

Festvortrag zur Verleihung des Karl Rinner Preises

Wien, 22. Oktober 2019

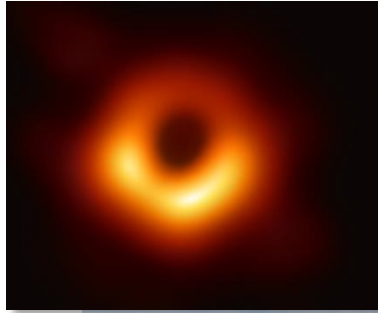
Satelliten-Tracking mit VLBI

Andreas Hellerschmied

Inhalt

1. Was ist VLBI und wozu wird es benötigt?
2. Spezialanwendung: Satelliten-Tracking mit VLBI
3. Fallstudie: Beobachtung des APOD-A nano Satellit

Very Long Baseline Interferometry (VLBI)



Erstes „Foto“ eines schwarzen Lochs
(EHT, April 2019; Quelle:
www.eso.org/public/images/eso1907a/)



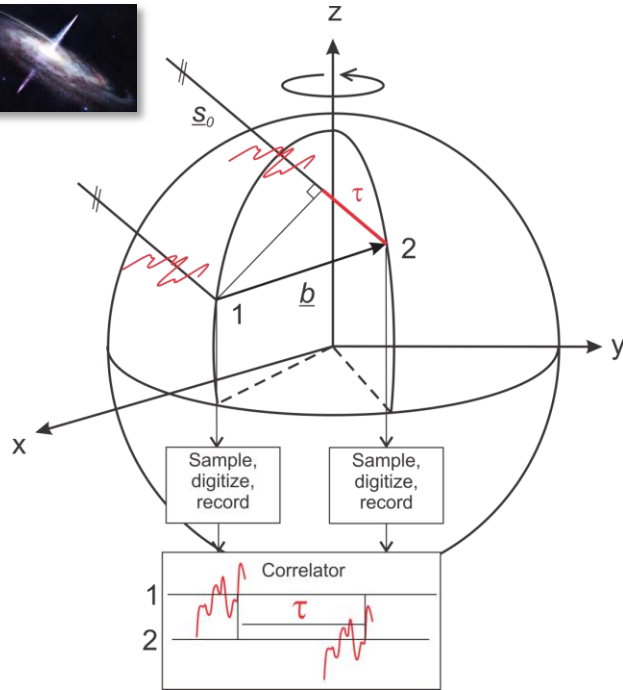
Geodätischen Observatorium
Wettzell, Deutschland



Illustration
eines Quasars

- Verfahren aus der Radioastronomie
- Seit 1970er für Geodäsie angewandt
- Beobachtung extragalaktischer Radioquellen (Quasare) mit globalen Antennen-Netzwerken
- Quasare sind mehrere Mrd. LJ entfernt
 - Extrem stabile Fixpunkte in der Himmelssphäre (vgl. Fernziel für Richtungsanschluss)

Messprinzip



(Schuh & Böhm, 2013)

- Schwache Radiosignale simultan mit 2 Antennen (1, 2) auf Basislinie b beobachtet
- Signale werden mit Zeitstempel aus Atomuhr versehen, digitalisiert und aufgezeichnet
- Beobachtungsgröße τ (= Differenz der Signal-Ankunftszeiten an Stationen 1 und 2) durch Kreuzkorrelation berechnet

$$\tau = -\frac{b \cdot s_0}{c} = t_2 - t_1$$

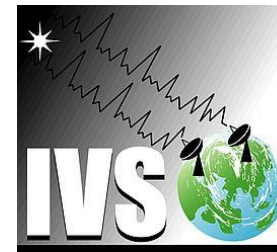
➔ **Schätzung geodätischer Parameter mit Delay τ**

Messkampagnen des IVS



IVS Stations-Netzwerk (siehe <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/stations/ns-map.html>).

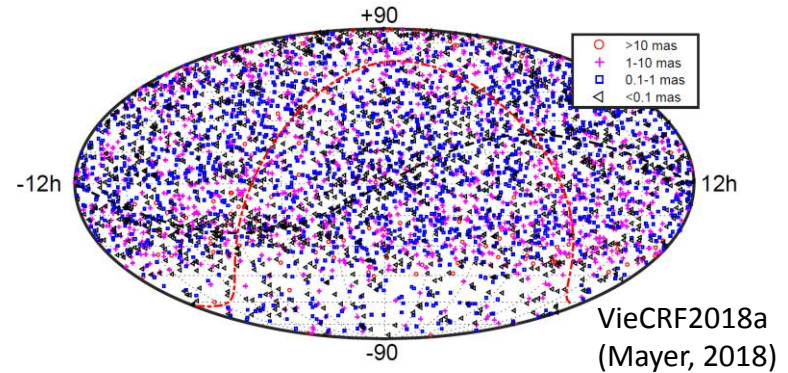
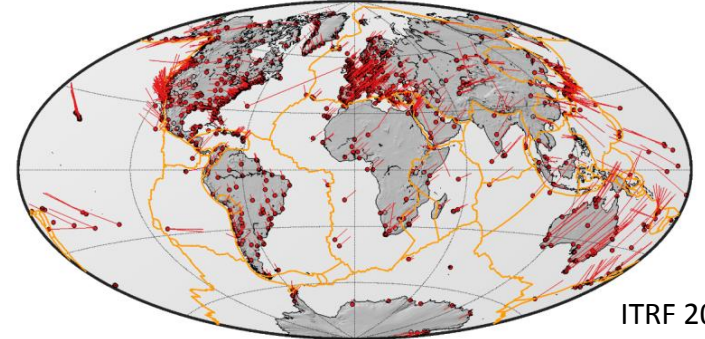
- **International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS)**
organisiert globale VLBI Sessions:
 - 2/Woche: 24h Session mit 8-12 Stationen (→ EOP, TRF, CRF)
 - Täglich: 1h intensive Session mit 2-3 Stationen (→ dUT1)



*Der IVS ist ein
Service der IAG.*

Produkte und Beiträge des IVS - Referenzrahmen

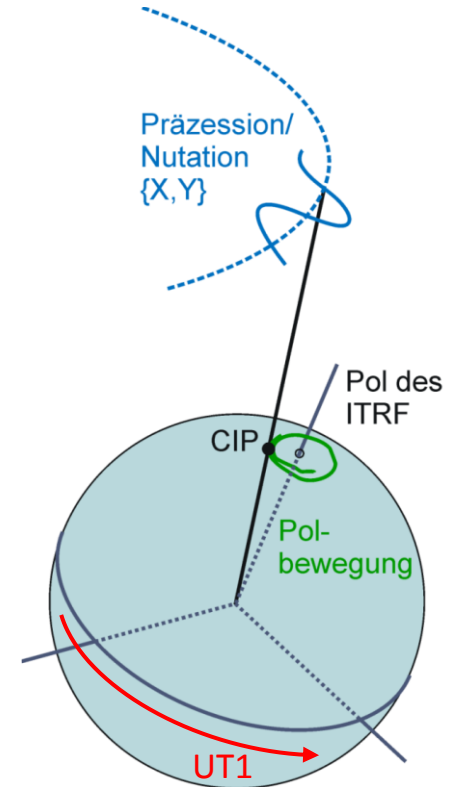
- **Terrestrischer Referenzrahmen (TRF)**
durch Positionen und
Geschwindigkeiten von VLBI Stationen
- **Himmelsfester Referenzrahmen (CRF)**
durch Positionen extra-galaktischer
Radioquellen
 - International Celestial Reference Frame
(ICRF) basiert rein auf VLBI Messungen!



Produkte und Beiträge des IVS - Erdorientierungsparameter

- Erdorientierungsparameter (EOP) beschreiben die **Orientierung der Erdkörpers im Weltraum**
- Transformation zwischen TRF und CRF
- UT1 („Erdrotation“) aus intensive Sessions

Parameter	VLBI	GNSS	DORIS	SLR
Nutation (X, Y)	X	(X)		(X)
Polbewegung (x_p, y_p)	X	X	X	X
UT1 ($dUT1$)	X			

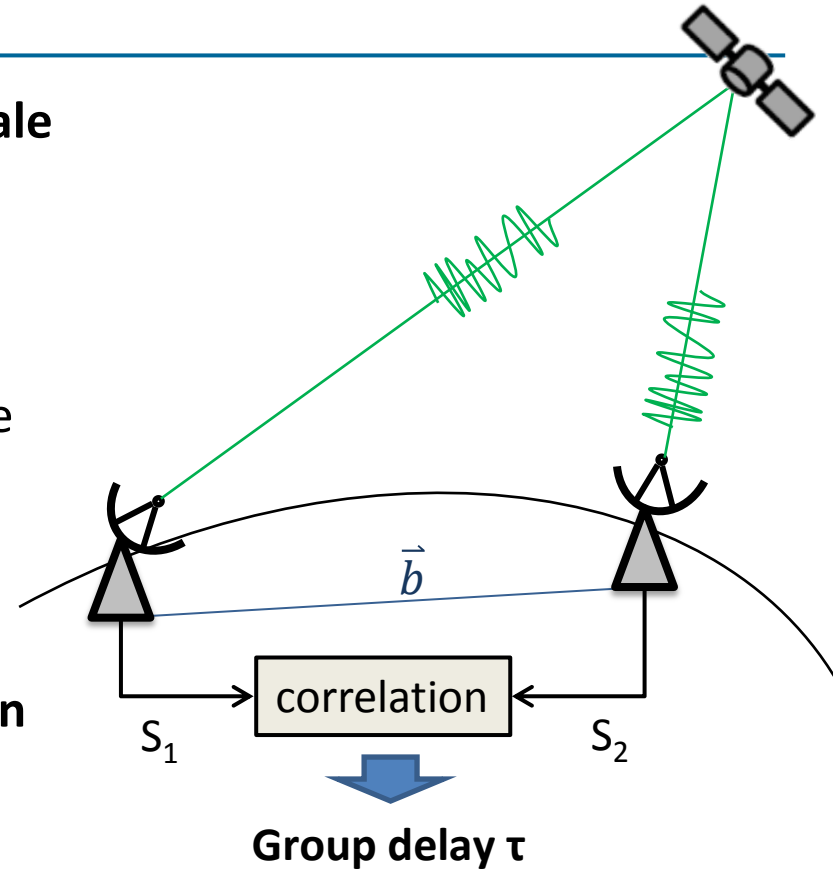


Satelliten-Tracking mit VLBI

Satelliten-Tracking mit VLBI

- **Beobachtung künstlicher Satelliten-Signale**
- Geodätischer Beobachtungsmodus
 - Satellitensignale behandelt wie Rauschen
 - Verwendung der Standard-Signalkette
 - Berechnung von Delays τ analog zur Beobachtung von Quasaren

➔ **Kombination mit Quasar-Beobachtungen**



Motivation: Verknüpfung geodätischer Weltraumverfahren

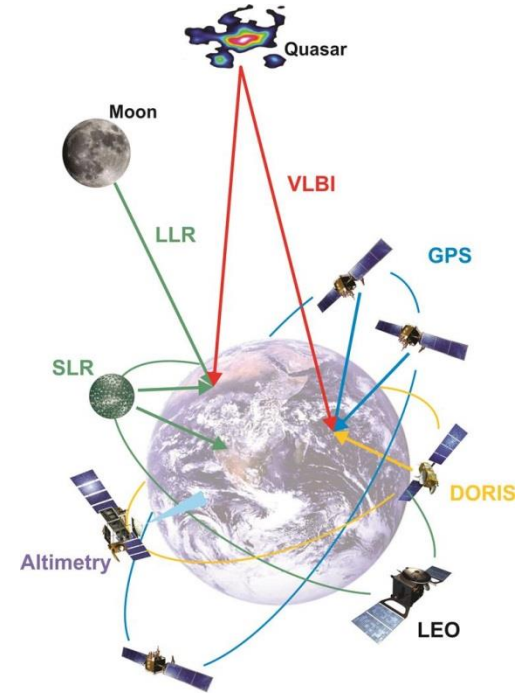
- SLR
- GNSS
- DORIS
- VLBI

Tracking von Satelliten
im Einfluss des
Erdschwerefeldes

Extragalaktische
Radioquellen

Kombinations- Produkte

- EOP
- ITRF
- etc.



GGOS Ziel im Bezug auf geod. Referenzrahmen:

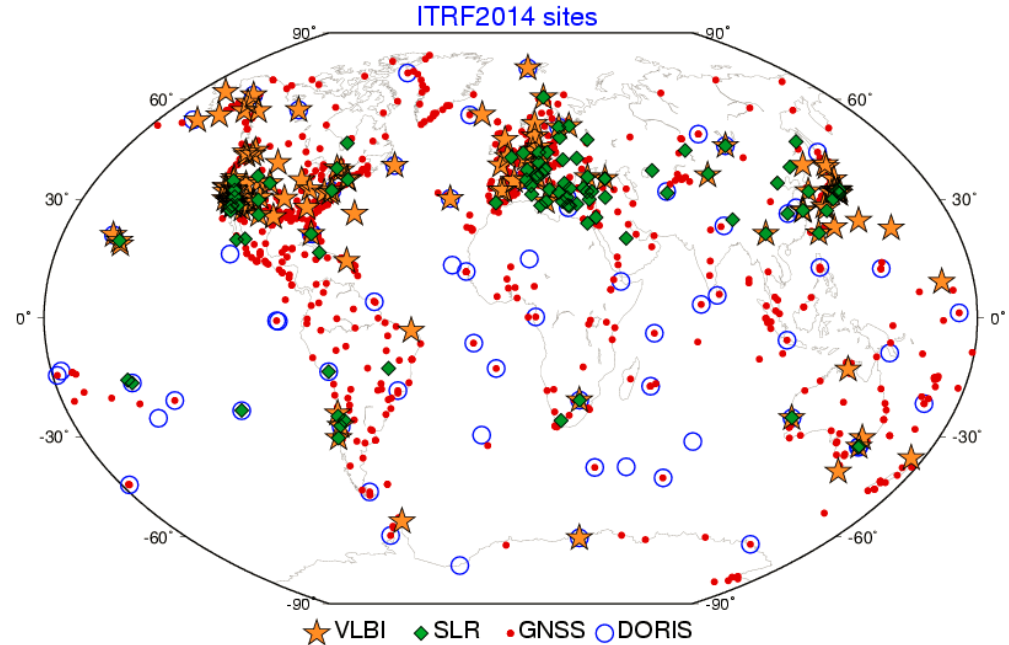
(Rothacher et al., 2009):

*„... rigorous combination and integration of the
different ground- and space-geodetic techniques.“*

<http://geodesy.hartrao.ac.za/>

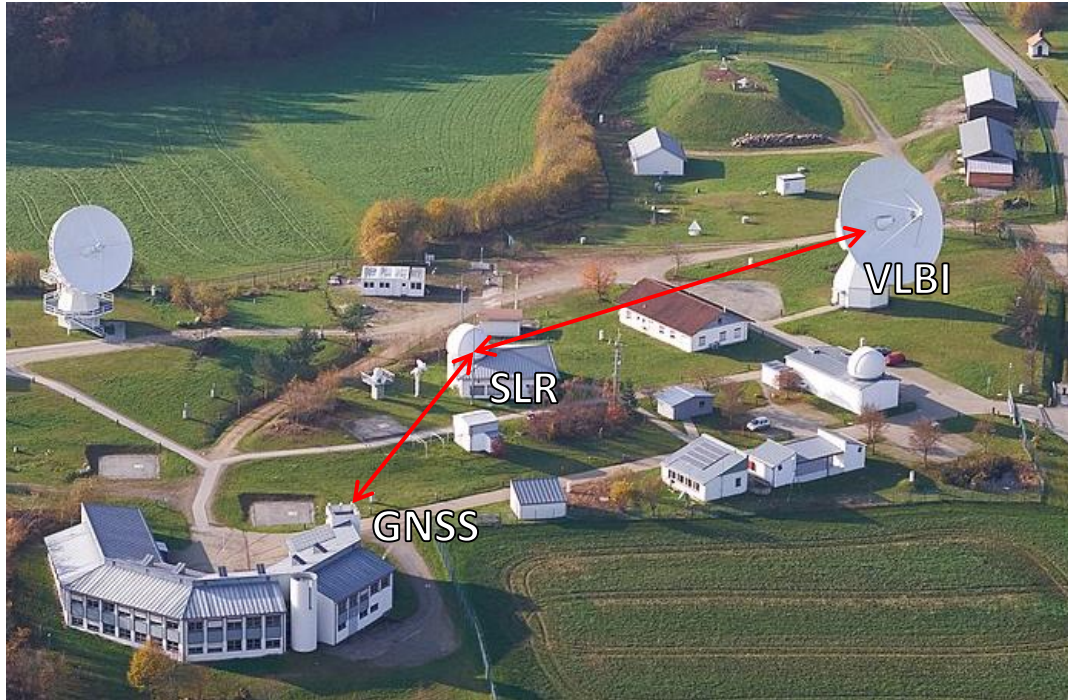
ITRF2014 als Kombinationsprodukt

- **Stationskoordinaten**
geodätischer
Weltraumverfahren
(Einzellösung jeder Technik)
- „**Local ties**“ = lokal
eingemessene
Verknüpfungsvektoren
zwischen Instrumenten an
geodätischen
Fundamentalstationen



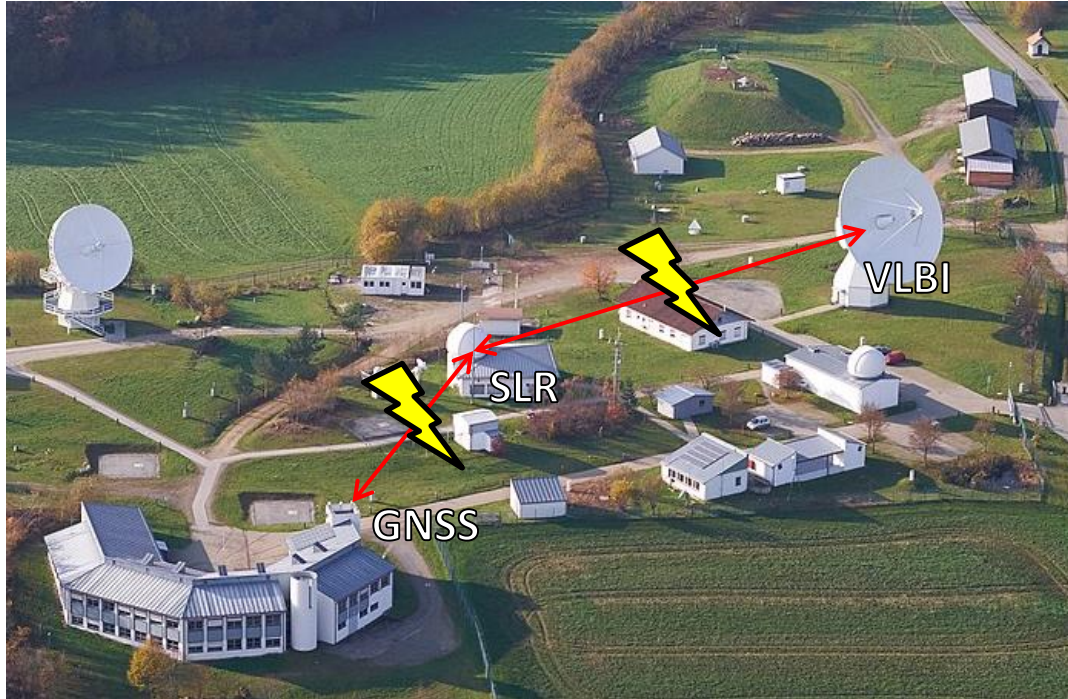
Stationsnetzwerk zur Realisierung des ITRF2014 (Altamimi et al., 2016)

Terrestrische Verknüpfungsvektoren („local ties“)



Verknüpfung weltraumgeodätischer Verfahren durch „local ties“ an der geodätischen Fundamentalstation Wettzell, Deutschland.

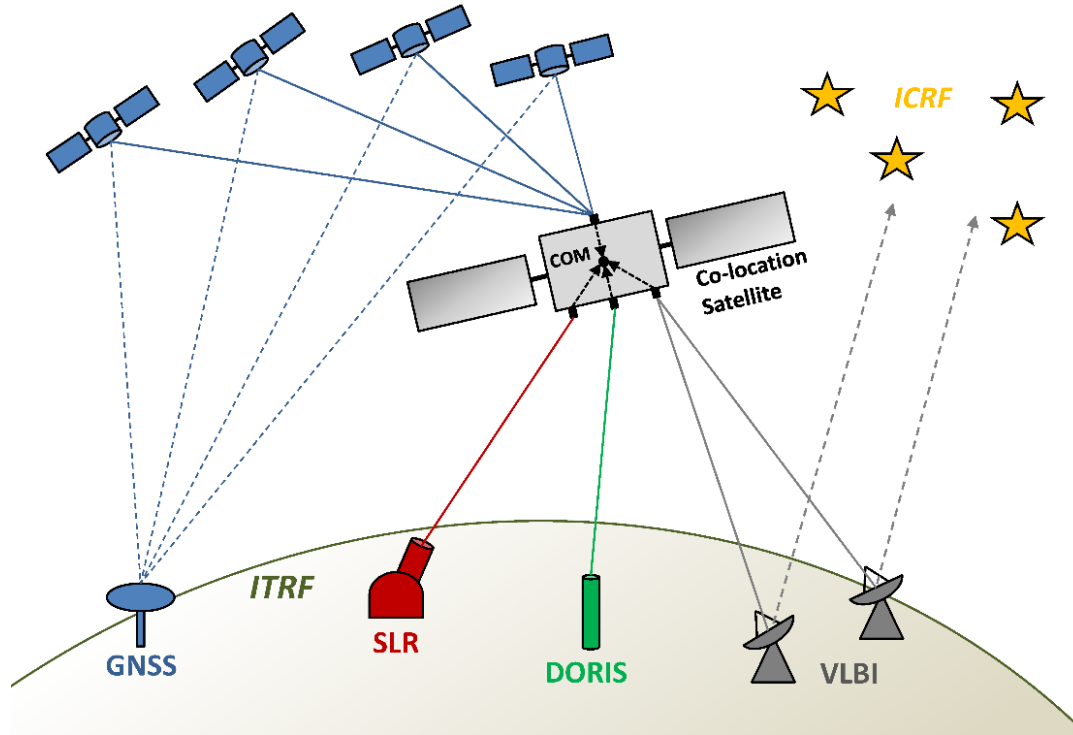
Terrestrische Verknüpfungsvektoren („local ties“)



Verknüpfung weltraumgeodätischer Verfahren durch „local ties“ an der geodätischen Fundamentalstation Wettzell, Deutschland.

- ITRF2014 Kombination (Altamimi et al., 2016):
 - ➔ **Signifikante Diskrepanzen zwischen local ties und Koordinatendifferenzen aus den Weltraumverfahren!**
- z.B: SLR-VLBI local ties:
 - 50% > 5 mm
 - 30% > 10 mm
- **Ursachen unklar!**

Kollokation im Weltraum



Verknüpfung geodätischer Weltraumverfahren via „Kollokationssatellit“.

- **Verknüpfung der Verfahren im Weltraum, unabhängig von local ties**
 - Diskrepanzen untersuchen
 - Verbesserte Verknüpfung
- Satellit als gemeinsames Beobachtungsziel dient als „Ident-Punkt“

Ausgangssituation

- **Simulationsstudien** zeigen das Potential, aber auch die derzeitigen Einschränkungen
 - e.g. Plank et al. (2014, 2016), Anderson et al. (2018), Hobiger et al. (2018), ...
- Erste **praktische Beobachtungs-Experimente**,
 - e.g. Tornatore et al. (2014), Haas et al. (2014), ...
- **Nichtsdestotrotz...**
 - Beobachtungs- und Datenanalyse-Prozesse nicht verfügbar
 - Echte Beobachtungsdaten fehlten

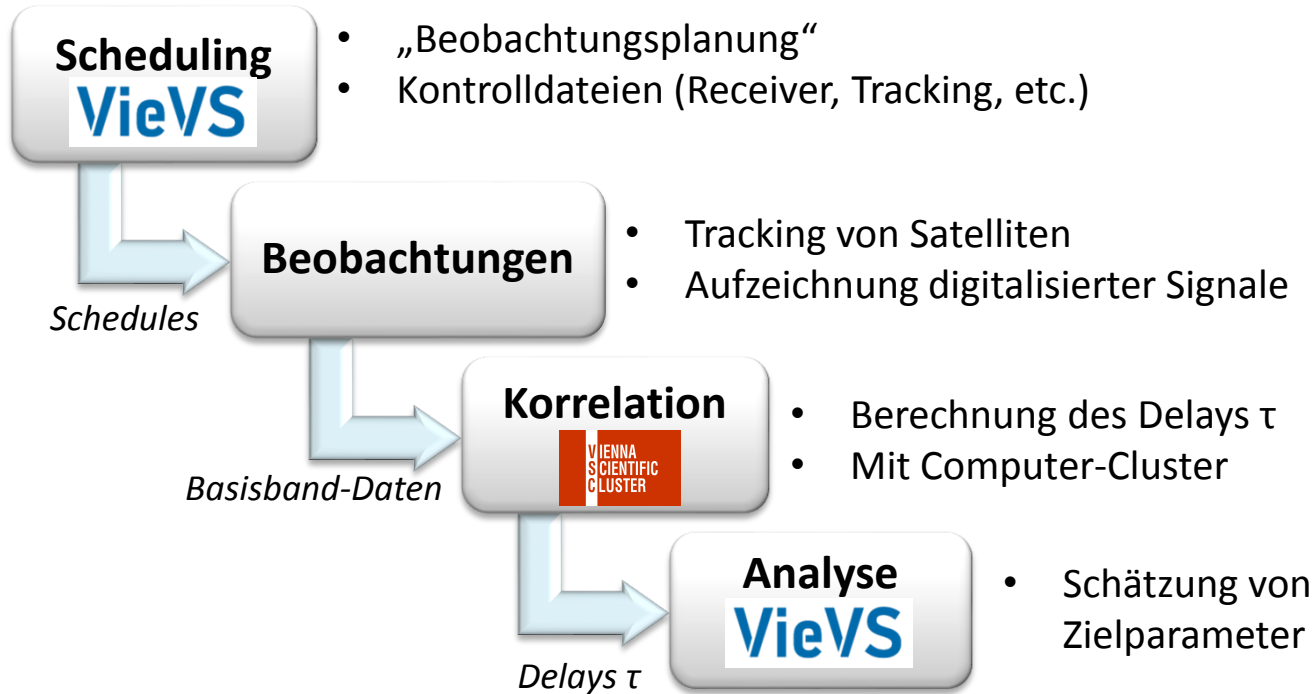
Ausgangssituation

- **Simulationsstudien** zeigen das Potential, aber auch die derzeitigen Einschränkungen
 - e.g. Plank et al. (2014, 2016), Anderson et al. (2018), Hobiger et al. (2018), ...
- Erste **praktische Beobachtungs-Experimente**,
 - e.g. Tornatore et al. (2014), Haas et al. (2014), ...

Ziele:

- 
- **Vollständigen Prozesskette für VLBI Satelliten-Tracking**
 - **Erstmals reale Beobachtungsdaten sammeln**

Prozesskette für Satelliten-Tracking mit VLBI



Vienna VLBI and Satellite Software
(VieVS, Böhm et al., 2018), als zentrale Komponente

Experimente (2014 - 2016)

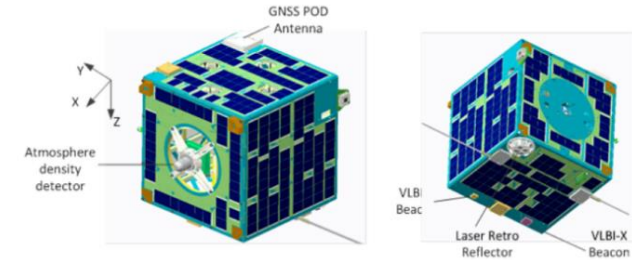
- Bei fast 50 Experimenten beteiligt
- Hauptsächlich Beobachtungsplanung mit **VieVS**

Liste von Satelliten-Tracking Experimenten zwischen 2014 und 2016 (unvollständig!).

Date	Duration	Code	Stations	Targets
16.01.2014	1h	G140116a	O8, Wz	GNSS
16.01.2014	1h	G140116b	O8, Wz	GNSS
21.01.2014	1h	G140121a	O8, Wz	GNSS
21.01.2014	1h	G140121b	O8, Wz	GNSS
15.06.2015	1h	615aHo	Ho	GNSS
18.06.2015	1h	169cHo	Ho	GNSS
18.06.2015	2h	169cCd	Cd	GNSS
28.06.2015	2h	179a	Ho, Cd	GNSS
19.08.2015	28 min	ex1	Wz, Wn, Wd	GNSS
20.08.2015	25 min	ex2	Wz, Wn, Wd	GNSS
24.08.2015	11 min	ex3a	Wz, Wn, Wd	GNSS
24.08.2015	4h	236a	Ho, Cd	GNSS
26.08.2015	4h	238a	Ho, Cd	GNSS
12.11.2015	30 min	ex4a	Wd, Wn	GNSS
23.11.2015	33 min	23a1	Mc, Wd	GNSS
23.11.2015	2h 15min	23b1	Mc, Wd	GNSS
23.11.2015	2h 30 min	23c1	Mc, Wd	GNSS
18.04.2016	9 min	ex5a	Wz, Wn, Wd	GNSS
05.05.2016	6h	126b	Ho, Cd	GNSS
10.05.2016	6h	131a	Ho, Cd	GNSS
11.05.2016	6h	132a	Ho, Cd	GNSS
17.05.2016	12 min	ex6b	Wn, Wz	GNSS
23.05.2016	12 min	ex7a	Wn, Wz	GNSS
23.05.2016	3h	144b	Mc, O8, Sr	GNSS
23.05.2016	40 min	144d	Mc, O8, Sr	GNSS
30.05.2016	12 min	ex8a	Wn, Wz	GNSS
06.07.2016	6 min	ap01	On	APOD
06.07.2016	9 min	ap02	On	APOD
06.07.2016	8 min	ap03	On	APOD
14.07.2016	7 min	196b	On	APOD
14.07.2016	9 min	196c	On	APOD
15.07.2016	9 min	197c	On	APOD
18.07.2016	10 min	200a	Yg, Ke	APOD
20.07.2016	9 min	202	Yg, Ke	APOD
25.07.2016	6 min	207a	On	APOD
25.07.2016	5 min	207b	On, Wn, Wz	APOD
19.09.2016	6 min	263a	On	APOD
19.09.2016	6 min	263b	On, Wn, Wz	APOD
19.09.2016	5 min	263c	On, Wn, Wz	APOD

Tracking des APOD-A nano Satelliten (2016)

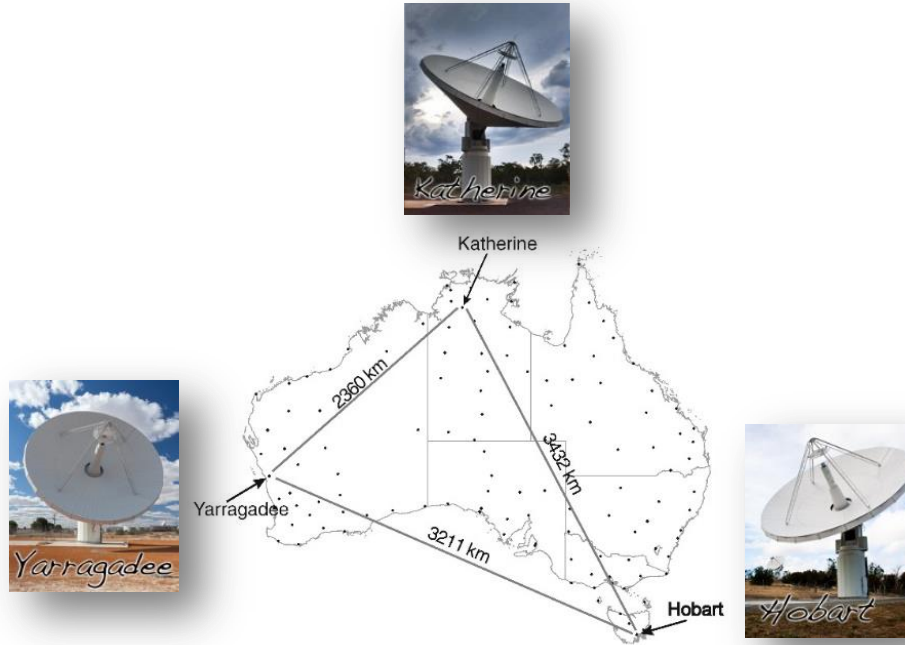
- **Prototyp eines Kollokationssatelliten**
- Chinesische „cube satellite“ Mission (BACC)
- Missionsstart im Sept. 2015
- Low Earth Orbit (~ 450 km, $i \approx 97^\circ$)
- **Geodätische Instrumente:**
 - GNSS Empfänger (GPS & BD)
 - SLR Retroreflektor
 - **VLBI Sender (S/X-Band, DOR)**



Aufbau des APOD-A (Sun et al., 2017)

Label	Band	Frequency [MHz]	
Carr _S	S	2262.010	} $\Delta f = 10.3$ MHz
DOR _{S1}	S	2256.869	
DOR _{S2}	S	2260.982	
DOR _{S3}	S	2263.038	
DOR _{S4}	S	2267.151	
Carr _X	X	8424.040	} $\Delta f = 38.3$ MHz
DOR _{X1}	X	8404.894	
DOR _{X2}	X	8420.211	
DOR _{X3}	X	8427.869	
DOR _{X4}	X	8443.186	

DOR Signale des VLBI Senders.



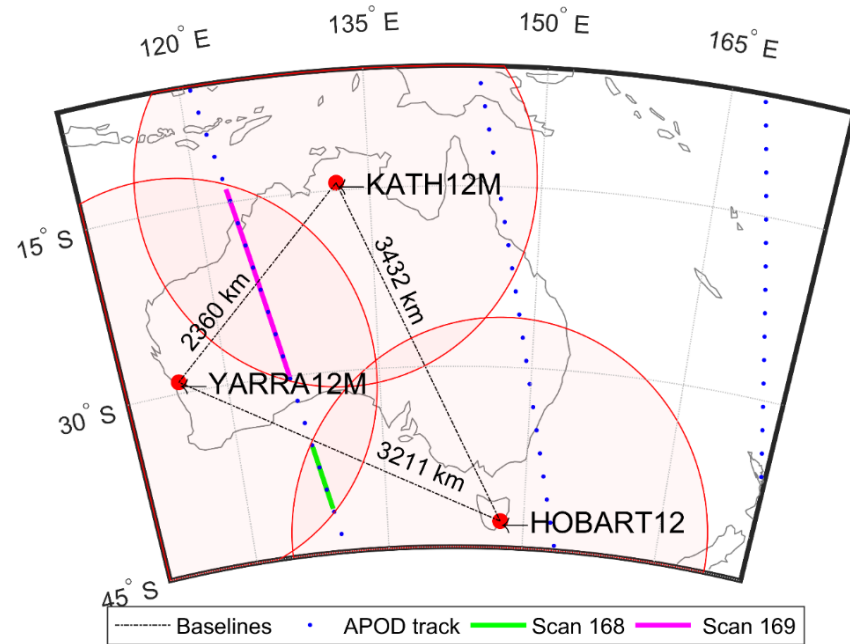
- **Drei idente Antennen**
- 12 m Reflektor
 - $5^\circ/\text{sec}$ (Azimut)
 - $1,5^\circ/\text{sec}$ (Elevation)
- **Spezieller Tracking-Modus für Satelliten** basierend auf Orbit-Stützstellen
 - Voraussetzung für Tracking von LEO Satelliten!
- Moderne S/X-Band Empfänger

APOD Experimente im November 2016

Date	Duration	Code	Stations	Targets
11.11.2016	33 min	316a	Ke, Yg	APOD + quasars
12.11.2016	41 min	317a	Hb, Ke	APOD + quasars
12.11.2016	35 min	317b	Hb, Ke, Yg	APOD + quasars
13.11.2016	26 min	318b	Hb, Ke, Yg	APOD + quasars
13.11.2016	26 min	318c	Hb, Ke	APOD + quasars
13.11.2016	23 min	318d	Ke, Yg	APOD + quasars
14.11.2016	40 min	319a	Hb, Ke, Yg	APOD + quasars
27.11.2016	24 h	a332	Hb, Ke, Yg	APOD + quasars

➔ APOD wurde zwischen 11. und 14. Nov. bei jeder Möglichkeit beobachtet

- Kontinent-weite Basislinien
- Sehr niedriger Satellitenorbit (LEO)
 - Eingeschränkte gemeinsame Sichtbarkeit
 - Nur „single-baseline“ Scans
 - 1 bis 3 Beobachtungen pro Tag möglich

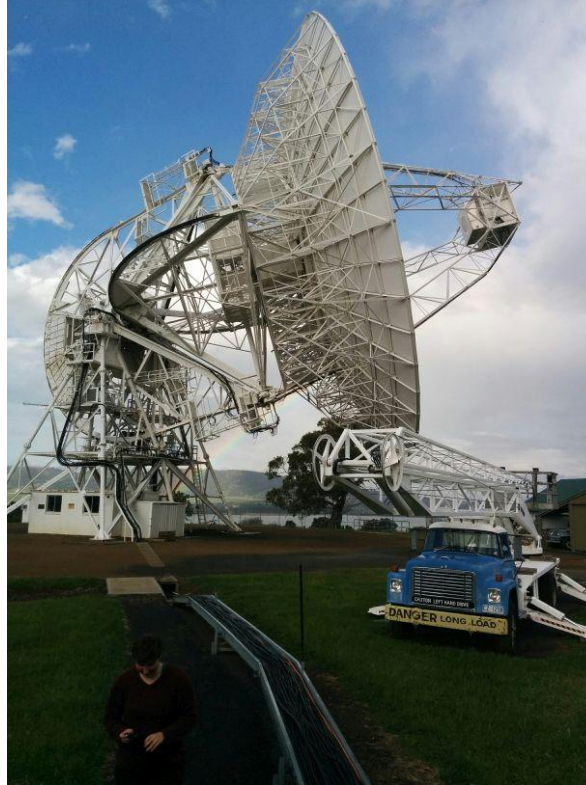


*Beobachtungsgeometrie in Session a332.
Die Sichtfelder der Antennen sind rot
markiert.*

Mount Pleasant Radio Observatory (Hobart, Tasmanien)



*12 m AuSope Radioantenne
(HOBART12).*



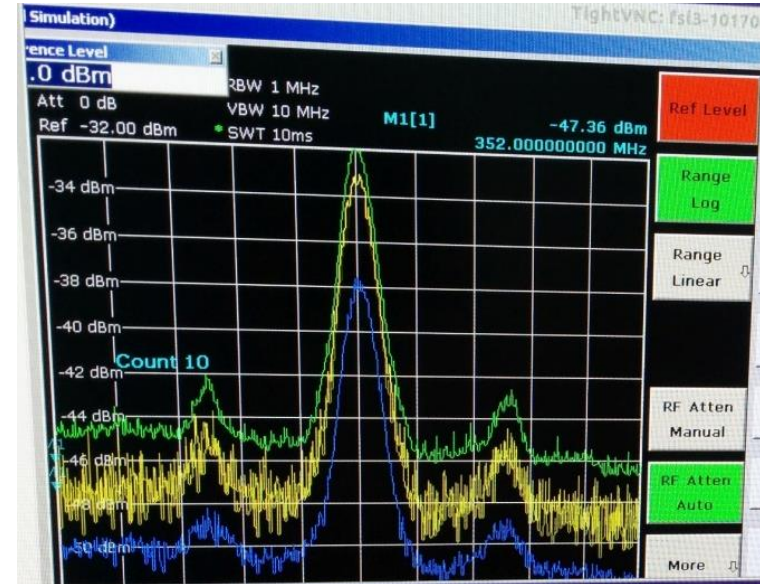
*Kontrollraum des Mt. Pleasant
Observatory mit Lucia und Jamie
McCallum (UTAS).*

*26 m Radioantenne
(HOBART26).*

Tracking



Kontrollrechner von HOBART26 im Satelliten-Tracking Modus.



Live APOD Signal, visualisiert mit Spektrum Analyzer am Empfänger

Auswertung der Beobachtungsdaten

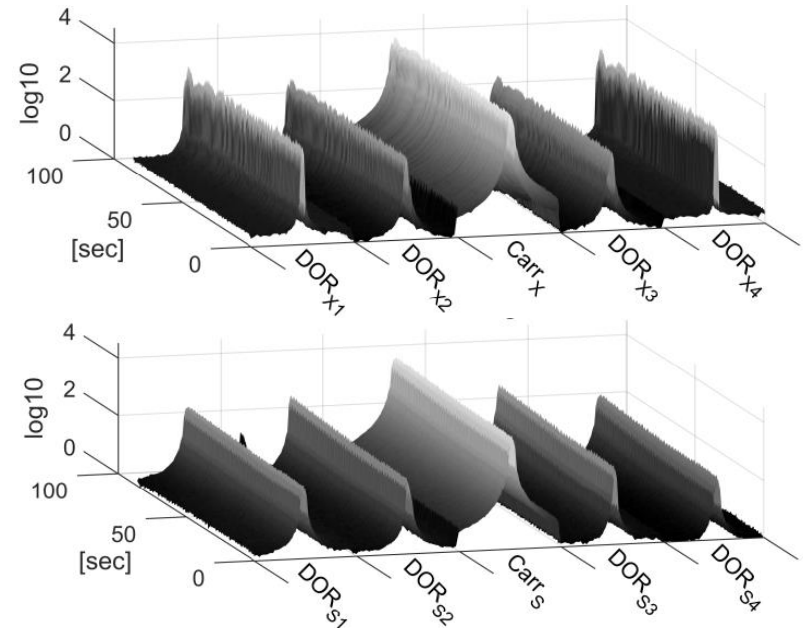
- **Korrelation am VSC3**

- Delays $\tau_{observed}$
 - für S- und X-Band



- **Analyse in VieVS**

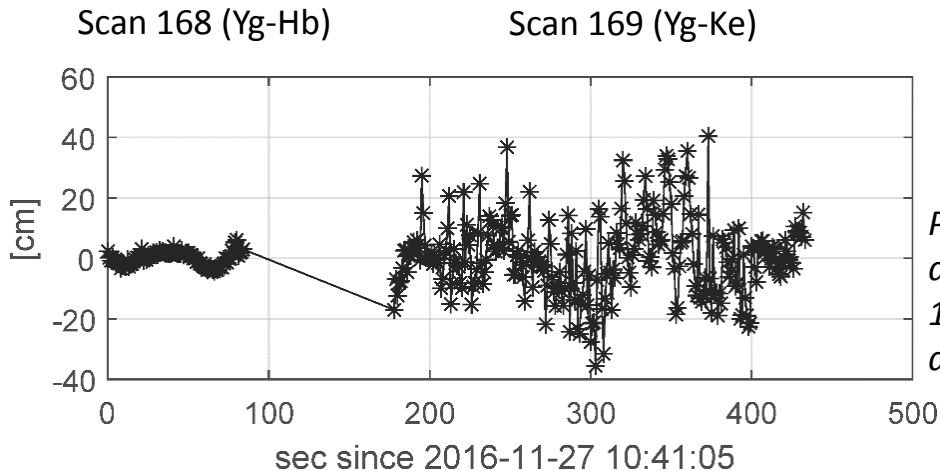
- Ionosphärenfreie
Linearkombination aus S- und X-
Band → $\tau_{obs_Ionfree}$
- Parameterschätzung



*Rekonstruierte Amplitudenspektren der APOD
S- und X-Band Signale an Station Yg (Scan
168 in Experiment a332).*

Parameterschätzung - Beispiel

- **Kleinste-Quadrate Ausgleich**
 - Basierend auf $\tau_{obs_Ionfree}$
 - Schätzung konstanter Offsets



*Post-fit Residuen
der Scans 168 und
169 (Experiment
a332).*

Parameter	Estimate	Formal error
Clock offset, Hb	14.0m	2.3m
Clock offset, Ke	-1.1m	1.9m
ZWD, Hb	3.4cm	1.7cm
ZWD, Ke	14.3cm	2.1cm
ZWD, Yg	7.3cm	1.7cm
Orbit, radial	1.2m	0.3m
Orbit, along-track	-7.8m	0.3m
Orbit, cross-track	-1.9m	1.3m

*Geschätzte Parameter aus den Scans 168 und
169 (Experiment a332).*

WRMS = 9.5 cm

- **Erstmalige Entwicklung einer kompletten Prozesskette für Satellitenbeobachtungen mit VLBI**
 - Scheduling → Beobachtung → Korrelation → Analyse
 - Grundlage für weitere Experimente, F&E, etc.
- **Fallstudie: Tracking des APOD Satelliten mit dem AuScope VLBI Array**
 - Prozesskette erfolgreich getestet
 - Erstmals Beobachtungsdaten für LEO-Satelliten generiert

Memorandum of Understanding zw. BEV und TU Wien im Juli 2018

 Federal Office
of Metrology and
Surveying



Partner:



Scheduling



*Vienna VLBI
Scheduling Center*

Beobachtungen

Korrelation

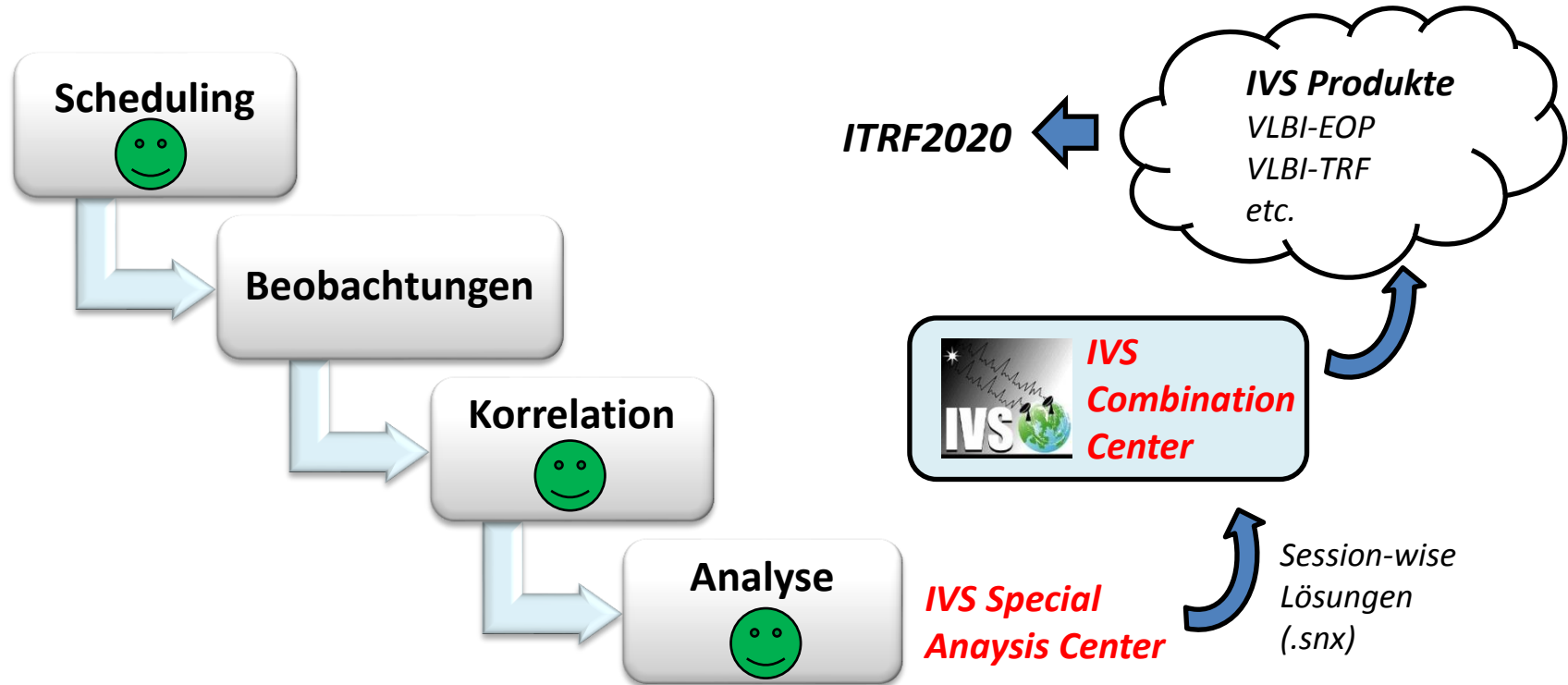


*IVS Correlation
Center*

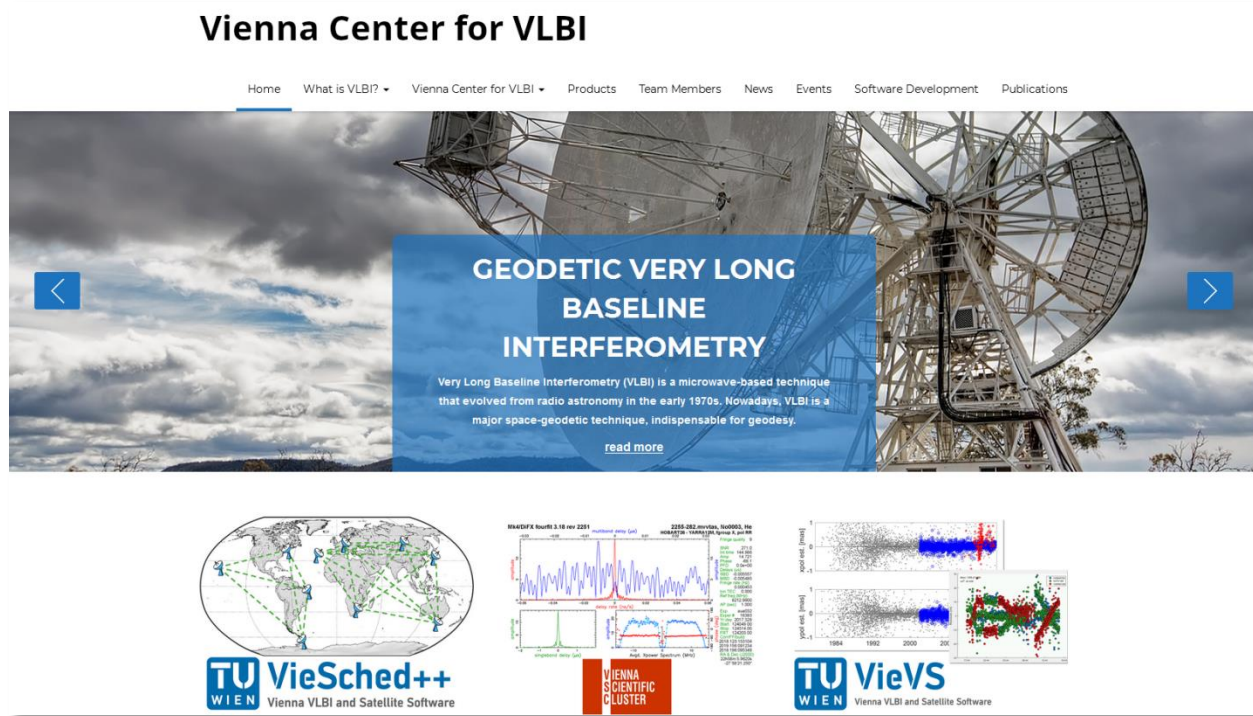
Analyse



*IVS Special
Analysis Center*



Vienna Center für VLBI - Webseite



Weite
Informationen
finden Sie unter
www.vlbi.at

Danke!

Kontakt: *andreas.hellerschmied@bev.gv.at*

Referenzen

- Anderson et al. (2017), Simulations of VLBI observations of a geodetic satellite providing co-location in space, *J Geod*, Vol 92, pp 1023-1046.
- Böhm et al. (2018), Vienna VLBI and Satellite Software (VieVS) for Geodesy and Astrometry, *PASP*, 130.
- Haas et al. (2014). The Wettzell-Onsala G130128 experiment – VLBI observations of a GLONASS satellite, *Proc. IVS General Meeting 2014*, pp 451-455.
- Hellerschmied et al. (2017), Scheduling of VLBI Observations to Satellites with VieVS, *Proc. IAG Symposia, REFAG 2014*, pp 59-64.
- Hellerschmied et al. (2018), Observing APOD with the AuScope VLBI array, *Sensors* 18, DOI 10.3390/s18051587
- Hobiger et al. (2018), VLBI goes satellite – benefits and restrictions, *EGU General Assembly 2018*, EGU2018-4954.
- Plank et al. (2014), Precise station positions from VLBI observations to satellites: a simulation study, *J Geod*, Vol 88, pp 659–673.
- Plank et al. (2016), Simulated VLBI satellite tracking of the GNSS constellation: Observing strategies, *Proc. IAG Scientific Assembly*, 2013, pp 85-90.
- Plank et al. (2017), VLBI observations to satellites of the GNSS: from scheduling to analysis, *J Geod*, Vol 91, pp 867-880.
- Sun et al. (2017), VLBI observations to the APOD satellite, *Advances in Space Research* Vol 61, pp 823-829.
- Tornatore et al. (2014), Direct observations of GNSS signals, *Proc IAG General Assembly*, 2011, *IAG Symposia series*, Vol. 6, pp 247-252.