

Untersuchung von Hauptreflektordeformationen an VGOS-Teleskopen mittels UAS

Cornelia ESCHELBACH, Michael LÖSLER, Rüdiger HAAS und Ansgar GREIWE

1 Einleitung

Das Verfahren zur Interferometrie auf langen Basislinien (VLBI) zählt zu den geodätischen Raumtechniken, die zur Realisierung eines erdfesten geodätischen Bezugsrahmens (bspw. International Terrestrial Referenz Frame, ITRF) herangezogen werden. So haben VLBI-Ergebnisse Einfluss auf den Netzmaßstab des ITRF. Radioteleskope bilden dabei die erdfesten Sensoren, die sich durch Drehungen um eine Primärachse und eine Sekundärachse auf Radioquellen, z. B. Quasare, ausrichten lassen. Entspricht die primäre bzw. sekundäre Achse des Radioteleskops der Azimut- bzw. Elevationsachse, so handelt es sich um eine Azimut-Elevation-Montierung, die o. B. d. A. im Folgenden vorausgesetzt sei. Quasare sind sehr weit von der Erde entfernte extragalaktische Objekte, die einen quasi-inertialen himmelsfesten Bezugsrahmen realisieren. Durch Korrelation der von mehreren Radioteleskopen gleichzeitig aufgezeichneten Radiosignale der Quasare lassen sich u. a. die interkontinentalen Raumstrecken zwischen den Teleskopen mit Millimetergenauigkeit ableiten.

Im Rahmen der Agenda VLBI2010 wurden durch NIELL et al. (2006) Spezifikationen für eine neue Generation von Radioteleskopen formuliert. Inzwischen wurden bspw. in Europa, den USA und Australien die ersten VGOS-Teleskope (VLBI Global Observing System) errichtet und in Betrieb genommen. Das Design dieser neuen Teleskope zeichnet sich im Vergleich zu den bisher für VLBI verwendeten konventionellen Teleskopen vor allem durch eine stabilere und kompaktere Bauweise und eine deutlich erhöhte Ausrichtungsgeschwindigkeit aus. Die Erweiterung des internationalen VLBI-Netzes durch diesen neuen Teleskoptyp soll auch zu der durch GGOS (Global Geodetic Observing System) angestrebten Steigerung der Positionsgenauigkeit im globalen geodätischen Bezugsrahmen führen (vgl. ROTHACHER ET AL. 2009). PETRACHENKO ET AL. (2009) spezifizieren die Mindestanforderungen für VGOS-Teleskope, um die Systemsensitivität zu erhöhen und die angestrebte Positionsgenauigkeit von 1 mm im globalen terrestrischen Referenzrahmen zu erreichen. Hierzu zählt auch ein stabiler bzw. modellierbarer Strahlengang über den gesamten Elevationsbereich des Teleskops, sodass für alle Teleskoporientierungen die Signalwegänderungen 300 μm (RMS) nicht überschreiten. Im Gegensatz zu konventionellen Radioteleskopen, die Brennweitenvariation von z. T. mehreren Zentimetern aufweisen (z. B. SARTI et al. 2009), liegen die zu erwartenden Deformationen aufgrund der kompakten Bauweise für VGOS-Teleskope im unteren Millimeterbereich.

Teleskope sind trotz ihrer hohen Fertigungsqualität nie vollständig unelastisch und invariant. Alle Bauelemente können Veränderungen durch eine Vielzahl von Einflüssen erfahren. Durch die gesteigerte Genauigkeit von VLBI-Radioteleskopen und deren Empfangseinheiten rücken nun verstärkt Einflüsse in den Vordergrund, die bisher noch nicht oder nicht ausreichend genau quantifiziert wurden. Dies gilt sowohl für Teleskope der konventionellen als auch für Teleskope der neuen Generation. So führen Temperaturänderungen zu einer

(partiellen) thermischen Ausdehnung der Teleskopstruktur, die durch ein Korrekturmodell in der VLBI-Datenanalyse zu berücksichtigen ist (HAAS et al. 1999, WRESNIK et al. 2007). Weiterhin wirken sich Lastfalländerungen, die durch die Verlagerung des Eigengewichts der Antenne während des VLBI-Messprogramms den Antennenbrennpunkt verändern, auf die Struktur und damit auf die Empfangseigenschaften der Teleskope aus. Messtechnische Untersuchungen von Hauptreflektoren konventioneller VLBI-Radioteleskope zeigen ein signifikantes, elevationsabhängiges Eigenverformungsverhalten, das u. a. Variationen der Brennweite von z. T. mehreren Zentimetern hervorruft (z. B. SARTI et al. 2009; BERGSTRAND et al. 2019). Unkompensiert führen diese Verformungen zu einer systematischen Verzerrung der geschätzten Stationskoordinate, die u. U. den globalen Netzmaßstab des ITRF verfälscht.



Abb. 1: Nordöstliches Onsala Twin Teleskop (ONSA13NE) mit Hexacopter während der Befliegung in der 0° Elevationsposition.

Für diesen Beitrag wurde erstmals das elevationsabhängige Verformungsverhalten eines modernen, kompakten VGOS-spezifizierten VLBI-Radioteleskops untersucht. Als Untersuchungsobjekt diente eines der 2017 in Betrieb genommenen Onsala Twin Teleskope (OTT; vgl. Abb. 1) am Onsala Space Observatory in Schweden, die der neuen VGOS-Bauart ent-

sprechen (HAAS 2013). Die beiden baugleichen Teleskope stehen mit einem Abstand von etwa 70 m zueinander an der Küste des Kattegat, 40 km südlich von Göteborg auf schwedischem Festland. Der Hauptreflektor hat die Form eines sogenannten Ring-Fokus-Paraboloids und besitzt einen Durchmesser von 13,2 m. Kapitel 2 gibt den Modellierungsansatz für diese Antennenform wieder. Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen für diese VGOS-Radioteleskope erfolgt die Datenerhebung photogrammetrisch. Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen, die einen Kran erfordern, erfolgte die photogrammetrische Datenerhebung zeiteffizient durch ein Unmanned Aircraft System (UAS). Kapitel 3 geht deshalb auf das Messverfahren und die Rahmenbedingungen beim Einsatz eines UAS ein. Kapitel 4 beschäftigt sich mit der Auswertung der Bilddaten und in Kapitel 5 werden die Ergebnisse dargestellt und erläutert. Der Beitrag wird mit einem Fazit abgeschlossen.

2 Parametrisierung der Antennenoberfläche

Die neue Generation von VLBI-Teleskopen weist eine deutlich höhere Rotationsgeschwindigkeit zur Ausrichtung des Reflektors auf. Damit einher geht eine Verkleinerung des Hauptreflektordurchmessers, die zwangsläufig zu einer Reduktion der Signalstärke im Vergleich zu konventionellen Teleskopen mit größerer Apertur führt. Bei konventionellen Teleskopen mit rotationssymmetrischem Paraboloid befinden sich der Subreflektor und die Empfangseinheit in der optischen Achse. Dies verursacht Abschattungen auf dem Hauptreflektor und führt somit zu Signalabschwächungen (CUTLER 1947). Diese Signalabschwächung wird zunehmend signifikant, wenn die Antennenapertur verringert wird. Die Oberfläche der meisten VLBI-Teleskope der neuen Generation besitzt die Form eines rotations-symmetrischen Ring-Fokus-Paraboloids. Vereinfacht lässt sich diese Form als ein rotationssymmetrisches Paraboloid beschreiben, dessen Scheitelpunkt durch einen Kreis ersetzt wurde. Die einzelnen Parabeläste werden radial nach außen an die Kreislinie verschoben (vgl. Abb. 2). Weder Subreflektor noch Empfangseinheit befinden sich so im eigentlichen Reflexionsbereich des Paraboloids.

Diese neue Form des Hauptreflektors hat zur Konsequenz, dass die einfallenden Signale sich nicht ohne Umlenkung an einem Subreflektor in einem Punkt bündeln lassen. Ein einzelner Brennpunkt wie bei der konventionellen Bauweise existiert nicht. Stattdessen wird dieser aufgeweitet zu einem im Raum liegenden Ring im Abstand der ursprünglichen Brennweite, weshalb diese Form des Hauptreflektors auch als Ring-Fokus-Paraboloid bezeichnet wird.

Zur mathematischen Darstellung des Paraboloids bezieht man sich auf die Normalform, auch kanonische Form genannt, also auf die eindeutig definierte Lage dieser Geometrie im Raum. Der Scheitelpunkt bzw. der Kreismittelpunkt fällt in den Koordinatenursprung, und die Rotationsachse bzw. Symmetrieachse fällt mit der z-Komponente des Koordinatensystems zusammen. Oberflächenpunkte, die zu einem rotationssymmetrischen Ring-Fokus-Paraboloid zählen, erfüllen folgende geschlossene mathematische Beschreibung:

$$a^2 \left((x_i - r_i n_{x,i})^2 + (y_i - r_i n_{y,i})^2 \right) = z_i . \quad (1)$$

Hierbei steuert der Parameter a die Öffnung des Paraboloids bzw. der Parabeläste und kann für die Ableitung der Brennweite $f = \frac{1}{4a^2}$ verwendet werden.

Der normierte Vektor $\mathbf{n}_i^T = (n_{x,i} \ n_{y,i} \ 0)$ in Verbindung mit seiner Skalierung um den Betrag r dient dabei zur radialen Verschiebung des Punktes $\mathbf{p}_i^T = (x_i \ y_i \ z_i)$ rechtwinklig zur Rotationsachse

$$n_{x,i} = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}, \quad (2)$$

$$n_{y,i} = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}. \quad (3)$$

Dies entspricht der Verschiebung der Parabeläste von der Kreislinie zum Scheitelpunkt des Paraboloids. Somit verbleiben nur die Parameter a und r als zu schätzende Modellparameter. Das Parameterset kann erweitert werden, indem das Paraboloid nicht rotationssymmetrisch, sondern mit elliptischem Außenrand modelliert wird:

$$a^2(x_i - r_i n_{x,i})^2 + b^2(y_i - r_i n_{y,i})^2 = z_i. \quad (4)$$

In diesem Fall führen die beiden Parameter a und b zu den beiden Extremwerten der Brennweite f_a und f_b . Weitere Variationen in der Modellierung sowie eine detaillierte Beschreibung können LÖSLER et al. (2017, 2019) entnommen werden.

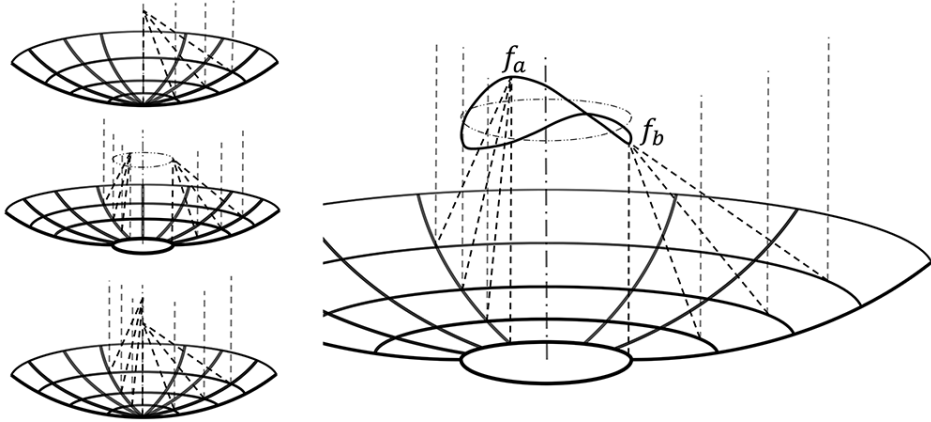


Abb. 2: Varianten paraboloidischer Hauptreflektorformen in kanonischer Form; links oben: rotationssymmetrisches Paraboloid, links mittig: rotationssymmetrisches Ring-Fokus-Paraboloid, links unten elliptisches Paraboloid; rechts: elliptisches Ring-Fokus-Paraboloid mit den beiden Extremwerten der Brennweite f_a und f_b ; ergänzt wurden in den Grafiken die Brennnlinie (schwarz, durchgezogen) und parallel einfallende Signalwellen (grau, gestrichelt) sowie weitere Hilfslinien.

Um eine Überparametrisierung zu vermeiden, sollte nur in begründeten Ausnahmen auf ein elliptisches Ring-Fokus-Paraboloid zurückgegriffen werden. Den Regelfall bildet das rotationssymmetrische Ring-Fokus-Paraboloid. Liegt das zu bestimmende Paraboloid nicht in kanonischer Form vor, kann es durch eine 3D-Transformation in diese überführt werden.

Zur Bestimmung der implizit in Gleichung (1) bzw. Gleichung (4) beschriebenen Modellparameter $\mathbf{x}_p^T = (a \ r)$ bzw. $\mathbf{x}_p^T = (a \ b \ r)$ ist ein Errors-in-Variables-Modell (EIV-Modell) zu verwenden. Im gleichen Schritt sind auch die unbekannten Transformationsparameter $\mathbf{x}_t^T = (X_0 \ Y_0 \ Z_0 \ \xi_X \ \xi_Y \ \xi_Z)$ zu ermitteln. Drei Translationen und drei Euler'sche Drehwinkel überführen die Geometrie in ihre kanonische Form. Ein geeignetes Verfahren zur Schätzung der Parameter ist die Sequentielle Quadratische Programmierung, die für die Optimierung nicht-linearer Zusammenhänge empfohlen wird (NOCEDAL & WRIGHT 2006).

3 Photogrammetrische Datenerfassung mittels UAS

Neben den Genauigkeitsanforderungen bestimmen in der Messtechnik häufig Dimension und Handhabung des Messobjekts sowie die zu erwartenden Rahmenbedingungen während der Messungen das geeignete Messverfahren. Der Hauptreflektor des nördlichen OTT hat einen Durchmesser von 13,2 m und befindet sich mit seinem Scheitelpunkt in etwa auf 10 m Höhe über dem Grund. Angestrebt wurde die Untersuchung der Antennen geometrie bei Lastfalländerung, also bei Änderung der Teleskopausrichtung, sodass die zu erfassende Antennenoberfläche in den verschiedenen Teleskoppositionen von Fall zu Fall sehr unterschiedlich im Raum orientiert war. Variationen in der Elevation führen im Vergleich zu Variationen im Azimut zu deutlich größeren Lastfalländerungen, sodass der gravitative Einfluss nur in Abhängigkeit des Elevationswinkels zu modellieren war.

3.1 Messsysteme zur Datenerhebung

Taktile Messsysteme wie Tachymeter oder Lasertracker konnten nicht eingesetzt werden, da die Signalisierung von Einzelpunkten zu zeitaufwändig und in diesem Fall auch zu kompliziert gewesen wäre. Laserscanner sind für flächige Aufnahmen sehr gut geeignet, da sie ohne Einzelpunktsignalisierung am Objekt auskommen. Der vergleichsweise schlechten Einzelpunktgenauigkeit steht die hohe Datenmenge gegenüber. Eine Herausforderung bildet aber in diesem Zusammenhang die Wahl eines geeigneten Instrumentenstandpunktes. Bei einer Ausrichtung des Teleskops in den Zenit ist ein stabiler Standpunkt außerhalb des Teleskops praktisch nicht möglich. Alternativ könnte der Laserscanner nahe des Subreflektors an dessen Aufhängung kardanisch befestigt werden, um die Teleskopoberfläche in möglichst vielen Teleskoppositionen zu scannen (HOLST et al. 2017, BERGSTRAND et al. 2019). Der Tubus mit der Empfangseinheit verursacht jedoch große Abschattungen der zu scannenden Fläche, siehe Abb. 1. Zudem wäre ggf. das zusätzlich eingebrachte Gewicht des Laserscanners aufgrund der Hebelwirkung am Subreflektor zu berücksichtigen.

Die Nahbereichsphotogrammetrie ermöglicht, Positionsgenauigkeiten von $5 \mu\text{m} + 5 \text{ ppm}$ zu erreichen (LUHMANN 2018). Dieses Verfahren wird standardmäßig eingesetzt, um die einzelnen Teleskoppaneele des Hauptreflektors formschlüssig zu justieren. Bei photogrammetrischen Messungen beeinflussen zum einen die geometrische Stabilität der Kamera und die Bildqualität die einzelnen Aufnahmen. Zum anderen haben die Aufnahmekonfiguration und die Verteilung von Pass- und Verknüpfungspunkten Auswirkungen auf die Ge-

naugigkeit des auszuwertenden Bildverbandes. Um qualitativ hochwertige und räumlich gut verteilte Aufnahmen für den gesamten Elevationsbereich des Teleskops zu erhalten, musste bisher kostspielig ein Kran eingesetzt werden. Durch die technologischen Fortschritte in der Drohnenentwicklung können inzwischen auch unbemannte Luftfahrzeuge (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) als Plattform für Messkameras genutzt werden. In diesem Projekt wurde erstmals ein Hexacopter eingesetzt, der mit einer Nutzlast von 850 g eine Flugzeit von 25 Minuten erreicht. Mit einer leichtgewichtigen Kompaktkamera war dieses System also in der Lage, mit einem Flug die Oberfläche eines VGOS-Radioteleskops komplett zu erfassen. Somit konnte das Messobjekt in lediglich 21 Flügen in den verschiedenen Elevationspositionen erfasst werden, um die lastfallabhängigen Deformationen zu ermitteln.

3.2 Konfiguration des UAS

Ein UAS besteht aus einem unbemannten Luftfahrzeug (UAV) und einer Bodenstation zur Fernsteuerung des UAV. In der Regel wird das UAV GNSS-gestützt im halbautomatischen Modus mit einem vordefinierten Flugplan betrieben. Der Flugplan enthält die anzufliegenden Wegpunkte und die Triggerpunkte für die Kameraauslösung. Hierbei ist die Flugeschwindigkeit an die Auslösegeschwindigkeit (Speicherzeiten) der Kamera anzupassen. Die Kamera wird an eine universelle Trägerplattform (Gimbal) montiert, welche servogesteuert durch die Lageregelung des Hexacopters die Eigenbewegung des Hexacopters kompensiert und die Ausrichtung der Kamera weitestgehend stabilisiert.

Im Gegensatz zur halbautomatischen Aufnahme erfolgt die Ausrichtung der Kamera auf das Messobjekt in diesem Projekt manuell. Dieses Vorgehen erlaubt gerade bei den kurzen Aufnahmedistanzen und den turbulenten Windverhältnissen nahe am Reflektor eine gezielte Ausrichtung auf das Messobjekt. Durch die begrenzte Nutzlast des Hexacopters richtet sich die Auswahl der Kamera vorrangig nach deren Gewicht. In diesem Projekt wurde eine leichtgewichtige Consumer-Kamera (Sigma DP3 Merrill) mit einem fest eingebauten Objektiv mit einer Brennweite von 50 mm und einem Gewicht von 380 g verwendet. Diese geringe Nutzlast ermöglicht eine Flugzeit von 25 Minuten mit dem eingesetzten Hexacopter (HP-TS960, HEXAPILOTS). Zwar erreichen kalibrierte und geometrisch stabilisierte Messkameras höhere Genauigkeiten als Consumer-Kameras, sie sind jedoch auch deutlich schwerer und reduzieren maßgeblich die Flugzeit des Akku-betriebenen UAV.

Die verwendete Sigma DP3 Merrill besitzt einen Foveon-Sensor in APS-C Größe (16 mm × 24 mm) anstelle eines Bayer-Patterns, der in allen anderen CCD- oder CMOS-Kamerasensoren verwendet wird (GREIWE & GEHRKE 2013a). Die Farbfilteranordnungen eines Bayer-Patterns erfordert Farbinterpolationen mit Nachbarpixeln, um die volle RGB-Farbinformation zu erhalten. Im Gegensatz hierzu erfasst ein Foveon-Sensor für jedes Pixel die volle RGB-Farbinformation ohne eine Interpolation (vgl. GREIWE & GEHRKE, 2013b). Durch diese Sensortechnik weisen die Bilder einen besseren Mikrokontrast auf und ermöglichen folglich auch eine genauere Bildmessung der Zielzeichen.

Als Zielzeichen dienten 12 bit codierte Schwarz-Weiß-Marken, die flächig auf der Teleskopantenne verklebt wurden. Anzahl und Anordnung richteten sich jeweils nach den Paneelen der Antennenoberfläche, die drei konzentrische Kreise mit 2x24 und 1x12 Elementen bilden. Diese 60 Zielmarken wurden ergänzt durch weitere 12 Zielmarken in der Nähe des Übergangs zum inneren Teil der Antenne und vier Zielmarken am Subreflektor. Dar-

über hinaus wurde nahe dem Subreflektor ein Koordinatenkreuz bestehend aus sechs Zielmarken fixiert, das näherungsweise das Bezugssystem der resultierenden 3D-Punkte definiert (vgl. Abb. 3). Zur Maßstabsdefinition wurden sechs kalibrierte Kohlefaserstäbe mit Zielmarken an den Stabenden verwendet. Um das Messvolumen zu umschließen, wurden die Maßstäbe gleichmäßig am Rand des Hauptreflektors, an den Stützen und in der Nähe des Subreflektors angebracht.

Die eingesetzte Kamera ist zwar leichtgewichtig, aber nicht geometrisch stabilisiert. Der Objektivtubus wird beim Ein- und Ausschalten mechanisch bewegt. Da die Stromversorgung der Kamera durch den Hexacopter erfolgt, musste die photogrammetrische Erfassung einer Elevationsposition des Reflektors in einem Flug ohne Zwischenlandung bzw. Akkuwechsel erfolgen. Der Flugplan für eine Antennenposition bestand aus zwei horizontalen Flugbahnen und zwei Kreisen (vgl. Abb. 4). Die kreisrunden Flugbahnen mit einem Radius von 6,5 m bzw. 11,5 m waren um den Elevationswinkel des Teleskops geneigt und lagen zentrisch um die optische Achse des Teleskops. Die Kamera wurde jeweils manuell auf die Teleskopoberfläche ausgerichtet und ausgelöst. Das Teleskop wurde zwischen 0° und 90° in 10° Schritten in Elevation verfahren. Alle zehn Positionen wurden zweimal erfasst, wobei zur Steigerung der Unabhängigkeit der Ergebnisse die Wiederholungsmessung nie direkt im Anschluss erfolgte. Ergänzt wurde die Datenreihe durch einen Datensatz in 34° Elevation, die der Justierposition des Herstellers entspricht. Die ganze Messkampagne umfasste inklusive Vorbereitungszeit, Teleskoppräparierung und Testflügen zwei Wochen und lieferte insgesamt 21 getrennt voneinander auswertbare Datensätze, die effektiv innerhalb von zwei Tagen photogrammetrisch erfasst wurden.



Abb. 3: Positionen der Zielmarken auf der Antennenoberfläche, dem Subreflektor sowie an den Enden der kalibrierten Kohlefaserstäbe und dem Koordinatenkreuz am Subreflektor.

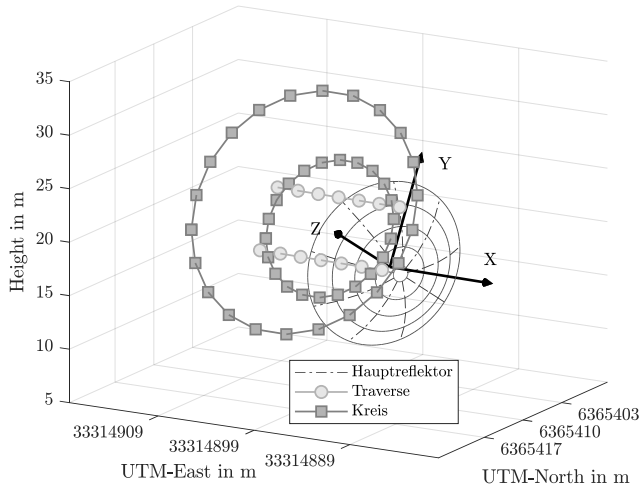


Abb. 4: UAV-Flugplan für die 30° Elevationsposition. Die Abstände zwischen dem Referenzpunkt und dem inneren bzw. äußeren Kreis betragen ca. 20 m bzw. 25 m. Der Abstand zwischen den horizontalen Flugtraversen und dem Referenzpunkt des Teleskops beträgt ca. 20 m.

4. Auswertung der Bilddaten

Für jede Antennenposition wurde ein Bildverband mit mindestens 250 Bildern generiert. Um die nötige Schärfentiefe bei den kurzen Aufnahmedistanzen zu gewährleisten, wurden die Aufnahmen mit Blende 8 und einer für einen Coptereinsatz entsprechend langen Belichtungszeit von 1/320 Sekunde erzeugt. Nach der Detektion von Bewegungsunschärfen standen für jeden Bildverband mindestens 150 Aufnahmen für eine Auswertung in AICON 3D zur Verfügung. Da die Kamera während der Befliegung für einen Bildverband nicht ausgeschaltet werden musste, konnte sich die Bestimmung der Kalibrierparameter auf einen Parametersatz pro Bildverband beschränken und in-situ mit der Bündelausgleichung erfolgen. Neben den Zielmarken wurden auch natürliche, kreisförmige Ziele, bspw. Schrauben an den Paneelen, als Verknüpfungspunkte in der Auswertung zugelassen. Im Schnitt war jede Zielmarke in 55 Aufnahmen enthalten. Mehr als 500 Verknüpfungspunkte wurden je Bildverband verwendet, wobei nur die codierten Zielmarken im weiteren Auswerteprozess zur Ableitung der Antennen geometrie berücksichtigt wurden. Da diese aus einem hochredundanten Beobachtungsmaterial abgeleitet wurden, konnten Ausreißer in den Bildkoordinaten zuverlässig eliminiert werden. Die abgeschätzten Unsicherheiten der Koordinatenkomponenten der codierten Zielmarken betrug 80 μm bis 120 μm (LÖSLER ET AL 2019). Diese Einzelpunktunsicherheiten sind zwar etwas größer als bei hochpräzisen photogrammetrischen Kameras (LUHMANN 2018), dennoch liegen sie in einer Größenordnung, die zur Erkennung der erwarteten Verformungen ausreichend sind (vgl. Kap. 1).

Temperaturschwankungen wirken sich auf die dünnen Antennenelemente mit leichter Verzögerung aus. Die Zeitreihe des Temperatursensors in der Nähe des Radioteleskops ergab eine Spannweite der Temperaturänderung von weniger als 2 K. Es wurde jeweils für eine Antennenposition der repräsentative Temperaturwert ermittelt, um mit Hilfe des Ausdehnungskoeffizienten von Stahl ($\gamma = 10^{-5} \text{K}^{-1}$) die jeweiligen Koordinatensets auf die Bezugstemperatur von 9 °C zu skalieren. Im Gegensatz zu der in der Messtechnik üblichen Bezugstemperatur von 20 °C, wird für VLBI die Bezugstemperatur weltweit für alle Stationen durch eine IVS-Konvention geregelt. Diese leitet sich aus dem globalen Temperatur- und Luftdruckmodell (GPT) ab (vgl. NOTHNAGEL 2009).

5. Ergebnisse der Messungen

Um die Modellparameter des Ring-Fokus-Paraboloids abzuleiten, wurden alle Datensätze entsprechend der Beschreibung aus Kapitel 3 ausgewertet. Voruntersuchungen am OTT von LÖSLER et al. (2017) zeigten in einem vom Teleskophersteller zur Verfügung gestellten photogrammetrischen Datensatz mit höherer Genauigkeit ($< 50 \mu\text{m}$) eine Systematik in den Oberflächenresiduen, die auf ein elliptisches Ring-Fokus-Paraboloid hindeuteten. Die Ausgleichung basierend auf dem komplexeren Modell mit zwei verschiedenen Brennweiten lieferte die Schätzwerte und die zugehörige Varianz-Kovarianz-Matrix der Parameter \hat{a} und \hat{b} . Aus diesen wurden die Brennweiten \hat{f}_a und \hat{f}_b , deren Abweichung $\hat{d} = \hat{f}_a - \hat{f}_b$ sowie dessen zugehörige Standardabweichung $\hat{\sigma}_d$ abgeleitet (vgl. JÄGER et al. 2005). Mittels der Teststatistik

$$T = \frac{\hat{d}^2}{\hat{\sigma}_d^2} \sim F_{1;n-1-\alpha} \quad (5)$$

lässt sich prüfen, ob die Schätzung eines elliptischen Ring-Fokus-Paraboloids gerechtfertigt ist, oder zugunsten des einfacheren rotationssymmetrischen Ring-Fokus-Paraboloids verworfen werden sollte. Hierin entspricht n dem Freiheitsgrad im Ausgleichungsmodell. Zwar ergeben sich in den niedrigeren Elevationsstellungen tendenziell größere Teststatistiken, diese erreichen jedoch nie den Grenzwert des 0,1%-igen Signifikanzniveaus.

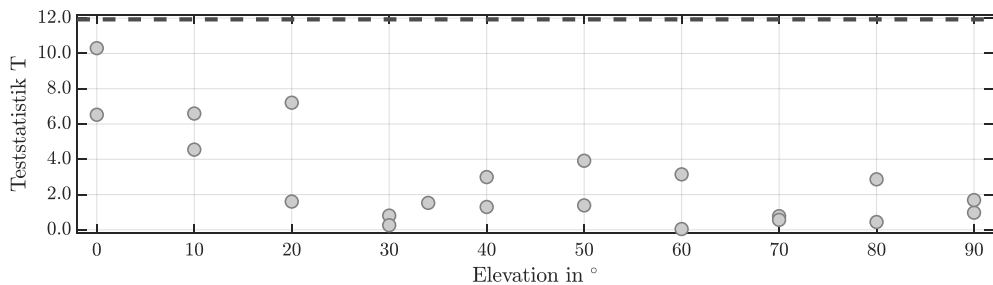


Abb. 5: Teststatistiken nach Gl. (5) zur Abschätzung einer Überparametrisierung; keine Teststatistik überschreitet den Grenzwert des 0,1%-igen Signifikanzniveaus.

Abb. 5 zeigt alle Teststatistiken sowie als gestrichelte Linie das Quantil des Signifikanzniveaus. Auch wenn das photogrammetrische Datenmaterial eine relativ hohe Genauigkeit

90°, da hier der Antennenrand von der Schwerkraft nach unten gezogen und die Antenne aufgeweitet wird. Mit dem Elevationswinkel fällt auch die Brennweite um bis zu 2,3 mm. Diese Spannweite ist um mehr als das 10-fache kleiner als in der Literatur dokumentierte Variationen konventioneller Radioteleskope (z. B. SARTI et al. 2009).

Tabelle 1: Übersicht über die analysierten Elevationspositionen des Teleskops und die RMS-Werte der Oberflächenresiduen.

Elevations- position	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	34°
1. Datensatz RMS in μm	204	187	200	167	192	182	173	178	221	292	169
2. Datensatz RMS in μm	190	194	166	147	154	155	162	167	227	282	-

Der Kurvenverlauf kann durch die elevationsabhängige Kosinus-Funktion

$$F(\epsilon) = c_0 + c_1 \cos \epsilon = 3,7017 \text{ m} + 0,0023 \text{ m} \cos \epsilon \quad (6)$$

approximiert werden, wobei c_0 den Offset zum Funktionswert an der Stelle 90° Elevation beschreibt und c_1 die Amplitude darstellt. Die Funktionswerte der Kurvenparameter c_0 und c_1 wurden unter Verwendung aller Stützstellen und deren Unsicherheiten geschätzt. Die Stützstellen mit ihren Unsicherheiten, der Funktionsverlauf und das zugehörige Unsicherheitsband (2σ) sind in Abb. 7 dargestellt. Die Brennweite, die bereits von LÖSLER et al. (2017) ermittelt wurde und durch ein schwarzes Quadrat symbolisiert wird, fügt sich sehr gut in den Funktionsverlauf ein. Dies kann als Indiz gesehen werden, dass die Ergebnisse der Studien sich gegenseitig bestätigen.

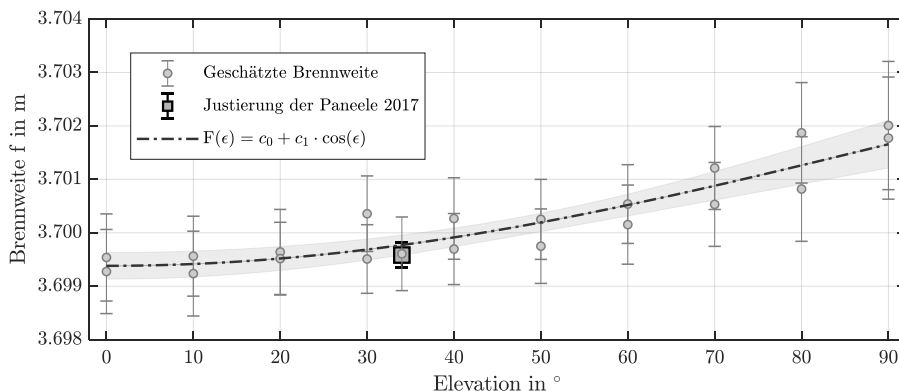


Abb. 7: Geschätzte Brennweiten in Abhängigkeit der Teleskopelevation; der funktionale Zusammenhang zwischen Elevation und Brennweite ist als gestrichelte Linie dargestellt, das Unsicherheitsband beträgt 2σ ; ein schwarzes Quadrat symbolisiert das Ergebnis aus LÖSLER et al. (2017).

5. Fazit

Mit der Forderung von GGOS, für den ITRF eine globale Positionsgenauigkeit von 1 mm zu erreichen (vgl. ROTHACHER ET AL. 2009), treten Einflussfaktoren in den Vordergrund, die bisher nicht oder nicht ausreichend bei der Analyse raumgeodätischer Messungen berücksichtigt werden konnten. Umso wichtiger werden entsprechende, auf die Anforderungen abgestimmte Messverfahren und Auswertestrategien, die diese Einflussfaktoren quantifizieren. Beispielsweise können elevationsabhängige gravitative Verformungen der Antennenoberfläche die Brennweite von Radioteleskopen verändern und so zu systematischen Abweichungen bei der VLBI-Auswertung führen, die sich wiederum in einer verzerrten Höhenkomponente der Teleskopposition niederschlagen.

In diesem Projekt wurde erstmals das durch Gravitation hervorgerufene elevationsabhängige Deformationsverhalten eines VGOS-Teleskops untersucht. Neu ist weiterhin der Einsatz eines UAS zur photogrammetrischen Erfassung. Die 21 durchgeführten Befliegung lieferten das Datenmaterial von 11 unterschiedlichen Elevationspositionen des Teleskops zwischen 0° und 90° . Hieraus konnten die Formparameter f und r des rotationssymmetrischen Ring-Fokus-Paraboloids in verschiedenen Elevationsstellungen bestimmt und ein funktionaler Zusammenhang zwischen Elevation und Brennweite hergestellt werden. Die signifikante Änderung der Brennweite von bis zu 2,3 mm kann durch geeignete Modelle im Analyseprozess von VLBI-Messungen berücksichtigt werden. Diese Studie ist ein erster Schritt zur Ableitung eines Kompensationsmodells zur Korrektur von elevationsabhängigen gravitativen Einflüssen an VGOS-Radioteleskopen.

Dank

Die Autoren danken Lars Wennerbäck und Christer Hermansson vom Onsala Space Observatory für ihre Unterstützung bei der Präparierung des Radioteleskops.

Diese Arbeit ist Teil des internationalen Projektes GeoMetre (*Large-scale dimensional measurements for geodesy*, JRP 18SIB01) und wurde aus Mitteln des von den Teilnehmerstaaten kofinanzierten EMPIR-Programms und aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm der Europäischen Union *Horizon 2020* finanziert.

Literatur

- BERGSTRAND, S., HERBERTSSON, M., RIECK, C., SPETZ, J., SVANTESSON, C.G. & HAAS, R. (2019): A gravitational telescope deformation model for geodetic VLBI. *Journal of Geodesy*, 93(5), 669–680. doi:10.1007/s00190-018-1188-1
- CUTLER, C.C.(1947): Parabolic-antenna design for microwaves. In: *Proceedings of the IRE*, 35(11), 1284–1294. doi:10.1109/JRPROC.1947.233571
- GREIWE, A. & GEHRKE, R. (2013a): Foveon Chip oder Bayer Pattern – geeignete Sensoren zur Aerophotogrammetrie mit UAS. In: Luhmann, T., Schumacher, C. (Hrsg.): *Photogrammetrie - Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik: Beiträge der 12. Oldenburger 3D-Tage 2013*, Wichmann, Offenbach, 334–343. ISBN: 978-3879075287

- GREIWE, A. & GEHRKE, R. (2013b): Kameras zur 3D-Modellierung mit UAS. In: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebner, G., Zagel, B. (Hrsg.): *Angewandte Geoinformatik 2013: Beiträge zum 25. AGIT-Symposium Salzburg*, Wichmann, Offenbach, 41–46.
- HAAS, R. (2013): The Onsala twin telescope project. In: Zubko, N., Poutanen, M. (Hrsg.): *Proceedings of the 21st European VLBI for Geodesy and Astrometry (EVGA) Working Meeting*, 61–66. ISBN: 978-9517112963
- HAAS, R., NOTHNAGEL, A., SCHUH, H. & TITOV, O. (1999): Explanatory supplement to the section 'Antenna Deformation' of the IERS Conventions (1996). In: Schuh, H. (Hrsg.): *Explanatory supplement to the IERS conventions (1996)*, Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut. (DGFI), München, 71, 26–29.
- HOLST, C., SCHUNCK, D., NOTHNAGEL, A., HAAS, R., WENNERBÄCK, L., OLOFSSON, H., HAMMARGREN, R. & KUHLMANN, H. (2017): Terrestrial Laser Scanner Two-FaceMeasurements for Analyzing the Elevation-Dependent Deformation of the Onsala Space Observatory 20-m Radio Telescope's Main Reflector in a Bundle Adjustment. *Sensors*, 17(8), 1833, 1–21. doi:10.3390/s17081833
- JÄGER, R., MÜLLER, T., SALER, H. & SCHWÄBLE, R. (2005): *Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren. Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern*. Wichmann, Heidelberg. ISBN: 978-3879076154
- LÖSLER, M., ESCHELBACH, C. & HAAS, R. (2017): Unified Model for Surface Fitting of Radio Telescope Reflectors. In: HAAS, R., ELGERED, G. (Hrsg.): *Proceedings of the 23rd European VLBI for Geodesy and Astrometry (EVGA) Working Meeting*, 29–34. ISBN: 978-91-88041-10-4
- LÖSLER, M., HAAS, R., ESCHELBACH, C., GREIWE, A. (2019): Gravitational Deformation of Ring-Focus Antennas for VGOS - First Investigations at the Onsala Twin Telescopes Project. *Journal of Geodesy*, doi: 10.1007/s00190-019-01302-5.
- LUHMANN, T. (2018): *Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen*, Wichmann, Berlin, 4. Auflage. ISBN: 978-3879074792
- NIELL A., WHITNEY A., PETRACHENKO B., SCHLÜTER W., VANDENBERG N. & HASE H. (2006): Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. In: BEHREND, D., BAVER, K.D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2005 Annual Report*, 13–40. NASA/TP-2006-214136
- NOCEDAL, J. & WRIGHT, S.J. (2006): *Numerical Optimization*. Springer, New York, 2. Auflage. doi:10.1007/978-0-387-40065-5
- NOTHNAGEL, A. (2009) Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astrometric VLBI. *Journal of Geodesy*, 83(8), 787–792. doi: 10.1007/s00190-008-0284-z
- PETRACHENKO, B., NIELL, A., BEHREND, D., COREY, B., BÖHM, J., CHARLOT, P., COLLIOD, A., GIPSON, J., HAAS, R., HOBIGER, T., KOYAMA, Y., MACMILLAN, D., MALKIN, Z., NILSSON, T., PANY, A., TUCCARI, G., WHITNEY, A., WRESNIK, J. (2009): Design aspects of the VLBI2010 system. NASA/TM-2009-214180
- 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. (Hrsg.): *The Global Geodetic Observing System. Meeting the Requirements of a Global Society on an Changing Planet in 2020*, Springer, Berlin, 237–272. doi:10.1007/978-3-642-02687-4_9
- SARTI, P., LUCA VITTUARI, L. & ABBONDANZA, C. (2009): Laser Scanner and Terrestrial Surveying Applied to Gravitational Deformation Monitoring of Large VLBI Tele-

- scopes' Primary Reflector. *Journal of Surveying Engineering*, 135(4), 136–148, doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000008
- WRESNIK, J., HAAS, R., BÖHM, J. & SCHUH, H. (2007): Modeling thermal deformation of VLBI antennas with a new temperature model. *Journal of Geodesy*, 81(6-8), 423–431. doi:10.1007/s00190-006-0120-2