

# Hochpräzise Bestimmung des Achsenschnittpunktes eines 20m VLBI-Radioteleskops mit einem (geneigten) Lasertracker

*Michael Lösler, Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe (TH)*

## Zusammenfassung

Das International Terrestrial Reference Frame (ITRF) wird aus Beobachtungen von verschiedenen Raumverfahren wie bspw. VLBI (Very Long Baseline Interferometry), DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), GNSS (Global Navigation Satellite System) oder SLR/LLR (Satellite/Lunar Laser Ranging) abgeleitet [Altamimi et al., 2007]. Um die Ergebnisse dieser verschiedenen Messsysteme, die auf Monumenten unterschiedlicher Bauweise installiert sind, miteinander verknüpfen zu können, muss die Lage und Orientierung dieser Messsysteme zueinander bekannt sein. Die Bestimmung der Verbindungsvektoren (local-ties) zwischen den Raumverfahren erfolgt an sogenannten Kollokationsstationen, an denen verschiedene Raumverfahren betrieben werden. Für die hierzu notwendigen Referenzpunkte wird eine Genauigkeit von deutlich unter einem Millimeter gefordert, was somit höchste Anforderungen an die moderne Messtechnik stellt [Niel et al., 2004]. Zukünftig sind messtechnische Verfahren und Auswertestrategien zu evaluieren, die eine permanente Ableitung des Verbindungsvektors im Zehntelmillimeterbereich zu lassen [Plag und Pearlman, 2008]. An der Fundamentalstation in Onsala (Schweden) wurde im Herbst 2008 eine Messkampagne mit einem modernen Lasertracker durchgeführt, bei der der Verbindungsvektor zwischen dem VLBI-Radioteleskop und dem GNSS-Monument bestimmt wurde.

## Einleitung

Die Fundamentalstation in Onsala, Abbildung 1, ist eine schwedische Forschungseinrichtung, die zusammen mit der Technischen Universität Chalmers, Göteborg (Schweden), betrieben wird. Im Herbst 2008 wurde an dieser Station eine Messkampagne mit dem Ziel, den Verbindungsvektor (local-tie) zwischen dem Referenzpunkt des GNSS-Monuments (IGS-Referenzrahmen) und dem des 20m VLBI-Radioteleskops (IVS-Referenzrahmen) mit einem Lasertracker LTD840 (Leica) zu bestimmen, durchgeführt. Während der IGS-Referenzpunkt in Onsala durch einen Bolzen vermarktet ist und somit verhältnismäßig einfach durch antastendes Messen direkt bestimmt werden kann, ist die Ableitung des VLBI-Referenzpunktes nicht trivial, da dieser Punkt weder zugänglich noch materialisierbar ist. Der Referenzpunkt eines Azimut-Elevation-Radioteleskops ist als Schnittpunkt zwischen der Azimut- und der Elevationsachse definiert. Schneiden sich diese beiden Achsen nicht, so ist der Punkt auf der Azimutachse als Referenzpunkt definiert, der den minimalen Abstand zur Elevationsachse besitzt (Abbildung 2). Der so definierte Punkt ist unabhängig von der Orientierung des Radioteleskops und wird daher häufig auch als invariant bezeichnet. Da dieser Punkt im Inneren der Teleskopstruktur liegt, kann dieser nur aus indirekten Beobachtungen berechnet werden. Ein mögliches Verfahren zur Referenzpunktbestimmung ist die Ableitung aus räumlichen Kreisen z.B. [Haas und Eschelbach, 2003], [Leinen et al., 2007] oder [Lösler und Eschelbach, 2009]. Am drehbaren Teil des Radioteleskops werden hierzu Zielmarken befestigt, die in unterschiedlichen Teleskoporientierungen beobachtet werden. Wird das Radioteleskop dabei stets nur um eine Achse gedreht, so bilden die Trajektorien der angebrachten Zielmarken Kreise um die jeweilige Rotationsachse, wobei die Mittelpunkte der Regressionskreise gleichzeitig Punkte der Drehachse sind. Werden mehrere Zielmarken in verschiedenen Teleskoporientierungen beobachtet, lassen sich

die Teleskopachsen bestimmen und der gesuchte Referenzpunkt ableiten. Die von Niel et al. (2004) in der Agenda VLBI2010 geforderte Genauigkeit des Referenzpunktes von unter 1mm wird bei dieser Vorgehensweise zuverlässig erreicht [Dawson et al., 2006]. Nachteilig ist jedoch, dass es ein definiertes Verdrehen des Teleskops erfordert und somit für eine permanente Bestimmung, wie es das Global Geodetic Observing System (GGOS) anregt, ungeeignet ist. Am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe wurde im Rahmen eines DFG geförderten Projektes ein neues Auswertemodell zur IVS-Referenzpunktbestimmung aufgestellt, welches mit beliebigen Teleskoporientierungen arbeitet und somit den zukünftigen Anforderungen des GGOS gerecht wird. Im Zuge der Vermessungskampagne am Raumobservatorium Onsala sollte der neue Algorithmus und die generelle Eignung eines Lasertrackers verifiziert werden.

## Modellbeschreibung

Die Koordinaten des IVS-Referenzpunktes  $\mathbf{P}_R$  werden beim entwickelten Auswertemodell aus den geometrischen Beziehungen zweier Koordinatensysteme abgeleitet – dem Teleskopkoordinatensystem und einem frei wählbaren Beobachtungssystem. Als Beobachtungssystem kommt das i.d.R. vorhandene lokale Vermessungsnetz an der Station in Frage, welches aus fest vermarkten Punkten und stabilen Vermessungspfeiler besteht. Das Teleskopkoordinatensystem leitet sich aus der Konstruktion eines idealen Radioteleskops ab. Die Elevationsachse entspricht der  $x_{Tel}$ -Achse und die Azimutachse der  $z_{Tel}$ -Achse. Die  $y_{Tel}$ -Achse steht jeweils senkrecht auf den beiden anderen. Der Koordinatenursprung dieses Systems ist der Referenzpunkt selbst. Fertigungsbedingt und zum Teil auch geplant weichen reale Konstruktionen von dieser Definition ab. So darf zum einen nicht von einem exakten Schnittpunkt zwischen der Elevations- und Azimutachse und zum anderen von orthogonal aufeinander stehenden Teleskopachsen ausgegangen werden. Ein mögliches Offset  $\mathbf{Ecc} = [0 \ e \ 0]^T$  sowie ein Korrekturwinkel  $\gamma$  ist daher im Modell zu berücksichtigen. Weiterhin steht die Azimutachse nicht parallel zur lokalen  $z_{Obs}$ -Achse des Beobachtungssystems. Diese Neigung kann durch zwei Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  kompensiert werden.

$$\mathbf{P}_{Obs} = \mathbf{P}_R + \mathbf{R}_x(\beta) \cdot \mathbf{R}_y(\alpha) \cdot \mathbf{R}_z(A + O_A) \cdot \mathbf{R}_y(\gamma) \cdot (\mathbf{Ecc} + \mathbf{R}_x(E + O_E) \cdot \mathbf{P}_{Tel}) \quad (1)$$

Gleichung (1) beschreibt in Abhängigkeit der beiden Teleskoporientierungswinkel A und E und unter Berücksichtigung der aufgezählten Restriktionen den Koordinatenübergang eines Punktes  $\mathbf{P}_{Tel}$  ins Beobachtungssystem  $\mathbf{P}_{Obs}$ . Das Lösen von Gleichung (1) gelingt mithilfe einer Ausgleichsrechnung – formuliert als strenges Gauß-Helmert-Modell [Ghilani und Wolf, 2006]. Durch Kombination mit dem robusten Levenberg-Marquardt-Algorithmus ist eine schnelle und zuverlässige Parameterbestimmung möglich, die auch bei schlecht gewählten Näherungswerten zuverlässig konvergiert. Eine ausführliche Modellbeschreibung und -herleitung ist in Lösler (2009a) zu finden.

## Vermessungskampagne

Das 20m VLBI-Radioteleskop ist von einem schützenden Radom umgeben, indem fünf Vermessungspfeiler und drei weitere Bodenpunkte für lokale Vermessungen zur Verfügung stehen. Mit dem Lasertracker wurde zunächst eine Verknüpfungsmessung zwischen den Pfeiler- und Bodenpunkten (Netzmessung) innerhalb des Radoms durchgeführt, welche später zur Bestimmung des IGS-Referenzpunkt mit dem Außennetz verbunden wurde. Da der IGS-Punkt direkt anmessbar ist,

stellt die Bestimmung des IVS-Punktes die weit größere Herausforderung dieser Vermessungskampagne dar. Bedingt durch das eingeschränkte Platzangebot innerhalb des Radoms musste der Lasertracker geneigt werden, um Messungen zu den ca. 15m höher gelegenen Reflektoren am Radioteleskop zu ermöglichen. Mit einem Präzisionsneigungssensor Nivel210 (Leica) wurde die Stabilität des Lasertrackers permanent überwacht (Abbildung 3). Da ein Lasertracker im Gegensatz zu einem Tachymeter nicht horizontiert wird sondern mittels Transformation im Netz stationiert wird, ergibt sich hierdurch keine Diskrepanz. In der anschließenden Netzauswertung sind pro Standpunkt lediglich drei zusätzliche Drehwinkel mitzuschätzen.

Während für die Vermessung des Netzes Standardreflektoren, so genannte Corner-Cube-Reflektoren, eingesetzt werden konnten (Abbildung 4, links), wurden am Radioteleskop spezielle Cat-Eye-Reflektoren mit großem Einfallswinkel befestigt (Abbildung 4, rechts), um einen Abriss des Laserstrahls beim Drehen des Radioteleskops zu verhindern. Insgesamt wurde eine gleichverteilte Punktwolke aus 720 unterschiedlichen Positionen am Teleskop erfasst. Zu jeder bestimmten Position  $P_{Obs}$  lagen neben dem Koordinatentripel die beiden Teleskoporientierungswinkel  $A$  und  $E$  vor, da diese neben den Punkten als zusätzliche Beobachtung ins oben beschriebene Modell eingehen. Um die temperaturbedingte Höhenvariation des Radioteleskops bei der Bestimmung des Referenzpunktes zu berücksichtigen, wurden zusätzlich die gemessenen Höhenänderungen, die ein entlang der Azimutachse gespannter Invardraht registriert hat, protokolliert.

### Local-Tie Bestimmung

Die mit dem Lasertracker gemessenen Punkte wurden zunächst mit einer freien Netzausgleichung koordinatenmäßig bestimmt. Da der Lasertracker, wie oben bereits beschrieben, nicht horizontiert werden kann, handelt es sich hierbei um ein echtes räumlich-kartesisches Koordinatensystem. Das geodätische Datum wurde dabei durch die im lokalen Netz vermarkten Punkten definiert, sodass eine spätere Transformation in ein geozentrisches System problemlos möglich wird. Der IGS-Punkt, der mit dem Lasertracker direkt messbar war, konnte durch die Netzausgleichung mit einer Standardabweichung von  $\hat{\sigma}_{IGS} = 0.3\text{mm}$  in allen drei Raumrichtungen bestimmt werden [Lösler und Haas, 2009].

Die Koordinatenbestimmung des IVS-Referenzpunktes erfolgte mit dem oben beschriebenen Modell. Aus der Netzausgleichung liegen die hierfür notwendigen Koordinaten der Punkte, die sich am Radioteleskop befanden, mit vollständigen Varianz-Kovarianz-Informationen vor. Die zugehörigen Teleskoporientierungswinkel  $A$  und  $E$ , die ebenfalls als Beobachtung ins Auswertemodell eingehen, wurden als unkorreliert betrachtet und mit einer a-priori Standardabweichung von  $\sigma_A = \sigma_E = 0.00025^\circ$  im Modell berücksichtigt. Der resultierende Referenzpunkt wurde mit einer Standardabweichung von  $\hat{\sigma}_{IVS} = 0.1\text{mm}$  in allen drei Koordinatenkomponenten abgeleitet. Da vollständige Varianz-Kovarianz-Informationen  $\hat{C}_{IVS,IGS}$  zwischen beiden Referenzpunkte notwendig sind, um den Verbindungsvektor abzuleiten, wurde das Auswertemodell entsprechend erweitert und beide Punkte anschließend gemeinsam ausgeglichen [Lösler, 2009b]. Der Verbindungsvektor ergibt sich durch Subtraktion der Koordinate des IVS- und IGS-Referenzpunktes.

$$\mathbf{tie}_{IVS,IGS} = \mathbf{P}_{IVS} - \mathbf{P}_{IGS} = \begin{pmatrix} 90.12325 \\ 35.94974 \\ 22.75947 \end{pmatrix}_m - \begin{pmatrix} 12.75551 \\ 23.39043 \\ 9.06529 \end{pmatrix}_m = \begin{pmatrix} 77.36774 \\ 12.55931 \\ 13.69418 \end{pmatrix}_m \quad (2)$$

Durch Anwendung des Varianzfortpflanzungsgesetzes auf Gleichung (2) ergibt sich die zugehörige Varianz-Kovarianz-Matrix  $\hat{\mathbf{C}}_{tie}$ .

$$\hat{\mathbf{C}}_{tie} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{C}}_{IVS,IGS} \mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} 0.0616 & 0.0041 & -0.0106 \\ & 0.0732 & -0.0370 \\ & & 0.0685 \end{bmatrix}_{mm^2} \quad (3)$$

Durch eine abschließende Transformation des local-tie-Vektors in ein geozentrisches Datum, kann dieser bei der Bildung des ITRFs Berücksichtigung finden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Um verschiedene Raumverfahren bei der Realisierung des International Terrestrial Reference System (ITRS) miteinander verknüpfen zu können, sind lokale Vermessungen zur Bestimmung der geometrischen Beziehungen dieser Raumverfahren zueinander an Fundamentalstationen notwendig. Da die Genauigkeit der lokalen Vermessung direkt in die globale Lösung eingeht, werden sehr hohe Anforderungen an die moderne Messtechnik gestellt. An der Fundamentalstation Onsala (Schweden) wurde der Verbindungsvektor zwischen dem IGS- und IVS-Referenzpunkt im Herbst 2008 abgeleitet. Der dabei eingesetzte Lasertracker LTD840 musste, bedingt durch die beengten räumlichen Verhältnisse im Radom, geneigt werden. Die erzielten Ergebnisse mit dem neuen mathematischen Modell, welches erstmalig an der Fundamentalstation in Wettzell (Deutschland) erfolgreich verifiziert werden konnte [Lösler, 2008], erfüllen die Anforderungen der Agenda VLBI2010 und des GGOS. Der Verbindungsvektor konnte mit einer Genauigkeit von  $\hat{\sigma}_{tie} = 0.3\text{mm}$  in allen drei Raumrichtungen abgeleitet werden. Für die angestrebte Permanentüberwachung werden derzeit Untersuchungen an der Fundamentalstation Wettzell in Zusammenarbeit mit Dr. rer. nat. Alexander Neidhardt und enger Kooperation mit Prof. Dr.-Ing Rüdiger Haas durchgeführt. Hierbei sollen Erkenntnisse über die Langzeitstabilität von local-ties gewonnen werden.

## Danksagung

Für die sehr gute Zusammenarbeit bei der Bestimmung des Verbindungsvektors zwischen IGS- und IVS-Referenzrahmen am Raumobservatorium Onsala sei Prof. Dr.-Ing Rüdiger Haas gedankt. Ferner sei Leica (Göteborg) gedankt, die schnell und unbürokratisch einen modernen Lasertrackers LTD840 bereitstellten. Dieses Projekt wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unterstützt, HE5213\_2-1.

## Kontakt

Michael Lösler  
 loesler@gik.uni-karlsruhe.de  
 Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe (TH)  
<http://www.gik.uni-karlsruhe.de>

## Literatur

Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B., Boucher C. (2007), ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. Journal of Geophysics

Ghilani, C.D., Wolf, P.R. (2006), Adjustment Computations – Spatial Data Analysis. John Wiley & Sons Inc., 4<sup>th</sup> Edition, Hoboken, New Jersey

Dawson, J., Sarti, P., Johnston, G., Vittuari, L. (2006), Indirect approach to invariant point determination for SLR and VLBI systems: an assessment. Journal of Geodesy

Haas, R., Eschelbach, C. (2003), The 2002 Local Tie Survey at the Onsala Space Observatory. Proceedings of the IERS Workshop on site co-location, Matera, Italien, 23.-24. Oktober

Leinen, S., Becker, M., Dow, J., Feltens, J., Sauermann, K. (2007), Geodetic Determination of Radio Telescope Antenna Reference Point and Rotation Axis Parameters. Journal of Surveying Engineering

Lösler, M. (2008), Reference point determination with a new mathematical model at the 20 m VLBI radio telescope in Wettzell. Journal of Applied Geodesy

Lösler, M. (2009a), A New Mathematical Model for Reference Point Determination of an Azimuth-Elevation Type Radio Telescope. Journal of Surveying Engineering (im Druck)

Lösler, M. (2009b), Bestimmung des lokalen Verbindungsvektors zwischen IVS- und IGS-Referenzrahmen am Raumobservatorium Onsala (Schweden). Allgemeine Vermessungsnachrichten (im Druck)

Lösler, M., Eschelbach, C. (2009), Evolution and obtained expertise in reference point determination at the GIK. Proceedings of the EVGA – European VLBI for Geodesy and Astrometry, Frankreich, Bordeaux, 23.-24. März

Lösler, M., Haas, R. (2009), The 2008 Local-tie Survey at the Onsala Space Observatory. Proceedings of the EVGA – European VLBI for Geodesy and Astrometry, Frankreich, Bordeaux, 23.-24. März

Niell, A., Whitney, A., Petrachenko, B., Schlüter, W., Vandenberg, N., Hase, H., Koyama, Y., Ma, C., Schuh, H., Tuccari, G. (2004), IVS Memorandum – VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. IVS Memorandum

Plag, H. P., Pearlman, M. (2008), The Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on an Changing Planet in 2020. The reference Document (v0.18)

## Abbildungen

Abbildung 1: Raumobservatorium Onsala 20m Radioteleskop im Radom (links) und 25m Radioteleskop (rechts)

Abbildung 2: Definition des Referenzpunktes eines Azimut-Elevation-Radioteleskops

Abbildung 3: Geneigter Lasertracker mit Neigungssensor

Abbildung 4: CCR auf Vermessungspfeiler (links) und CER am Radioteleskop (rechts)