

# Erfassung der Hauptreflektordeformation eines Radioteleskops durch UAV-gestützte Nahbereichsphotogrammetrie

ANSGAR GREIWE<sup>1</sup>, RAINER BRECHTKEN<sup>1</sup>, MICHAEL LÖSLER<sup>2</sup>,  
CORNELIA ESCHELBACH<sup>2</sup> & RÜDIGER HAAS<sup>3</sup>

*Zusammenfassung: Deformationen am Hauptreflektor eines Radioteleskops verursachen systematische Abweichungen in den Messungen und führen zu einer Verfälschung der abgeleiteten globalen Position und somit zu einem verzerrten Netzmaßstab im globalen geodätischen Bezugsrahmen. Um diese Systematiken zu minimieren, ist ein stabiler bzw. modellierbarer Strahlengang über den gesamten Arbeitsbereich des Teleskops notwendig. Zur messtechnischen Erfassung des Hauptreflektors konventioneller Radioteleskope werden gegenwärtig häufig Laserscanner verwendet, die eine Einzelpunktgenauigkeit von wenigen Millimetern erreichen.*

*Für diesen Beitrag wurde erstmals das elevationsabhängige Verformungsverhalten eines modernen, kompakten VGOS-spezifizierten VLBI-Radioteleskops photogrammetrisch untersucht. Um den Hauptreflektor des Teleskops in mehreren Neigungen zu erfassen, erfolgte die photogrammetrische Datenerhebung durch ein Unmanned Aircraft Vehicle (UAV) als Sensorplattform für eine leichtgewichtige Kompaktkamera. Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine Einzelpunktgenauigkeit von ca. 50 µm in 21 unterschiedlichen Bildverbänden erreicht.*

## 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 Reference Frame, ITRF) herangezogen werden. Radioteleskope bilden dabei die erdfesten Sensoren, die sich durch Drehungen um eine Azimut- und Elevationsachse auf Radioquellen, z. B. Quasare, ausrichten lassen. 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 mit kompakter Bauweise und erhöhter Ausrichtungsgeschwindigkeit formuliert. Die Erweiterung des internationalen VLBI-Netzes durch diesen neuen Teleskoptyp soll zu der durch GGOS (Global Geodetic Observing System) angestrebten Steigerung der Positionsgenauigkeit im globalen geodätischen Bezugsrahmen führen (vgl. ROTHACHER et al. 2009), und wird häufig als VLBI Global Observing System (VGOS) bezeichnet. 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

---

<sup>1</sup> Hochschule Bochum, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, Lennerhofstr. 140, D-44801 Bochum, E-Mail: [Ansgar.Greiwe, Rainer.Brechtken]@hs-bochum.de

<sup>2</sup> Frankfurt University of Applied Sciences, Labor für Industrielle Messtechnik, E-Mail: [Michael.Loesler, Cornelia.Eschelbach]@fb1.fra-uas.de

<sup>3</sup> Chalmers University of Technology, Gothenburg, SE, E-Mail: rudiger.haas@chalmers.se

den gesamten Elevationsbereich des Teleskops, sodass für alle Teleskoporientierungen die Signalwegänderungen  $300\ \mu\text{m}$  (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. Messtechnische Untersuchungen von VGOS-Teleskopen fehlen jedoch bisher.

Deformationen am Hauptreflektor werden neben Temperaturänderungen oder Wind vor allem durch Lastfalländerungen hervorgerufen und wirken sich auf die Struktur und damit auf die Empfangseigenschaften der Teleskope aus. Durch die Verlagerung des Eigengewichts der Antenne während des VLBI-Messprogramms wird der Antennenbrennpunkt in Abhängigkeit von der jeweiligen Elevationsstellung des Hauptreflektors verändert. Mit einer geeigneten Messmethode ist somit das elevationsabhängige Verformungsverhalten eines Teleskops zu erfassen und die Brennpunktvariation zu bestimmen.



Abb. 1: Nordöstliches Onsala Twin Teleskop (ONSA13NE) mit Hexacopter (Hexapilots HP-TS960) während der Befliegung in der  $0^\circ$  Elevationsposition. Im Hintergrund erkennbar: Südliches Teleskop in  $90^\circ$ -Stellung (Opferschalenstellung)

Für diese Studie wurde erstmals das Deformationsverhalten eines VGOS-spezifisierten Teleskops untersucht. Als Untersuchungsobjekt diente eines der 2017 in Betrieb genommenen Onsala Twin Teleskope (OTT; s. Abb. 1) am Onsala Space Observatory in Schweden (HAAS 2013). Das Observatorium befindet sich 40 km südlich von Göteborg. Die beiden baugleichen Radioteleskope stehen in einem Abstand von ca. 70 m zueinander, direkt an der Küste des Kattegats. Der Hauptreflektor hat die Form eines sogenannten Ring-Focus-Paraboloids und besitzt einen Durchmesser von 13,2 m. Der Scheitelpunkt des Hauptreflektors befindet sich in etwa auf 10 m Höhe über dem

Grund. Angestrebt wurde die Untersuchung der Antennengeometrie bei Lastfalländerung, also bei Änderung der Teleskopausrichtung zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  Elevation.

## 2 Erfassung der Reflektoroberfläche

Um die Verformung der Hauptreflektoroberfläche in unterschiedlichen Elevationsstellungen zu erfassen, könnte ein terrestrischer Laserscanner (TLS) nahe des Subreflektors an dessen Aufhängung kardanisch befestigt werden (HOLST et al. 2017; BERGSTRAND et al. 2019). Durch dieses Aufnahmeverfahren wird die Oberfläche des Hauptreflektors mit einer Genauigkeit von ca. 1,5 mm erfasst, hervorgerufen durch zufällige und systematische Anteile (HOLST et al. 2017). Nachteil dieses Verfahrens ist die nicht vollständige Erfassung der Antennenoberfläche, da der Tubus mit der Empfangseinheit große Abschattungen auf der zu scannenden Fläche erzeugt (Abb. 1).

Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen für diese VGOS-Radioteleskope wurde für diese Untersuchungen die photogrammetrische Erfassung als alternatives Aufnahmeverfahren gewählt. Vorteil der photogrammetrischen Aufnahme gegenüber einer Aufnahme per TLS ist die vollständige Erfassung der Oberfläche durch die wechselnden Kamerastandpunkte, die durch die Aufnahmekonfiguration des photogrammetrischen Blockverbandes vorgegeben werden. Somit werden auch Oberflächenpunkte unterhalb etwaiger Streben am Subreflektor erfasst.

Die Nahbereichsphotogrammetrie erlaubt - unter optimalen Voraussetzungen (metrische Kamerasysteme, optimale Aufnahmekonfiguration) - Einzelpunktgenauigkeiten von  $5 \mu\text{m} + 5 \text{ ppm}$  zu erreichen (LUHMANN 2018). Dieses Messverfahren wird aus diesem Grund auch eingesetzt, um die einzelnen Teleskoppaneele des Hauptreflektors formschlüssig beim Aufbau des Teleskops vor Ort zu justieren (Abb. 2).



Abb. 2: Einsatz eines Krans zur Montage und Ausrichtung der Paneele

Für das untersuchte Teleskop wurden die Paneele durch den Teleskophersteller in einer Elevationsstellung von  $34^\circ$  nach der Montage abschließend eingemessen und so der Nachweis für die Einhaltung der Sollgeometrie erbracht. Bei dieser Messung werden Abweichungen von der Sollgeometrie in anderen Elevationsstellungen des Hauptreflektors nicht ermittelt.

## 2.1 UAV gestützte Aufnahme

Um die erforderlichen Kamerastandpunkte für eine photogrammetrische Aufnahme zu realisieren, ist bei geringen Elevationen des Hauptreflektors die Verwendung eines Krans denkbar, wie in Abb. 2 dargestellt. Die Aufnahmekonfiguration entspräche in etwa der einer Fassadenaufnahme. Wird der Hauptreflektor in einer Elevation von mehr als  $40^\circ$  geneigt, ist die Positionierung per Kran für einen Rundumverband als Aufnahmekonfiguration herausfordernd.

Um Aufnahmen für den gesamten Elevationsbereich des Teleskops zu erhalten, wurde erstmals ein Hexacopter eingesetzt, der mit einem Gesamtgewicht von ca. 10 kg und einem Durchmesser von ca. 1,8 m in der Lage ist, Nutzlasten von bis zu 2500 g zu tragen (Abb. 3).



Abb. 3: Hexapilots HP-TS960 (links) und für die Aufnahmen eingesetzter Kameragimbal (rechts) zur Orientierung der Kamera auf das Messobjekt

Das UAV wird durch eine Funksteuerung (2,4 GHz) durch den Piloten manuell gesteuert. Das Kamerabild kann durch einen Monitor am Boden betrachtet werden und die Auslösung der Aufnahmen manuell per Funksteuerung erfolgen. Zudem verfügt der Copter über einen halbautonomen Flugmodus, bei dem die Flugtrajektorie in Form von Wegpunkten, die Fluggeschwindigkeit und die geplanten Auslösezeitpunkte für die Aufnahmen durch ein Wegpunktskript in Form einer Textdatei vorgegeben werden. Für die vorliegende Untersuchung wurde die Flugtrajektorie vorab geplant und automatisiert durch den Copter unter den definierten Geschwindigkeiten geflogen. Aufgrund der schwierigen Windverhältnisse am Messobjekt und der kurzen Aufnahmedistanzen erfolgte die Ausrichtung und Auslösung der Kamera manuell durch den Piloten.

Das System ist modular aufgebaut und lässt sich individuell konfigurieren. Halterung und Kamera können problemspezifisch und insbesondere herstellerunabhängig eingesetzt werden. Ausgestattet mit zwei 10.000 mAh Akkus beträgt die Flugzeiten für eine Mittelformatkamera (2500 g) ca. 15 Minuten. Eine Kompaktkamera (Sensor im APS-C Format) ermöglicht durch ihr geringes Gewicht von ca. 400 g mit entsprechender Halterung eine Flugzeit von 25 Minuten.

## 2.2 Kamerasystem

Für ein Kamerasystem zur Nahbereichsphotogrammetrie existieren unterschiedliche Anforderungen im Hinblick auf die optische Abbildungsgüte, geometrische Stabilität, Temperaturunempfindlichkeit, Auflösungsvermögen und Schockresistenz. Insbesondere eine feste Sensor-Objektiv-Verbindung ist unabdingbar, um gute Ergebnisse zu erzielen. Diese Forderungen werden sicherlich

von vielen Systemen am Markt erfüllt, lediglich das Gewicht dieser Kameras ermöglicht kaum Flugzeiten von 25 Minuten mit dem eingesetzten UAV.

Die Forderung nach einer festen Sensor-Objektiv-Verbindung erfüllt noch am besten die Merrill-Baureihe des Herstellers Sigma. Diese Kamera wird mit einer fest montierten, nicht wechselbaren Festbrennweiten-Optik ausgeliefert. Das Objektiv verfügt bis auf die Fokussierlinse über keine variablen Bauteile (Objektivtubus fest, s. Abb. 4). Ebenso fehlt der Kamera ein Bildstabilisator. Objektiv und Sensor sind fest mit dem Gehäuse verbunden und führen zu einem stabilen Bildhauptpunkt. In einer Serie von Testfeldkalibrierungen an fünf unterschiedlichen Tagen wurde für die eingesetzte Kamera eine Standardabweichung der Kamerakonstante von  $4,8 \mu\text{m}$  und für den Bildhauptpunkt von  $1,1 \mu\text{m}$  in x- sowie  $2,2 \mu\text{m}$  in y-Richtung ermittelt. Aufgrund dieser Werte wurde im Rahmen der Erfassung vor Ort davon ausgegangen, dass es sich zumindest um eine geometrisch stabile Kamera zwischen einem Ein- und Ausschaltvorgang handelt (Fokussierlinse wird beim Einschalten bewegt).



Abb. 4: Der Objektivtubus (links) der Sigma DP3 Merrill ist fest mit dem Gehäuse verbaut

Im Hinblick auf das geforderte Auflösungsvermögen der Kamera sind sowohl Objektiv als auch Sensor maßgebliche Komponenten. Das Objektiv ist bei der Merrill Baureihe vom Hersteller speziell auf die Geometrie (Auflagemaß) der Kamera berechnet. Bereits bei Offenblende verfügt die Kamerareihe über ein sehr gutes Abbildungsverhalten (SPRECKELS et al. 2016). Zudem verfügt das Objektiv über einen Zentralverschluss und nicht über einen Rolling-Shutter, der insbesondere bei den hochfrequenten Schwingungen am Copter, hervorgerufen durch die Propeller, die Bildmessgenauigkeit beeinflussen würde.

Für den Mikrokontrast ist zudem der Sensor maßgeblich. Die verwendete Merrill-Baureihe verfügt über einen Foveon-Sensor in APS-C Größe ( $16 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ ) anstelle eines Bayer-Patterns, der in allen sonstigen CCD- oder CMOS-Kamerasensoren verwendet wird (GREIWE & GEHRKE 2013a). Die Farbfilteranordnungen eines Bayer-Patterns erfordert Farbbinterpolationen mit Nachbarpixeln, um die volle RGB-Farbinformation zu erhalten. Im Gegensatz hierzu erfasst ein Foveon-Sensor für jedes Pixel die volle RGB-Farbinformation ohne Interpolation (vgl. GREIWE & GEHRKE, 2013b). Durch diese Sensortechnik weisen die Bilder einen besseren Mikrokontrast auf und ermöglichen folglich auch eine genauere Bildmessung der Zielmarken.

### 2.3 Signalisierung

Für die photogrammetrische Aufnahme wurde das Objekt mit 72 Zielmarken signalisiert, welche gleichmäßig auf der Hauptreflektoroberfläche verteilt waren. Zum Einsatz kamen 12 bit codierte Schwarz-Weiß-Marken, auf Haftetiketten mit einem Durchmesser von ca. 15 cm (Abb. 5). Die Anordnung der Zielmarken erfolgte in drei konzentrischen Kreisen mit  $2 \times 24$  und  $1 \times 12$  Elementen. Somit wurde pro Paneel des Hauptreflektors mindestens eine Zielmarke angebracht. Weitere 12 Marken waren in der Mitte des Hauptreflektors im Bereich des Tubus und vier Zielmarken am Subreflektor angebracht. Zudem wurde ein Kreuz mit sechs codierten Marken am Subreflektor positioniert.



Abb. 5: Zielmarken am Hauptreflektor, Kreuz mit Passpunkten zur Lagerung sowie Maßstäbe vorne am Subreflektor, an den Streben und am Rand des Hauptreflektors

Die Koordinaten der sechs Punkte wurden zuvor im Labor photogrammetrisch bestimmt und als Datumspunkte zur Definition des lokalen Koordinatensystems der 3D Punkte der jeweiligen Bündelblockausgleichung verwendet. Die Maßstabsinformation für die Auswertung wurde durch insgesamt sechs kalibrierte Kohlefasermaßstäbe mit einer Länge von ca. 1,3 m realisiert. Die Maßstäbe umschließen das Messvolumen, indem zwei an den Streben zum Subreflektor, drei am Rand des Hauptreflektors und einer am Subreflektor angebracht wurden.

### 2.4 Aufnahmekonfiguration

Für die Aufnahmen wurde eine Pixelgröße von 1 mm am Objekt angezielt. Dies führt bei dem zu Verfügung stehenden Foveon Chip mit einem Pixelpitch von  $5 \mu\text{m}$  zu einem Bildmaßstab von 1:200. Um aus flugtechnischer Sicht eine größtmögliche Aufnahmedistanz zu erreichen, wurde die DP3 mit einer Brennweite von 50 mm anstelle der alternativ zur Verfügung stehenden DP2

(Brennweite 30 mm) gewählt. Mit Blende 8.0 wurde das Objektiv dreifach abgeblendet und auf 10 m Aufnahmeentfernung fokussiert. Dies führte zu einer Schärfentiefe von ca. 21 m. Der vordere Schärfe­punkt lag bei ca. 6 m, der hintere Schärfe­punkt bei ca. 27 m Aufnahmeentfernung. Die Belichtungszeit wurde aufgrund der kleinen Blende mit 1/640 s. eingestellt. Die verwendete Fluggeschwindigkeit von 0,2 m/s führte bei dieser Verschlusszeit zu einer Bewegungsunschärfe von ca. 1/3 Pixel während der Belichtung.

Die eingesetzte Kamera ist zwar leichtgewichtig, aber nicht über einen längeren Zeitraum geometrisch stabil. Da die Stromversorgung der Kamera durch den Hexacopter erfolgte, war es erforderlich, die photogrammetrische Erfassung einer Elevationsposition des Hauptreflektors in einem Flug ohne Zwischenlandung bzw. Akkuwechsel durchzuführen.

Resultierend aus der maximalen Flugzeit von 25 Minuten und der maximalen Fluggeschwindigkeit von 0,2 m/s wurde eine Flugkonfiguration bestehend aus zwei horizontalen Flugbahnen vor dem Subreflektor und zwei Kreisen geplant (Abb. 6). 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 kürzeste Aufnahme­distanz (Abstand zwischen Fluglinien und Subreflektor) betrug ungefähr 7 m, die weiteste Distanz 24 m (Abstand zwischen äußeren Kreis und Hauptreflektor).

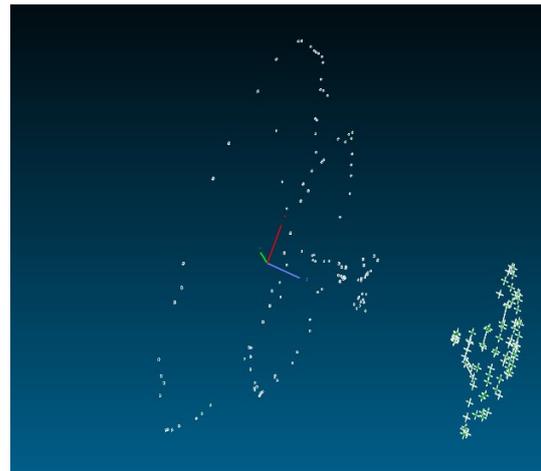
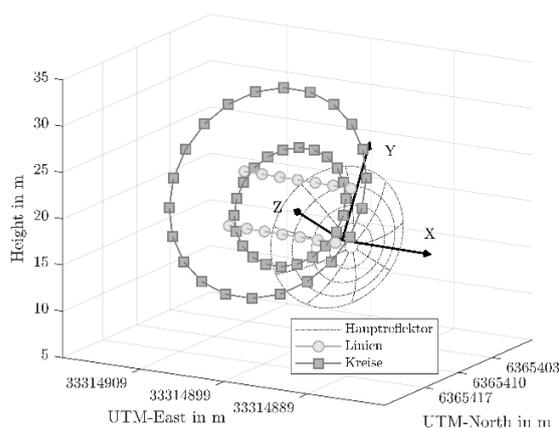


Abb. 6: Geplante (links) und tatsächlich geflogene Aufnahme­konfiguration für eine Elevationsposition

Die Kamera wurde jeweils manuell auf die Teleskopoberfläche ausgerichtet und ausgelöst. Mit einer Bildfolgezeit von ca. 5 Sekunden führte dies zu einem Aufnahme­abstand von ca. 1 m. Kreisbahnen und horizontale Linien führen zu einem Gesamtflugweg von ca. 150 m. Somit sind für einen Flug mindestens 150 Aufnahmen möglich.

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 lieferte insgesamt 21 getrennt voneinander auswertbare Datensätze.

## 2.5 Auswertung und Ergebnisse

Die einzelnen Bildverbände wurden mit AICON 3D Studio ausgewertet. Pro Epoche standen für die Auswertung nach Löschung unscharfer Bilder ca. 130 Aufnahmen zur Verfügung (mindestens 117, in zwei Fällen 227).

Wie in Abb. 7 ersichtlich, sind drei Flüge mit mehr als 200 Aufnahmen durchgeführt worden. Hierbei handelt es sich um drei am ersten Flugtag durchgeführten Flüge bei 10°, 20° und 90° Elevation, bei denen die zu Verfügung stehende Flugzeit von etwa 25 Minuten maximal ausgenutzt wurde. Am zweiten Flugtag wurden die restlichen Elevationsstellungen des Teleskops befliegen und die in Abbildung 6 dargestellte Flugkonfiguration strikt eingehalten. Dies ermöglichte die Reduktion der Flugzeit um ca. fünf Minuten auf ca. 20 Minuten Gesamtflugzeit und die Aufnahme der geplanten 150 Aufnahmen.

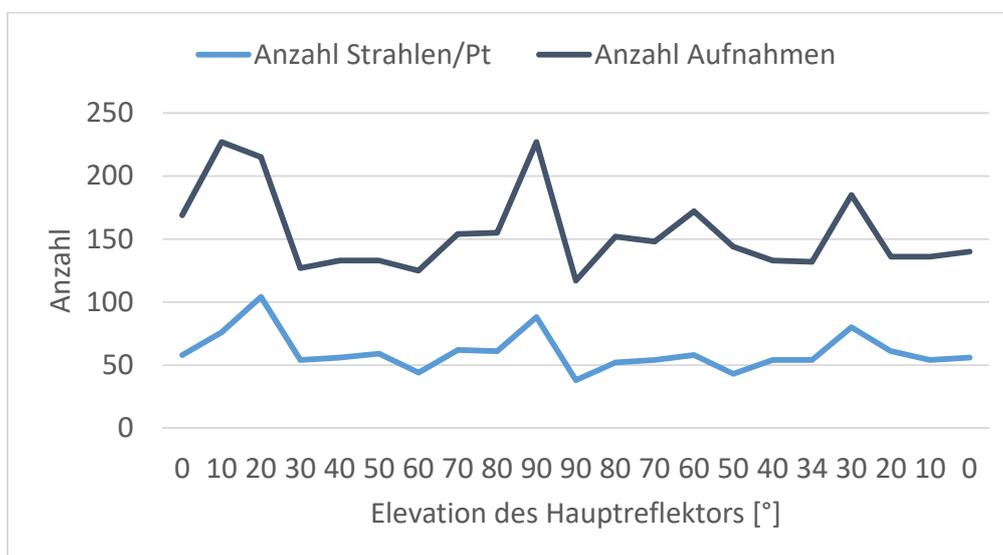


Abb. 7: Anzahl der Aufnahmen und Strahlen pro Punkt

Die Bündelblockausgleichung wurde für diese Untersuchung nur mit den signalisierten Zielmarken durchgeführt. Zusätzliche von AICON erkannte Punkte wurden nicht in die Auswertung aufgenommen, da es sich teilweise um fehlinterpretierte Panneelzwischenräume oder versenkte Schraubenköpfe handelte. In der Regel wurde jede Zielmarke in ca. 50 Aufnahmen, mindestens jedoch in 38 Aufnahmen gemessen.

Für jeden Bildverband wurde die Kamerakalibrierung in situ durchgeführt und pro Bildverband ein zugehöriges Kameramodell im Zuge der Bündelblockausgleichung bestimmt.

Die Standardabweichung in Aufnahme­richtung (z) war erwartungsgemäß am höchsten, wie aus der Größe und Orientierung der resultierenden Konfidenzellipsoide der signalisierten Zielmarken nach der Bündelblockausgleichung in Abb. 8 ersichtlich.

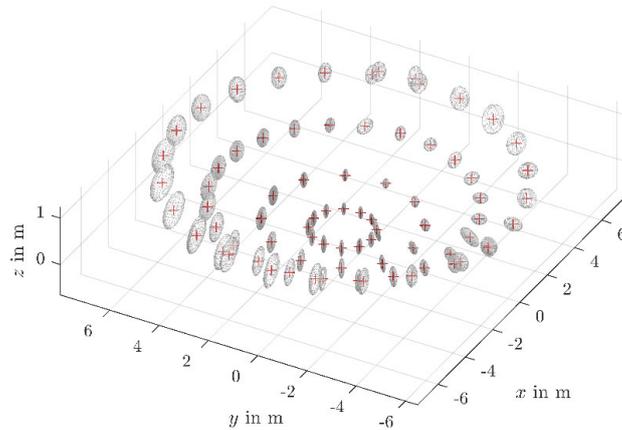


Abb. 8: Resultierende Konfidenzellipsoide nach der Bündelblockausgleichung für die signalisierten Zielmarken auf der Hauptreflektoroberfläche

Das quadratische Mittel der Standardabweichung eines Einzelpunktes in z-Richtung betrug in fast allen Epochen weniger als 50  $\mu\text{m}$ , die maximale Standardabweichung weniger als 100  $\mu\text{m}$ . Nicht alle der 21 Flugmissionen konnten optimal durchgeführt werden, da am Teleskop schwierige Windverhältnisse (Windschatten/Wirbelschleppen) herrschten. Zudem musste die Ausrichtung der Kamera in jeder Elevationsstellung neu angepasst werden, da die 90°-Stellung einem Flug mit Nadiraufnahmen, die 0° Stellung dem Anwendungsfall der Fassadenaufnahme entspricht. Insbesondere die Elevationen ab 40° bis 80° erfordern einige Übung des Piloten, somit sind die Genauigkeiten in der zweiten Befliegung dieser Elevationen bei annähernd gleicher Anzahl der Aufnahmen höher, wie in Abb. 9 im rechten Teil des Diagramms mit abnehmenden Elevationswerten dargestellt.

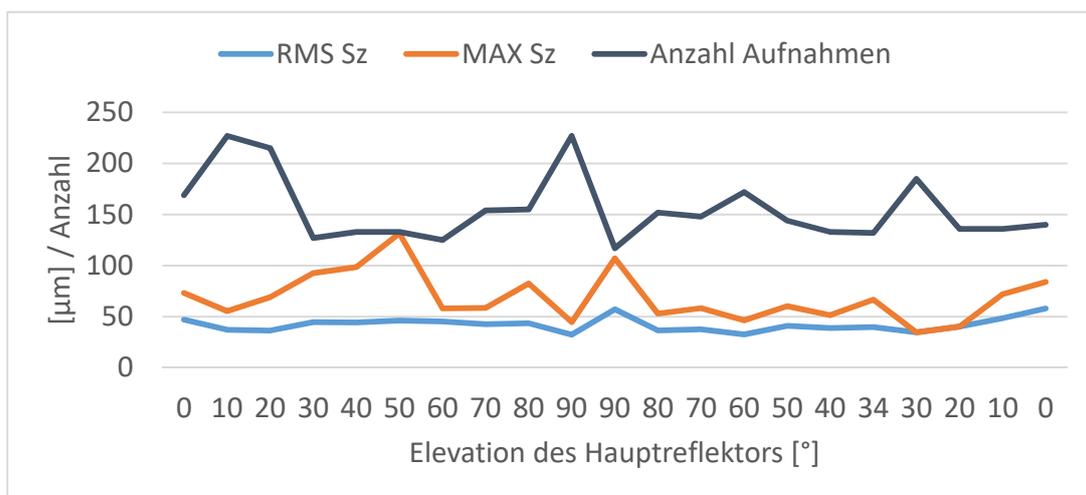


Abb. 9: Quadratisches Mittel und Maximale Standardabweichung der Oberflächenpunkte in z-Richtung

Die Abnahme der Genauigkeiten in den niedrigen Elevationsstellungen des Teleskops lassen sich durch die Aufnahmekonfiguration erklären. In den niedrigen Elevationsstellungen konnte keine optimale Blockkonfiguration geflogen werden (Abb. 10). Die geplante Aufnahmekonfiguration (Kreise, Abb. 6) hätte aufgrund der niedrigen Flughöhe vor der nahezu senkrecht stehenden Hauptreflektoroberfläche entweder zu negativen oder sehr geringen Flughöhen geführt. Vollständige Kreise konnten ab einer Elevationsstellung von  $30^\circ$  geflogen werden, in niedrigeren Elevationsstellungen führte eine Mindestflughöhe zu Halbkreisen, was zu schlechterer Punktgenauigkeit bei vergleichbarer Aufnahmeanzahl führte.

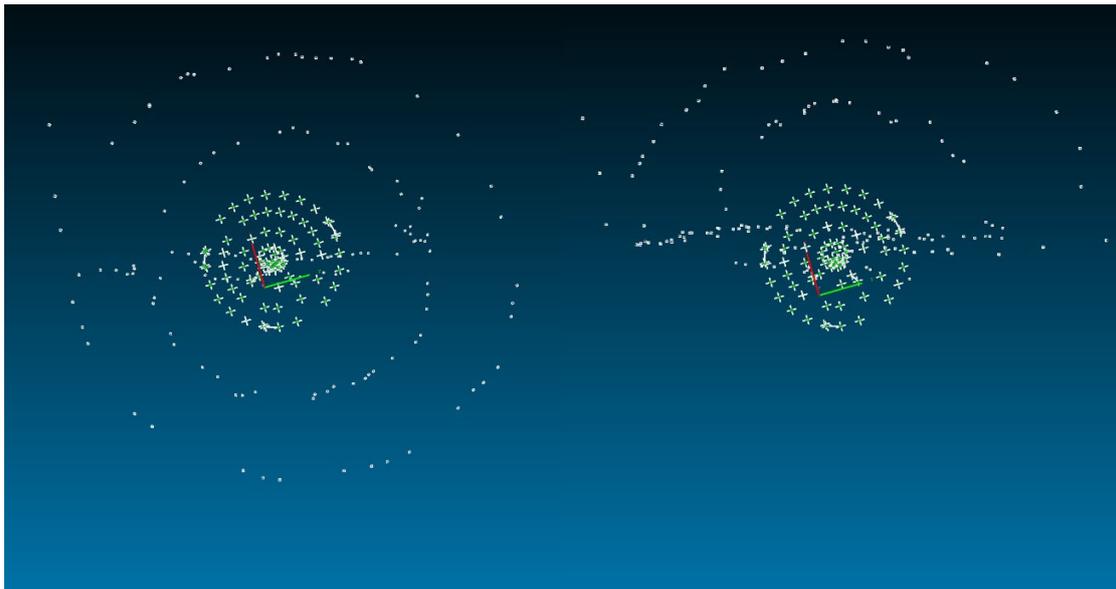


Abb. 10: Flugkonfiguration in Aufnahmerichtung für  $30^\circ$  und  $0^\circ$  Elevationsstellung

### 3 Fazit & Ausblick

Die Erfassung der Oberflächenpunkte für eine Deformationsanalyse ist erstmals mit einem UAV erfolgreich durchgeführt worden. Hierbei kam eine geeignete Kompaktkamera als Sensor zum Einsatz, welche durch das geringe Gewicht die hohe Anzahl an Aufnahmen ermöglichte (Flugzeit) und trotzdem eine hohe Bildqualität und eine zumindest kurzzeitige geometrische Stabilität während der Aufnahme aufweist. Die geforderten Punktgenauigkeiten sind in allen 21 Flugkampagnen konstant erreicht worden.

Limitierende Faktoren sind hierbei die Aufnahmekonfiguration in niedrigen Elevationsstellungen und die Anzahl der Aufnahmen pro Bildverband. Ersteres kann in Zukunft durch eine optimierte Aufnahmekonfiguration erreicht werden. Die Anzahl der Aufnahmen pro Verband sind entweder durch eine längere Flugzeit oder durch eine Kamera mit schnellerer Bildfolgezeit möglich, die allerdings den geschilderten Anforderungen (Gewicht, Stabilität, Optik) genügen muss.

Für jeden Datensatz konnte ein Ring-Fokus-Paraboloid geschätzt werden. Abbildung 11 zeigt die daraus abgeleiteten Brennweiten in Abhängigkeit der Elevationsstellung des Teleskops. Die größte Brennweite liegt erwartungsgemäß bei einer Elevation von  $90^\circ$ , 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).

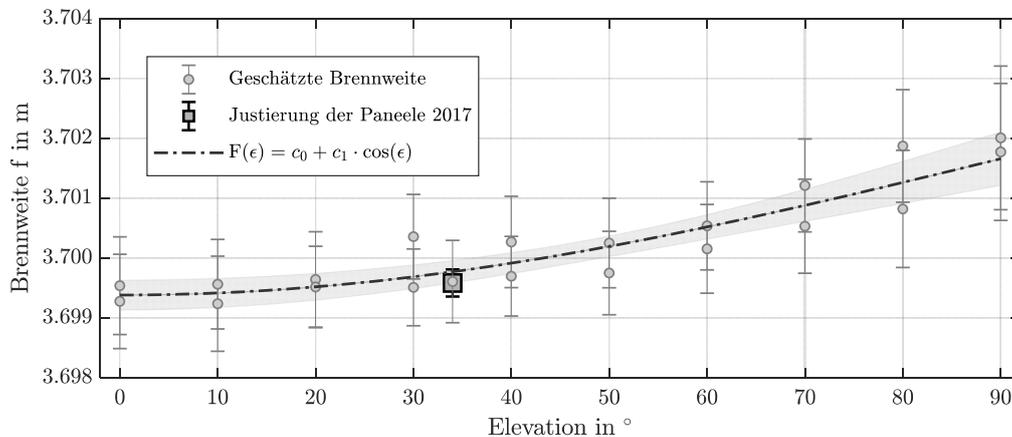


Abb.11: Geschätzte Brennweiten in Abhängigkeit der Teleskopelevation; der funktionale Zusammenhang zwischen Elevation und Brennweite ist als gestrichelte Linie dargestellt, das Unsicherheitsband beträgt  $2\sigma$ ; ein schwarzer Stern symbolisiert das Ergebnis aus LÖSLER et al. (2019).

## 4 Dank

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

## 5 Literaturverzeichnis

- BERGSTRAND, S., HERBERTSSON, M., RIECK, C., SPETZ, J., SVANTESSON, C.G. & HAAS, R., 2019: A gravitational telescope ldeformation model for geodetic VLBI. *Journal of Geodesy* **93**(5), 669-680. doi:10.1007/s00190-018-1188-1.
- 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.
- 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.
- 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* **93**(10), S. 2069-2087. 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., Bayer, K.D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2005 Annual Report*, 13-40. NASA/TP-2006-214136.
- 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 a 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 Telescopes' Primary Reflector. *Journal of Surveying Engineering* **135**(4), 136-148, doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.00000008.
- SPRECKELS, V., SCHLIENKAMP, A., GREIWE, A. & EBERHARDT, L., 2016: Eignung von ALS, Aero- und UAS-Photogrammetrie zur Früherkennung und Erfassung von Tagesbrüchen. Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF in Bern, Schweiz – Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band **25**, 97-112.