

Frequenzabhängige Modellierung von Signalwegvariationen an VLBI-Radioteleskopen

Frequency-dependent Modelling of Signal Path Variations at VLBI Radio Telescopes

Michael Lösler | Gerhard Kronschnabl | Christian Plötz | Alexander Neidhardt | Cornelia Eschelbach

Zusammenfassung

Radioteleskope, die zur Radiointerferometrie auf langen Basen in der Geodäsie eingesetzt werden, sind große bauliche Anlagen. Aufgrund ihrer Dimension sind sie keine starren Objekte, sondern weisen verschiedene Deformationsmuster auf, die zu Laufzeitvariationen oder Änderungen an der Referenzpunktposition führen. In der jüngeren Vergangenheit sind lastfallabhängige Deformationen und deren Auswirkungen auf die VLBI-Produkte zunehmend in den Fokus gerückt. Hierzu zählt insbesondere das Erfassen von Deformationen an der Empfangseinheit, welche elevationsabhängige Laufzeitvariationen von z.T. mehreren Millimetern hervorrufen. Zur Modellierung der Signalwegänderungen werden die erfassten Deformationen gewichtet. Das Gewichten erfolgt dabei zonal und basiert auf der intrinsischen Illumination der Apertur. Die Verstärkung durch das verwendete Empfangshorn ist jedoch frequenzabhängig. Während konventionelle Radioteleskope im X-Band bei etwa 8,4 GHz beobachten, ist die neue Generation sogenannter VGOS-Radioteleskope für einen Breitbandempfang zwischen 2 GHz und 14 GHz konzipiert. In diesem Betrag wird evaluiert, welche Funktion sich zur Beschreibung der Illumination eignet und ob die Signalwegänderung insbesondere bei VGOS-Radioteleskopen frequenzabhängig zu modellieren ist. Hierzu werden insgesamt 14 Datensätze von zwei verschiedenen Empfangshörnern untersucht, die bei den Twin Radioteleskopen am Geodätischen Observatorium Wettzell eingesetzt werden.

Schlüsselwörter: Illuminationsfunktion, Radioteleskop, Signalwegvariation, Deformation, VLBI, VGOS

Summary

Radio telescopes used for Very Long Baseline Interferometry are large facilities. Due to the telescope dimension, radio telescopes are affected by several deformation patterns. These deformations yield, for instance, signal path variations and changes in the reference point position. Deformations during load changes have been investigated in several studies in recent years, including deformations at the receiver unit, which cause elevation-dependent signal path variations of several millimetres in some cases. To model signal path variations, the observed deformation patterns are combined using a zonal weighting scheme obtained by the intrinsic illumination function of the telescope under investigation. However, the gain of the feed-horn depends on the frequency. Whereas legacy radio telescopes observe in X-band at about

8.4 GHz, the new generation of so-called VGOS radio telescopes is designed for broadband reception between 2 GHz and 14 GHz. This contribution evaluates suitable functions to describe the illumination, and investigates a frequency-dependent modelling of the signal path variations – especially for VGOS-specified radio telescopes. For that purpose, 14 datasets obtained from two different feed-horns used by the Twin Telescopes at Geodetic Observatory Wettzell are evaluated.

Keywords: illumination function, radio telescope, signal path variation, deformation, VLBI, VGOS

1 Einleitung

Die Realisierung des globalen geodätischen Referenzsystems (GGRS) basiert auf der Kombination von verschiedenen geodätischen Raumverfahren. Hierzu zählen die Radiointerferometrie auf langen Basen (VLBI; engl. Very Long Baseline Interferometry), die Entfernungsmessungen zu Satelliten bzw. zum Mond (SLR/LLR; engl. Satellite/Lunar Laser Ranging), das Doppler-Positionierungs- und Bahnbestimmungssystem DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), sowie verschiedene globale Navigationssatellitensysteme (GNSS). Die Realisierung des GGRS wird als Globaler Geodätischer Referenzrahmen bezeichnet und ergibt sich aus konkreten physischen Punkten auf der Erdoberfläche: den Referenzpunkten der geodätischen Raumverfahren (Seitz et al. 2017). Für einen zuverlässigen Referenzrahmen sind raumzeitlich stabile Referenzpunkte wesentlich. Das Global Geodetic Observing System (GGOS) strebt eine globale Positionsgenauigkeit von 1 mm an, um die notwendige Grundlage für eine konsistente Georeferenzierung bspw. für die Bewertung des globalen Meeresspiegelanstiegs zu schaffen (Rothacher 2013). Derzeitige Realisierungen wie der International Terrestrial Reference Frame (ITRF) erreichen diese Genauigkeiten nicht. Eine potenzielle Ursache sind unberücksichtigte systematische Abweichungen in den geodätischen Raumverfahren.

In diesem Beitrag beschränken wir uns auf systematisch wirkende Einflüsse bei VLBI-Radioteleskopen und gehen im Speziellen auf lastfallabhängige Deformationen ein. VLBI-Radioteleskope sind große, zumeist freistehende bauliche Anlagen. Aufgrund ihrer Dimension sind Radio-

teleskope keine starren Objekte, sondern weisen verschiedene Verformungsmuster auf, die u. a. Laufzeitvariationen oder Änderungen an der Referenzpunktposition hervorrufen (Schuh 1987, S. 68 f.). So führen Variationen in der Umgebungstemperatur zu thermischen Verformungen, die insbesondere die vertikale Koordinatenkomponente des Referenzpunktes beeinflussen (Wresnik et al. 2006). Messungen am 20 m Radioteleskop Wettzell (RTW) mittels Invardraht zeigen tageszeitliche und saisonale Variationen von 1 mm bzw. 3 mm, die auf Temperaturänderungen zurückführbar sind (Zerneck 1999). Ähnliche Größenordnungen konnten aus tachymetrischen Langzeitmessungen auch für die 2013 fertiggestellten Twin Teleskope Wettzell (TTW) am Geodätischen Observatorium Wettzell (GOW) von Mähler et al. (2018) nachgewiesen werden. Lösler et al. (2010) zeigen weiterhin, dass der tägliche Sonnenverlauf die horizontalen Koordinatenkomponenten des Referenzpunktes beeinflusst und Variationen im Submillimeterbereich hervorrufen kann.

Die Auswirkung von lastfallabhängigen Verformungen der Teleskopstruktur auf abgeleitete VLBI-Produkte ist insbesondere in der jüngeren Vergangenheit in den Fokus verschiedener Studien gerückt. Lösler und Eschelbach (2010) untersuchen mittels Neigungsmessungen elevationsabhängige Veränderungen am RTW-Referenzpunkt und detektieren horizontale Variationen von ca. 50 μm . Die Entwicklung von präzisen Sensoren zur flächenhaften dreidimensionalen Erfassung wie bspw. Laserscanner oder innovative Kombinationen von photogrammetrischen Messsystemen und neuartigen Trägerplattformen wie unbemannte Luftfahrzeuge bieten die Möglichkeit, notwendige Daten zur Erfassung von Deformationen an der Empfangseinheit schnell und mit hinreichender Genauigkeit zu registrieren. In diesem Kontext sei für Messungen mittels Laserscanner exemplarisch auf die Arbeiten von Sarti et al. (2009), Holst et al. (2015) und Weinhuber et al. (2022) verwiesen. Die Eignung von unbemannten Luftfahrzeugen zur Erfassung von Deformationen an der Empfangseinheit von Radioteleskopen weisen Greiwe et al. (2020) erstmals nach.

Varenius et al. (2021) zeigen, dass lastfallabhängige Verformungen an der Empfangseinheit zu systematischen Signalwegabweichungen führen, die insbesondere die vertikale Stationskoordinate um z. T. mehrere Millimeter verzerren. Auf der Basis von messtechnisch erfassten Deformationen an der Empfangseinheit, die unter Berücksichtigung einer teleskopspezifischen Illuminationsfunktion gewichtet werden, lassen sich Signalwegvariationen modellieren und in der VLBI-Datenanalyse korrigieren. Bei der Erstellung des ITRF2020 wurden erstmals Gravitationsdeformationen an VLBI-Radioteleskopen bei der Analyse berücksichtigt, wobei für lediglich sieben Stationen Korrekturmodelle vorlagen (Shoushtari et al. 2020, Haas 2022). Der Internationale VLBI Service für Geodäsie und Astrometrie (IVS) hebt daher explizit die Bedeutung und Notwendigkeit dieser »Untersuchungen von Radioteleskopen zur Modellierung von Gravitationsdeformationen« in der 2019 verabschiedeten Resolution IVS-Res-2019-01 hervor (IVS 2019).

In diesem Beitrag wird die Berücksichtigung von frequenzabhängigen Illuminationsfunktionen bei der Modellierung von Signalwegvariationen untersucht. Für geodätische VLBI-Anwendungen im konventionellen VLBI-Netz stellen Messungen im X-Band bei etwa 8,4 GHz die eigentliche Beobachtungsgröße dar (Schmid 2009, S. 29). Die neue Generation von Radioteleskopen, die im Rahmen des sogenannten VLBI Global Observing System (VGOS) konzipiert und errichtet wurden, sind hingegen für einen Breitbandempfang zwischen 2 GHz und 14 GHz ausgelegt (Petrachenko et al. 2011). Die Verstärkung durch das verwendete Empfangshorn (Feed-Horn) ist frequenzabhängig. Es ist somit zu evaluieren, ob bei der Modellierung der Signalwegvariationen neben den elevationsabhängigen Verformungen an der Empfangseinheit auch eine frequenzabhängige Illuminationsfunktion zu berücksichtigen ist.

In Abschnitt 2 wird zunächst das Standardmodell zur Modellierung von Signalwegänderungen vorgestellt, welches die Illuminationsfunktion zum Ableiten von spezifischen Gewichten heranzieht. Weiterhin wird eine alternative Methode vorgestellt, die die Illuminationsfunktion direkt integriert. Die Twin Radioteleskope Wettzell werden in Abschnitt 3 kurz beschrieben. Beide VLBI-Radioteleskope nutzen verschiedene Empfangshörner. Für diese Hörner liegen jeweils sieben Datensätze für verschiedene Frequenzen vor, die erstmals eine frequenzabhängige Betrachtung der Illuminationsfunktion im Kontext der Modellierung von Signalwegvariationen ermöglichen. Abschnitt 4 beschreibt zunächst zwei verbreitete funktionale Modelle zur Parametrierung der Illuminationsfunktion und stellt anschließend die Ergebnisse vergleichend gegenüber. Die resultierenden Signalwegvariationen für die TTW werden in Abschnitt 5 präsentiert. Abschnitt 6 fasst diesen Beitrag zusammen.

2 Modellierung von Signalwegvariationen

Clark und Thomsen (1988) untersuchen elevationsabhängige Laufzeitvariationen an Radioteleskopen, die durch gravitative Deformationen an der Empfangseinheit hervorgerufen werden, und leiten erstmals ein Kompensationsmodell für Primärfokusantennen her. Das vorgeschlagene Modell berücksichtigt neben Brennweitenänderungen ΔF auch axiale Verschiebungen des Scheitelpunktes ΔV und des Empfängers ΔR . Die gesamte Signalwegvariation resultiert aus einer gewichteten Summenbildung dieser drei Deformationsanteile, wobei die einzelnen Gewichte α_F , α_V und α_R aus der teleskopspezifischen Illuminationsfunktion resultieren. Die Illuminationsfunktion $I(\gamma)$ beschreibt hierbei die vom Einfallswinkel γ abhängige Signalsensitivität der Apertur (Nothnagel 2020). Eine wesentliche Modellannahme von Clark und Thomsen (1988) ist, dass sich alle drei Deformationsanteile auf die identische optische Achse der Empfangseinheit beziehen und hierdurch ein

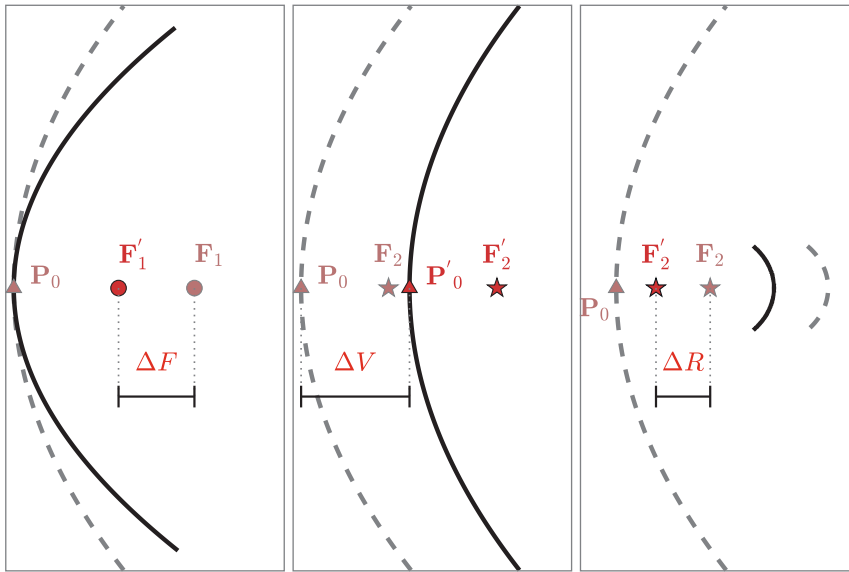


Abb. 1:
Schematische Darstellung der primären Deformationsanteile einer Sekundärfokusantenne mit dem Scheitelpunkt P_0 und den beiden Brennpunkten F_1 und F_2 : Brennweitenänderung ΔF (links), Scheitelpunktverschiebung ΔV (Mitte) und Subreflektorverschiebung ΔR (rechts). Während ausgegraute Elemente jeweils die unverformte Ausgangssituation symbolisieren, stellen Vollfarbenelemente die deformierte Situation dar.

rotationssymmetrisches Deformationsverhalten impliziert wird. Diese Annahme führt zu einer nennenswerten Reduktion des Berechnungsaufwandes, da das originäre räumliche Problem durch ein projiziertes zweidimensionales Problem vereinfacht gelöst werden kann (Artz et al. 2014). Abbondanza und Sarti (2010) zeigen, dass dieses Modell auch zur Beschreibung der elevationsabhängigen Laufzeitvariationen von Sekundärfokusantennen geeignet ist. In diesem Fall beschreibt ΔR die Verschiebung des Subreflektors entlang der optischen Achse. Aufgrund dieses universellen Charakters wird das Modell fast ausnahmslos zur Modellierung von elevationsabhängigen Laufzeitvariationen eingesetzt und hat sich als Standardmodell etabliert (Nothnagel 2020). Abb. 1 zeigt schematisch die drei primären Deformationsanteile einer Sekundärfokusantenne.

Die vom Elevationswinkel ε abhängige Signalwegvariation ergibt sich durch Kombination der drei Deformationsanteile ΔF , ΔV und ΔR in einer gewichteten Summenbildung und lautet

$$\Delta L(\varepsilon) = \alpha_F \Delta F(\varepsilon) + \alpha_V \Delta V(\varepsilon) + \lambda \alpha_R \Delta R(\varepsilon). \quad (1)$$

Hierin parametrisiert λ den Antennentyp, d. h., $\lambda = 1$ für Primärfokusantennen und $\lambda = 2$ für Sekundärfokusantennen,

und α_F , α_V und α_R sind die spezifischen Gewichte. Nach Clark und Thomsen (1988) sind die Gewichte

$$\alpha_F = \lambda(1 - \alpha_R), \quad (2)$$

$$\alpha_V = -1 - \lambda \alpha_R \quad (3)$$

linear von α_R abhängig. Das Gewicht α_R ergibt sich durch Integration der mittels der Illuminationsfunktion $I(\gamma)$ gewichteten Signalwegänderungen $h(\gamma)$ über die gesamte Apertur $\mathcal{A}$ zu

$$\alpha_R = 2\pi \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} I_n(\gamma) h(\gamma) d\gamma. \quad (4)$$

Die Integrationsgrenzen $\gamma_{\min}$ und $\gamma_{\max}$ entsprechen dem minimal und dem maximal zulässigen Einfallswinkel der Apertur, siehe auch Abb. 4. Die Änderung der Signalweglänge aufgrund einer vertikalen Verschiebung um eine Einheit $\Delta R = 1$ ist in Abb. 2 dargestellt. Sie wird durch die Funktion $h(\gamma)$ in Abhängigkeit vom Einfallswinkel γ beschrieben. Geeignete Funktionen zur Modellierung der Signalwegänderung $h(\gamma)$ werden von Lösler (2021, S. 111 ff.) diskutiert.

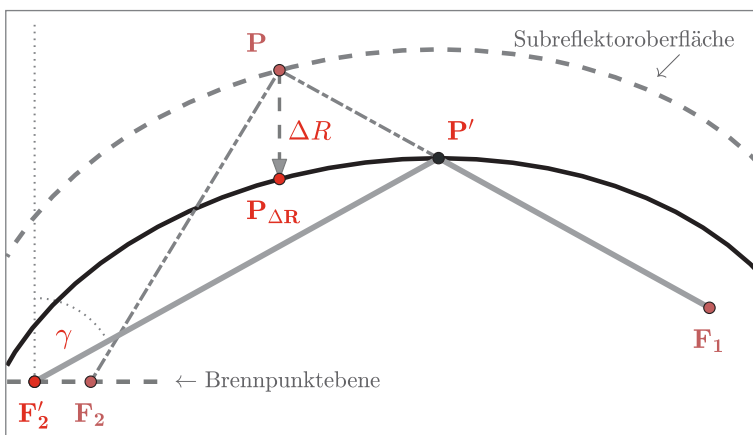


Abb. 2:
Änderung des Signalweges aufgrund einer vertikalen Verschiebung um eine Einheit $\Delta R = 1$ des Subreflektors. Das einfallende Signal vom Brennpunkt F_1 über den Oberflächenpunkt P hin zum Brennpunkt F_2 in der Brennpunktebene wird durch den verschobenen Subreflektor bereits im Punkt P' in Richtung der Brennpunktebene reflektiert.

Die Funktion $I_n(\gamma)$ ergibt sich durch Normierung der Illuminationsfunktion $I(\gamma)$ mit dem Normierungsfaktor k , sodass für die gesamte Apertur $\mathcal{A}$ die Bedingung $\int_{\mathcal{A}} k I d\mathcal{A} = 1$ erfüllt ist (Abbondanza und Sarti 2010). Der Normierungsfaktor resultiert aus

$$\frac{1}{k} = 2\pi \int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} I(\gamma) d\gamma. \quad (5)$$

Wird Gl. (1) zur Modellierung der Signalwegvariation einer Sekundärfokusantenne verwendet, so wird impliziert, dass das Empfangshorn einen festen Abstand zum Scheitelpunkt aufweist und die Variation des Scheitelpunktes demnach identisch mit der Positionsänderung des Empfangshorns ist. Weist das Empfangshorn einer Sekundärfokusantenne hingegen einen festen Abstand zur Elevationsachse auf, so bewegen sich Haupt- und Subreflektor relativ zum Empfangshorn mit $\Delta H = \Delta V$, sodass sich die erweiterte Darstellung

$$\Delta L(\varepsilon) = \alpha_F \Delta F(\varepsilon) + \alpha_V \Delta V(\varepsilon) + \lambda \alpha_R \Delta R(\varepsilon) + \Delta H(\varepsilon) \quad (6)$$

ergibt (Nothnagel et al. 2019).

Im Standardmodell nach Gl. (1) bzw. in der erweiterten Darstellung nach Gl. (6) werden ausschließlich symmetrisch wirkende Deformationen an der Empfangseinheit berücksichtigt. Den Effekt von asymmetrischen Deformationen auf die Signalwegvariationen untersuchen erstmals Lösler et al. (2022) an zwei Radioteleskopen am GOW. Ein asymmetrisches Deformationsverhalten liegt vor, wenn die einzelnen Komponenten der Empfangseinheit keine gemeinsame optische Achse aufweisen. Verschiebt sich bspw. der Subreflektor nicht nur entlang der optischen Achse, sondern auch senkrecht zu dieser, liegt ein asymmetrisches Deformationsverhalten vor. Um diese Deformationen bei der Bestimmung der Signalwegänderungen zu berücksichtigen, modellieren Lösler et al. (2022) den räumlichen Strahlverlauf für die gesamte Empfangseinheit.

Im Unterschied zu den Gln. (1) bzw. (6) kann die Modellierung nicht mehr durch eine zweidimensionale Darstellung vereinfacht werden, sondern muss im Dreidimensionalen erfolgen. Mittels räumlicher Strahlverfolgung (engl. Spatial Ray Tracing) kann die Änderung des (geometrischen) Signallaufweges ΔD an jeder Stelle direkt bestimmt werden (Lösler et al. 2018). Die räumliche Strahlverfolgung ist somit ein universelles Werkzeug, das alle modellierbaren Deformationen abbildet, insbesondere können hierdurch auch lokale Oberflächendeformationen am Hauptreflektor berücksichtigt werden, wie diese bspw. für das 100 m Radioteleskop in Effelsberg aus Laserscannerdaten von Holst et al. (2015) nachgewiesen wurden.

Die Signalwegänderung ΔL ergibt sich durch numerische Integration über die gesamte Apertur mittels

$$\Delta L(\varepsilon) = \frac{\sum_{\phi=0}^{2\pi} \sum_{r=0}^R I_n(\gamma_{\phi,r}) r \Delta D_{\phi,r}(\varepsilon)}{\sum_{\phi=0}^{2\pi} \sum_{r=0}^R I_n(\gamma_{\phi,r}) r}. \quad (7)$$

Hierin ist R der Radius des Hauptreflektors und r der Abstand zwischen dem einfallenden Strahl und der optischen Achse des Hauptreflektors. Die innere Summation modelliert die Änderung des Signalwegs entlang des ϕ -ten Meridians und die äußere Summation tastet diskrete Meridiane über den Vollkreis ab. Die Illuminationsfunktion berücksichtigt für jeden Strahl die zonale Sensitivität der Empfangseinheit in Abhängigkeit von ϕ und r .

Ein Vergleich zwischen dem Standardmodell und der Modellierung mittels Strahlverlauf deutet darauf hin, dass die Ergebnisse praktisch gleichwertig sind (Artz et al. 2014). Insbesondere zeigt sich, dass der Einfluss von asymmetrischen Deformationsmustern nur einen geringen Anteil an der resultierenden Signalwegänderung ΔL aufweist (Lösler et al. 2022). Die Gln. (1) bzw. (6) berücksichtigen somit die primär wirkenden Deformationsanteile und können als Approximation erster Ordnung aufgefasst werden. Gl. (7) erlaubt hingegen eine Evaluierung aller potenziellen Einflüsse auf den Signalweg und wird bei gesteigerten Genauigkeitsanforderungen zukünftig an Relevanz gewinnen. Insbesondere erlaubt Gl. (7) eine Berücksichtigung von lokalen Deformationen am Haupt- bzw. Subreflektor. Beiden Ansätzen ist gemein, dass sie die Illuminationsfunktion zur zonalen Gewichtung verwenden, sodass die Ergebnisse maßgeblich von dieser abhängen (Abbondanza und Sarti 2010). Aufgrund der hinreichenden Übereinstimmung zwischen beiden Modellen beschränken wir die Betrachtung im Folgenden auf das Standardmodell und verwenden Gl. (6), da für die drei Radioteleskope am GOW die Empfangshörner einen festen Abstand zur Elevationsachse aufweisen.

3 Twin Radioteleskope Wettzell

Das Geodätische Observatorium Wettzell ist eine Multitechnikstation und betreibt Instrumente für alle vier Raumtechniken. Das Observatorium wird vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der Technischen Universität München kooperativ betrieben, und zählt zu den sogenannten GGOS Core-Stationen (Schlüter et al. 2007). Seit 2013 verfügt das Observatorium über zwei baugleiche VGOS-spezifizierte Radioteleskope, die sogenannten Twin Teleskope Wettzell. Abb. 3 zeigt die südliche Antenne TTW-2, bei der es sich um ein VGOS-Radioteleskop handelt. Es ist mit einem Elevenfeed ausgestattet und nimmt an nahezu allen VGOS- bzw. EU-VGOS-Beobachtungskampagnen teil (Neidhardt et al. 2021). Die nördliche Antenne TTW-1 wurde bis Ende 2022 als konventionelle S/X-Station betrieben (Schüler et al. 2015). Mit der Installation eines Quadruple-Ridged Flared Horn (QRFH) wird das TTW-1 zukünftig jedoch ebenfalls am VGOS-Netz partizipieren (Neidhardt et al. 2021).

Beide Radioteleskope sind Sekundärfokusantennen und nutzen ein verbessertes Teleskopdesign, bei dem der Hauptreflektor ein Ring-Fokus-Paraboloid ist und der



Abb. 3: Südliches VGOS-Radioteleskop TTW-2 während der photogrammetrischen Erfassung von Daten zur Ermittlung von lastfallabhängigen Deformationen an der Empfangseinheit am Geodätischen Observatorium Wettzell.

Subreflektor geometrisch einem elliptischen Spindeltorus entspricht. Abb. 4 zeigt einen Schnitt durch die Empfangseinheit. In dieser Darstellung besteht der Subreflektor aus zwei zueinander geneigten Ellipsenausschnitten und der Hauptreflektor aus zwei getrennten Parabelbögen. Der gemeinsame Brennpunkt eines Parabelastes und einer Ellipse ist der primäre Brennpunkt F_1 . Im Gegensatz zu klassischen

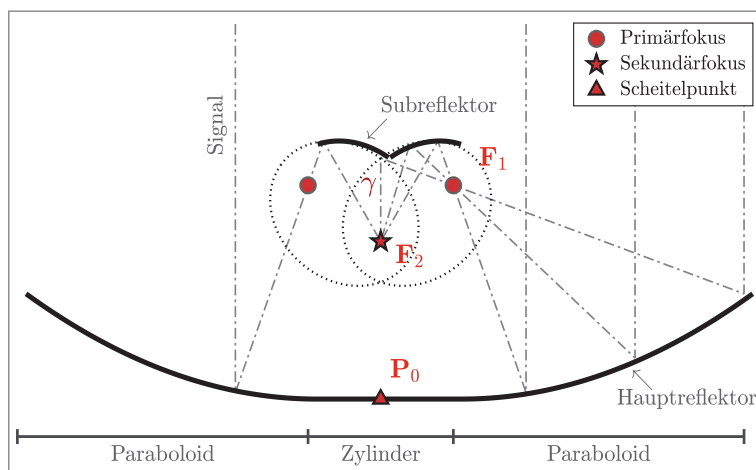


Abb. 4: Schnitt durch die Empfangseinheit einer Ring-Fokus-Antenne mit Signalverlauf. Die beiden Brennpunkte sind F_1 und F_2 . Der Scheitelpunkt ist P_0 .

Parabolantennen wie dem RTW besitzen Ring-Fokus-Antennen unendlich viele Primärbrennpunkte, die sich auf einem Ring bzw. Kreis befinden. Alle vom Subreflektor reflektierten Signale treffen sich in einem gemeinsamen Punkt F_2 , der identisch mit dem zweiten Brennpunkt aller Schnitteffektellipsen ist. Für undeformierte Empfangseinheiten ist die Länge des Signalweges somit identisch für alle Strahlen.

4 Illuminationsfunktion

Konventionelle geodätische VLBI-Beobachtungen erfolgen im S- und X-Band bei etwa 2,3 GHz bzw. 8,4 GHz. Die Messungen im S-Band dienen vornehmlich zur Bestimmung der ionosphärischen Refraktion, die als Korrekturterm an den Messungen im X-Band angebracht wird. Für geodätische VLBI-Anwendungen stellen demnach die Messungen im X-Band die eigentliche Beobachtungsgröße dar (Schuh 1987, S. 65 f.). Die in Gl. (4) bzw. Gl. (7) zu berücksichtigende Illuminationsfunktion sollte für konventionelle VLBI-Radioteleskope zweckmäßigerweise für das X-Band vorliegen. In der Praxis ist die exakte Illuminationsfunktion häufig undokumentiert, und Stützstellen liegen meist nur für wenige neuralgische Punkte vor – häufig nur für die beiden Grenzbereiche, d. h., für die Verstärkung entlang der optischen Achse bei einem Einfallswinkel von $\gamma_{\min} = 0^\circ$ sowie für $\gamma_{\max}$ am Rand des Horns (Nothnagel 2020). Aus diesen Gründen war eine frequenzabhängige Betrachtung bisher weder nötig noch objektiv möglich (Nothnagel et al. 2014).

Die neue Generation von VGOS-Radioteleskopen ist für einen Breitbandempfang zwischen 2 GHz und 14 GHz konzipiert (Petrachenko et al. 2011). Da die Verstärkung bauartbedingt nicht für die gesamte Bandbreite identisch sein kann, resultieren hieraus frequenzabhängige Ausleuchtungen der Apertur für VGOS-Radioteleskope. In welcher Größenordnung die ermittelten Signalwegvariationen ΔL hierdurch variieren, ist bisher nicht untersucht. Sowohl für das QRFH des TTW-1 als auch für das Eleven-feed des TTW-2 liegen für sieben verschiedene Frequenzen zwischen 2 GHz und 11 GHz jeweils zehn Stützstellen vor, die eine frequenzabhängige Betrachtung der Illuminationsfunktion ermöglichen.

4.1 Parametrierung

In der Literatur werden verschiedene Funktionen zur Modellierung der Illumination diskutiert und eingesetzt. Für das 100 m Radioteleskop Effelsberg schlagen Artz et al. (2014) eine Kosinusquadratfunktion vor, die sie auch für das 40 m Radioteleskop in Yebe einsetzen (Nothnagel et al. 2014). Für beide Radioteleskope lagen jeweils nur zwei Stützstellen vor, sodass keine objektive Bewertung bzgl. der Eignung dieser

Funktion möglich ist. Eine Kosinusquadratfunktion setzen Nothnagel et al. (2019) ebenfalls zur Modellierung der Illuminationsfunktion für das konventionelle 20 m Radioteleskop am Onsala Space Observatory ein. Den funktionalen Zusammenhang geben die Autoren mit

$$I_c(\gamma) = c_0 + c_1 \cos^2(\gamma c_2) \quad (8)$$

an. Hierin beschreibt c_0 die Verschiebung der Kurve entlang der Ordinate, c_1 ist die Amplitude und c_2 ist ein zusätzlicher Dämpfungskoeffizient zur Skalierung des Einfallswinkels γ .

In der Signalverarbeitung wird die elektromagnetische Strahlung häufig durch einen Gauß-Strahl charakterisiert. Basierend auf dieser physikalischen Überlegung empfehlen Abbondanza und Sarti (2010) die Verwendung einer Gaußfunktion, da diese die beste Annäherung an das abgestrahlte Feld von kreisförmigen Hörnern darstellt. Gaußfunktionen wurden für konventionelle Radioteleskope u. a. in Noto, Medicina und Wettzell sowie für die VGOS-spezifizierten Radioteleskope in Onsala und Wettzell verwendet, siehe die Beiträge von Abbondanza und Sarti (2010), Sarti et al. (2011), Lösler et al. (2019, 2022). Die allgemeine Gaußfunktion lautet

$$I_g(\gamma) = g'_1 \exp \left(- \left(\frac{\gamma - g'_3}{g'_2} \right)^2 \right). \quad (9)$$

Hierin parametrieren g'_1 und g'_3 die Höhe und die Position des Peaks der glockenförmigen Gaußkurve, und g'_2 steuert die Breite.

Im Gegensatz zu Gl. (8), deren Maximum sich für $\gamma = 0^\circ$ ergibt, liegt das Maximum von Gl. (9) nicht notwendigerweise bei $\gamma = 0^\circ$. Die Kosinusquadratfunktion besitzt somit einen formbeschreibenden Parameter mehr, da die Position des Maximums implizit festliegt. Bei der Gaußfunktion nach Gl. (9) ist die Position des Maximums hingegen Teil der Schätzung und wird durch g'_3 parametrieren. Liegen für eine Regressionsanalyse Daten vor, die den Wertebereich nicht vollständig abdecken, so erfolgt die Anpassung in diesem Fall an den optimalen Funktionsabschnitt. Da die maximale Verstärkung eines idealen kreisförmigen Horns jedoch im Zentrum liegt, muss die Funktion ihr Maximum bei $\gamma = 0^\circ$ besitzen. Die Gaußfunktion, die diese Bedingung erfüllt, lautet

$$I_g(\gamma) = g_0 + g_1 \exp \left(- \frac{\gamma^2}{g_2^2} \right), \quad (10)$$

worin g_0 die Verschiebung der Kurve entlang der Ordinate beschreibt.

Um auch den Einfluss der gewählten Funktion auf die abgeleiteten Ergebnisse zu evaluieren, erfolgt die Bestimmung der Illuminationsfunktion mit den funktionalen Modellen nach Gl. (8) und Gl. (10) nach der Methode der kleinsten Quadrate. Da die Anzahl der Koeffizienten in beiden funktionalen Modellen identisch ist, bietet sich die

Verbesserungsquadratsumme Ω als objektive Bewertungsmetrik an. Die zehn Stützstellen werden hierbei jeweils als unabhängig und identisch verteilte Zufallsvariablen betrachtet.

4.2 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Abb. 5 zeigt die gegebenen Stützstellen als gelbe Punkte sowie die geschätzten Amplitudenfunktionen für das Elevenfeed (links) und das QRFH (rechts) für die sieben Frequenzen. Die rote Strichpunktlinie entspricht der Gaußfunktion nach Gl. (10) und die Kosinusquadratfunktion nach Gl. (8) ist blau gestrichelt dargestellt. Die Stützstellen vom QRFH weisen gegenüber denen des Elevenfeeds ein deutlich höheres Rauschen auf. Für beide Hörner ist eine frequenzabhängige Verstärkung gut zu erkennen, wobei das Elevenfeed eine bessere Effizienz aufweist. Weiterhin bemerkenswert ist für beide Hörner die sehr hohe Übereinstimmung zwischen den jeweils geschätzten Funktionsverläufen für eine Frequenz. Dieser visuelle Eindruck wird auch durch die ermittelten Verbesserungsquadratsummen Ω bestätigt, wie Tab. 1 zeigt.

Tab. 1 zeigt für die sieben Frequenzen das Verhältnis Ω_g/Ω_c zwischen den geschätzten Verbesserungsquadratsummen der Gauß- und Kosinusquadratfunktion für das Elevenfeed und das QRFH. Ist $\Omega_g/\Omega_c < 1$, so sind die Abweichungen zwischen den zehn Stützstellen und der Gaußfunktion geringer als bei Verwendung der Kosinusquadratfunktion, ansonsten bietet die Kosinusquadratfunktion eine bessere Anpassung. Für lediglich zwei Datensätze liefert die Gaußfunktion eine geringfügig bessere Anpassung und wäre zu favorisieren. Für die übrigen zwölf Datensätze sind die Ergebnisse nahezu identisch. Die Kosinusquadratfunktion bietet somit eine hinreichende Anpassung an die Daten. Im Vergleich zur Gaußfunktion, die insbesondere in der Signalverarbeitung zur Beschreibung von elektromagnetischer Strahlung verwendet wird, bietet die Kosinusquadratfunktion für die untersuchten Datensätze jedoch keinen Mehrwert.

Tab. 1: Verhältnis zwischen den Verbesserungsquadratsummen der Gauß- und Kosinusquadratfunktion für das Elevenfeed und das QRFH für Frequenzen f zwischen 2 GHz und 11 GHz. Für Werte kleiner als Eins ist $\Omega_g < \Omega_c$ und die Anpassung der Gaußfunktion besser.

f	$\Omega_g^{\text{Eleven}} / \Omega_c^{\text{Eleven}}$	$\Omega_g^{\text{QRFH}} / \Omega_c^{\text{QRFH}}$
2 GHz	1,00	1,00
3 GHz	0,90	0,95
5 GHz	1,00	1,00
6 GHz	1,00	1,00
8 GHz	1,00	1,01
10 GHz	1,00	1,00
11 GHz	1,01	1,00

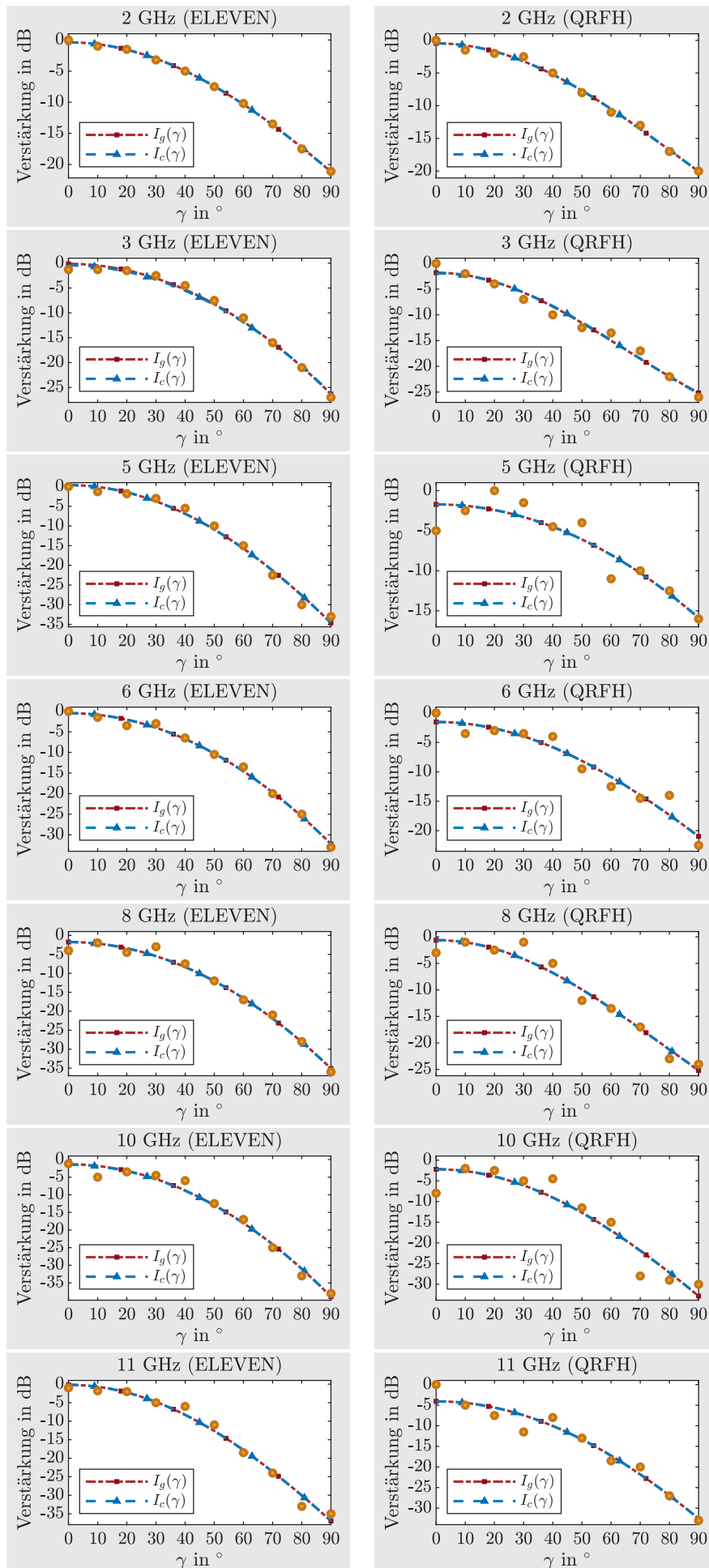


Abb. 5:
Geschätzte Amplitudenfunktionen für das Elevenfeed (links) und das QRFH (rechts) für Frequenzen zwischen 2 GHz und 11 GHz. Die rote Strichpunktlinie entspricht der Gaußfunktion I_g , die blau gestrichelte Kurve ergibt sich für die Kosinusquadratfunktion I_c . Gelbe Punkte symbolisieren die jeweiligen Stützstellen.

5 Signalwegvariationen

Die Bestimmung der Signalwegvariationen mittels Gl. (6) erfolgt durch eine gewichtete Summenbildung der geometrischen Deformationsanteile ΔF , ΔV und ΔR . Für das VGOS-spezifizierte Radioteleskop TTW-2 leiten Lösler et al. (2022) die elevationsabhängigen Verformungen aus photogrammetrischen Daten ab, siehe Abb. 3. Die modellierten und auf $\varepsilon = 90^\circ$ bezogenen Variationen der Brennweite sowie die axialen Verschiebungen des Scheitelpunktes bzw. des Subreflektors lauten

$$\Delta F(\varepsilon) = -1,07 \text{ mm} \cdot \cos \varepsilon, \quad (11)$$

$$\Delta V(\varepsilon) = -0,08 \text{ mm} \cdot \cos \varepsilon, \quad (12)$$

$$\Delta R(\varepsilon) = 1,16 \text{ mm} \cdot (1 - \sin \varepsilon) \quad (13)$$

und sind unabhängig vom verwendeten Frequenzbereich des Radioteleskops.

Die zu berücksichtigenden Gewichte α_F , α_V und α_R sind hingegen unabhängig vom Elevationswinkel, aber aufgrund der Illuminationsfunktion frequenzabhängig. Für Gl. (6) ergibt sich somit die frequenz- und elevationsabhängige Darstellung

$$\Delta L(\varepsilon, f) = \alpha_F(f) \Delta F(\varepsilon) + \alpha_V(f) \Delta V(\varepsilon) + \lambda \alpha_R(f) \Delta R(\varepsilon) + \Delta H(\varepsilon). \quad (14)$$

Tab. 2 fasst die mit Gl. (4) ermittelten Gewichte $\alpha_R(f)$ für die beiden Empfangshörner bei Verwendung der Gauß- bzw. Kosinusquadratfunktion zusammen. Eine geringe Abhängigkeit der Gewichte von der Frequenz f ist erkennbar. Die Differenzen sind jedoch sehr gering und bleiben insgesamt unter 2 %, sodass sie mit Hinblick auf die auftretenden Messunsicherheiten bei der praktischen Anwendung vernachlässigbar sind. Auch die Wahl des funktionalen Modells spielt nur eine untergeordnete Rolle und bestätigt die Ergebnisse aus Abschnitt 4.2. Abb. 6 zeigt die resultierenden normierten Illuminationsfunktionen für die sieben Frequenzen zwischen 2 GHz und 11 GHz. Durch die Normierung nach Gl. (5) sind die resultierenden Funktionsverläufe $I_n(f, \gamma)$ sehr ähnlich, sodass aus Gl. (4) praktisch gleichwertige Gewichte $\alpha_R(f)$ resultieren.

Weiterhin fällt die sehr hohe Übereinstimmung zwischen den Gewichten beider Empfangshörner auf, sodass

Tab. 2: Gewichtskoeffizienten α_R für das Elevenfeed und das QRFH für Frequenzen f zwischen 2 GHz und 11 GHz. Die Ergebnisse bei Verwendung der Gauß- und der Kosinusquadratfunktion sind mit α_R^g bzw. α_R^c bezeichnet.

f	Eleven		QRFH	
	α_R^g	α_R^c	α_R^g	α_R^c
2 GHz	0,636	0,636	0,636	0,636
3 GHz	0,632	0,633	0,629	0,629
5 GHz	0,626	0,625	0,648	0,648
6 GHz	0,628	0,628	0,638	0,638
8 GHz	0,627	0,627	0,630	0,630
10 GHz	0,625	0,625	0,627	0,627
11 GHz	0,624	0,624	0,629	0,629

die in Abb. 7 dargestellte Signalwegvariation im Wesentlichen von den geometrischen Deformationsanteilen ΔF , ΔV und ΔR abhängt und nicht von der Illuminationsfunktion. Mit einem mittleren Gewicht $\bar{\alpha}_R = 0,63$ und den Gln. (5) und (6) ergeben sich $\bar{\alpha}_V = -2,26$ und $\bar{\alpha}_F = 0,74$. Im Gegensatz zu konventionellen Radioteleskopen, bei denen die Änderung der Brennweite ΔF aufgrund von $\alpha_F \rightarrow 0$ praktisch keinen Einfluss auf die Signalwegvariation besitzt (siehe Bergstrand et al. 2019), darf der gewichtete Anteil der Brennweitenänderung bei Ring-Fokus-Antennen nicht vernachlässigt werden, wie Abb. 7 deutlich zeigt.

Abb. 7 stellt die einzelnen Einflussgrößen der Signalwegvariation komponentenweise dar. Den größten Anteil weist die Subreflektorverschiebung auf, die im Maximum etwa 1,5 mm erreicht. Der Abstand des Subreflektors verkürzt sich mit steigendem Elevationswinkel. Die Brennweite verkürzt sich hingegen mit fallenden Elevationswinkeln und beträgt maximal $-0,8$ mm. Durch die gegensätzlichen Verläufe kompensiert die Brennweitenänderung einen Großteil der axialen Verschiebung des Subreflektors. Insgesamt ergeben sich Signalwegvariationen von maximal 0,9 mm. Dies entspricht einer Laufzeitänderung von lediglich 3 ps. Die sehr kompakte Bauweise der 13,2 m Twin Radioteleskope Wettzell führt zu einer sehr steifen Empfangseinheit, die durch Lastfalländerungen kaum deformiert wird und nur geringe Laufzeitänderungen hervorruft. Zum Vergleich: Artz et al. (2014) ermittelten mit ca. 290 ps eine fast hundertmal größere Laufzeitänderung für das 100 m Radioteleskop Effelsberg.

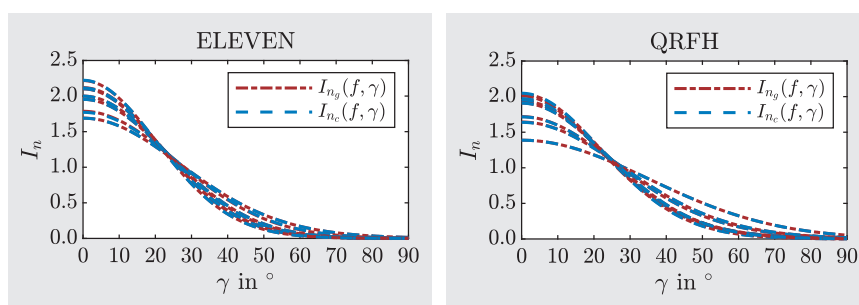


Abb. 6: Normierte Illuminationsfunktionen I_n für das Elevenfeed (links) und das QRFH (rechts) für Frequenzen zwischen 2 GHz und 11 GHz. Die rote Strichpunktcurve resultiert aus der Gaußfunktion, die blau gestrichelte Kurve ergibt sich bei Verwendung der Kosinusquadratfunktion.

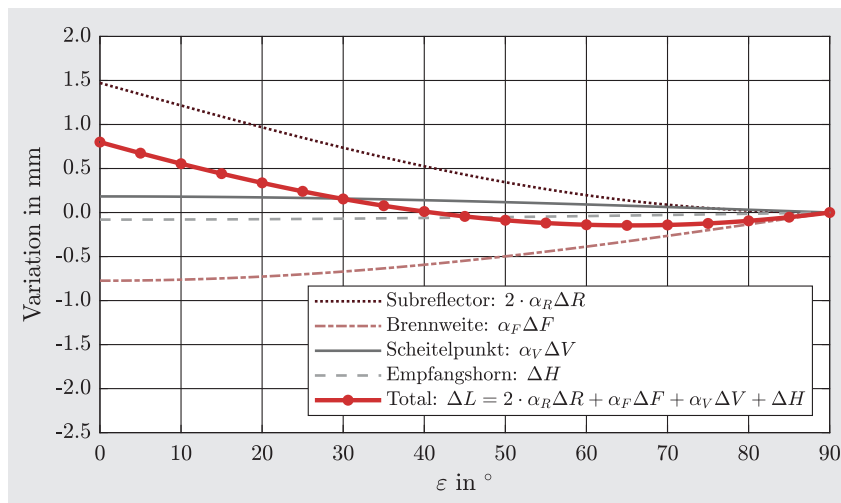


Abb. 7:

Komponentenweise Darstellung der gewichteten Deformationen sowie die resultierende Signalwegvariation für die Twin Radioteleskope Wettzell bezogen auf die Referenzelevationsposition $\varepsilon = 90^\circ$.

Bei den Twin Radioteleskopen am GOW handelt es sich um zwei baugleiche VLBI-Radioteleskope, sodass die ermittelten Deformationen vom TTW-2 auf das TTW-1 übertragbar sind. Da die ermittelten Gewichte in Tab. 2 praktisch unabhängig vom gewählten funktionalen Zusammenhang, aber auch unabhängig vom eingesetzten Empfangshorn sind, kann die in Abb. 7 dargestellte Signalwegvariation für beide VLBI-Radioteleskope herangezogen werden, um die systematisch wirkenden Abweichungen gravitativer Deformationen an der Empfangseinheit in der VLBI-Analyse zu reduzieren.

6 Zusammenfassung

VLBI-Radioteleskope sind große bauliche Anlagen, die verschiedene Verformungsmuster aufweisen. Bleiben diese unberücksichtigt, so verfälschen sie die abgeleiteten Produkte systematisch. Neben thermischen Verformungen sind in der jüngeren Vergangenheit insbesondere lastfallabhängige Deformationen in den Fokus gerückt. Untersuchungen von Varenius et al. (2021) zeigen, dass elevationsabhängige Deformationen an der Empfangseinheit von VLBI-Radioteleskopen Verzerrungen von zum Teil mehreren Millimetern in der global geschätzten Stationskoordinate hervorrufen, insbesondere in der vertikalen Komponente.

Clark und Thomson (1988) identifizieren drei Hauptinflüsse, die Variationen im Signalweg hervorrufen. Dies sind die Änderungen in der Brennweite sowie die axialen Verschiebungen des Scheitelpunktes und des Empfängers bzw. Subreflektors. Die Modellierung der Signalwegvariation erfolgt durch eine gewichtete Summenbildung, wobei die Gewichtung aus der intrinsischen Illuminationsfunktion des VLBI-Radioteleskops resultiert. Lösler et al. (2022) zeigen, dass neben diesen rotationssymmetrisch wirkenden Deformationen auch asymmetrische Deformationen auftreten, die durch das Standardmodell unberücksichtigt bleiben. Um alle modellierbaren Deformationen bei der Ableitung der Signalwegvariationen zu berücksichtigen,

parametrieren die Autoren die Empfangseinheit und führen eine räumliche Strahlverfolgung durch. Die einzelnen Strahlen werden in Abhängigkeit des Einfallswinkels im Empfangshorn wiederum mit der teleskopspezifischen Illuminationsfunktion gewichtet. Beiden Ansätzen ist somit gemein, dass sie die Illuminationsfunktion zur zonalen Gewichtung verwenden.

In diesem Beitrag wurde erstmals untersucht, ob insbesondere für VGOS-Radioteleskope eine frequenzabhängige Illuminationsfunktion bei der Modellierung von Signalwegvariationen notwendig ist. Für diese Untersuchung standen insgesamt 14 Datensätze von zwei verschiedenen Empfangshörnern zu Verfügung, mit denen die Twin Radioteleskope Wettzell ausgestattet sind. In der Literatur werden verschiedene funktionale Modelle zur Parametrierung der Illuminationsfunktion vorgeschlagen. Die beiden gebräuchlichsten, die Kosinusquadratfunktion und die Gaußfunktion, wurden ausgewählt und in diesem Beitrag miteinander verglichen. Die Anzahl der Modellparameter ist bei beiden Funktionen identisch, sodass eine objektive Modellbewertung auf der Basis der Verbesserungsquadratsumme erfolgte.

Die Anpassungen an die gegebenen Daten waren für beide Modelle gleichwertig und resultierten in nahezu identischen Funktionsverläufen, siehe Abb. 5. Weiterhin lieferten sowohl die Kosinusquadratfunktion als auch die Gaußfunktion praktisch identische Gewichte und sind daher für eine Modellierung der Signalwegvariationen geeignet. Zudem zeigte sich, dass die Gewichte weitgehend unabhängig von der Frequenz sind, sodass eine frequenzabhängige Modellierung der Signalwegvariationen unnötig ist. Interessanterweise konnte auch eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen den beiden Empfangshörnern, Elevenfeed und Quadruple-Ridged Flared Horn, festgestellt werden, mit denen die Twin Radioteleskope am GOW ausgestattet sind. Da es sich bei den TTW um zwei baugleiche VLBI-Radioteleskope handelt, die ein vergleichbares Deformationsverhalten aufweisen, können die für das TTW-2 ermittelten Signalwegvariationen auf das TTW-1 übertragen werden. Für beide Radioteleskope kann dieselbe Korrekturfunktion verwendet werden.

Literatur

- Abbondanza, C., Sarti, P. (2010): Effects of illumination functions on the computation of gravity-dependent signal path variation models in primary focus and Cassegrainian VLBI telescopes. *Journal of Geodesy*, 84(8), 515–525. DOI: 10.1007/s00190-010-0389-z.
- Artz, T., Springer, A., Nothnagel, A. (2014): A complete VLBI delay model for deforming radio telescopes: the Effelsberg case. *Journal of Geodesy*, 88(12), 1145–1161. DOI: 10.1007/s00190-014-0749-1.
- 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.
- Clark, T.A., Thomsen, P. (1988): *Deformations in VLBI Antennas*. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, United States, NASA-TM-100696.
- Greiwe, A., Brechtken, R., Lösler, M., Eschelbach, C., Haas, R. (2020): Erfassung der Hauptreflektordeformation eines Radioteleskops durch UAV-gestützte Nahbereichsphotogrammetrie. In: Kersten, T.P. (Hrsg.): 40. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Vol. 29, 346–357.
- Haas, R. (2022): Antenna deformation. In: Unified Analysis Workshop (UAW), Aristoteles-Universität Thessaloniki, 21.–23. Oktober 2022, Thessaloniki, Griechenland. DOI: 10.5281/zenodo.7315785.
- Holst, C., Nothnagel, A., Blome, M., Becker, P., Eichborn, M., Kuhlmann, H. (2015): Improved area-based deformation analysis of a radio telescope's main reflector based on terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Geodesy*, 9(1), 1–14. DOI: 10.1515/jag-2014-0018.
- IVS (2019): Resolution IVS-Res-2019-01: Surveys of radio telescopes for modeling of gravitational deformation. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS), Directing Board.
- Lösler, M., Eschelbach, C. (2010): Wie invariant ist eigentlich invariant? – Untersuchungen zur Stabilität des IVS-Referenzpunktes an der Fundamentalstation Wettzell. In: Zippelt, K. (Hrsg.): *Vernetzt und ausgeglichen – Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. Dr. E. h. Günter Schmitt*, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 215–220. DOI: 10.5445/KSP/1000020074.
- Lösler, M., Eschelbach, C., Schenk, A., Neidhardt, A. (2010): Permanentüberwachung des 20 m VLBI-Radioteleskops an der Fundamentalstation in Wettzell. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformatik und Landmanagement*, 135(1), 40–48.
- Lösler, M., Eschelbach, C., Haas, R. (2018): Bestimmung von Messunsicherheiten mittels Bootstrapping in der Formanalyse. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 143(4), 224–232. DOI: 10.12902/zfv-0214-2018.
- 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), 2069–2087. DOI: 10.1007/s00190-019-01302-5.
- Lösler, M. (2021): Modellbildungen zur Signalweg- und in-situ Referenzpunktbestimmung von VLBI-Radioteleskopen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 865.
- Lösler, M., Eschelbach, C., Greiwe, A., Brechtken, R., Plötz, C., Kronschnabl, G., Neidhardt, A. (2022): Ray Tracing-Based Delay Model for Compensating Gravitational Deformations of VLBI Radio Telescopes. *Journal of Geodetic Science*, 12(1), 165–184. DOI: 10.1515/jogs-2022-0141.
- Mähler, S., Klügel, T., Lösler, M., Schüler, T. (2018): Permanentes Referenzpunkt-Monitoring der TWIN Radioteleskope am Geodätischen Observatorium Wettzell. *avn – Allgemeine Vermessungsnachrichten*, 125(7), 210–219.
- Neidhardt, A., Plötz, C., Kronschnabl, G., Hohlneicher, M., Schüler, T. (2021): Geodetic Observatory Wettzell: 20-m Radio Telescope and Twin Radio Telescopes. In: Behrend, D., Armstrong, K.L., Bayer, K.D. (Hrsg.): *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2019+2020*, NASA/TP–20210021389, 120–124.
- Nothnagel, A., Springer, A., Heinz, E., Artz, T., de Vicente, P. (2014): Gravitational Deformation Effects: The Yebes 40-m Telescope Case. In: Behrend, D., Bayer, K.D., Armstrong, K.L. (Hrsg.): *Proceedings of the 8th IVS General Meeting 2014 – VGOS: The New VLBI Network*, Science Press, Peking, 158–162.
- Nothnagel, A., Holst, C., Haas, R. (2019): A VLBI delay model for gravitational deformations of the Onsala 20 m radio telescope and the impact on its global coordinates. *Journal of Geodesy*, 93(10), 2019–2036. DOI: 10.1007/s00190-019-01299-x.
- Nothnagel, A. (2020): Very Long Baseline Interferometry. In: Freeden, W., Rummel, R. (Hrsg.): *Mathematische Geodäsie/Mathematical Geodesy*, Springer, Berlin, 1257–1314. DOI: 10.1007/978-3-662-55854-6_110.
- Petrachenko, W.T., Niell, A.E., Corey, B.E., Behrend, D., Schuh, H., Wresnik, J. (2011): VLBI2010: Next Generation VLBI System for Geodesy and Astrometry. In: Kenyon, S., Pacino, M.C., Marti, U. (Hrsg.): *Geodesy for Planet Earth, Proceedings of the 2009 IAG Symposium*, Springer, Berlin, Vol. 136, 999–1005. DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1_125.
- Rothacher, M. (2013): Globaler Wandel, GGOS und GEOSS. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 138(1), 16–20.
- Sarti, P., 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.1943-5428.0000008.
- Sarti, P., Abbondanza, C., Petrov, L., Negusini, M. (2011): Height bias and scale effect induced by antenna gravitational deformations in geodetic VLBI data analysis. *Journal of Geodesy*, 85(1), 1–8. DOI: 10.1007/s00190-010-0410-6.
- Schlüter, W., Brandl, N., Dassing, R., Hase, H., Klügel, T., Kilger, R., Lauber, P., Neidhardt, A., Plötz, C., Riepl, S., Schreiber, U. (2007): *Fundamentalstation Wettzell – Ein geodätisches Observatorium*. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 132(3), 158–167.
- Schmid, R. (2009): Zur Kombination von VLBI und GNSS. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 636.
- Schuh, H. (1987): Die Radiointerferometrie auf langen Basen zur Bestimmung von Punktverschiebungen und Erdrotationsparametern. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 328.
- Schüler, T., Kronschnabl, G., Plötz, C., Neidhardt, A., Bertarini, A., Bernhart, S., Porta, L., Halsig, S., Nothnagel, A. (2015): Initial Results Obtained with the First TWIN VLBI Radio Telescope at the Geodetic Observatory Wettzell. *Sensors*, 15(8), 18767–18800. DOI: 10.3390/s150818767.
- Seitz, M., Angermann, D., Bloßfeld, M. (2017): Geometrische Referenzsysteme. In: Rummel, R. (Hrsg.): *Handbuch der Geodäsie – Erdmessung und Satellitengeodäsie*, Springer, Berlin, 325–348. DOI: 10.1007/978-3-662-47100-5_17.
- Shoushtari, S., Glaser, S., Balidakis, K., Heinkelmann, R., Anderson, J., Schuh, H. (2020): On the impact of gravitational deformation on VLBI-derived parameters. In: *EGU General Assembly 2020*, 4.–8. Mai 2020, Copernicus GmbH. DOI: 10.5194/egusphere-egu2020-5100.
- Varenius, E., Haas, R., Nilsson, T. (2021): Short-baseline interferometry local-tie experiments at the Onsala Space Observatory. *Journal of Geodesy*, 95(5), 54. DOI: 10.1007/s00190-021-01509-5.

- Weinhuber, A., Neidhardt, A., Holst, C. (2022): Monitoring Gravitational Deformations of the Wettzell 20 m Radio Telescope's Main Reflector Using a Leica RTC360. In: García-Asenjo, L. und Lerma, J. L. (Hrsg.): 5th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Editorial Universitat Politècnica de València, Valencia, 447–454. DOI: 10.4995/JISDM2022.2022.13902.
- Wresnik, J., Haas, R., Boehm, J., Schuh, H. (2006): 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.
- Zerneck, R. (1999): Seasonal variations in height demonstrated at the radio telescope reference point. In: Schlüter, W., Hase, H. (Hrsg.): Proceedings of the 13th European VLBI for Geodesy and Astrometry (EVGA) Working Meeting, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Viechtach, Wettzell, 15–18.

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.

Kontakt

Michael Lösler | Cornelia Eschelbach
Labor für Industrielle Messtechnik
Fachbereich 1: Architektur, Bauingenieurwesen, Geomatik
Frankfurt University of Applied Sciences
Nibelungenplatz 1, 60318 Frankfurt am Main
michael.loesler@fb1.fra-uas.de
cornelia.eschelbach@fb1.fra-uas.de

Gerhard Kronschnabl | Christian Plötz
Geodätisches Observatorium Wettzell
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Sackenrieder Straße 25, 93444 Bad Kötzing
gerhard.kronschnabl@bkg.bund.de
christian.ploetz@bkg.bund.de

Alexander Neidhardt
Geodätisches Observatorium Wettzell
Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie
Technische Universität München
Sackenrieder Straße 25, 93444 Bad Kötzing
alexander.neidhardt@tum.de