

Untersuchung zur automatisierten Bestimmung des IVS-Referenzpunktes am TWIN Radioteleskop Wettzell

Michael LÖSLER, Torsten LOSSIN, Alexander NEIDHARDT und Rüdiger LEHMANN

1 Einleitung

Die Verknüpfung von geodätischen Raumtechniken wie GNSS (Global Navigation Satellite System), DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), SLR (Satellite Laser Ranging) oder VLBI (Very Long Baseline Interferometry) zur Ableitung eines Referenzrahmens wie dem ITRF gelingt erst durch sogenannte Kolokationsstationen (z. B. ALTAMIMI et al. 2011). Hierbei handelt es sich um Forschungseinrichtungen, an denen mindestens zwei der o. g. Raumtechniken betrieben werden, sodass diese Stationen eine besondere Rolle im Global Geodetic Observing System (GGOS) spielen (vgl. PLAG & PEARLMAN 2009). Die geometrischen Beziehungen zwischen den betriebenen Raumtechniken (engl. Local Tie) sind dabei aus präzisen lokalen Vermessungen abzuleiten. Durch die Genauigkeitsanforderung von unter 1 mm für den räumlichen Verbindungsvektor und 0,1 mm/a für dessen Variationen sind die messtechnischen Anforderungen sehr hoch (ROTHACHER et al. 2009). Aufgrund des zeitlichen und personellen Aufwands bei der Bestimmung der Referenzpunkte wurden Vermessungskampagnen bisher nur periodisch in jährlichen oder größeren Zyklen wiederholt (z. B. KLÜGEL et al. 2011, SARTI et al. 2013). Abrupte Veränderungen und saisonale Variationen können somit nur bedingt detektiert werden. Das GGOS regt daher folgerichtig eine automatisierte und permanente Überwachung der Referenzpunkte an (ROTHACHER et al. 2009).

Grundsätzlich ist zwischen dem elektronischen und dem geometrischen Referenzpunkt zu unterscheiden. Während der elektronische Referenzpunkt das Phasenzentrum des aufgezeichneten Signals beschreibt und z. B. in Abhängigkeit des Signaleintrittswinkels variiert, definiert der geometrische Referenzpunkt den ortsfesten Bezugspunkt der jeweiligen Raumtechnik. Raum-geodätische Beobachtungen sind daher durch geeignete Korrekturen auf den geometrischen Referenzpunkt zu reduzieren. Gegenüber anderen Raumtechniken stellt die Bestimmung der geometrischen Referenzpunkte von VLBI-Radioteleskopen eine große Herausforderung für die Metrologie dar, da diese Punkte i. Allg. unzugänglich und nicht direkt visierbar sind. Der Internationale VLBI Service für Geodäsie und Astrometrie (IVS) definiert den Referenzpunkt als Schnittpunkt zwischen der primären und der sekundären Achse. Schneiden sich beide Achsen konstruktionsbedingt nicht, so ist der Referenzpunkt als die senkrechte Projektion der Sekundärachse auf die Primärachse definiert (NOTHNAGEL 2009). Der so definierte Punkt ist somit unabhängig von der Orientierung des Radioteleskops und wird daher häufig auch als invarianter Punkt bezeichnet. Im Folgenden soll nur auf die Bestimmung des geometrischen Referenzpunktes eines Radioteleskops mit Azimut- und Elevationsachse eingegangen werden, da dieser Konstruktionstyp am häufigsten im bestehenden IVS-Netz vorkommt und auch neu entstehende VLBI2010-spezifizierte Radioteleskope (NIELL et al. 2006) häufig diesem Typ entsprechen. Ein besonderer Fokus

soll dabei auf der Automatisierung liegen. Im Gegensatz zu den bisherigen Untersuchungen von HAAS & BERGSTRAND (2010) bzw. LÖSLER et al. (2010), die zur Überwachung des Radioteleskops Reflektoren am starren Teil des Monuments befestigten, werden in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Reflektoren am drehbaren Teil des Radioteleskops einbezogen, da nur aus diesen der Referenzpunkt abgeleitet werden kann.

Der Schwerpunkt dieses Artikels fokussiert das in Kapitel 2 beschriebene Konzept zur automatisierten Bestimmung des IVS Referenzpunktes und definiert alle dafür notwendigen Komponenten. Erste erzielte Ergebnisse werden in Kapitel 3 kurz vorgestellt.

2 Konzept zur automatisierten Referenzpunktbestimmung

2.1 Allgemeines

Während bei einem konventionellen Monitoring quasi-stabile Punkte beobachtet werden, erfordert die automatisierte Bestimmung des Referenzpunktes das Beobachten von Punkten, deren Positionen sich in Abhängigkeit der Radioteleskoporientierung ändern. Kommerzielle Produkte können diesen Umstand meist nicht berücksichtigen, sodass das von LÖSLER et al. (2010) in Java erstellte HEIMDALL-System weiterentwickelt und an die speziellen Erfordernisse angepasst wurde. Das datenbankbasierte System setzt sich aus vier Kernkomponenten zusammen:

- Beobachtungsplan,
- Netzausgleichung,
- Referenzpunktbestimmung und
- Filterung.

Neben einem Tachymeter können eine Reihe weiterer Sensoren wie Neigungsmesser, meteorologische Sensoren oder Invardrahtmessungen zur Erfassung von Höhenvariationen bei Bedarf eingebunden werden. Die Kommunikation und Ansteuerung erfolgt i. d. R. über die serielle Schnittstelle RS-232. Sensordaten, die derzeit noch nicht direkt abgefragt werden, können nachträglich in die SQL-Datenbank importiert und über einen Zeitstempel referenziert werden.

2.2 Beobachtungsplan

Da die langfristige Zielsetzung die Bestimmung des Referenzpunktes während des regulären Beobachtungsbetriebes ist, wird die zeitliche Abfolge der terrestrischen Messungen durch einen VLBI-Beobachtungsplan vorgegeben. Dieser enthält für das spezifische VLBI-Experiment die jeweiligen Azimut- und Elevationswinkel der zu detektierenden Radioquellen mit einer zeitlichen Referenz. Durch den VLBI-Beobachtungsplan sind somit a priori die Zeitpunkte und die anzufahrenden Azimutwinkel α und Elevationswinkel ε des Radioteleskops bekannt. Folglich lassen sich die Positionen der Reflektoren am Radioteleskop $\mathbf{P}_{\text{Obs}}^i(\alpha, \varepsilon)$ in Abhängigkeit von α und ε näherungsweise für jeden Zeitpunkt bestimmen, wenn \mathbf{P}_{Obs} in einer Initialisierungsorientierung ($\alpha = \varepsilon = 0$) koordinatenmäßig vorliegen.

$$\mathbf{P}_{\text{Obs}}^i(\alpha, \varepsilon) = \mathbf{P}_{\text{RP}}^0 + \mathbf{R}_\alpha^z \mathbf{R}_\varepsilon^x (\mathbf{P}_{\text{Obs}}^i - \mathbf{P}_{\text{RP}}^0) = \mathbf{P}_{\text{RP}}^0 + \mathbf{R}_{\alpha, \varepsilon} (\mathbf{P}_{\text{Obs}}^i - \mathbf{P}_{\text{RP}}^0) \quad (1)$$

worin \mathbf{R} eine Rotationsmatrix ist, die eine Drehung um den im Subindex angegebenen Winkel um die in Supindex angegebene Achse beschreibt.

Die in Gleichung (1) benötigte Referenzpunktposition \mathbf{P}_{RP}^0 kann mit ausreichender Näherung aus Messungen der Elevationsachsenendpunkte abgeleitet werden (vgl. LOSSIN 2013). Neben der Position der angebrachten Reflektoren ändern sich auch deren Orientierungen \mathbf{n}_{Obs}^i in Abhängigkeit der Teleskopwinkel. Bei der Erstellung des Beobachtungsplans ist daher zu prüfen, ob ein Reflektor vom gewählten Standpunkt \mathbf{P}_{TS} aus überhaupt visierbar ist. Der zu berücksichtigende Einfallswinkel τ ergibt sich aus

$$\cos \tau^i = \frac{[\mathbf{P}_{TS} - \mathbf{P}_{Obs}^i(\alpha, \varepsilon)]^T \mathbf{R}_{\alpha, \varepsilon} \mathbf{n}_{Obs}^i}{|\mathbf{P}_{TS} - \mathbf{P}_{Obs}^i(\alpha, \varepsilon)| |\mathbf{n}_{Obs}^i|} \quad (2)$$

und ist mit dem spezifizierten Öffnungswinkel (z. B. $\pm 45^\circ$) des verwendeten Prismas zu vergleichen. Die Ableitung des Orientierungsvektors \mathbf{n}_{Obs} erfolgt zweckmäßigerweise zusammen mit der Bestimmung der Initialisierungsposition \mathbf{P}_{Obs} , indem temporär ein zweiter Reflektor zentrisch in Richtung der Reflektornormalen des fest installierten Reflektors gemessen wird (siehe Abb. 1).

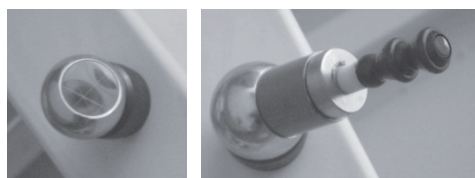


Abb. 1: Magnetisch befestigter 1,5"-Kugelreflektor (Silber, links); temporär vorgehaltener RFI-0,5"-Reflektor (Blau, rechts) zur Ableitung der Reflektornormalen \mathbf{n}_{Obs}

Durch die Verwendung von 360°-Reflektoren könnte prinzipiell der Arbeitsbereich vergrößert werden, jedoch haben Untersuchungen gezeigt, dass diese Reflektoren konstruktionsbedingt systematische Fehler von mehreren Millimetern verursachen (z. B. KRICKEL 2004). Aufgrund von Verdeckungen durch das Radioteleskop selbst garantiert auch der Einsatz von 360°-Reflektoren keine permanente Sichtbarkeit.

Auch der Einsatz von Standardglaskörperreflektoren führt zu systematischen Messabweichungen in Abhängigkeit des Einfallswinkels. Die radialen Abweichungen ergeben sich zu (z. B. RÜEGER 1990)

$$\xi_{radial} = d(n - \sqrt{n^2 - \sin^2 \tau}) - e(1 - \cos \tau) \quad (3)$$

worin e und d die Abstände zwischen der Glasfläche und dem Drehpunkt bzw. der Spitze des Tripelprismas sind und $n \approx 1,53$ das Verhältnis zwischen den Gruppenbrechungsindizes von Glas und Luft beschreibt. Des Weiteren verursacht ein schief ausgerichteter Reflektor laterale Abweichungen (vgl. RÜEGER 1990).

$$\xi_{lateral} = (d - e) \sin \tau - d \frac{1}{\cos \tau_G} \sin(\tau - \tau_G), \text{ mit } \tau_G = \arcsin \frac{\sin \tau}{n} \quad (4)$$

Nach Gleichung (3) bzw. (4) führt eine FehlAusrichtung eines Präzisionsreflektors GPH1P (Leica) von $\tau = 35^\circ$ zu einer optischen Verschiebung des Reflektorzentrums von $\xi_{radial} \approx 0.5$ mm und $\xi_{lateral} \approx 2$ mm (vgl. Abb. 2) und übersteigt somit die Messgenauigkeit gegenwärtiger Präzisionstachymeter und muss berücksichtigt werden. Diese Abweichungen wirken einseitig und lassen sich daher nicht durch spezielle Messanordnungen oder durch die automatische Zielerfassung (ATR) kompensieren. Modifizierte Reflektoren, die eine (halb-)automatische Ausrichtung ermöglichen, benötigen Strom und basieren z. T.

auf Funk (vgl. FANCHER et al. 2011, HORST & VON GÖSSELN 2013), sodass sie für einen Einsatz am Radioteleskopfachwerk nicht infrage kommen. Da der Einfallswinkel im Reflektor für die Ableitung des Beobachtungsplans vorliegt, schlagen LÖSLER et al. (2013a) eine rechnerische Korrektur der polaren Beobachtungen vor. Während die Strecke direkt mit ξ_{radial} zu korrigieren ist, wird $\xi_{lateral}$ mittels \mathbf{n}_{Obs} in eine horizontale und eine vertikale Komponente zerlegt und an der gemessenen Richtung bzw. Zenitwinkel angebracht.

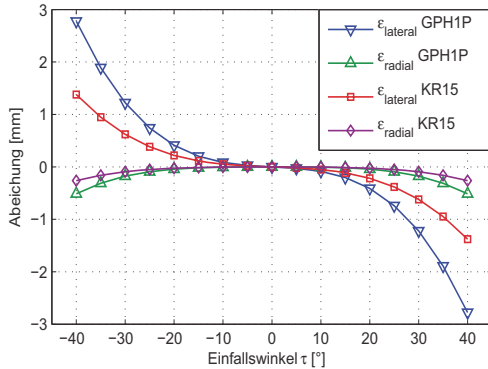


Abb. 2: Radiale und laterale Abweichungen infolge eines schief ausgerichteten Glaskörperreflektors GPH1P bzw. 1,5"-Kugelreflektor (KR15) nach Gleichung (3) bzw. Gleichung (4)

Die Näherungskoodinaten der sichtbaren Reflektoren und die Einfallswinkelkorrekturen werden zusammen mit einem Zeitstempel in der Datenbank gespeichert. Neben den messbaren Punkten am Radioteleskop werden die Koordinaten der Vermessungspfeiler in der Datenbank hinterlegt. Diese dienen zur Stabilitätskontrolle des Instrumentes und werden in vorgegebenen Intervallen beobachtet.

2.3 Netzausgleichung

Die erhobenen Daten einer Beobachtungskampagne bzw. -epoche werden zunächst mittels einer Netzausgleichung ausgewertet. In diesem Schritt werden die Beobachtungen der einzelnen Standpunkte miteinander verbunden und der Bezug zum lokalen Vermessungsnetz (Beobachtungssystem) hergestellt. Die Ausgleichung erfolgt im Gauß-Markov-Modell mit Bedingungen als freie Netzausgleichung (z. B. ILLNER 1985) mit dem Programm JAG3D¹, wobei die Lagerung des Netzes auf den örtlichen Vermessungspfeilern erfolgt; vgl. Abbildung (3).

Für die Verknüpfung der Standpunkte mit dem lokalen Vermessungsnetz liegen i. Allg. redundante Beobachtungen vor, sodass bereits im Rahmen der Netzausgleichung Fehlmessungen detektierbar sind und eine Prüfung des stochastischen Modells erfolgen kann. Im Gegensatz dazu sind Beobachtungen zu den Punkten am Radioteleskop unkontrolliert, sodass eine äquivalente Analyse erst bei der Referenzpunktbestimmung möglich wird (z. B. LÖSLER 2008). Lediglich ein Vergleich zwischen der gemessenen und der prädierten Position kann für das Aufdecken von Punktverwechslungen verwendet werden. Die Varianz-Kovarianz-Matrix, die zusammen mit den ausgeglichenen Teleskoppunktkoordinaten für die Referenzpunktbestimmung benötigt wird, hängt somit stark von den gewählten a priori Unsicherheiten ab.

¹ <http://derletztekick.com/software/netzausgleichung>

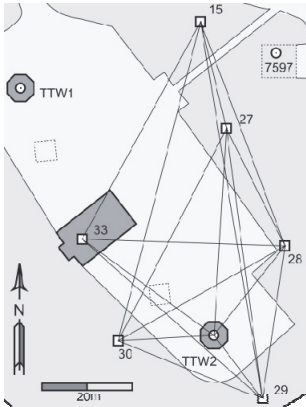


Abb. 3: Südlicher Teil des lokalen Vermessungsnetzes (Ausschnitt) am Geodätischen Observatorium Wettzell im Bereich des überwachten TWIN-Radioteleskops (TTW2) mit zulässigen Sichten. Datumsdefinition auf gegründeten Vermessungspfeilern (15, 27, 28, 29 und 30). Pfeiler 33 ist nicht gegründet und wurde daher nur als (freier) Standpunkt verwendet.

2.4 Referenzpunktbestimmung

Der Referenzpunkt eines Radioteleskops ist i. d. R. nicht materialisiert, sodass eine Bestimmung auf indirektem Wege erfolgen muss. Zwar existieren Radioteleskope, die durch bauliche Maßnahmen den Referenzpunkt materialisieren, jedoch setzt eine direkte Beobachtung eine bestimmte Teleskopstellung voraus. Ferner lassen sich aus diesen Messungen keine zusätzlichen Parameter wie bspw. der Achsenoffset ableiten.

Ein geometrisch anschauliches Modell zur Bestimmung des IVS-Referenzpunktes entsteht, wenn während der Rotation des Radioteleskops um eine Achse die andere fixiert ist. Wird ein Reflektor beobachtet, der sich am drehbaren Teil des Radioteleskops befindet, so beschreibt dessen Trajektorie einen räumlichen Kreis (z. B. ESCHELBACH & HAAS 2003). Der Kreismittelpunkt ist dabei ein Punkt der Rotationsachse, welche durch den Normalenvektor der Kreisebene eindeutig beschrieben ist. Die bisher fixierte Achse lässt sich auf dem gleichen Weg ableiten und der Referenzpunkt aus der o. g. Projektionsbedingung schätzen. Grundsätzlich kann die Parametrierung eines räumlichen Kreises auf verschiedenen Wegen erfolgen; etwa durch die Verschneidung einer Kugel mit einer Ebene (z. B. ESCHELBACH & HAAS 2003, SARTI et al. 2004). DAWSON et al. (2007) untersuchen den Einfluss zusätzlicher geometrischer Restriktionen in diesem Modell und zeigen, dass diese signifikante Auswirkungen auf das Ergebnis des ermittelten Referenzpunktes haben. Ein Nachteil der Kreisausgleichung ist, dass das Radioteleskop nur um eine der beiden Achsen verfahren werden kann, da sonst keine räumlichen Kreise entstehen. SARTI et al. (2004) setzen darüber hinaus die Referenzpunkthöhe mit denen der Elevationskreismittelpunkte gleich. Eine mögliche Schiefstellung der Achsen kann hierbei nur vernachlässigt werden, wenn eine symmetrische Beobachtungsstrategie gewählt wird. Eine permanente Überwachung der Referenzpunkte (vgl. ROTHACHER et al. 2009) ist daher während des regulären Stationsprozesses mit diesem Modell nicht möglich.

Ein alternatives Modell, bei dem die Azimutwinkel α und die Elevationswinkel ϵ als zusätzliche Beobachtungen mit einfließen, stellt LÖSLER (2009) vor.

$$\mathbf{P}_{\text{Obs}} = \mathbf{P}_{\text{RP}} + \mathbf{R}_{\theta}^x \mathbf{R}_{\phi}^y \mathbf{R}_{\alpha-0}^z \mathbf{R}_{\psi}^y (\mathbf{E}_{\text{cc}} + \mathbf{R}_{\epsilon-0}^x \mathbf{P}_{\text{Tel}}) \tag{5}$$

Hierbei ist der Achsenoffset mit \mathbf{E}_{cc} gegeben, eine mögliche Schiefstellung der Azimutachse gegenüber der z-Achse des Beobachtungssystems wird durch die Winkel θ und ϕ be-

rücksichtigt, und der Winkel ψ kompensiert die Nicht-Orthogonalität zwischen der Elevations- und Azimutachse. Gleichung (5) beschreibt somit die Transformation eines Punktes $\mathbf{P}_{\text{Tel}} = [b \ a \ 0]^T$ vom Teleskopkoordinatensystem ins Beobachtungskordinatensystem \mathbf{P}_{Obs} unter Berücksichtigung möglicher Imperfektionen beim Übergang. Die Verschiebung zwischen diesen beiden Koordinatensystemen ist letztlich der gesuchte Referenzpunkt \mathbf{P}_{RP} . Da \mathbf{P}_{Tel} zwar eine beliebige aber feste Position im Teleskopsystem hat, sind zwei zusätzliche Orientierungswinkel O_α und O_ε mitzuschätzen. Einen zu Gleichung (5) äquivalenten Ansatz schlagen KALLIO & POUTANEN (2012) vor, wobei sie die Rotationen nicht durch Eulerwinkel, sondern durch Richtungskosinusse parametrieren. Beiden Modellen ist gemein, dass durch die Berücksichtigung der Teleskopwinkel α und ε keine vordefinierten Teleskoppositionen notwendig sind und somit eine Bestimmung des Referenzpunktes während des regulären Stationsprozesses möglich wird (vgl. KALLIO & POUTANEN 2013, LÖSLER et al. 2013a).

Bei der Anwendung von Gleichung (5) wird davon ausgegangen, dass stabile Umgebungsverhältnisse vorliegen. Untersuchungen zum thermischen Verhalten von Radioteleskopen haben jedoch gezeigt, dass temperaturbedingt Höhenvariationen $z_{\text{P}_{\text{RP}}}(\Delta T)$ von mehreren Millimetern auftreten (z. B. ZERNECKE 1999, WRESNIK et al. 2007). LÖSLER et al. (2013b) evaluieren die Kompensation für die räumlich wirkende Ausdehnung jeder gemessenen Position $\mathbf{P}_{\text{Obs}}^i$ im Rahmen der Referenzpunktbestimmung und zeigen, dass die Güte der Kompensation bei der Berechnung validierbar ist. In Anlehnung an die IVS-Konventionen (NOTHNAGEL 2009) ergeben sich

$$z_{\text{P}_{\text{RP}}}(\Delta T_i) = z_{\text{P}_{\text{RP}}} + (\gamma_S h_S + \gamma_B h_B) \Delta T_i \quad (6)$$

$$a(\Delta T_i) = a(1 + \gamma_S \Delta T_i) \quad (7)$$

$$b(\Delta T_i) = b(1 + \gamma_S \Delta T_i) \quad (8)$$

worin γ_S und γ_B die Ausdehnungskoeffizienten von Stahl bzw. Beton beschreiben, h_S die Höhe des Referenzpunktes über dem Betonmonument und h_B die Höhe des Betonmonuments sind, und $\Delta T_i = T_i - T_0$ die Temperaturänderung in Bezug auf eine Referenztemperatur T_0 beschreibt.

Eingangsdaten für die Referenzpunktbestimmung sind die aus der Netzausgleichung stammenden ausgeglichenen Koordinaten $\mathbf{P}_{\text{Obs}}^i$, die zugehörigen Orientierungswinkel α^i und ε^i des Radioteleskops sowie die Varianz-Kovarianz-Matrix $\mathbf{C}_{11} = \text{diag}(\mathbf{C}_{xyz} \ \mathbf{C}_{\alpha\varepsilon})$. Da es sich bei Gleichung (5) um ein gemischtes Modell handelt, erfolgt die Bestimmung der unbekannt Parameter im Gauß-Helmert-Modell (z. B. LENZMANN & LENZMANN 2004).

2.5 Filterung

Lokale Vermessungen werden bisher nur periodisch in jährlichen oder größeren Abständen durchgeführt. Die dabei bestimmten Referenzpunkte werden jeweils als aktuell gültige Lösung vorgehalten. Durch den verringerten personellen Aufwand bei einer automatisierten Vermessung lassen sich die Zyklen zwischen den einzelnen Messkampagnen deutlich verkürzen, sodass mit jeder neuen Epoche die zusätzlichen Informationen aus den aktuellen Beobachtungen mit der Information der Parameter der vorangegangenen Epoche optimal kombiniert werden können.

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_m \end{pmatrix}; \mathbf{Q}_{xx} = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_{x_1x_1} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{x_2x_2} & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{x_mx_m} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Betrachtet man die Ergebnisse von m Epochen \mathbf{x}_j als unabhängige Realisierung eines Zufallsexperimentes (vgl. Gleichung (9)), so können Methoden der rekursiven Schätzung und Filterung angewendet werden. Wird als Bewegungsansatz Identität der Parameter angenommen, so ergibt sich die kombinierte Lösung hierbei zu (z. B. KNICKMEYER et al. 1996, CAROSIO 2000, NIEMEIER 2008)

$$\hat{\mathbf{x}}_j = \hat{\mathbf{x}}_{j-1} + \mathbf{K}_{j-1,j}(\mathbf{x}_j - \hat{\mathbf{x}}_{j-1}) \quad (10)$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_j\hat{\mathbf{x}}_j} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\hat{\mathbf{x}}_{j-1}} - \mathbf{K}_{j-1,j}\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\hat{\mathbf{x}}_{j-1}} \quad (11)$$

mit der sogenannten Gain-Matrix

$$\mathbf{K}_{j-1,j} = \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\hat{\mathbf{x}}_{j-1}} \left(\mathbf{Q}_{x_jx_j} + \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}_{j-1}\hat{\mathbf{x}}_{j-1}} \right)^{-1}. \quad (12)$$

Die Gleichungen (10) und (11) berücksichtigen nicht die zeitliche Entstehung der einzelnen miteinander kombinierten Lösungen. Um den Einfluss der jeweils aktuellen Epoche auf die gefilterte Lösung zu verstärken und um nicht modellierte Modellabweichungen zu kompensieren, kann ein zusätzliches Prozessrauschen $\mathbf{C}_{nn} = \text{diag}(\sigma_{x_{\text{PRP}}}^2, \sigma_{y_{\text{PRP}}}^2, \sigma_{z_{\text{PRP}}}^2)$ bei der Bildung des stochastischen Modells $\mathbf{Q}_{x_jx_j}^{\Delta t}$ in Gleichung (9) verwendet werden (vgl. LÖSLER et al. 2013a).

$$\mathbf{Q}_{x_jx_j}^{\Delta t} = \mathbf{Q}_{x_jx_j} + \mathbf{B}\mathbf{C}_{nn}\mathbf{B}^T \quad (13)$$

worin \mathbf{B} den Übergang des stochastischen Prozesses zwischen den Zeitpunkten $\Delta t = t_j - t_{j-1}$ der zu kombinierenden Epochen beschreibt (z. B. NIEMEIER 2008). Das vorgeschlagene Kalman-Filter ermöglicht es, alle zum gegenwärtigen Zeitpunkt verfügbaren geometrischen Informationen sowie deren Unsicherheitsbudget in die aktuelle Lösung einfließen zu lassen.

3 Erste Untersuchungsergebnisse

Die Forschungsgruppe Satellitengeodäsie (FESG) der Technischen Universität München betreibt in Kooperation mit dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) das Geodätische Observatorium Wettzell im Bayerischen Wald. Seit Anfang der 1980er-Jahre nimmt die Station mit dem 20 m Radioteleskop (RTW) an Beobachtungskampagnen im Rahmen des IVS teil (SCHLÜTER & BEHREND 2007) und gehört heute zu einer der am häufigsten messenden Stationen für geodätisches VLBI (NEIDHARDT et al. 2012). Neben VLBI existieren seit den frühen 1970er-Jahren SLR/LLR-Teleskope, mit denen Entfernungsmessungen zu Satelliten bzw. zum Mond durchgeführt werden. Als dritte Raumtechnik sind seit 1986 permanent installierte GNSS Antennen vorhanden. Eine ausführliche Chronik über die Entwicklungen der Fundamentalstation Wettzell geben HUGENTOBLE et al. (2011).

Im Rahmen des Aufbaus und der Erweiterung des sogenannten VLBI2010 Global Observing System (VGOS) Netzes werden in Wettzell die bisher weltweit einzigartigen und komplett VLBI2010 konformen TWIN-Radioteleskope in Betrieb genommen. Hierbei handelt es sich um zwei baugleiche 13,2 m Antennen (vgl. NEIDHARDT et al. 2011). An einem der beiden TWIN-Teleskope wurde im Frühjahr 2013 das Monitoringsystem HEIMDALL eingerichtet, um Erfahrungen für die automatisierte Vermessung von Radioteleskopreferenzpunkten zu bekommen und das o. g. Konzept zu validieren. Hierzu wurden 26 1,5"-Kugelreflektoren (vgl. Abb. 1) an der Azimutkabine und im Fachwerk des Paraboloids magnetisch befestigt und in verschiedenen Epochen mit einer Leica Totalstation TS30 überwacht. Zeitweise wurde mit einer TCA2003 (Leica) parallel gemessen. Meteorologische Daten wurden durch Sensoren vom Typ MSR145 im Außen- und Innenbereich registriert und dienen zur Korrektur der elektro-optischen Distanzmessung (EDM) bzw. zur Kompensation der thermischen Verformungen des Radioteleskops vgl. Gleichung (6)-(8). In dieser ersten Testphase wurden keine realen VLBI-Beobachtungspläne, sondern Kalibrationsfahrten mit beliebigen aber vordefinierten Positionen genutzt, bei denen besonders viele Beobachtungen auf die verwendeten Standpunkte abfielen. Diese Abarbeitung wurde bereits im neuen, fernsteuerbaren Kontrollsystem e-RemoteCtrl² für die TWIN-Teleskope integriert und über das NASA Field System, welches als Standard zur Steuerung der IVS-Radioteleskope genutzt wird, umgesetzt (vgl. ETTL et al. 2012). Die Dauer eines Messexperimentes betrug in Abhängigkeit der Anzahl der besetzten Pfeiler ca. 7 – 14 h und enthielt durchschnittlich 75 Teleskopstellungen. Eine ausführliche Beschreibung der durchgeführten Messungen sowie der untersuchten Konfigurationen ist LOSSIN (2013) zu entnehmen.

In den Tabellen 1-3 sind die Ergebnisse der Einzelauswertungen für den Referenzpunkt und das Exzentrum in Relation zur finalen Filterlösung sowie die Anzahl der im Experiment besetzten Pfeiler (Standpunkte) zusammengefasst. Abbildung 4 zeigt die aus den Einzelexperimenten stammenden Koordinatendifferenzen sowie die gefilterte Lösung für den Referenzpunkt. Aus Übersichtsgründen wurde auf die Messung von 2012 bei der Darstellung in Abbildung 4 (rechts) verzichtet. Gut zu erkennen ist, dass Konfigurationen mit mehreren Standpunkten weniger streuen und geringere Abweichungen erzeugen als Kampagnen, die nur von einem Standpunkt aus beobachtet wurden. Zum einen treten bei Kampagnen mit mehreren Standpunkten keine konfigurationsbedingten Extrapolationen für den Referenzpunkt auf, und zum anderen wird bei einer symmetrischen Verteilung der Standpunkte ein mögliches Achstaumeln des Radioteleskops kompensiert, sodass diese Konfiguration grundsätzlich vorzuziehen ist. Auf der anderen Seite ist der personelle Einsatz bei Kampagnen, die lediglich von einem Standpunkt aus durchgeführt wurden, am geringsten und aus wirtschaftlicher Sicht zu favorisieren. Das in Kapitel 2.5 vorgeschlagene Filter erlaubt die Kombination von allen Einzelexperimenten. Insbesondere auch jenen die für sich genommen die Genauigkeitsanforderungen nicht erfüllen, aber durch die Kombination plausible Resultate liefern. Bei den Lagekomponenten ist bei den Juni/Juli-Kampagnen eine Änderung in der gefilterten Lösung von $< 0,2$ mm zu erkennen, die sich auch in den Einzellösungen zeigt. Diese Variation ist auf geringfügige Abweichungen beim Wiedereinrichten des Versuchsaufbaus zurückzuführen, was auch erklärt, warum alle Ergebnisse im benannten Zeitraum diese Tendenz aufweisen. Ferner sind in den Höhenkomponenten noch Variationen zu erkennen, die vorrangig auf eine noch unzureichende Kompensation der temperaturbedingten Höhenänderungen schließen lässt.

² <http://www.econtrol-software.de>

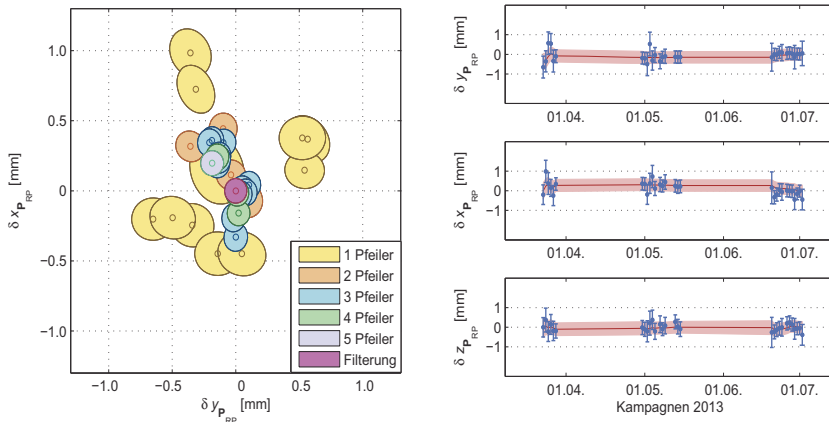


Abb. 4: Einzellösung mit 99%-Konfidenzellipsen (Maßstab: 10:1) für Einzellösung und Filterlösung reduziert auf finale Filterlösung (links); Zeitlicher Verlauf der Variationen der ermittelten Referenzpunktkoordinaten mit 1σ -Unsicherheitsbalken und gefilterte Lösung mit 1σ -Unsicherheitsband (rechts).

Tabelle 1: Referenzpunkt- und Exzentrumsvariationen [mm] im März/April 2013

	31.05. ³	22.03.	23. 03.	24.03.	25.03.	26. 03.	27.03.	30.04.
Pfeiler	5 (13 ⁴)	1	1	1	1	1	3	3
$\delta y_{P_{RP}}$	-0,19	-0,65	-0,36	0,57	0,54	-0,34	-0,10	-0,19
$\delta x_{P_{RP}}$	0,20	-0,20	0,98	0,37	0,15	-0,25	0,34	0,36
$\delta z_{P_{RP}}$	0,11	0,00	0,37	-0,22	0,14	-0,19	-0,19	0,02
E_{cc}	-0,01	0,12	0,00	0,01	-0,04	0,02	-0,16	-0,02

Tabelle 2: Referenzpunkt- und Exzentrumsvariationen [mm] im Mai 2013

	01.05.	02.05	03.05.	04.05.	05.05.	07.05.	08.05.	09.05.	13.05.	14.05.	15.05.
Pfeiler	3	1	1	1	2	2	4	2	3	3	3
$\delta y_{P_{RP}}$	-0,21	-0,50	0,52	-0,31	-0,04	-0,36	-0,15	-0,10	-0,13	-0,14	-0,13
$\delta x_{P_{RP}}$	0,34	-0,19	0,38	0,72	0,11	0,32	0,24	0,44	0,25	0,19	0,22
$\delta z_{P_{RP}}$	-0,11	-0,21	0,21	0,38	-0,21	0,15	-0,10	-0,08	0,27	0,03	0,10
E_{cc}	-0,03	0,09	0,01	0,07	-0,07	-0,03	-0,06	-0,12	0,03	0,03	-0,02

Tabelle 3: Referenzpunkt- und Exzentrumsvariationen [mm] im Juni/Juli 2013

	20.06.	21.06.	22.06.	23.06.	24.06.	26.06.	27.06.	28.06.	29.06.	30.06.	01.07.	02.07.
Pfeiler	1	3	3	3	2 (1 ⁴)	3 (2 ⁴)	3 (3 ⁴)	3 (3 ⁴)	1 (1 ⁴)	4	4	1
$\delta y_{P_{RP}}$	-0,15	0,00	0,02	0,10	0,09	0,05	0,08	0,04	-0,02	-0,02	0,01	-0,05
$\delta x_{P_{RP}}$	-0,15	-0,33	-0,19	0,04	-0,06	0,01	-0,01	-0,02	-0,16	-0,16	-0,02	-0,45
$\delta z_{P_{RP}}$	-0,26	-0,24	-0,12	0,05	0,00	0,20	0,24	0,13	-0,07	-0,07	-0,05	-0,39
E_{cc}	0,10	0,01	0,05	0,03	0,15	0,09	0,09	0,04	0,07	0,07	-0,04	-0,12

³ Resultate vom 31.05.2012 aus manuell durchgeführter Messung (LÖSLER et al. 2013b).

⁴ Zusätzliche freie Standpunkte für Parallelmessung mit zweitem Tachymeter.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das GGOS regt eine automatisierte und permanente Überwachung der Referenzpunkte an Kolokationsstationen (Core Stations) an, um ein Höchstmaß an Zuverlässigkeit für die Verbindungsvektoren zu erreichen. In diesem Beitrag wurde ein Vermessungs- und Auswertekonzept vorgestellt, das diese Anforderung erfüllt. Seit dem Frühjahr 2013 wird am Geodätischen Observatorium Wettzell dieses Konzept in einer ersten Langzeitstudie betrieben, bei der der IVS-Referenzpunkt und zusätzliche Parameter von einem der VLBI2010-konformen TWIN-Radioteleskope automatisiert bestimmt werden. Die vorgeschlagene Kalman-Filterung ermöglicht es, alle zum Zeitpunkt der Berechnung verfügbaren Informationen in die gegenwärtige Lösung mit einfließen zu lassen. Die Filterung erlaubt darüber hinaus auch das Kombinieren von Einzellösungen, die für sich betrachtet den Genauigkeitsanforderungen nicht genügen würden, in der Summe aber plausible und zuverlässige Resultate liefern. Bei Bedarf kann das Filter noch erweitert werden, um bspw. saisonale Effekte besser abzubilden. Derartige Modifikationen erfordern jedoch Beobachtungen aus einer längeren Zeitreihe und sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht möglich. Die angestrebte Genauigkeit von 1 mm wird durch das vorgeschlagene Konzept erreicht (vgl. Abb. 4). Insgesamt können für das untersuchte TWIN-Radioteleskop in einem Zeitraum von über einem Jahr keine signifikanten Änderungen des Referenzpunktes festgestellt werden.

Zukünftige Entwicklungen sehen eine Erweiterung des Konzeptes auf andere Raumtechniken vor, sodass der vollständige Local Tie im Ergebnis vorliegt. Weiterhin ist eine Integration des Konzeptes in das Projekt zum Monitoring und Bewerten von Sicherheits- und Systemparametern (SysMon) vorgesehen (vgl. Ettl et al. 2010).

Danksagung

Für die Bereitstellung von Messequipment und Sensoren möchten wir uns bei Frau Prof. Cornelia Eschelbach (FH Frankfurt) ganz herzlich bedanken. Weiterhin sei Frau Kerstin Schnabel (BKG G3) für die Bereitstellung der Totalstation TS30 (Leica) gedankt.

Literatur

- ALTAMIMI, Z., COLLILIEUX, X. & MÉTIVIER, L. (2011): ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. In: *J Geod*, 85, S. 457-473.
- CAROSIO, A. (2000): Optimale Beschreibung dynamischer Systeme mittels Kalman-Filter. XIII. Internat. Kurs für Ingenieurvermessung, Kursunterlagen. 13.-17. März 2000, Technische Universität München.
- DAWSON, J., SARTI, P., JOHNSTON, G. & VITTUARI, L. (2007): Indirect approach to invariant point determination for SLR and VLBI systems: an assessment. In: *J Geod*, 81, S. 433-441.
- ESCHELBACH, C. & HAAS, R. (2003): The IVS-Reference Point at Onsala – High End Solution for a real 3D-Determination. In: SCHWEGMANN, W. & THORANDT, V. (Eds.): Proceedings of the 16th Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy, S. 109-118.

- ETTL, M., NEIDHARDT, A., PLÖTZ, C., MÜHLBAUER, M., DASSING, R., HASE, H., BEAUDOIN, C. & HIMWICH, E. (2010): SysMon – a robust and flexible remote monitoring system for VLBI and more. Proceedings of Science – 10th European VLBI Network Symposium and EVN Users Meeting: VLBI and the new generation of radio arrays, 25, Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati, S. 1-6.
- ETTL, M., NEIDHARDT, A., SCHÖNBERGER, M., ALEF, W., HIMWICH, E., BEAUDOIN, C., PLÖTZ, C., LOVELL, J. & HASE, H. (2012): e-RemoteCtrl: Concepts for VLBI Station Control as Part of NEXPREs. In: BEHREND, D. & BAVER, K. D. (Eds.): Launching the Next-Generation IVS Network, IVS 2012 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2012-217504, S. 128-132.
- HAAS, R. & BERGSTRAND, S. (2010): COLD MAGICS – Continuous Local Deformation Monitoring of an Arctic Geodetic Fundamental Station. In: BEHREND, D. & BAVER, K. D. (Eds.): VLBI2010: From Vision to Reality, IVS 2010 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2010-215864, S. 118-122.
- HORST, S. & VON GÖSSELN, I. (2013): Active Prism for Total Station Measurements. In: *avn*, 4/2013, S. 129-136.
- HUGENTOBLER, U., NEIDHARDT, A., LAUBER, P., ETTL, M., SCHREIBER, K.U., DASSING, R., KLÜGEL, T., RIEPL, S., HEROLD, G., KRONSNABL, G., PLÖTZ, C. & HESSELS, U. (2011): The Geodetic Observatory Wettzell – a fundamental reference point. In: CARENA, S. et al. (Eds.): Proceedings of Fragile Earth International Conference, GSA Field Guides, Geological Society of America (GSA), 22, S. 1-6.
- ILLNER, I. (1985): Datumsfestlegung in freien Netzen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, 309. München.
- KALLIO, U. & POUTANEN, M. (2012): Can We Really Promise a mm-Accuracy for the Local Ties on a Geo-VLBI Antenna. In: KENYON, S. et al. (Eds.): Geodesy for Planet Earth. International Association of Geodesy Symposia, Springer, Berlin/Heidelberg, S. 35-42.
- KALLIO, U. & POUTANEN, M. (2013): Local Ties at Fundamental Stations. In: ALTAMIMI, Z. & COLLILIEUX, X. (Eds.): Reference Frames for Applications in Geosciences, Springer, Berlin/Heidelberg, S. 147-152.
- KNICKMEYER, E. T., KNICKMEYER, E. H. & NITSCHKE, M. (1996): Zur Auswertung kinematischer Messungen mit dem Kalman-Filter. Schriftenreihe des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW), 22. Stuttgart, S. 141-166.
- FANCHER, K. L., BREIDENBACH, S. & GEOGHEGAN, C. (2012): Local Tie Information Report – IERS Network Site: Brewster, WA.
- KLÜGEL, T., MÄHLER, S. & SCHADE, C. (2011): Ground Survey and Local Ties at the Geodetic Observatory Wettzell. In: 17th Workshop on Laser Ranging, Bad Kötzing.
- KRICKEL, B. (2004): Leistungskriterien zur Qualitätskontrolle von Robottachymetern. Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, 92. Bonn.
- LENZMANN, L. & LENZMANN, E. (2004): Strenge Auswertung des nichtlinearen Gauß-Helmert-Modells. In: *avn*, 2/2004, S. 68-73.
- LÖSLER, M. (2008): Reference point determination with a new mathematical model at the 20 m VLBI radio telescope in Wettzell. In: *J Appl Geod*, 2, S. 233-238.
- LÖSLER, M. (2009): New Mathematical Model for Reference Point Determination of an Azimuth-Elevation Type Radio Telescope. In: *J Surv Eng*, 135, S. 131-135.
- LÖSLER, M., ESCHELBACH, C., SCHENK, A. & NEIDHARDT, A. (2010): Permanent Überwachung des 20m VLBI-Radioteleskops an der Fundamentalstation in Wettzell. In: *zfv*, 1/2010, S. 40-48.

- LÖSLER, M., HAAS, R. & ESCHELBACH, C. (2013A): Automated and Continual Determination of Radio Telescope Reference Points with Sub-mm Accuracy – Results from a campaign at the Onsala Space Observatory. In: *J Geod*, 87, S. 791-804.
- LÖSLER, M., NEIDHARDT, A. & MÄHLER, S. (2013B): Impact of Different Observation Strategies on Reference Point Determination – Evaluations from a Campaign at the Geodetic Observatory Wettzell. In: ZUBKO N. & POUTANEN, M. (Eds.): Proceedings of the 21th Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy, S. 255-259.
- LOSSIN, T. (2013): Untersuchungen zur Automatisierung von kontinuierlichen Bestimmungen des IVS – Referenzpunkts am TWIN Radioteleskop Wettzell. Masterarbeit, HTW Dresden/TU München (unveröffentlicht).
- NEIDHARDT, A., KRONSNABL, G., KLÜGEL, T., HASE, H., PAUSCH, K. & GÖLDI, W. (2011): VLBI2010 – Current status of the TWIN radio telescope project at Wettzell, Germany. In: ALEF, W. et al. (Eds.): Proceedings of the 20th Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy, S. 67-70.
- NEIDHARDT, A., KRONSNABL, G., SCHATZ, R. (2012): Geodetic Observatory Wettzell: 20-m radio telescope and twin telescope. In: BEHREND, D. & BAVER, K. D. (Eds.): IVS 2011 Annual Report, NASA/TP-2011-215880, S. 113-116.
- NIELL, A., WHITNEY, A., PETRACHENKO, B., SCHLÜTER, W., VANDENBERG, N., HASE, H., KOYAMA, Y., MA, C., SCHUH, H. & TUCCARI, G. (2006): VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. In: BEHREND, D. & BAVER, K. D. (Eds.): IVS Annual Report 2005, NASA/TP-2006-214136, S. 13-40.
- NIEMEIER, W. (2008): Ausgleichsrechnung: Statistische Auswertemethoden. 2. Auflage. W. de Gruyter, Berlin/New York.
- NOTHNAGEL, A. (2009): Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astrometric VLBI. In: *J. Geod*, 83, S. 787-792.
- RÜEGER, J.M. (1990): Electronic Distance Measurement – An Introduction. 3. Auflage. Springer, Heidelberg/Berlin.
- SARTI, P., SILLARD, P. & VITTUARI, L. (2004): Surveying co-located space-geodetic instruments for ITRF computation. In: *J Geod*, 78, S. 210-222.
- SARTI, S., ABBONDANZA, C., LEGRAND, J., BRUYNINX, C., VITTUARI, L. & RAY, J. (2013): Intrasite motions and monument instabilities at Medicina ITRF co-location site. In: *Geophys. J. Int.*, 192, S. 1-10.
- PLAG, H.-P. & PEARLMAN, M. (Eds.) (2009): The Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020, Springer, Heidelberg/Berlin.
- ROTHACHER M., BEUTLER G., BEHREND D., DONNELLAN A., HINDERER J., MA C., NOLL C., OBERST J., PEARLMAN M., PLAG H.-P., RICHTER B., SCHÖNE T., TAVERNIER G. & WOODWORTH P.L. (2009): The future Global Geodetic Observing System. In: PLAG, H.-P. & PEARLMAN M. (Eds.): The Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. Springer, Heidelberg/Berlin, S. 237-272.
- SCHLÜTER, W. & BEHREND, D. (2007): The International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS): Current capabilities and future prospects. In: *J Geod*, 81, S. 379-387.
- WRESNIK, J., HAAS, R., BÖHM, J. & SCHUH, H. (2007): Modeling thermal deformation of VLBI antennas with a new temperature model. In: *J Geod*, 81, S. 423-431.
- ZERNECKE, R. (1999): Seasonal variations in height demonstrated at the radio telescope reference point. In: SCHLÜTER, W. & HASE, H. (Eds.): Proceedings of the 13th Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy, S. 15-18.