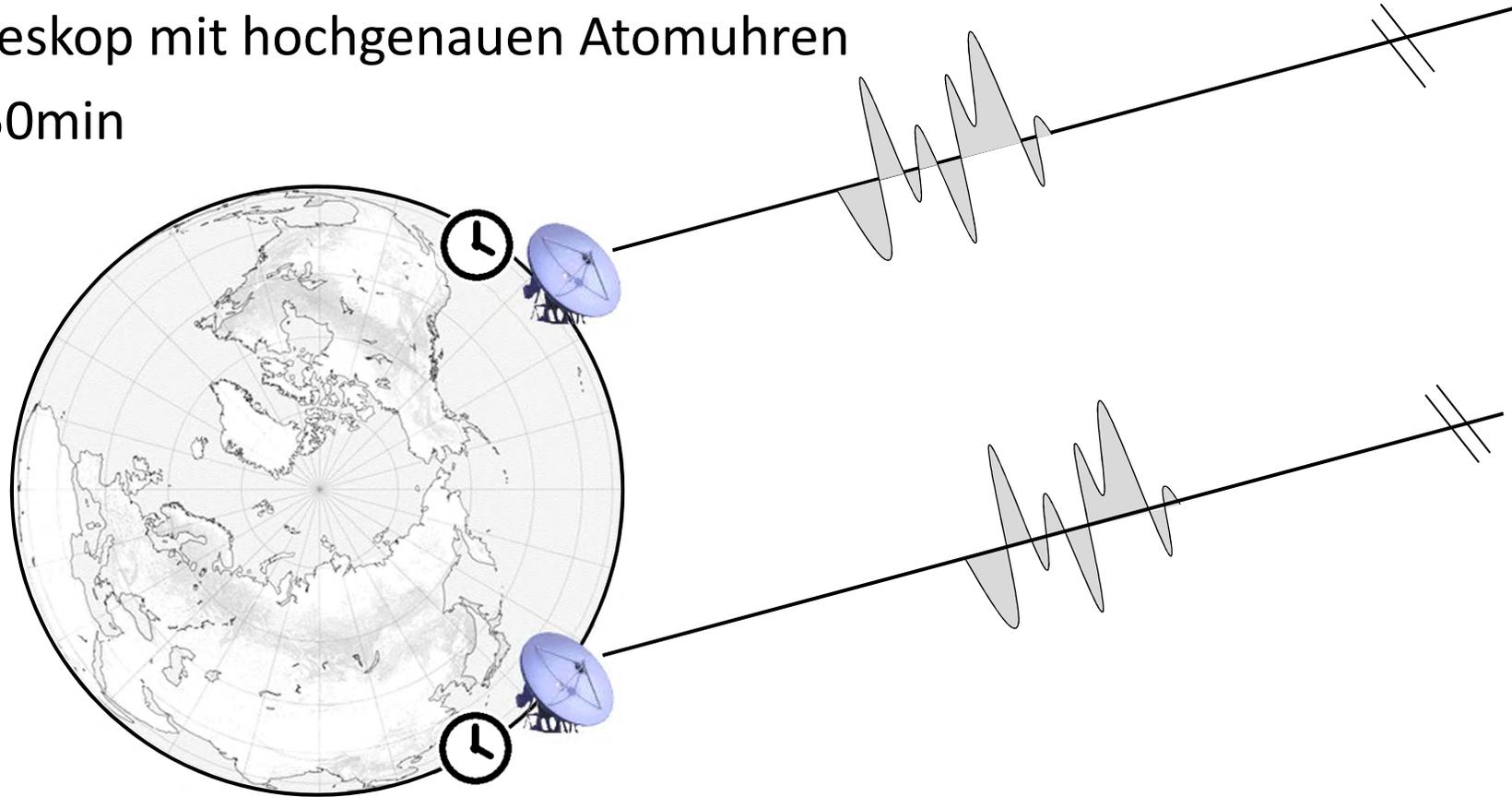
- Strahlung des Quasars 1000-fach überauscht durch Atmosphäre und Empfänger



# Very Long Baseline Interferometry (VLBI)



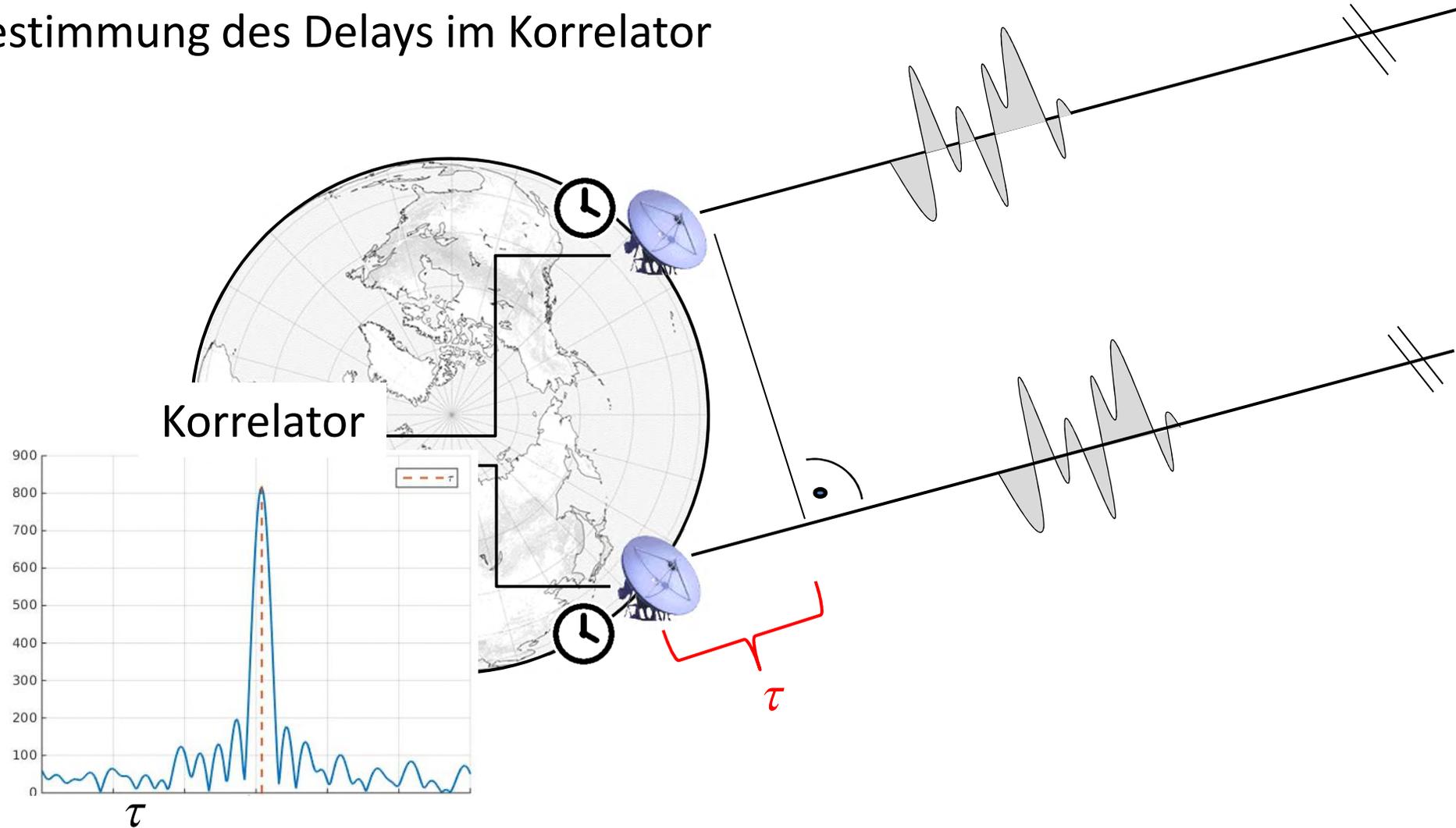
- Zweites Teleskop mit hochgenauen Atomuhren
  - $10^{-15}$ @50min



# Very Long Baseline Interferometry (VLBI)



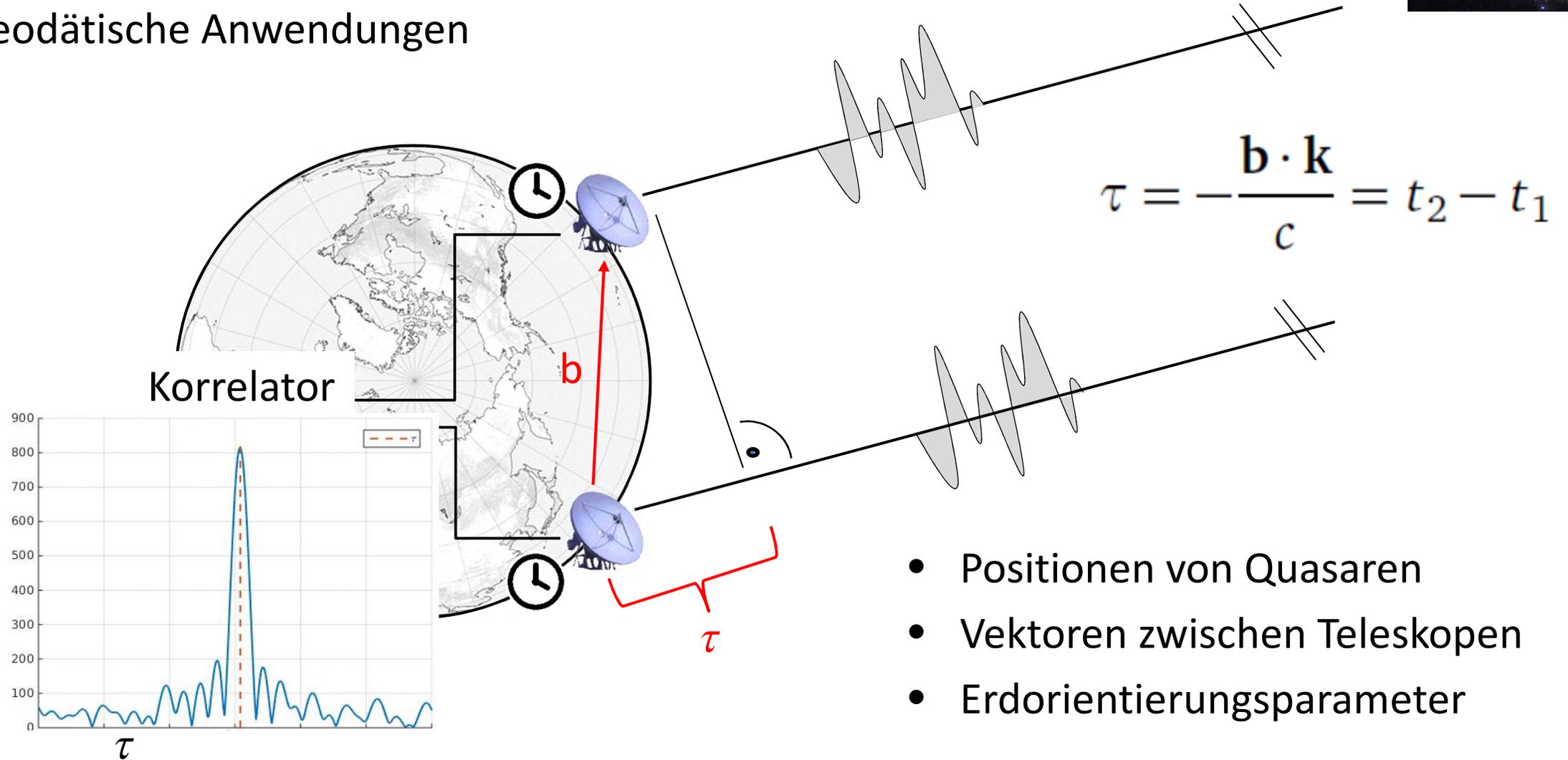
- Bestimmung des Delays im Korrelator



# Very Long Baseline Interferometry (VLBI)



- Geodätische Anwendungen



# Geschichte und technologische Entwicklung

---

- Karl Jansky beobachtete Radiostrahlung aus dem Zentrum der Milchstraße (1931)



Nachbau in Greenbank (Bild von Alan Whitney, 2010)

# Geschichte und technologische Entwicklung

---

- VLBI entwickelte sich aus kabelverbundenen Elementen



- Aufzeichnungsgeräte und Atomuhren ermöglichten die Trennung der Teleskope
  - Ende 1960er Jahre verfolgten Gruppen in USA, Kanada und der Sowjetunion die Entwicklung der VLBI



# Geschichte und technologische Entwicklung

---

- Mkl System Aufzeichnung mit 0.72 Mbits/s (Whitney et al. 1976) auf Bänder
- Aufzeichnung später auf handelsübliche Festplatten
- Versand mit Fedex etc., heute oft E-Transfer (mehrere Gbits/s)



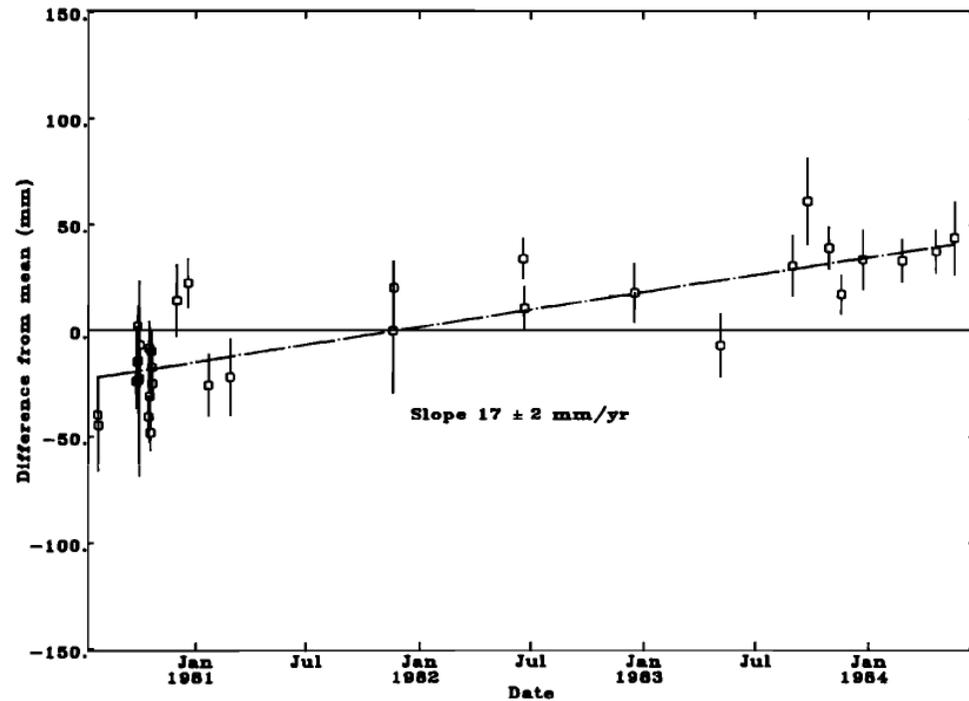
MkI System (Bild von A. Whitney, 2010)



MkV System

# Geschichte und technologische Entwicklung

- VLBI zunächst astronomisch, aber Potential für Geodäsie bald erkannt
- Erster messtechnischer Nachweis der Plattentektonik mit VLBI



Haystack (USA)-Onsala (Sweden) (Herring et al. 1986)



# Erstellung der Beobachtungspläne (Scheduling)

IVS-Live: <http://ivslive.obs.u-bordeaux1.fr/>

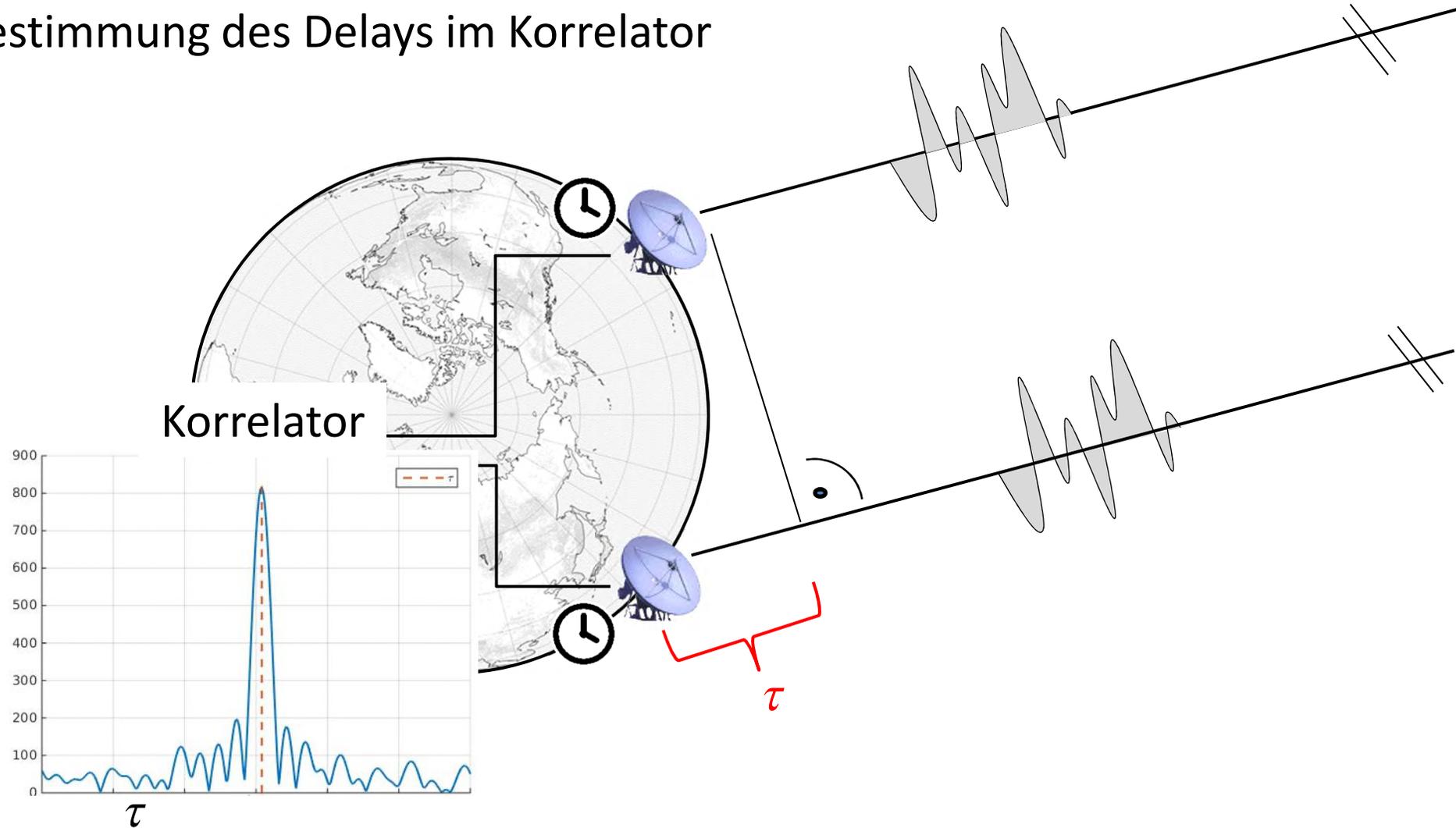
- Optimierungsproblem (brute force Methode)



# VLBI Korrelation



- Bestimmung des Delays im Korrelator

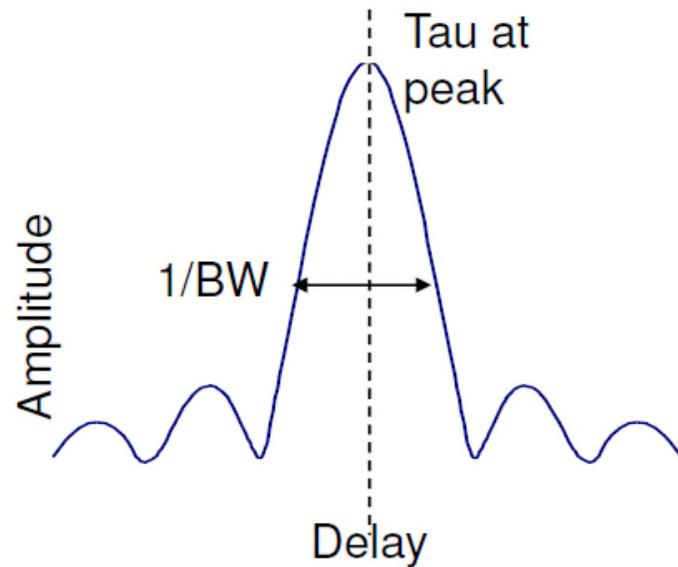


# VLBI Korrelation

---

- Korrelation: Zeitbereich

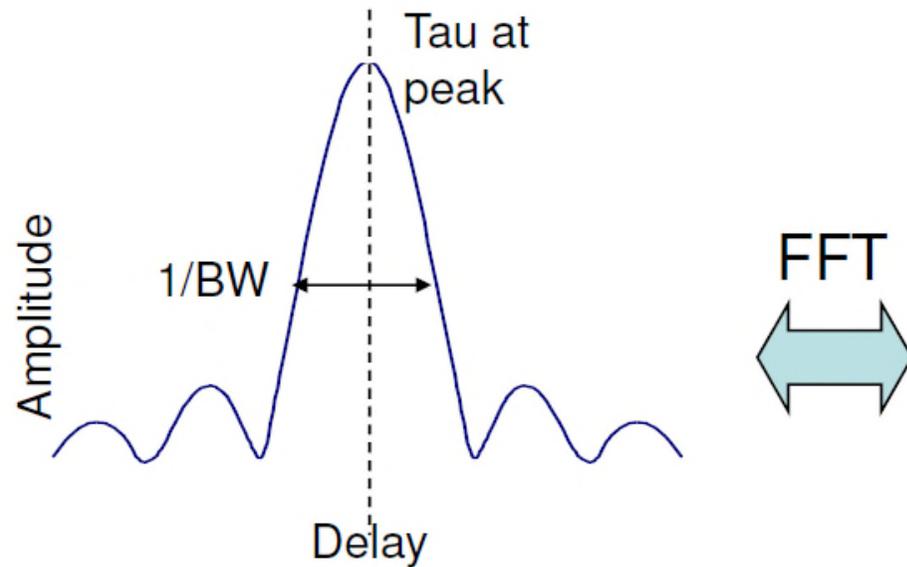
$$C_{12}(\tau) = \text{Corr}(s_1, s_2) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t)s_2(t - \tau)dt$$



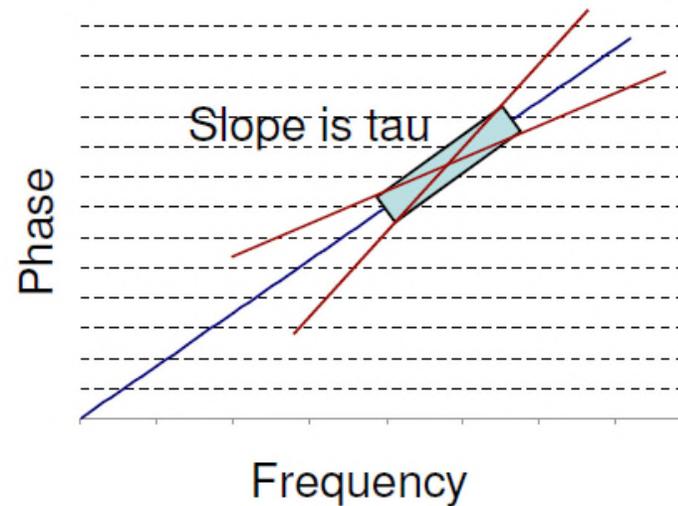
# VLBI Korrelation

- Korrelation: Zeit- vs. Frequenzbereich

$$C_{12}(\tau) = \text{Corr}(s_1, s_2) = \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) s_2(t - \tau) dt$$



$$C_{12}[f] = \text{FFT}(s_1) \cdot \overline{\text{FFT}(s_2)}$$

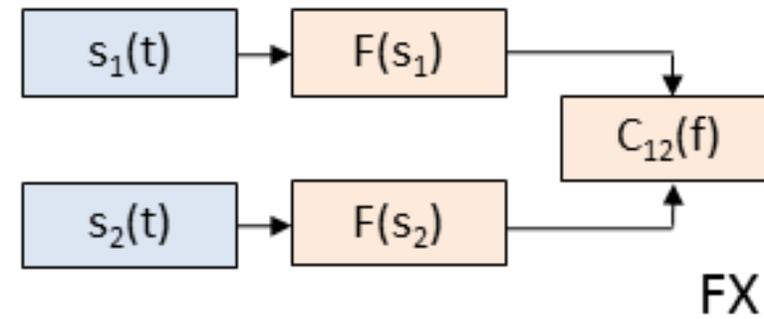
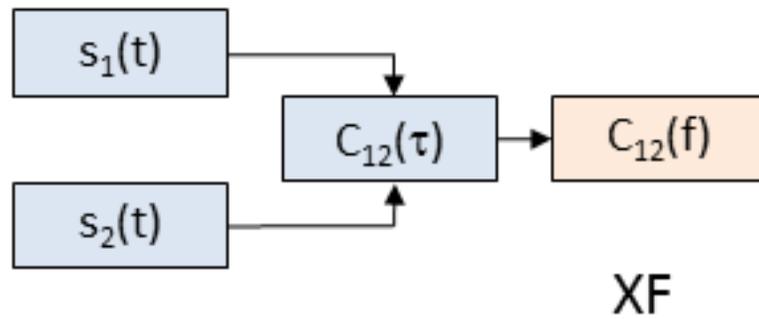


(Petrachenko, 2009)

# VLBI Korrelation

- Zwei unterschiedliche Ansätze für Korrelatoren: XF vs. FX

(Nothnagel, 2018)



# VLBI Korrelation

---

- Korrelationsergebnisse für Geodäsie:

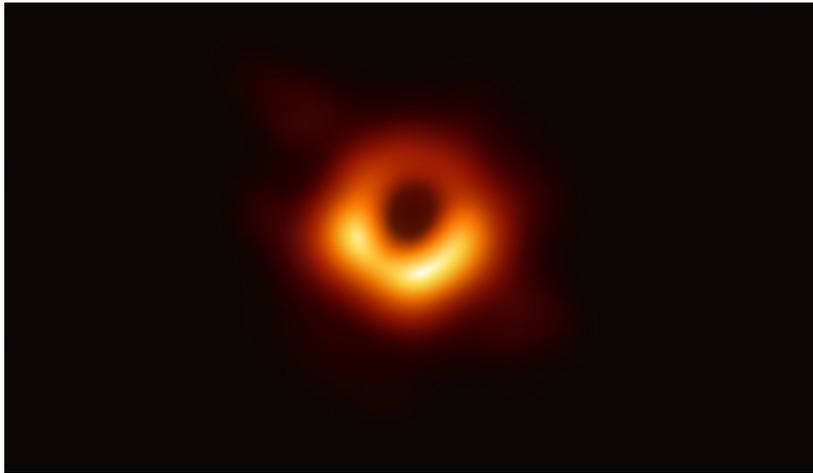
$$\tau = \frac{d\Phi}{d\nu} \quad \dot{\tau} = \frac{1}{\nu_0} \frac{d\Phi}{dt}$$

# VLBI Korrelation

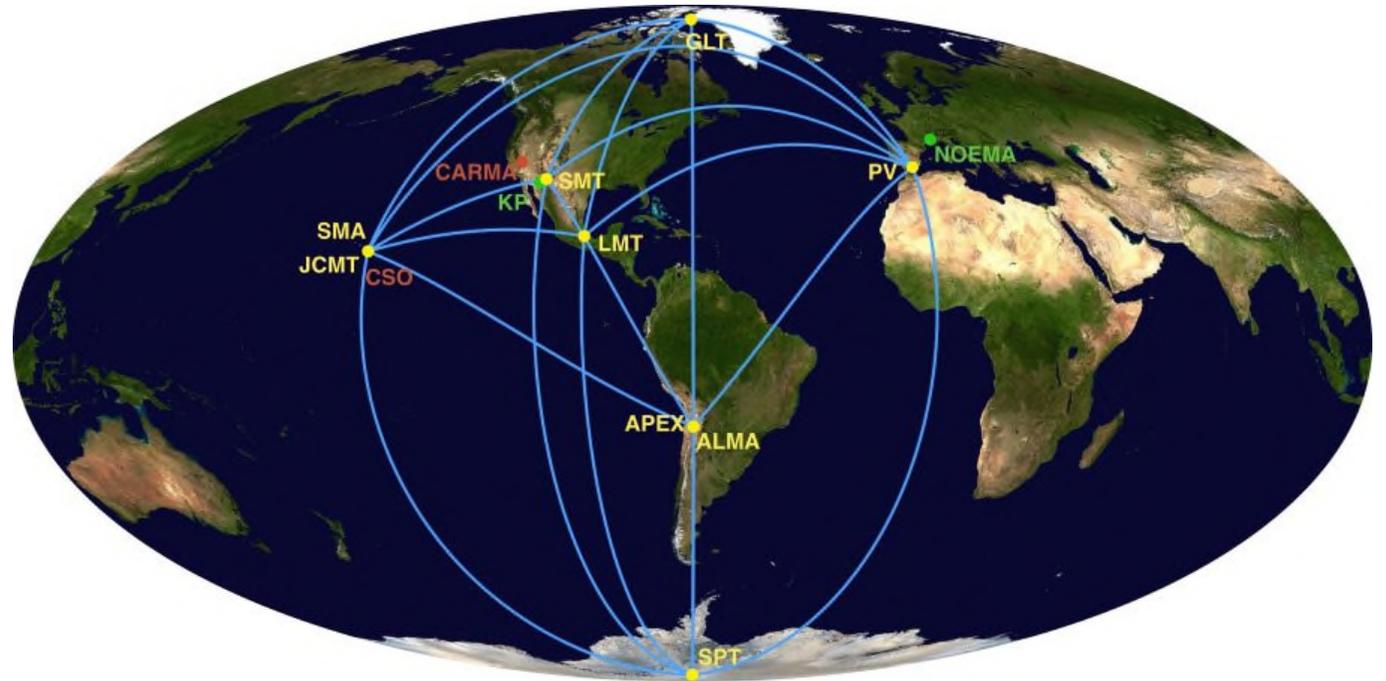
- Korrelationsergebnisse für Geodäsie:

$$\tau = \frac{d\Phi}{d\nu} \quad \dot{\tau} = \frac{1}{\nu_0} \frac{d\Phi}{dt}$$

- Korrelationsergebnisse für Astrophysik:



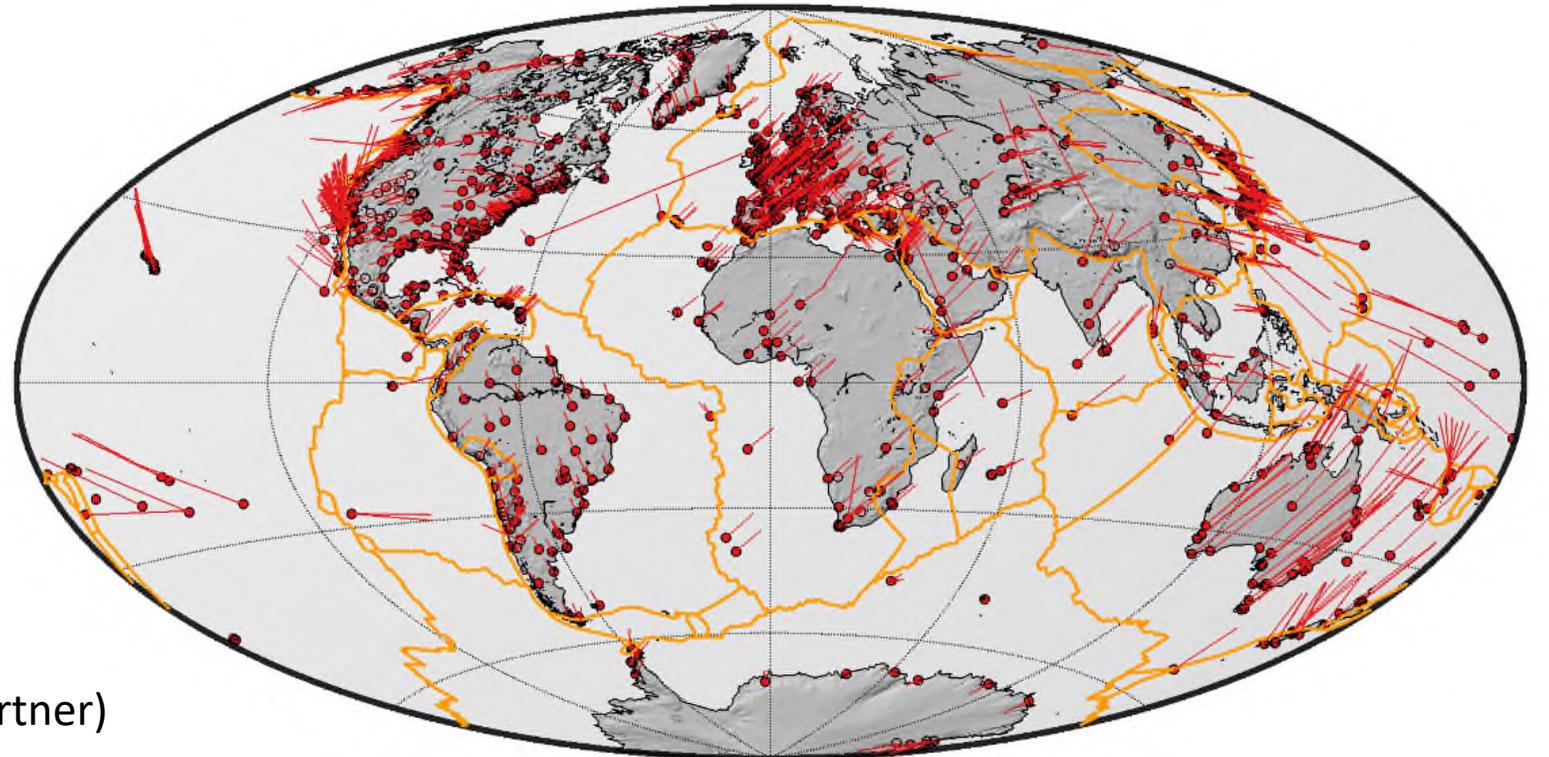
M87 (EHT)



# Terrestrische Referenzrahmen

---

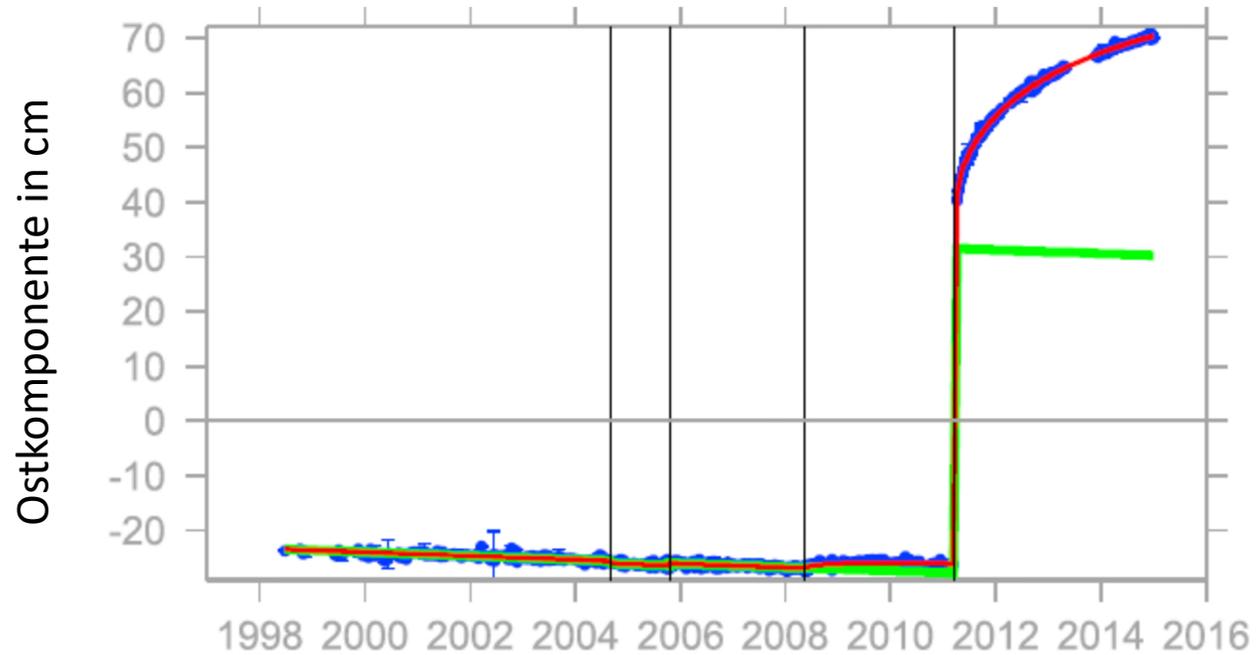
- Positionen und Geschwindigkeiten von Stationen an der Erdoberfläche
  - Positionierung und Navigation auf der Erde und im Weltraum
  - Referenzierung von geophysikalischen Prozessen
    - z.B. Erdbeben oder Meeresspiegelanstieg



(Schartner)

# Terrestrische Referenzrahmen

- Tsukuba (2011, Japan)



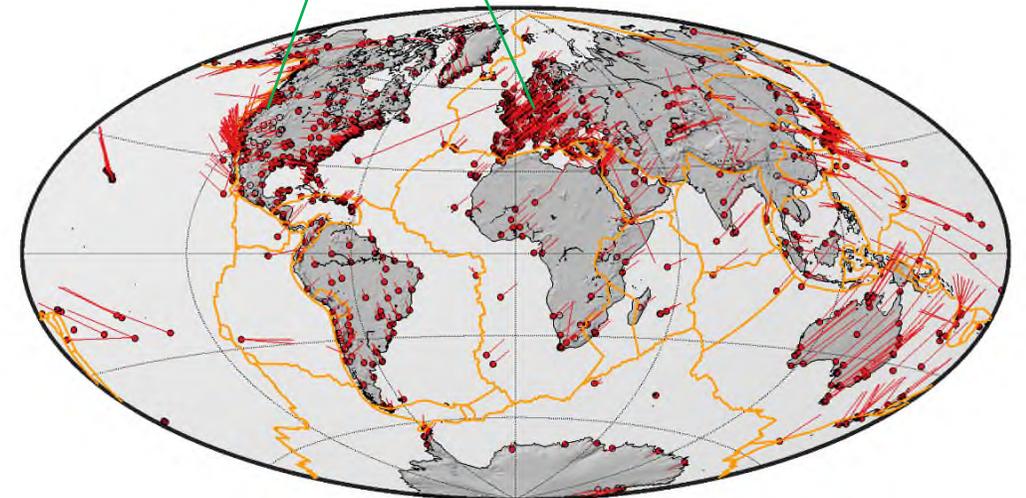
(Altamimi et al., 2016)



(Earthscope)

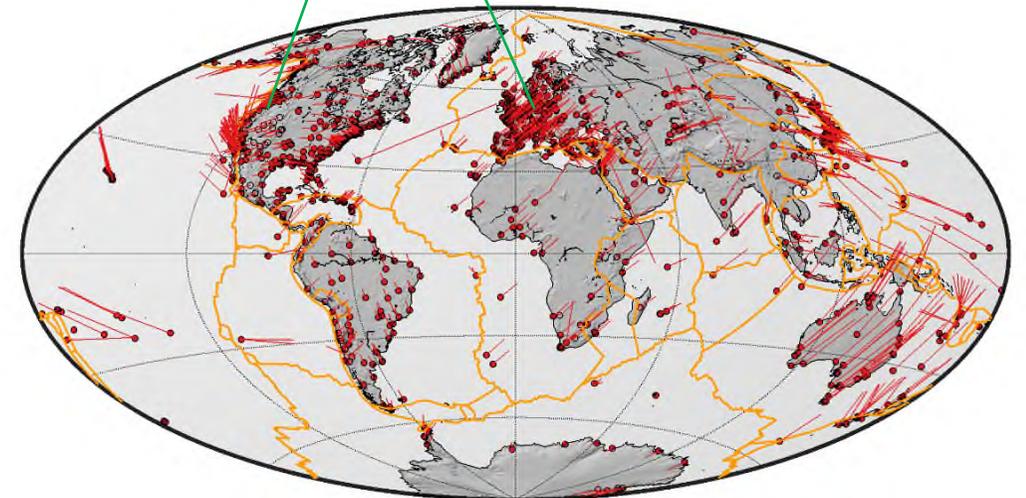
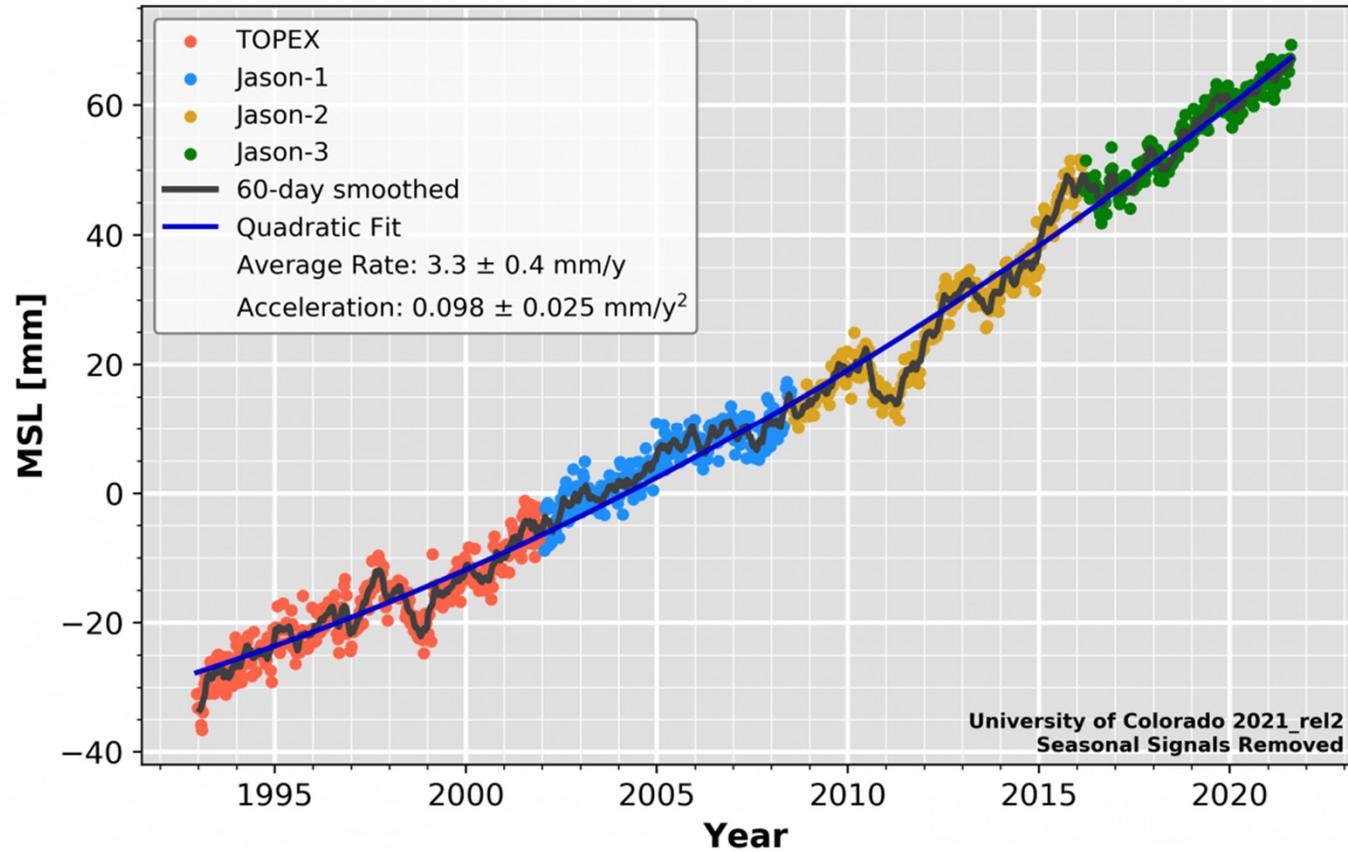
# Meeresspiegelanstieg

- Mit Satellitenaltimetrie



# Meeresspiegelanstieg

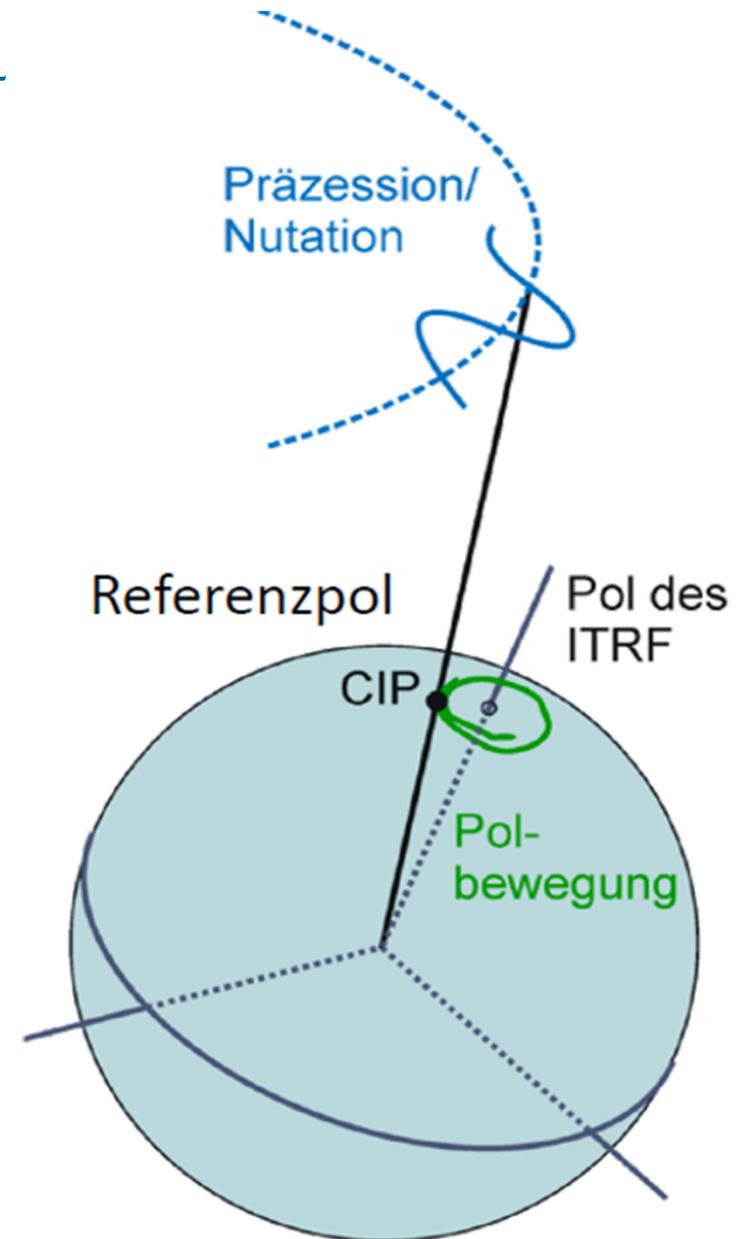
- Mit Satellitenaltimetrie



# Erdorientierung in Bezug auf Quasare

---

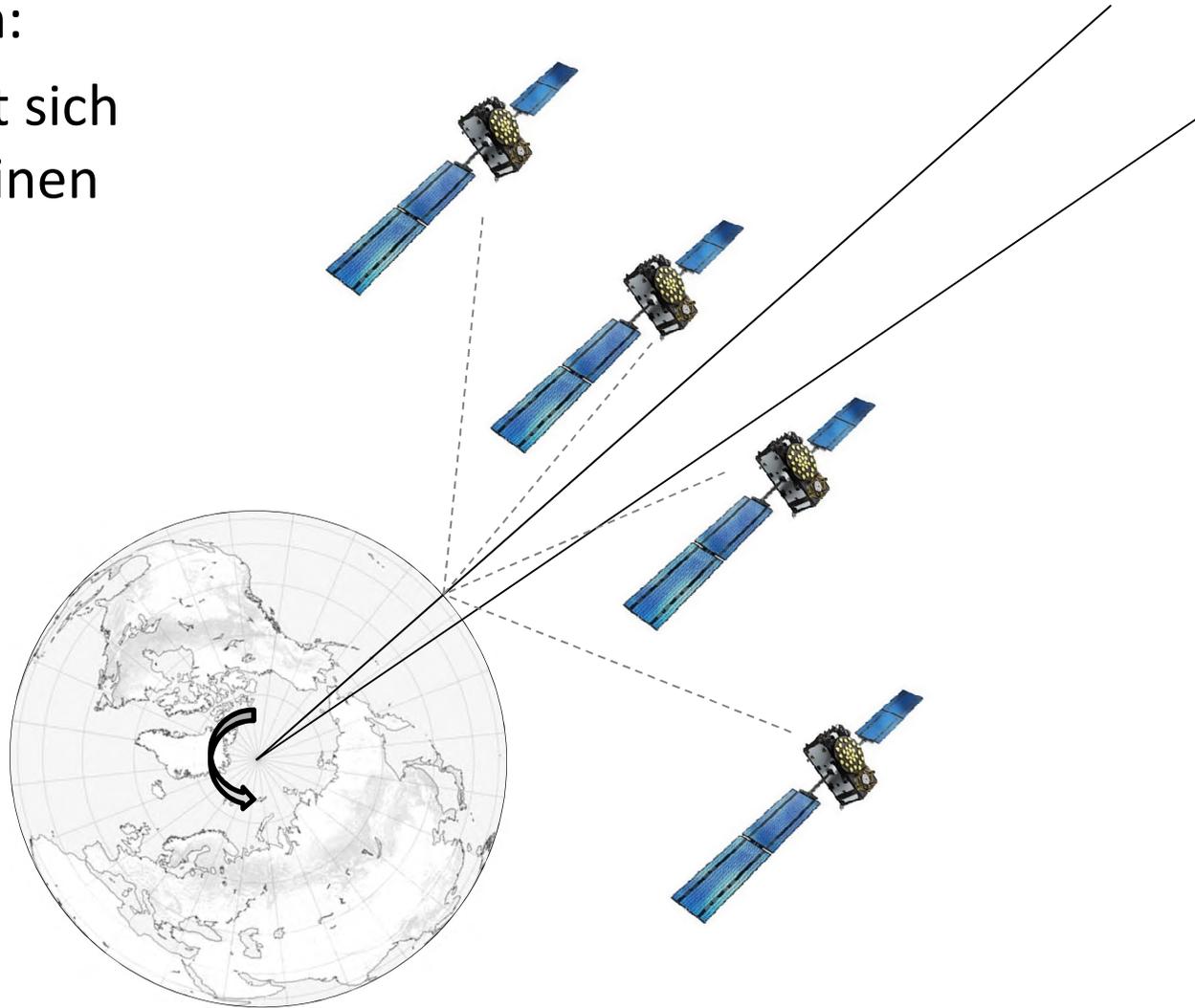
- Präzession/Nutation
- Polbewegung
- UT1-UTC
  - UT1 Winkel der Erdrotation
  - UTC quasi Atomzeit



# Warum brauchen wir UT1 - UTC?

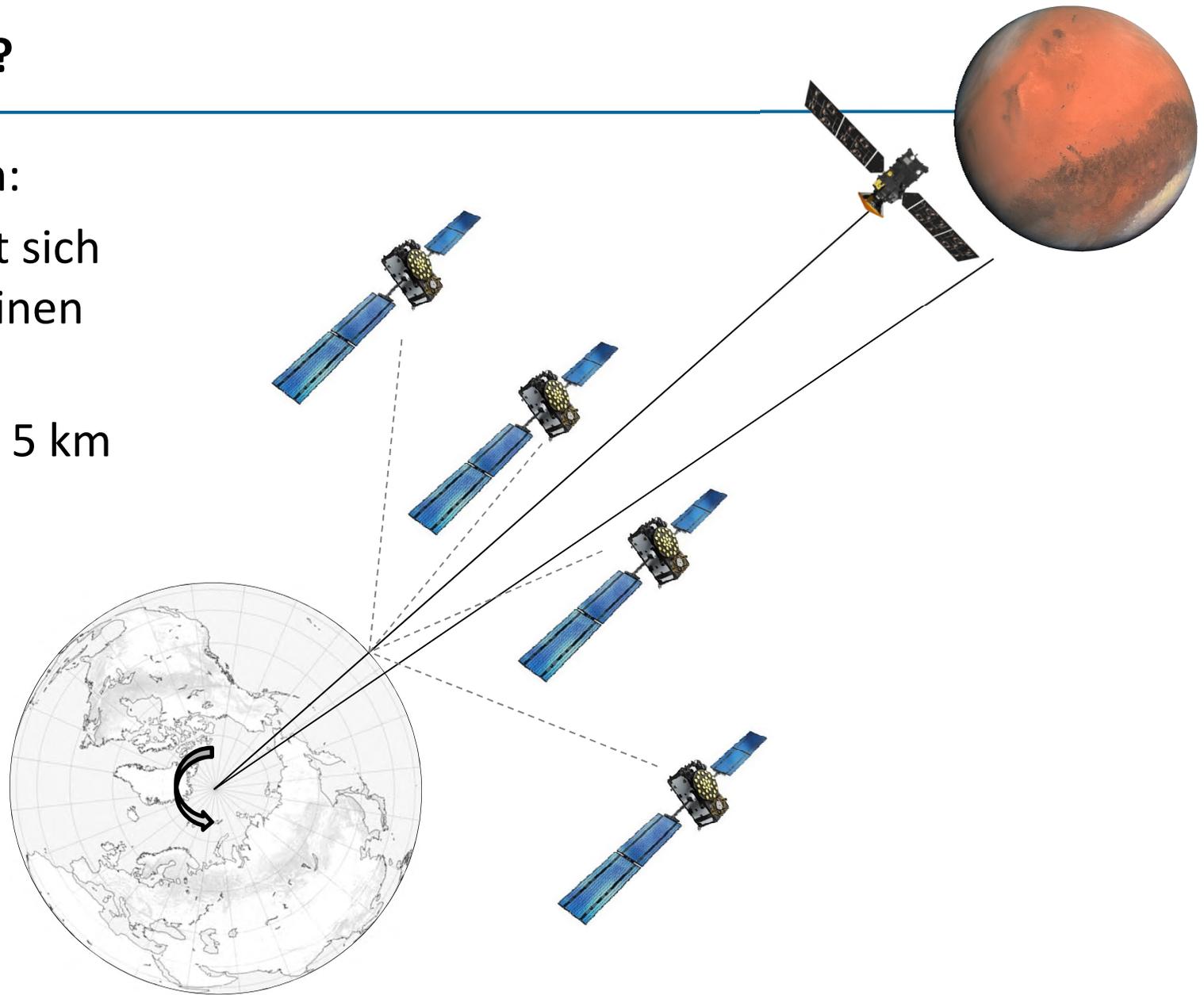
---

- Positionierung und Navigation:
  - In einer Millisekunde dreht sich die Erde am Äquator um einen halben Meter weiter



# Warum brauchen wir UT1 - UTC?

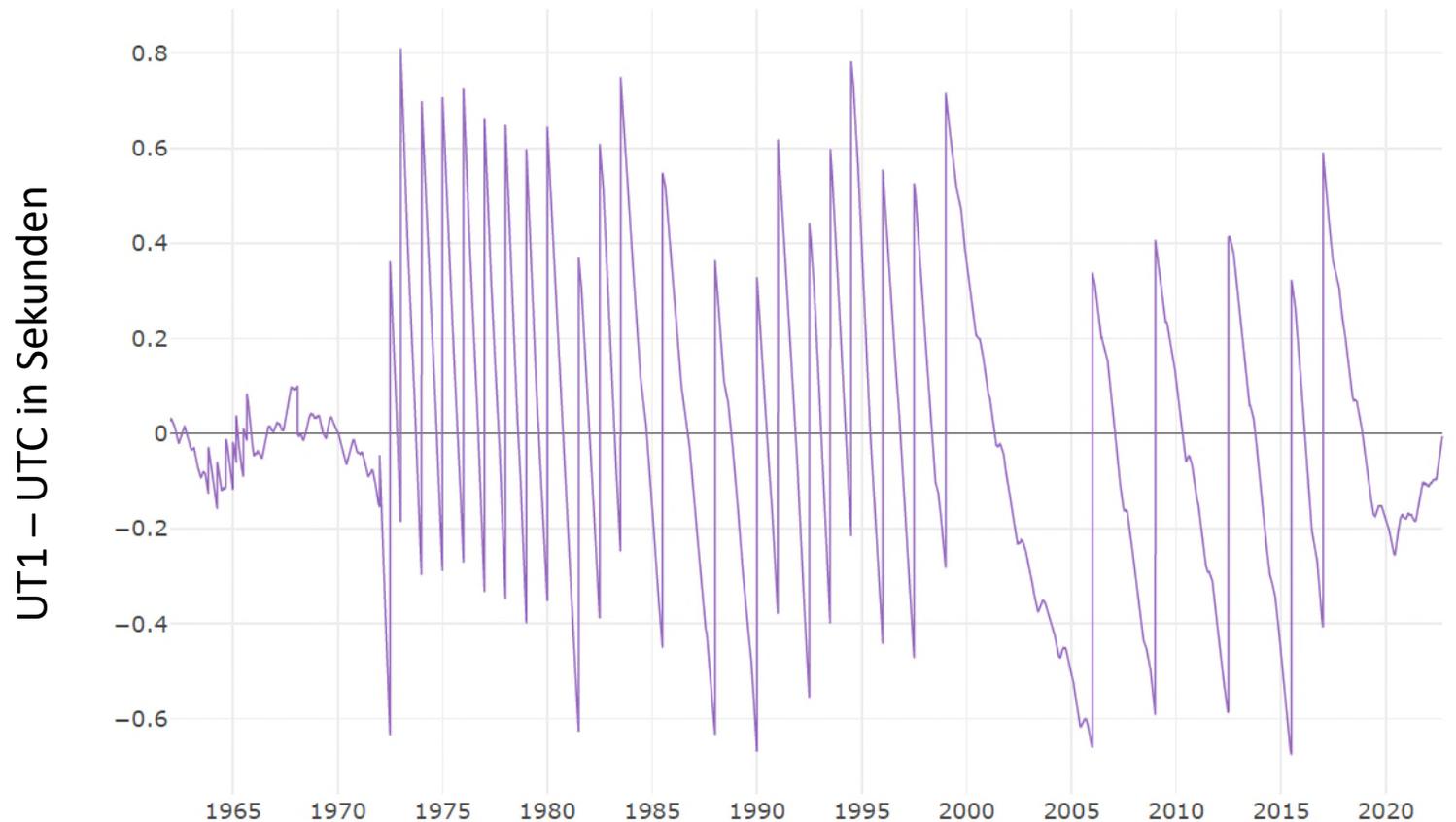
- Positionierung und Navigation:
  - In einer Millisekunde dreht sich die Erde am Äquator um einen halben Meter weiter
  - Das entspricht mindestens 5 km beim Mars



# Koordinierte Weltzeit UTC

---

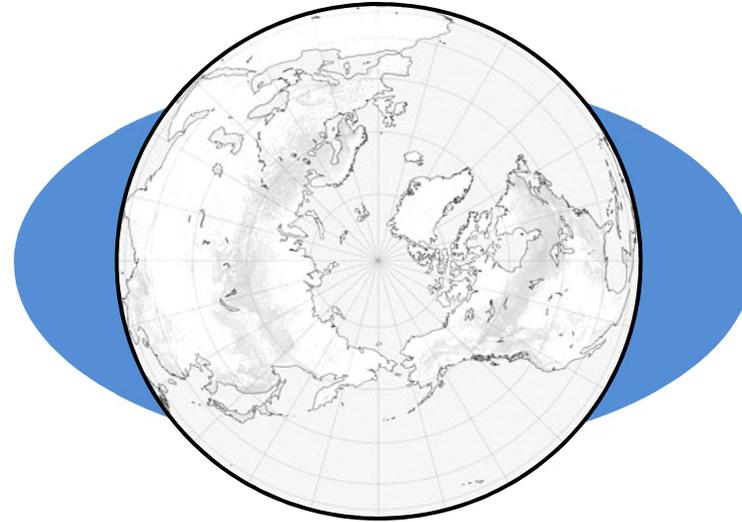
- Die UTC unterscheidet sich von der Atomzeit um ein ganzzahliges Vielfaches einer Sekunde ( $\text{TAI} - \text{UTC} = +37\text{s}$ )
- UTC wird mit Schaltsekunden an UT1 angepasst, sodass:  $\text{UT1} - \text{UTC} < 0.9 \text{ s}$



# Ozeanische Gezeitenbremse

---

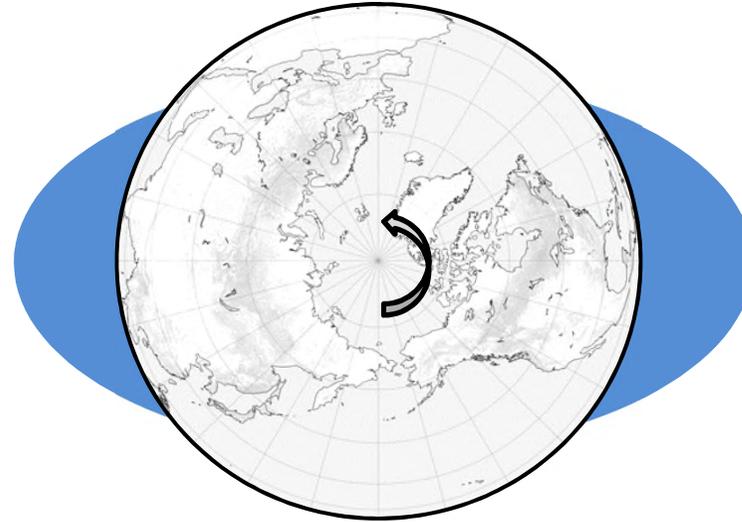
- Flutberge aufgrund Gezeitenkraft



# Ozeanische Gezeitenbremse

---

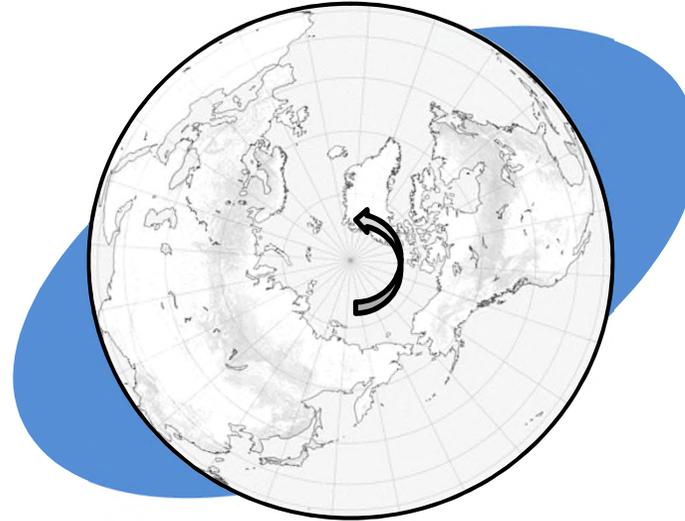
- Flutberge aufgrund Gezeitenkraft ...
- werden von rotierender Erde mitgenommen



# Ozeanische Gezeitenbremse

---

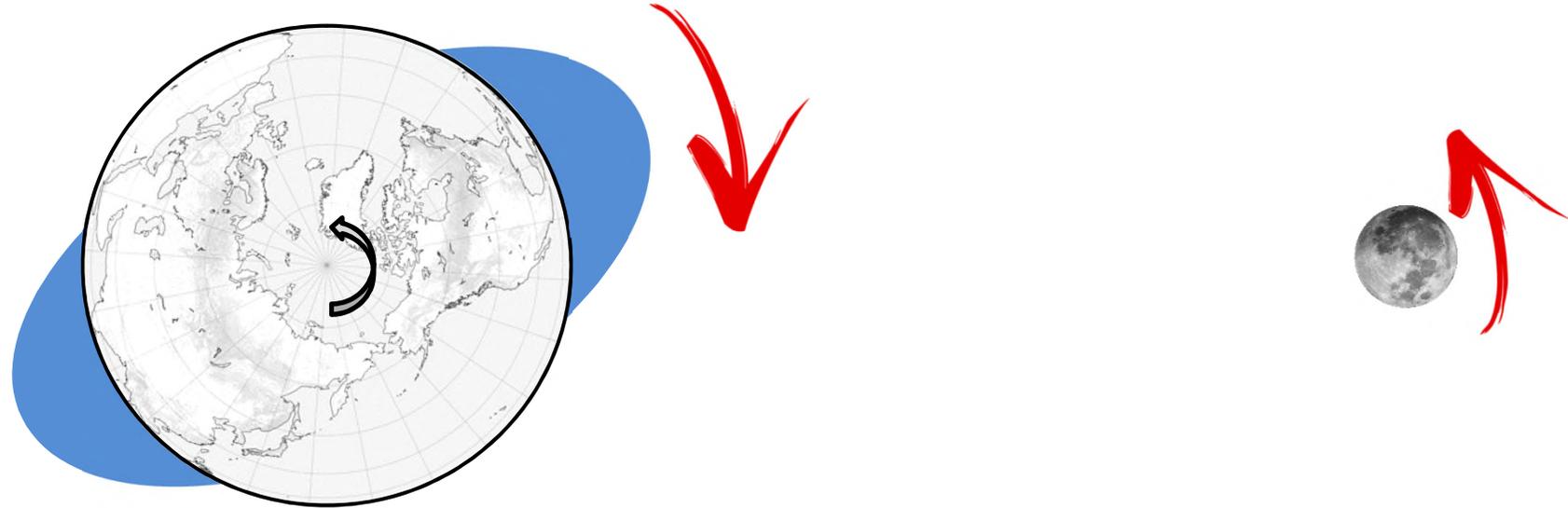
- Flutberge aufgrund Gezeitenkraft ...
- werden von rotierender Erde mitgenommen



# Ozeanische Gezeitenbremse

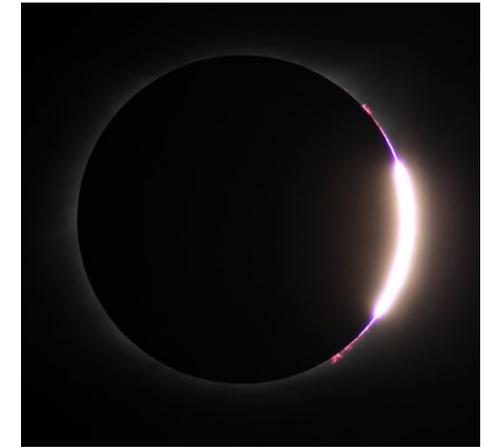
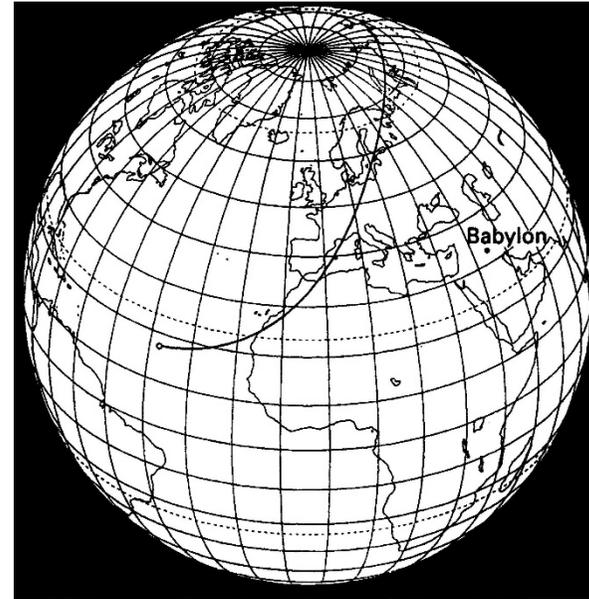
---

- Flutberge aufgrund Gezeitenkraft ...
- werden von rotierender Erde mitgenommen



# Ozeanische Gezeitenbremse

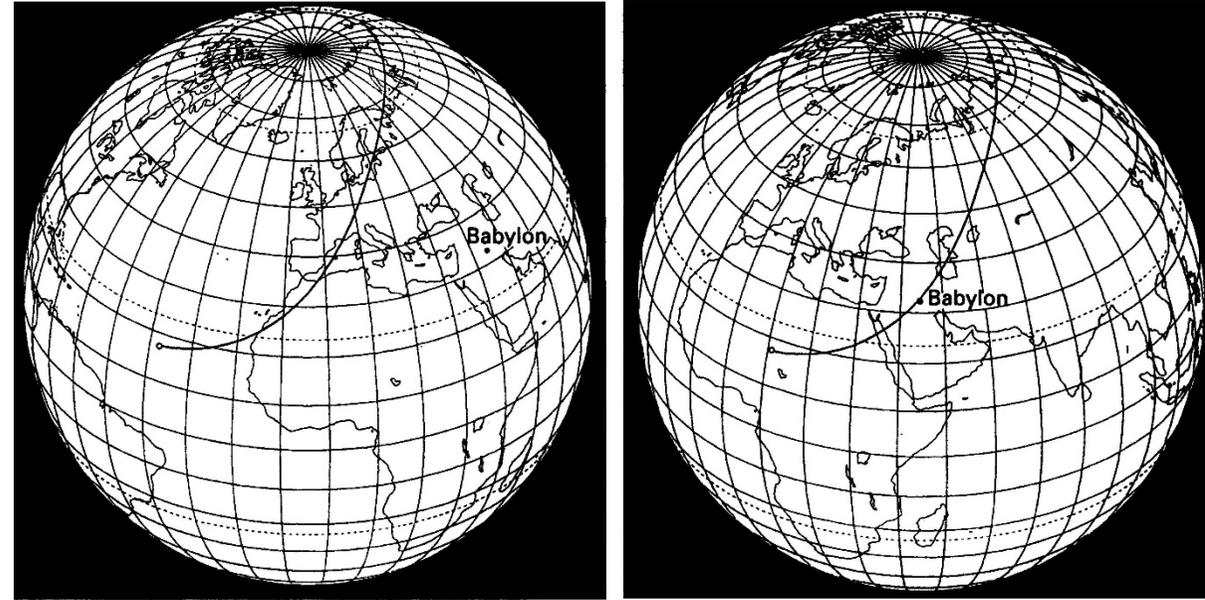
- Berechnung einer totalen Sonnenfinsternis basierend auf heutiger Rotationsrate für das Jahr 136 v.Chr.



(ESA)

# Ozeanische Gezeitenbremse

- Beobachtung einer totalen Sonnenfinsternis 136 v.Chr. in Babylon
- 3 Stunden Unterschied in 2000 Jahren

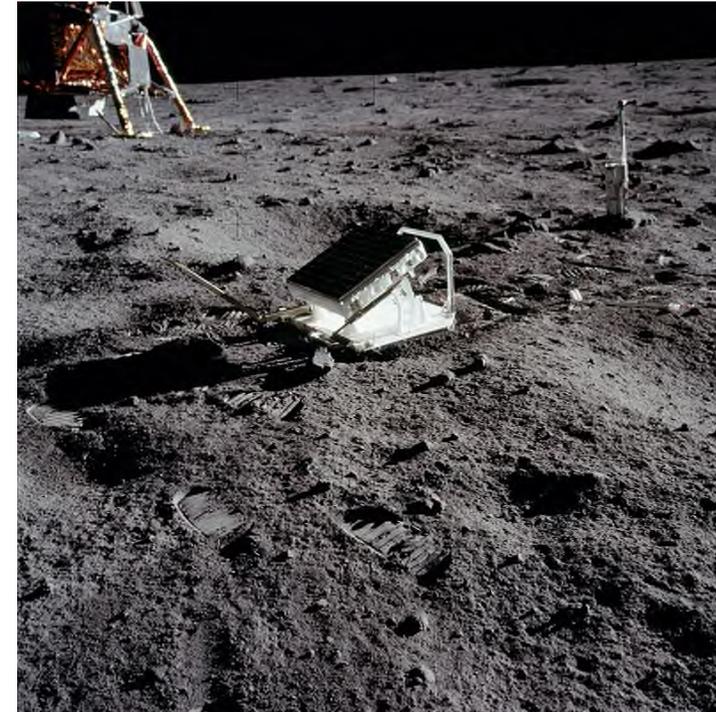


Totale Sonnenfinsternis beobachtet  
136 BC in Babylon (Stephenson 1997)

# Ozeanische Gezeitenbremse

---

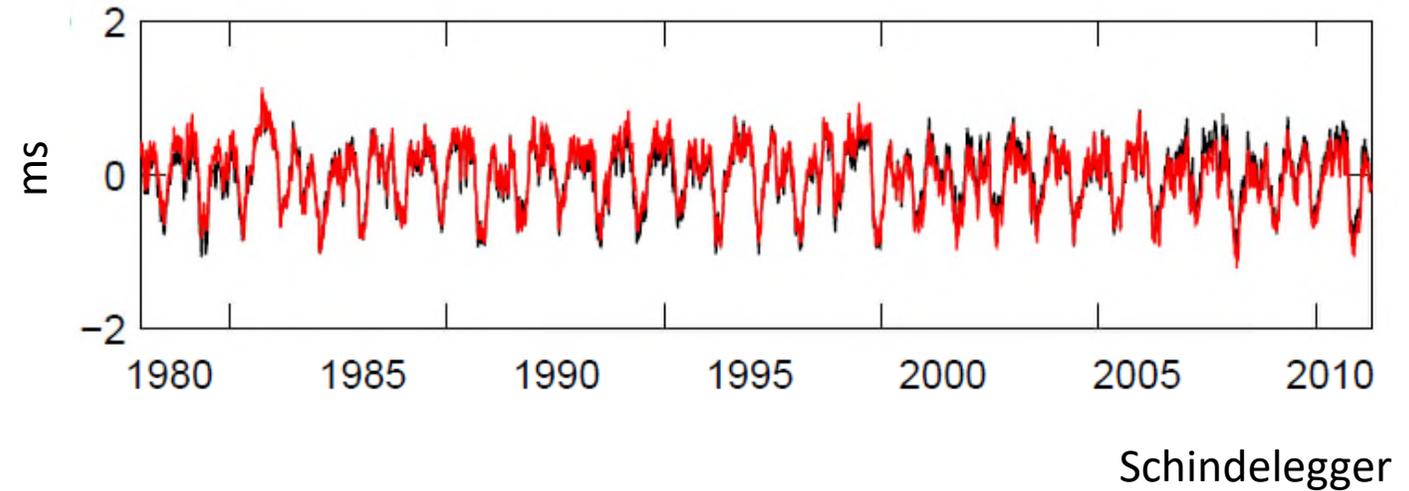
- Abstand Erde-Mond wächst um 3.8 cm/Jahr
  - Lunar Laser Ranging



Retroreflektor der Apollo 11 Mission,  
Bild NASA vom 20. Juli 1969

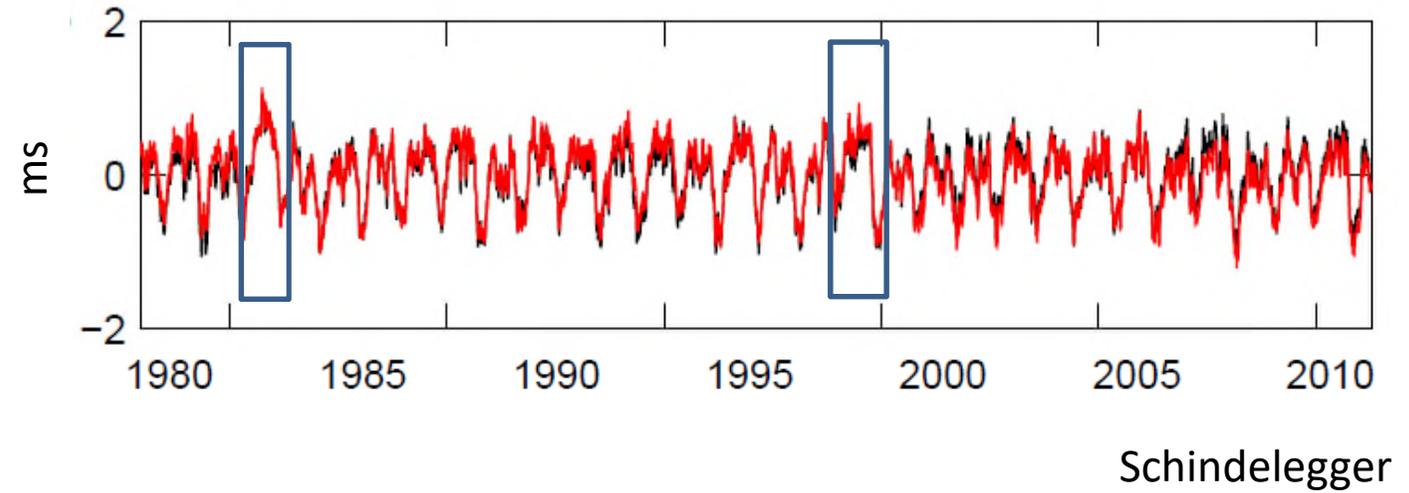
# Veränderung von UT1 - UTC nach einem Tag: Tageslänge

- Beobachtete Tageslänge und atmosphärische Anregung



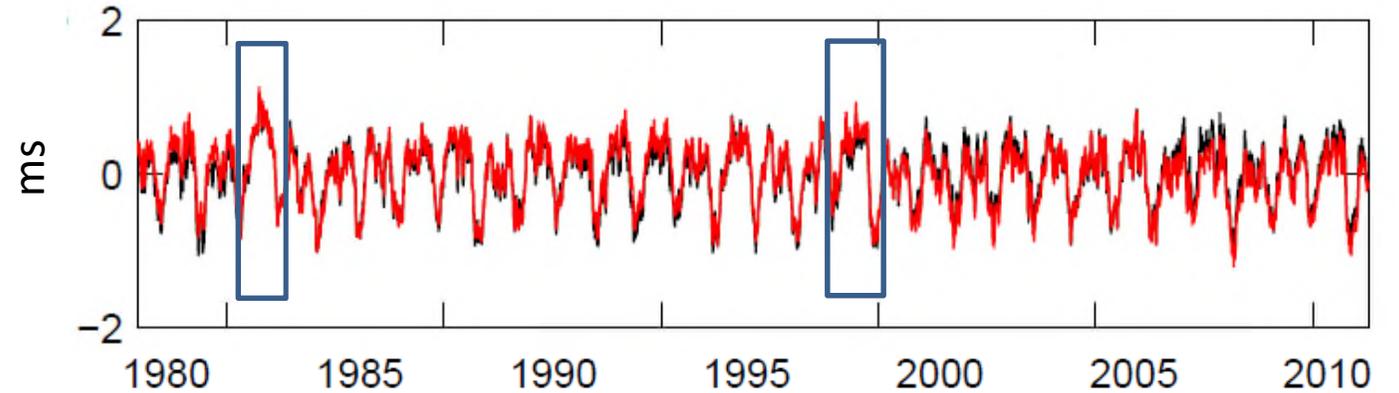
# Veränderung von UT1 - UTC nach einem Tag: Tageslänge

- Beobachtete Tageslänge und **atmosphärische Anregung**



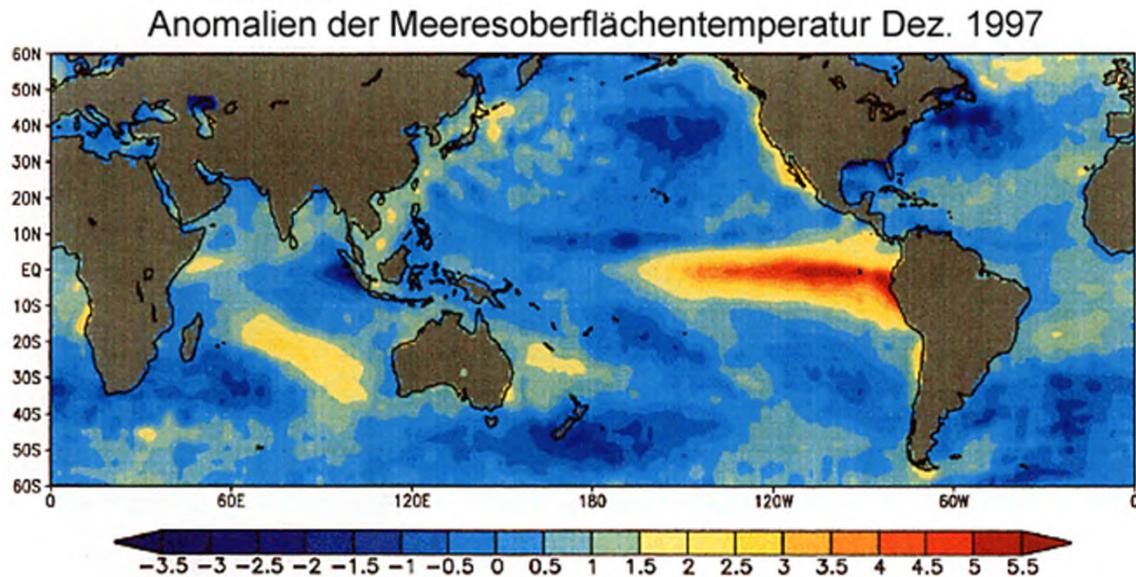
# Veränderung von UT1 - UTC nach einem Tag: Tageslänge

- Beobachtete Tageslänge und **atmosphärische Anregung**



Schindelegger

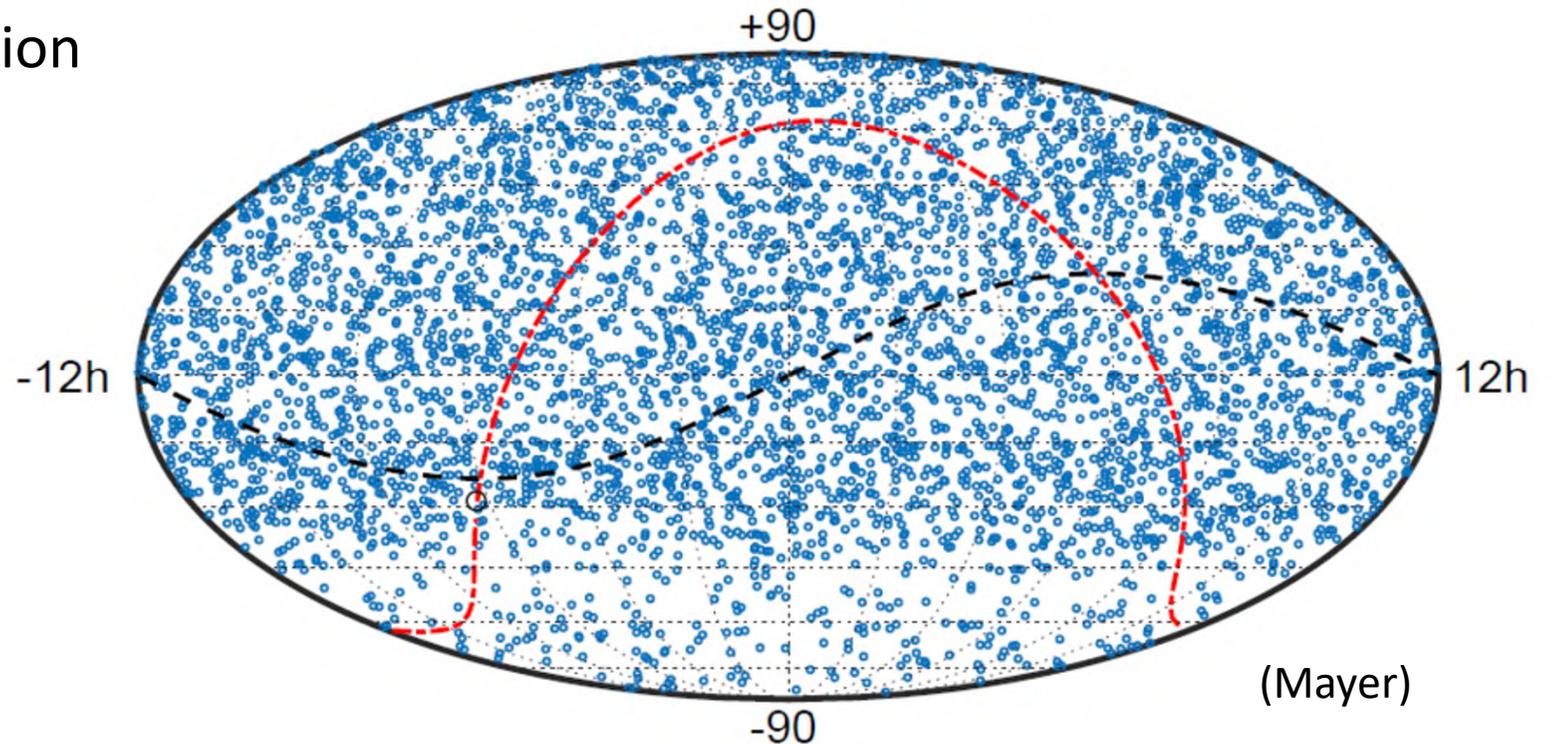
El Niño Ereignisse



NOAA

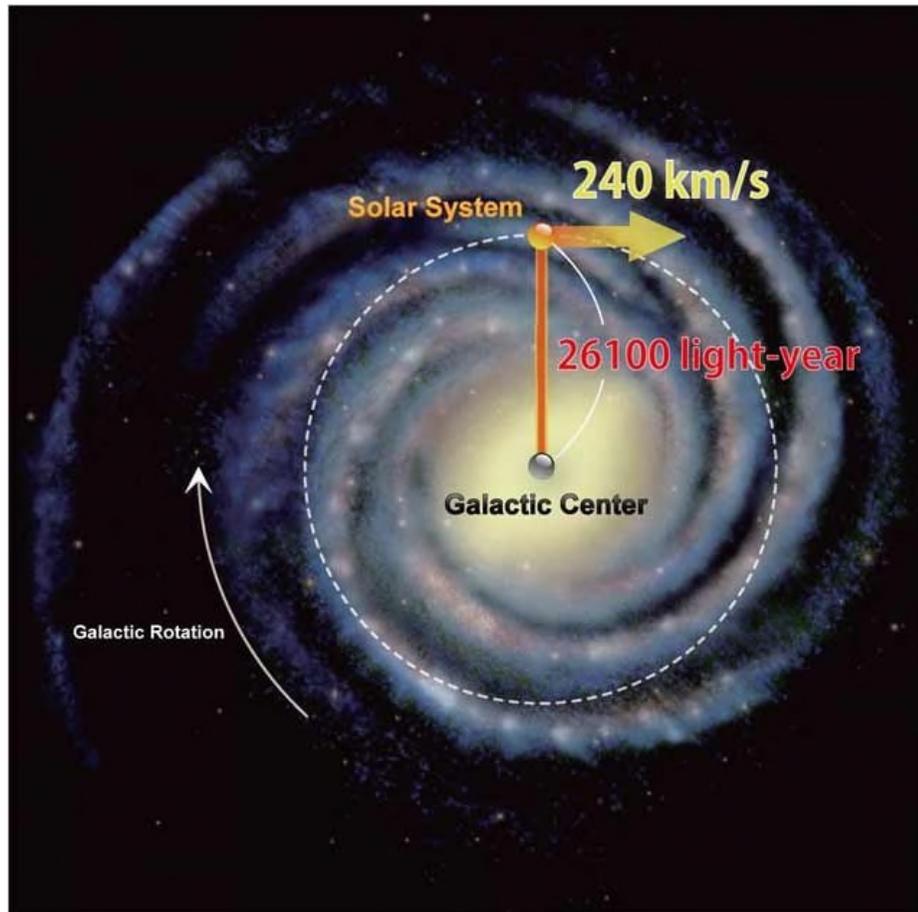
# Himmelsfester Referenzrahmen

- Realisierung mit VLBI Beobachtungen der Jahre 1979-2018
  - ICRF3 mit 4500 Quellen (Quasaren)
  - Genauigkeit  $30 \mu\text{as}$  (Tennisball am Mond) 
- Bedeutung
  - Vielzahl astronomischer Anwendungen
  - Interplanetare Navigation



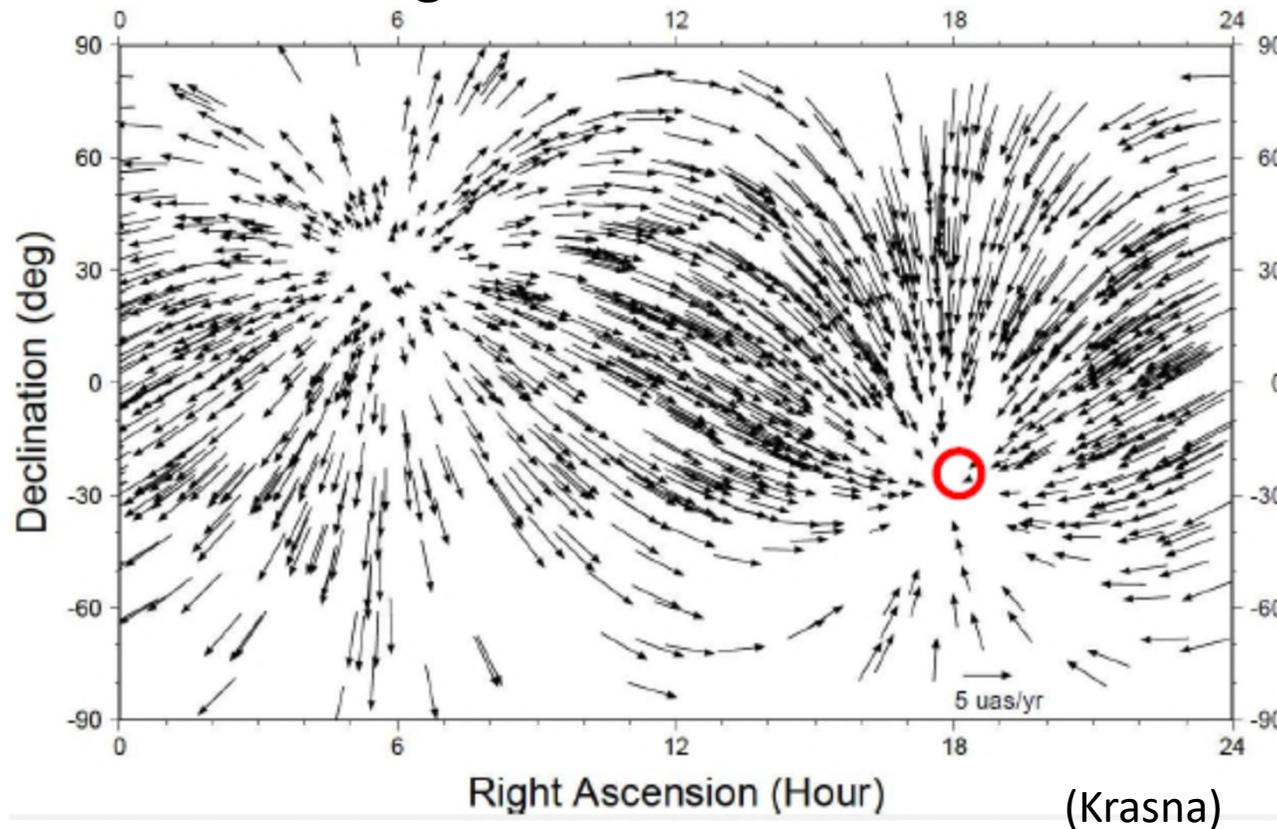
# Galaktische Aberration

- Ursprung des ICRF3 im Schwerpunkt des Sonnensystems (SSB)
- SSB in beschleunigter Bewegung um galaktisches Zentrum (200 Mio Jahre um SgrA\*)



# Galaktische Aberration

- Bestimmung aus VLBI Daten



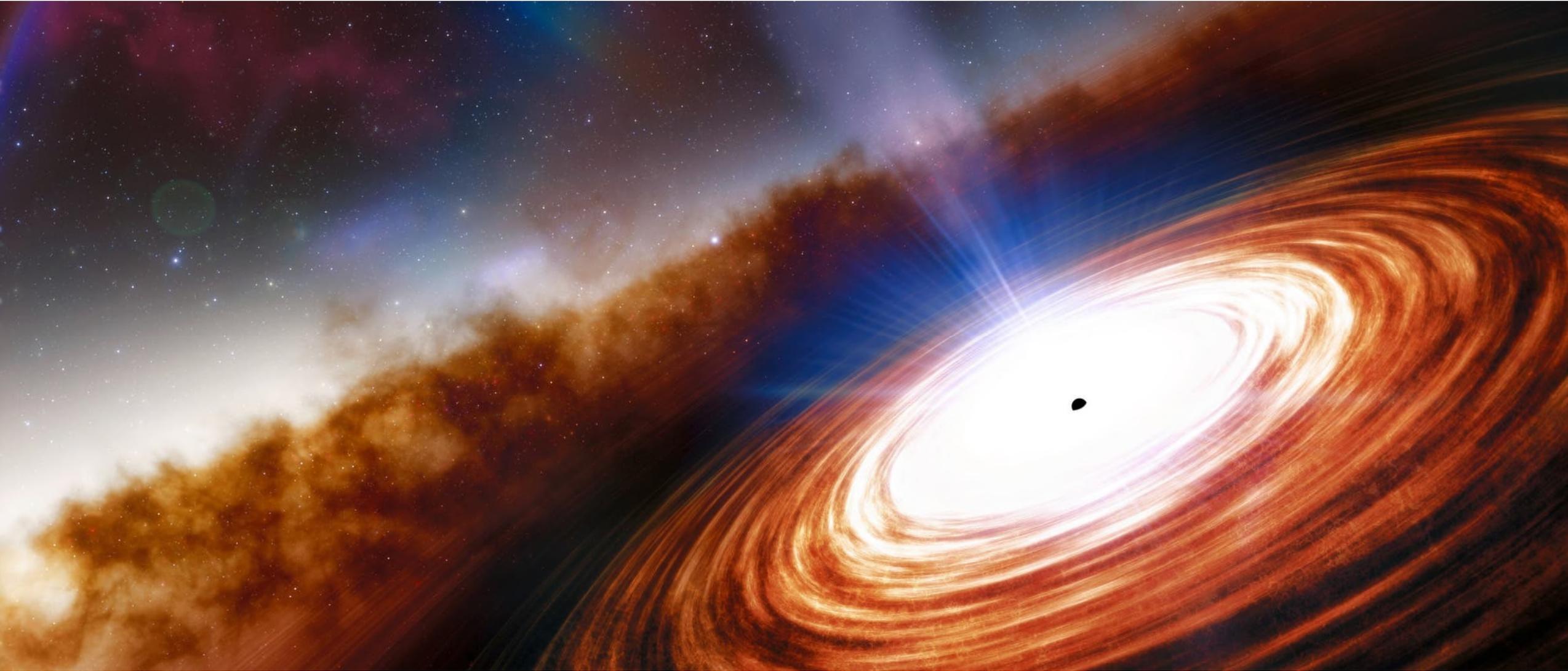
Dipolar Pattern of Proper Motion  
5.8  $\mu\text{as/yr}$

Galactic center (RA=266°, Dec=-29°)

$$\Delta\mu = 5.8 \mu\text{as/year}$$

**Danke für die Aufmerksamkeit**

---



J0313-1806; Credit: NOIRLab/NSF/AURA/J. da Silva