

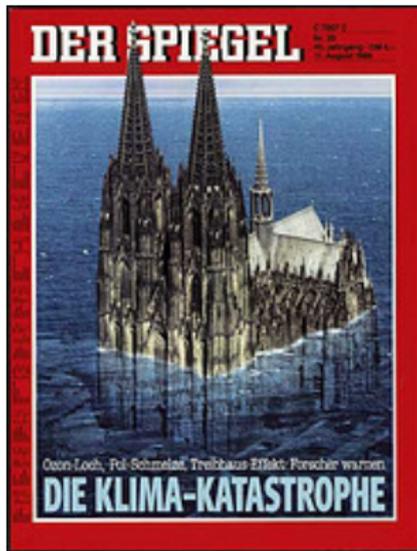
# Untersuchungen zu Phasenlösungen in der geodätischen Radiointerferometrie

Masterarbeit

Annemarie Kunkel

10.10.2013

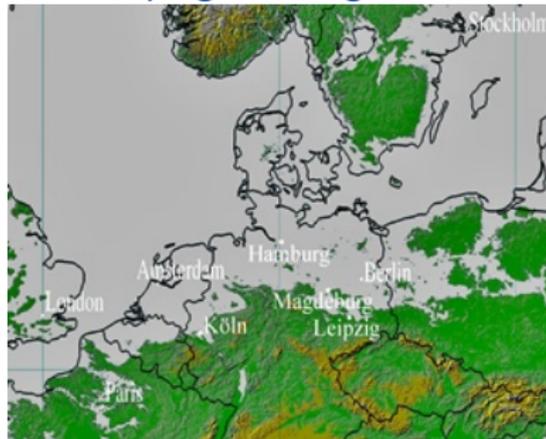
1



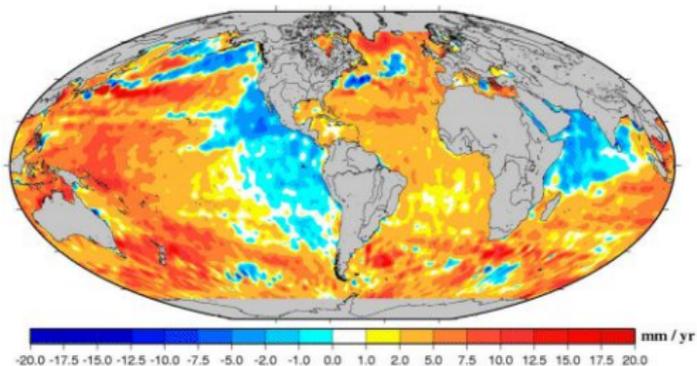
Der Spiegel von  
1968

heute: einige mm/Jahr

Küstenlinie bei einem  
Meeresspiegelanstieg von 100 m



[<http://klimakatastrophe.wordpress.com/2010/11/02/klimawandel-100-meter-meeresspiegelanstieg-innerhalb-weniger-generationen/>]



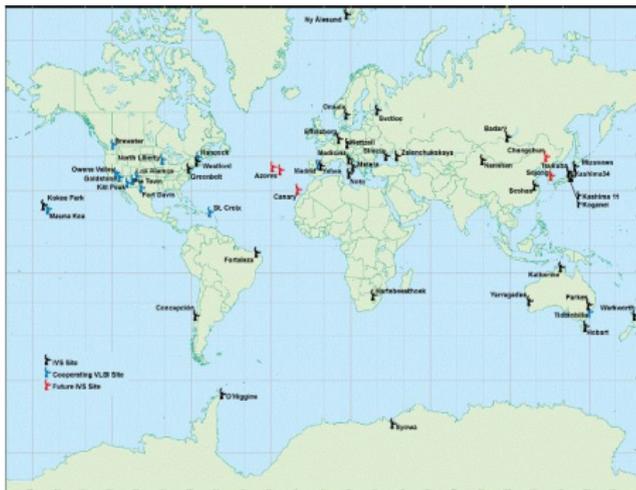
[[http://www.altimetry.info/html/appli/ocean/msl\\_en.html](http://www.altimetry.info/html/appli/ocean/msl_en.html)]

Für globale Messungen und Erdbeobachtungssatelliten:

- Weltweites Referenzsystem
- Räumlich und zeitlich sehr stabil  
→ International Terrestrial Reference System (ITRS)

ITRF: Realisierung des ITRS durch

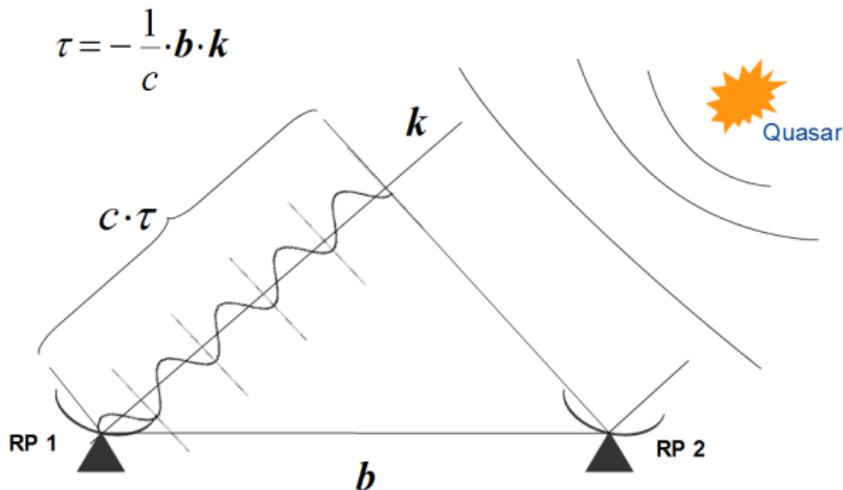
- SLR, GPS, DORIS, **VLBI**



[<http://ivs.nict.go.jp/mirror/stations/ns-map.html>]

## Verdichtung des VLBI-Netzes auf der Südhalbkugel

- kleine Teleskope (günstiger, aber ungenauer)
- **phase delay** zur Genauigkeitssteigerung



Laufzeitdifferenz als Beobachtungen  
 → **group delay** und **phase delay**

Der phase delay ist um den **Faktor 60** genauer als der group delay, aber **mehrdeutig** mit 36 mm!

- 1 Parameterschätzung aus dem group delay

$$\widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr} = \left( \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \right) \mathbf{A}^T \mathbf{P} \Delta \ell_{gr}$$

mit Parametern für Basislinie und Uhren- und Atmosphärenverhalten

- 2 ggf. Ausreißereliminierung
- 3 Aus  $\widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr}$  werden die Residuen des phase delay bestimmt

$$\mathbf{r}_{ph} = \Delta \ell_{ph} - \mathbf{A} \widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr}$$

- 4 ggf. Ausreißereliminierung
- 5 Bestimmung der Mehrdeutigkeiten in den Phasenresiduen

- 1 Parameterschätzung aus dem group delay

$$\widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr} = \left( \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \right) \mathbf{A}^T \mathbf{P} \Delta \ell_{gr}$$

mit Parametern für Basislinie und Uhren- und Atmosphärenverhalten

- 2 ggf. Ausreißereliminierung
- 3 Aus  $\widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr}$  werden die Residuen des phase delay bestimmt

$$\mathbf{r}_{ph} = \Delta \ell_{ph} - \mathbf{A} \widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr}$$

- 4 ggf. Ausreißereliminierung
- 5 Bestimmung der Mehrdeutigkeiten in den Phasenresiduen

- 1 Parameterschätzung aus dem group delay

$$\widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr} = \left( \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \right) \mathbf{A}^T \mathbf{P} \Delta \ell_{gr}$$

mit Parametern für Basislinie und Uhren- und Atmosphärenverhalten

- 2 ggf. Ausreißereliminierung
- 3 Aus  $\widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr}$  werden die Residuen des phase delay bestimmt

$$\mathbf{r}_{ph} = \Delta \ell_{ph} - \mathbf{A} \widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr}$$

- 4 ggf. Ausreißereliminierung
- 5 Bestimmung der Mehrdeutigkeiten in den Phasenresiduen

- 1 Parameterschätzung aus dem group delay

$$\widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr} = \left( \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \right) \mathbf{A}^T \mathbf{P} \Delta \ell_{gr}$$

mit Parametern für Basislinie und Uhren- und Atmosphärenverhalten

- 2 ggf. Ausreißereliminierung
- 3 Aus  $\widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr}$  werden die Residuen des phase delay bestimmt

$$\mathbf{r}_{ph} = \Delta \ell_{ph} - \mathbf{A} \widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr}$$

- 4 ggf. Ausreißereliminierung
- 5 Bestimmung der Mehrdeutigkeiten in den Phasenresiduen

- 1 Parameterschätzung aus dem group delay

$$\widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr} = \left( \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \right) \mathbf{A}^T \mathbf{P} \Delta \ell_{gr}$$

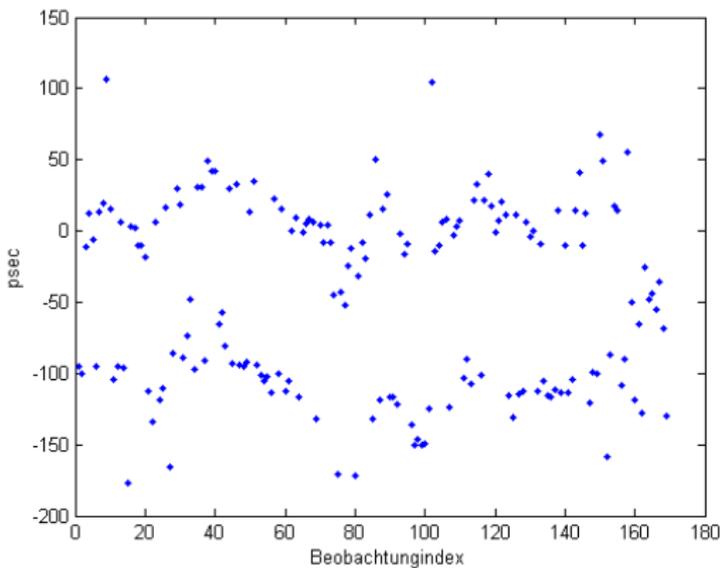
mit Parametern für Basislinie und Uhren- und Atmosphärenverhalten

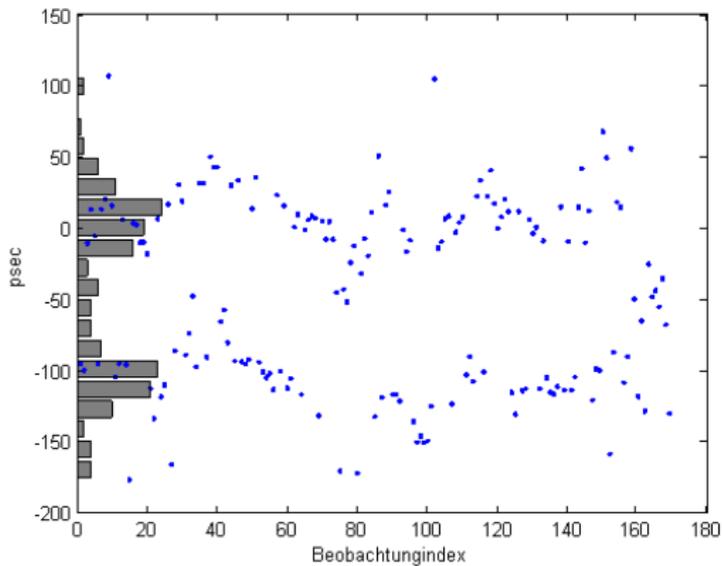
- 2 ggf. Ausreißereliminierung
- 3 Aus  $\widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr}$  werden die Residuen des phase delay bestimmt

$$\mathbf{r}_{ph} = \Delta \ell_{ph} - \mathbf{A} \widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{gr}$$

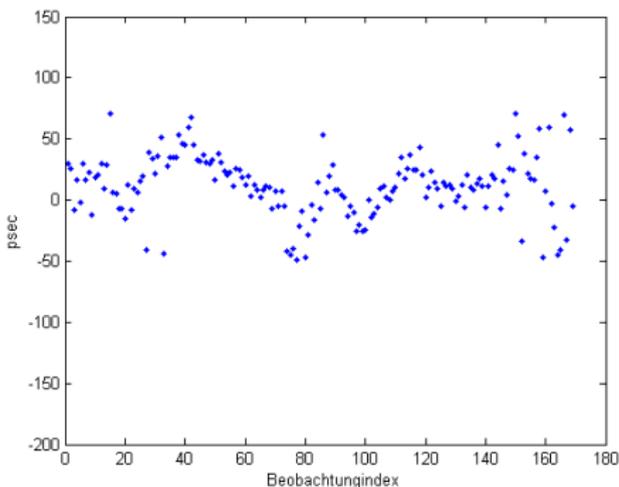
- 4 ggf. Ausreißereliminierung
- 5 Bestimmung der Mehrdeutigkeiten in den Phasenresiduen







## Dichteschätzung der Residuen



- 6 Gleichung der mehrdeutigkeitsfreien Phasenbeobachtungen  $\Delta \ell_{ph}^{af}$

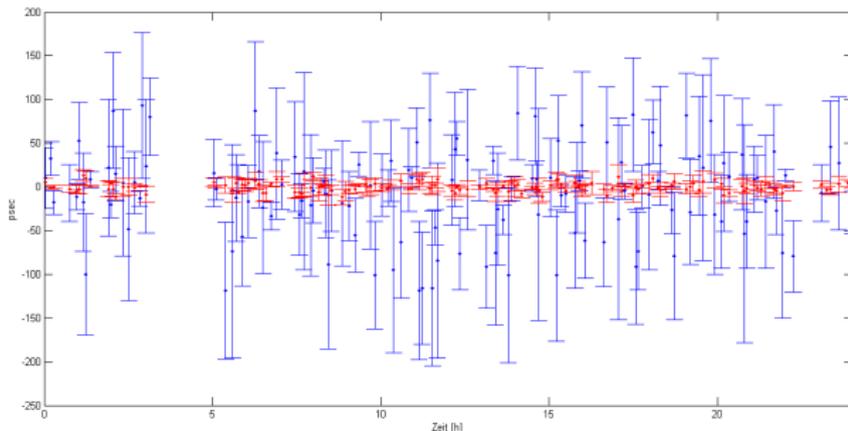
$$\widetilde{\Delta \mathbf{x}}_{ph} = \left( \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \right) \mathbf{A}^T \mathbf{P} \Delta \ell_{ph}^{af}$$

Zwischen dem transportablen Radioteleskop TIGO in Wettzell und dem dort fest installierten 20 m Teleskop (1998-2000)



[[http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/public/teleskope/tigo\\_vlb.jpg](http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/public/teleskope/tigo_vlb.jpg)]

Kurze Basislinie von 60 m → Minimierung des Einflusses der Ionosphäre

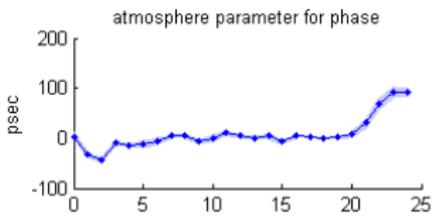
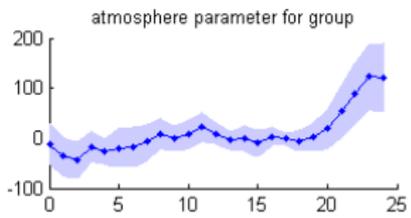
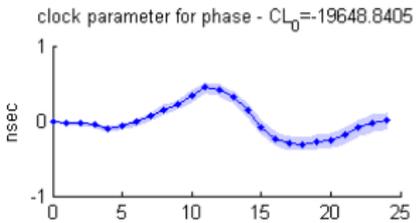
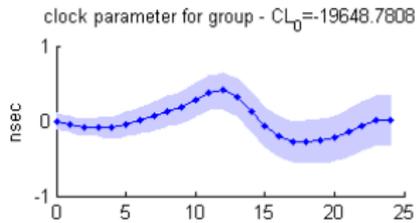


$$\sigma_{wmrs,gr} = 30 \text{ psec}, \sigma_{wmrs,ph} = 3.8 \text{ psec}$$

## Auswertung von 13 Sessions

$$\sigma_{wmrs,ph} < 10 \text{ psec}: 85 \%$$

$$\sigma_{wmrs,gr} / \sigma_{wmrs,ph}: 5,0$$



## Genauigkeitssteigerung der Parameter

$$\sigma_{CL,gr} / \sigma_{CL,ph} : 4,9$$

$$\sigma_{AT,gr} / \sigma_{AT,ph} : 5,1$$

$$\sigma_{xyz,gr} \approx 9 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xyz,ph} \approx 1,5 \text{ mm}$$



- Durchführung auf 13 Sessions für Tigo-Wettzell  
→ Mehrdeutigkeiten lassen sich automatisiert lösen
- Phase delay liefert auf Basislinie Tigo-Wettzell deutlich bessere Ergebnisse als der group delay
- Mehrdeutigkeitslösung unter Einfluss der Ionosphäre muss für lange Basislinien umgesetzt werden

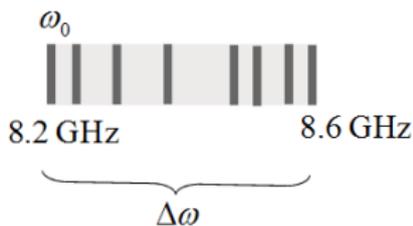
→ erste Schritte hingehend der routinemäßigen Anwendung des phase delays für globale Lösungen mit einer gesteigerten Genauigkeit

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

13

- Hase, H. and Petrov, L. (1999). The First Campaign of Observations with the VLBI-Module of TIGO. In Proceedings of the 13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, held at Viechtach.
- Herring, T. (1983). Precision and Accuracy of Intercontinental Distance Determination Using Radiointerferometry. Technical Report, Massachusetts Institute of Technology.
- Herring, T. (1992). Submillimeter Horizontal Position Determination Using Very Long Baseline Interferometry. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 97(B2):1981-1990.
- Petrov, L. (1998). VLBI Phase Delay Ambiguity Resolution Project. Preliminary report. unpublished.
- Petrov, L. (1999). Steps towards Phase Delay VLBI. Proceedings of the 13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Viechtach, pages 144-151.
- Ray, J., Himwich, W., and Knight, C. (1993). Radiointerferometric Survey between the GRAS and VLBA Antennas, Ft. Davis, TX. Geodynamics Series, 25:115-124.
- Rogers, A., Knight, C., Hinteregger, H., Whitney, A., Counselman, C., Shapiro, I., Gourevitch, S., and Clark, T. (1978). Geodesy by radiointerferometry: Determination of a 1.24-km Baseline Vector with 5-mm Repeatability. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 83(B1):325-334.

Aufnahme im X-Band:



Genauigkeit der Beobachtung:

$$\text{group delay : } \sigma_{\tau_{gr}} = \frac{1}{SNR \cdot \Delta\omega}$$

$$\text{phase delay : } \sigma_{\tau_{ph}} = \frac{1}{SNR \cdot \omega_0}$$

Grundgleichung für zwei Stationen  $a$  und  $b$  bei Ausgleichung einer Basislinie:

$$\tau = -\frac{1}{c} \cdot \mathbf{b} \cdot \mathbf{k}$$

Erweiterung des funktionalen Zusammenhangs:

$$\tau = -\frac{1}{c} \mathbf{b} \cdot \mathbf{W}(x_p, y_p) \mathbf{S}(UT1) \mathbf{PN}(X, Y) \cdot \mathbf{k} + e \quad \left. \begin{array}{l} \} 1) \text{ Geometrie und EOP} \\ \} 2) \text{ Uhr} \\ \} 3) \text{ Atmosphäre} \end{array} \right\}$$

$$+ T_0^b + T_1^b(t - t_0) + T_2^b(t - t_0)^2$$

$$+ m_w^a [\Delta L_{w0}^a + \Delta L_{w1}^a(t - t_0)]$$

$$+ m_w^b [\Delta L_{w0}^b + \Delta L_{w1}^b(t - t_0)]$$

Zusätzlich stückweise lineare Funktionen für das Atmosphären- und Uhrenverhalten

$\sigma_{wrms}$ [psec]	group	phase
00FEB07XA	28.9	5.8
00JAN27XA	20.2	2.9
00MAY15XA	17.3	6.3
98AUG17XA	28.6	9.0
98DEC14XA	13.4	2.6
98JUL20XK	12.2	2.8
98JUN22XA	23.7	4.4
98MAY19XE	5.2	6.1
99AUG16XA	32.5	12.9
99FEB01XA	37.1	19.1
99FEB04XK	5.7	2.1
99JUN28XA	23.1	13.9
99OCT11XA	24.0	4.3
Anzahl $\sigma_{wrms} < 10$ psec	10/13	