

Permanentüberwachung des 20 m VLBI-Radioteleskops an der Fundamentalstation in Wettzell

Michael Lösler, Cornelia Eschelbach, Andreas Schenk und Alexander Neidhardt

Zusammenfassung

Permanente und automatische Überwachungsmessungen der Verbindungsvektoren zwischen den Referenzpunkten verschiedener Raumverfahren wie beispielsweise Very Long Baseline Interferometry (VLBI) oder dem Globalen Navigationssatellitensystem (GNSS) sind maßgebliche Forderungen im Rahmen des Global Geodetic Observing System (GGOS) und der Agenda VLBI2010, um die angestrebte Submillimetergenauigkeit zu erreichen. Am Geodätischen Observatorium in Wettzell wurde aus diesem Grund ein Monitoringsystem eingerichtet, welches das 20 m VLBI-Radioteleskop überwacht. Im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie sollte geprüft werden, ob sich signifikante Deformationen, hervorgerufen beispielsweise durch Temperaturänderungen, feststellen lassen und welche Größenordnungen sie besitzen.

Summary

In the agenda VLBI2010 and the framework of the Global Geodetic Observing System (GGOS) an automated monitoring of the reference points of different geodetic space techniques like Very Long Baseline Interferometry (VLBI) or Global Navigation Satellite System (GNSS) and therefore of the local-tie vectors at co-location stations are desirable to obtain the submillimeter level. For this reason a monitoring system was installed to observe the 20 m VLBI radio telescope at the geodetic observatory Wettzell. This project is one of the first feasibility studies aimed at determining significant deformations caused by the VLBI antenna due to e. g. changes in temperature.

1 Einleitung

Die Verknüpfung verschiedener Referenzrahmen z. B. bei der Realisierung des Internationalen Terrestrischen Referenz-Systems (ITRS) gelingt erst, wenn die räumlichen Beziehungen dieser zueinander bekannt sind (z. B. Ray und Altamimi 2005 oder Altamimi et al. 2007). Die Bestimmung der Lage und Orientierung zwischen diesen Referenzrahmen erfolgt durch hochpräzise, lokale Vermessung an sogenannten Kollokations- oder Fundamentalstationen. An solchen Stationen werden mindestens zwei Raumverfahren verschiedener Services, wie beispielsweise dem International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS), dem International GNSS Service (IGS) oder dem International Laser Ranging Service (ILRS), betrieben. An die hierbei zu bestimmenden Referenz-

renzpunkte dieser Raumverfahren und die daraus abgeleiteten Verbindungsvektoren (local-ties) werden höchste Genauigkeitsanforderungen gestellt (Schuh 2009). So regt das Global Geodetic Observing System (GGOS) eine Bestimmung der local-ties im Submillimeterbereich an (Rothacher et al. 2009). Dies ist eine Forderung, die die moderne Messtechnik bei geeigneter Instrumentenwahl und Beobachtungsanordnung imstande ist zu erfüllen, wie u. a. Eschelbach und Haas 2003, Dawson et al. 2007, Lösler 2008 oder Lösler und Haas 2009 zeigten. Unbeantwortet bleibt jedoch die Frage, wie repräsentativ eine solche Momentaufnahme über die Zeit ist und ob es tageszeitliche oder gar jährliche Variationen beispielsweise aufgrund von Temperaturschwankungen gibt. Zwar existiert für die Analyse von VLBI-Daten bereits ein Korrekturmodell, welches die relativen Höhenvariationen der Radioteleskope in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur berücksichtigt (Wresnik et al. 2007, Nothnagel 2009), doch bleiben Lageänderungen derzeit vollkommen unberücksichtigt.

Das im Bayrischen Wald gelegene Geodätische Observatorium Wettzell, welches vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) und der Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie (FESG) der Technischen Universität München betrieben wird, ist eine der weltweit führenden Fundamentalstationen (Schlüter et al. 2007). An dieser Station wurde ein am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (GIK) entwickeltes Monitoringsystem eingerichtet, das das 20 m VLBI-Radioteleskop Wettzell (RTW) in einem Zeitraum von über drei Monaten permanent beobachtete. Die Durchführung eines solchen Monitorings ist die logische Konsequenz der immer besser werdenden Ergebnisse, die mit den interkontinentalen Messverfahren erzielt werden, und eine maßgebliche Forderung im Rahmen der Agenda VLBI2010 (Niell et al. 2006) und des GGOS (Rothacher et al. 2009). Mit dem in Wettzell eingerichteten Überwachungssystem sollte neben einer möglichen Realisierung auch die Notwendigkeit für ein permanent messendes System evaluiert werden. Die hierbei gesammelten Erfahrungen können darüber hinaus direkt in die derzeit im Bau befindlichen TWIN-Teleskope an der Station einfließen. Dabei handelt es sich um zwei baugleiche schnelle Radioteleskope mit 13,2 m Reflektoren zur breitbandigen Aufzeichnung mit der Möglichkeit zum schnellen, flexiblen Quellenwechsel im Rahmen der IVS-Beobachtungen (Hase et al. 2008). Mit ähnlichen Vorhaben wird auch an anderen Fundamentalstationen die Stabilität der Verbindungsvektoren untersucht, wie u. a. das auf Spitzbergen durchgeführte Projekt COLD MAGICS zeigt (Bergstrand und Haas 2009).

Der Aufbau der erstellten Monitoringsoftware, das eingesetzte Instrumentarium und die gewählte Beobachtungsanordnung werden im Nachfolgenden kurz erläutert. Es folgt eine Beschreibung der Auswertung und der dabei erzielten Erkenntnisse.

2 Monitoringsystem HEIMDALL

allen Rechnerarchitekturen, auf denen die Laufzeitumgebung installiert ist. Der modulare Aufbau von HEIMDALL mit allen Komponenten, die in Wettzell zum Einsatz kamen, ist in Abb. 1 schematisch dargestellt.

Zur Ermittlung der geometrischen Größen wurde der robuste Tachymeter TCA2003 von Leica, der mit einer Streckengenauigkeit von $\sigma_s = 1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ und einer Winkelgenauigkeit von $\sigma_w = 0,5 \text{ mgon}$ spezifiziert ist,

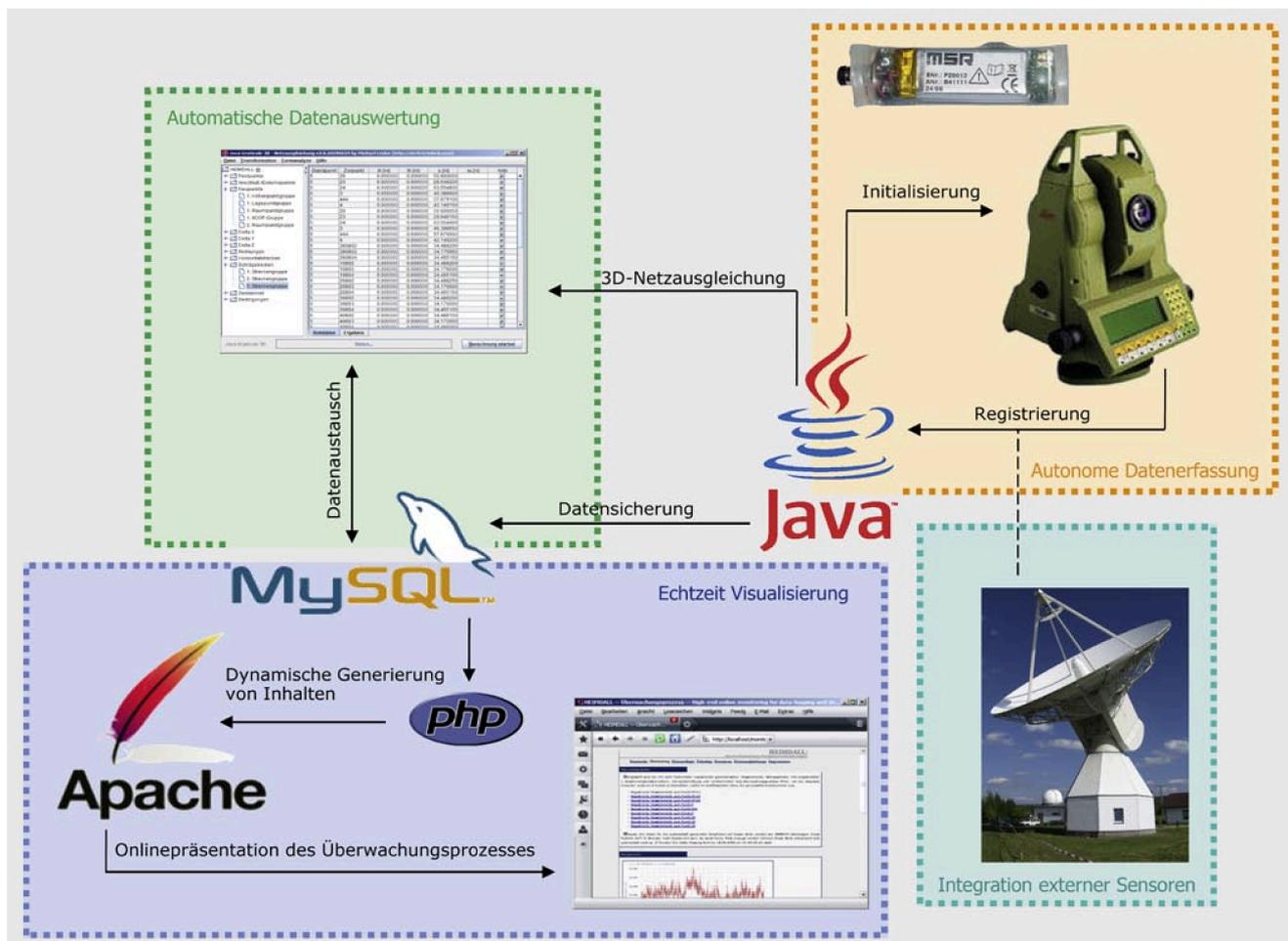


Abb. 1: Schematische Darstellung des Überwachungssystems HEIMDALL

Für den Überwachungsprozess in Wettzell wurde ein speziell auf die Bedürfnisse der Station abgestimmtes Softwarekonzept am GIK entworfen. Auf eine kommerzielle Lösung wurde verzichtet, um unabhängig und flexibel auf spezielle Problemstellungen reagieren zu können. Der Name des Monitoringsystems HEIMDALL leitet sich aus »High-End Interface for Monitoring and spatial Data Analysis using L2-Norm« ab und beschreibt bereits die wesentliche Aufgabe des Systems. Gleichzeitig existiert in der deutschen Mythologie ein Schutzgott mit demselben Namen. Dem wachsamem Heimdall wird u. a. nachgesagt, dass er bei Tag und Nacht gleich gut sieht und das Gras auf den Weiden wachsen hört (Golther 2004).

Das Multisensorsystem ist vollständig in Java geschrieben und läuft mit kleinen Einschränkungen auf

eingesetzt. Die Kommunikation zwischen dem Instrument und HEIMDALL erfolgt über den seriellen Port mittels der offengelegten geoCOM-Schnittstelle von Leica. Zur Erfassung der meteorologischen Umgebungsparameter, die unter anderen für die EDM-Streckenkorrektur benötigt werden, wurde der Datenlogger MSR145W gewählt (Tab. 1), weil in dieser Machbarkeitsstudie ein preisgünstiges Equipment getestet werden sollte, mit dem durch eine reichhaltige Bestückung in als kritisch erkannten Be-

Tab. 1: MSR145W Spezifikationen

Sensor	Standardabweichung σ
Temperatur	0.2°C (-10°C bis +58°C)
Luftdruck	2.5 mbar
Relative Luftfeuchte	2% (10% bis 85%)

reichen eine hohe Repräsentativität erreicht werden kann. Für die direkte Integration des USB-Stick-großen Sensors stellte die MSR Electronics GmbH eine Funktionsbibliothek zur Verfügung.

Das 20 m Radioteleskop wurde nicht nur als Überwachungsobjekt betrachtet, sondern gleichzeitig auch als Messsensor. Zum einen wurden die beiden Teleskopwinkel registriert um ggf. Verformungen auf Lastfalländerungen

3 Beobachtungskonzept

Für diesen ersten Überwachungsprozess an der Fundamentalstation Wettzell wurde ein Beobachtungszeitraum von drei Monaten, der sich von Mitte Mai bis Mitte August 2009 erstreckte, vorgesehen. Da der Referenzpunkt, definiert als Schnittpunkt zwischen der Azimut- und der Elevationsachse, nicht direkt messbar ist, wurden ledig-

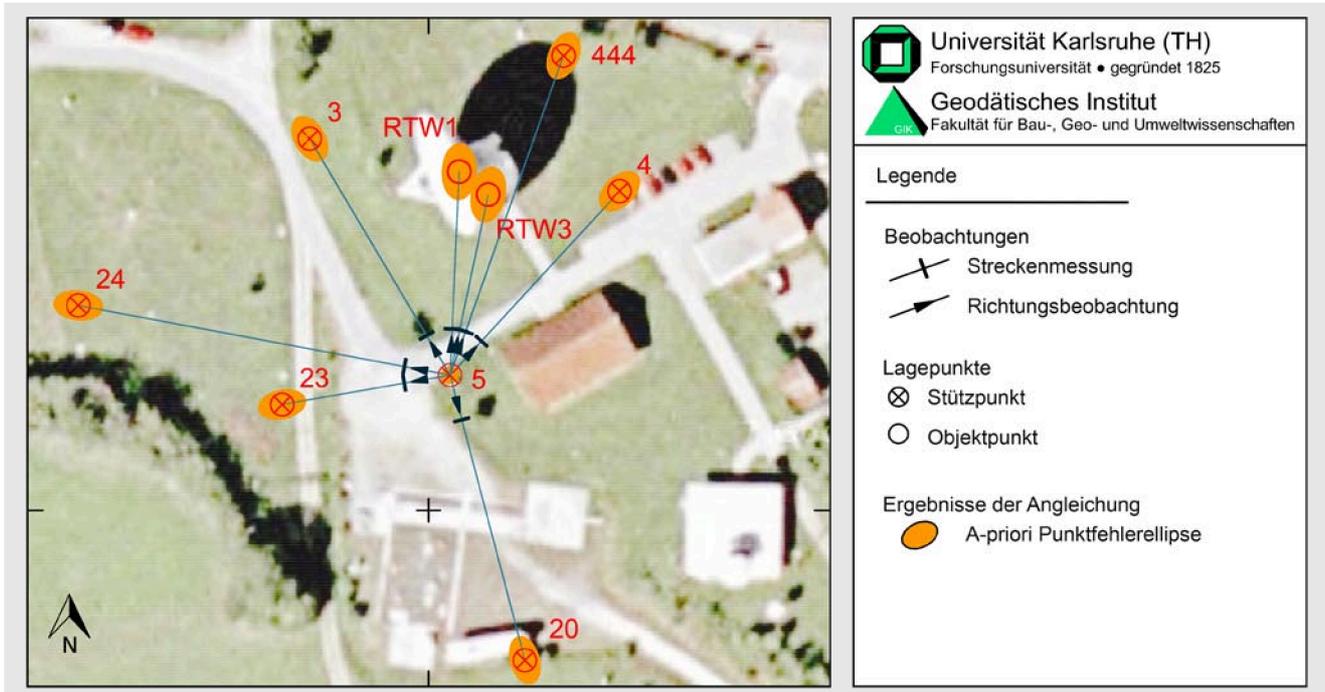


Abb. 2: Geplantes Überwachungsnetz in NetzCG (Luftbild: Google-Maps)

gen zurückführen zu können und zum anderen wurden die Werte der vier im Monument verbauten Temperatursensoren sowie der entlang der Azimutachse gespannte Invardraht, die Rückschlüsse über die Höhenvariationen des Radioteleskops liefern, gespeichert. Die Auskopplung der benötigten Sensordaten aus der Kontrollsoftware für das Radioteleskop, dem NASA Filed System, erfolgte über Komponenten, die für die Remotesteuerung von Beobachtungen in Wettzell entwickelt wurden (Neidhardt et al. 2009).

Da sich bei einem gewählten Beobachtungsintervall von ca. 15 Minuten innerhalb von drei Monaten enorm große Datenmengen ergeben, erfolgte die Speicherung der einzelnen Messepochen zweckmäßigerweise in einer SQL-Datenbank. Dies vereinfacht nicht nur die Aufbereitung und Prozessierung der Rohdaten mit dem eingebundenen Auswertemodul, sondern ermöglicht auch (im Zusammenspiel mit einem Webserver) die direkte online Visualisierung des Überwachungsprozesses in einem Webbrowser.

lich Punkte am Monument beobachtet. Um detaillierte Informationen über mögliche Veränderungen zu bekommen, wurde mit einem Beobachtungsintervall von ca. 15 Minuten gearbeitet. Das Überwachungsnetz ist, wie beispielsweise in Jäger et al. 2005 beschrieben, zweistufig aufgebaut und lässt sich in Stütz- und Objektpunkte unterteilen.

Grundlage für die als fest angenommenen Stützpunkte bilden sieben Punkte des vorhandenen, örtlichen Vermessungsnetzes an der Fundamentalstation, welches um das 20 m Radioteleskop durch stabile Vermessungspfeiler realisiert ist. In die Klasse der Objektpunkte fallen alle Punkte, die sich am Teleskop befinden. Abb. 2 zeigt die Situation vor Ort und die geplante Messanordnung. Um Übersicht zu wahren, sind nur zwei Punkte am Radioteleskop exemplarisch eingezeichnet. Bedingt durch die geometrische Anordnung war bei den Objektpunkten ein unsicherer Hochwert gegenüber dem Rechtswert zu erwarten, wie deutlich anhand der geschätzten Fehlerellipsen in Abb. 2 zu erkennen ist. Der abgeschätzte mittlere Punktfehler der Teleskoppunkte aus einer Präanalyse, die mit der Netzausgleichungssoftware NetzCG durchgeführt wurde, betrug $\hat{\sigma}_m = 1,3 \text{ mm}$ für eine Einzelepoch. Bedingt durch die teils hohen Korrelationen zwischen den einzelnen Epochen war jedoch davon auszugehen, dass

einige Effekte systematisch wirken und bei der Betrachtung von relativen Änderungen vernachlässigt werden können (z.B. Benning 2007). Die ermittelte innere Genauigkeit des relativen Verschiebungsvektors zwischen zwei Epochen betrug lediglich $\hat{\sigma}_{rel} = 0,5\text{ mm}$ nach einer Worst-Case-Abschätzung.

Vorbereitend für die spätere 3D-Auswertung der Netzbeobachtungen wurden zunächst die Kippachs- bzw. Re-

suchte Höhe h_k über einem Bezugshöheniveau nach (1) bestimmen.

$$0 = h_k + \frac{h_i \cot z_{i+1} - h_{i+1} \cot z_i}{\cot z_i - \cot z_{i+1}} \quad (1)$$

Die Messpeiler wurden mit Leica Präzisionsreflektoren vom Typ GPH1P be-

stückt. Zum Schutz vor Witterung wurden diese wie auch das Instrument mit einem kleinen Dach versehen (Abb. 4).

Am Radioteleskop konnten platzbedingt nur extrem kleine Reflektoren genutzt werden. Diese wurden sowohl am feststehenden Monumentteil als auch an der azimuthal drehenden Teleskopkabine magnetisch angebracht (Abb. 5).

Bedingt durch den regulären Beobachtungsbetrieb des Radioteleskops und die damit verbundenen Abschattungen war klar, dass bei den Reflektoren am drehbaren Teil mit größeren Datenlücken zu rechnen ist. Da der Referenzpunkt, der sich als Achsenschnitt-

punkt innerhalb der Teleskopkabine befindet, nicht direkt messbar ist, können dessen Variationen nur indirekt aus Bewegungen von Punkten am Radioteleskop abgeleitet werden. Reflektoren in der Nähe des Referenzpunktes an der Kabinenaußenwand erschienen hierfür am dienlichsten, da die dort registrierten Deformationen sich weit-

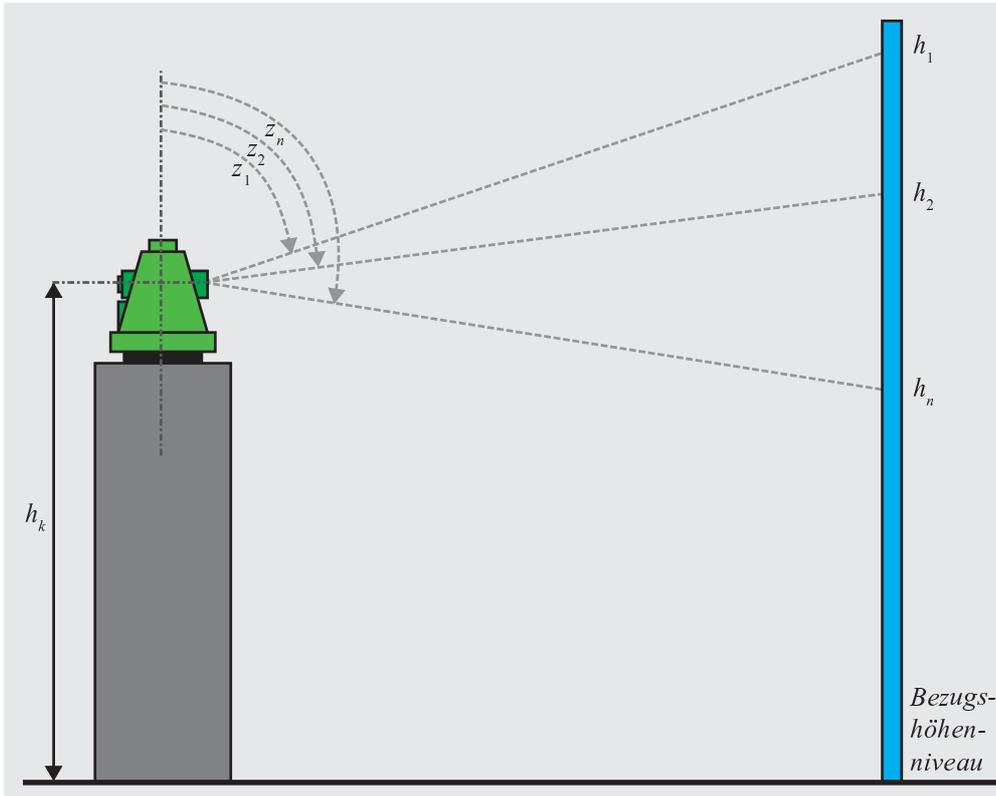


Abb. 3: Bestimmung der Reflektorzentrumshöhen

fektorhöhe h_k jedes einzelnen Stützpunktes ermittelt. Hierzu wurden jeweils fünf Zenitwinkelmessungen auf eine analoge Invarnivellierlatte, die sich auf einem Punkt mit bekannter Höhe befand, in beiden Lagen durchgeführt (Abb. 3). Aus den ermittelten Zenitwinkeln z_i und den zugehörigen Lattenablesungen h_i lässt sich die ge-



◀ Abb. 4: GPH1P (links) und TCA2003 (rechts) mit Schutzdach

▶ Abb. 5: Anordnung der Reflektoren am RTW in beiden Messphasen



gehend auf den im inneren dieser Kabine befindlichen Referenzpunkt übertragen lassen.

4 Refraktionskorrektur im Postprocessing

Um eine größtmögliche Aussagekraft für die Höhenbewegungen der Punkte an der Teleskopkabine zu erreichen, wurde zusätzlich ein Messsystem zur Refraktionsreduktion permanent installiert. Da sich im Tagesverlauf der vertikale Temperaturgradient um bis zu 1°C pro Meter ändern kann, sind allein durch die refraktionsbedingte Strahlkrümmung in einer Entfernung von 40 m vom Standpunkt (Pfeiler 5) scheinbare Hebungen von bis zu 0,8 mm möglich (Eschelbach 2007). Die Korrektur der Zenitwinkel erfolgte erst im Auswerteprozess unter Angabe der jeweils vorherrschenden Refraktionskoeffizienten. Dabei erhielten die Punkte höhenabhängige Koeffizienten, um die Höhenabhängigkeit des Temperaturgradienten zu berücksichtigen. Die für die Berechnung der Refraktionskoeffizienten notwendigen Temperaturgradienten wurden aus permanenten Turbulenzmessungen gewonnen. Das eigens dafür installierte Szintillometer (Abb. 6) liefert minutenweise Impuls- und Wärmeflussdaten, auf deren Basis sich nach der Monin-Obukhov-Similaritätstheorie der Temperaturgradient ableiten lässt. Mit dem Temperaturgradienten dT/dh ergibt sich die Höhenkorrektur Δh in Abhängigkeit von der Distanz s bzw. der Refraktionskoeffizient k (zur Nutzung in klassischen Softwarepaketen) näherungsweise zu

$$\Delta h = -\frac{s^2}{2} \frac{dT}{dh} 10^{-6} / ^\circ\text{C},$$

$$k = -10^{-6} \frac{dT}{dh} R$$

worin R der Erdradius ist.

An dieser Stelle soll nur kurz auf das physikalische Prinzip eingegangen werden. Eine detaillierte Beschreibung des Algorithmus befindet sich in (Eschelbach 2009) und wurde dort vor allem für konvektive Verhältnisse, bei denen besonders hohe negative Gradienten auftreten, optimiert.

Vertikale Temperaturgradienten entstehen immer dann, wenn horizontal verlaufende Luftschichten unterschiedliche Temperaturen besitzen. Tagsüber wird der Boden durch Sonneneinstrahlung aufgeheizt und die bodennahe Luftschicht wird erwärmt. Da warme Luft leichter ist als kalte, beginnt sofort ein Austausch der Luftschichten, der bei geodätischen Messungen üblicherweise als Bildflimmern in Erscheinung tritt. Hier wirken kleinste Luftpakete unterschiedlicher Dichte wie Linsen, die durch den Zielstrahl wandern und so das Flimmern verursachen.

Der durch das turbulente Medium verlaufende Laserstrahl des Szintillometers ist davon ebenfalls betroffen. Die am Ende des Übertragungsweges auftretenden Intensitätsschwankungen werden vom Szintillometer registriert und mit dem vorherrschenden Impuls- und Wärmefluss in der Luft in Beziehung gesetzt. Aus dem Wärmefluss erhält man schließlich den Temperaturgradienten, der zur Berechnung des vertikal wirkenden Refraktionseinflusses



Abb. 6: Szintillometer und sein Laserbereich im Messgebiet seitlich des RTW

bzw. des Refraktionskoeffizienten nötig ist. Mithilfe dieses Verfahrens konnte für diese Messkampagne je nach Tageszeit und damit je nach verwendetem Modellansatz eine Genauigkeit des Temperaturgradienten von mindestens 0,2°C erreicht werden, was einer Reduktion des Refraktionseinflusses von mindestens 50% gleichkommt. Diese Messunsicherheit entspricht in einer Entfernung von 45 m ca. 0,2 mm in der Höhenkomponente. Da die Korrektur jedoch pauschal für alle Zenitwinkel angenommen werden muss, ist der Nutzen des Verfahrens bei dieser Messanordnung eher begrenzt. Erst die Ableitung der turbulenten Flüsse aus hochfrequentem geodätischem Beobachtungsmaterial selbst würde individuelle, repräsentative Refraktionskoeffizienten für jedes Ziel liefern (vgl. Hennes 2002).

5 Auswertung

Die Vorauswertung der gemessenen Daten erfolgte weitgehend automatisiert, indem die erhobenen Messdaten epochenweise mit dem integrierten 3D-Netzausgleichsmodul prozessiert wurden. Ein Vergleich der Auswertungen mit und ohne Korrektur des refraktiven Einflusses zeigte bei 65% der Epochen eine Verringerung der Verbesserungsquadratsumme bei Berücksichtigung der ermittelten Refraktionskoeffizienten. Darüber hinaus war eine leichte Annäherung der Höhenbewegung der Objektpunkte an die am Invardraht abgegriffene temperaturabhängige Teleskophebung und -senkung festzu-

stellen. Trotz dieser Verbesserung sind die am Invardraht registrierten Höhenvariationen bedingt durch die wesentlich höhere Genauigkeit dieses Messsystems der trigonometrischen Bestimmung vorzuziehen.

In der Lage ist bei den Objektpunkten am Radioteleskop ein periodischer Tagesverlauf deutlich zu erkennen, der ebenfalls temperaturabhängig ist (Abb. 7 links), so dass mit den gewonnenen Daten anschließend eine Zeit-

mehreren Tagen, die sich so nicht füllen lassen. Gerade die Auswertung dieser Messreihen ist jedoch erforderlich, da sie für Änderungen der Referenzpunktposition repräsentativ sind. In der weiteren Betrachtung wurden deshalb nur Tage einbezogen, zu denen mindestens 80% der möglichen Beobachtungen vorlagen. Die so ausgewählten Tage wurden jeweils um den linearen Trend bereinigt, noch vorhandene Datenlücken durch Polynome niederen

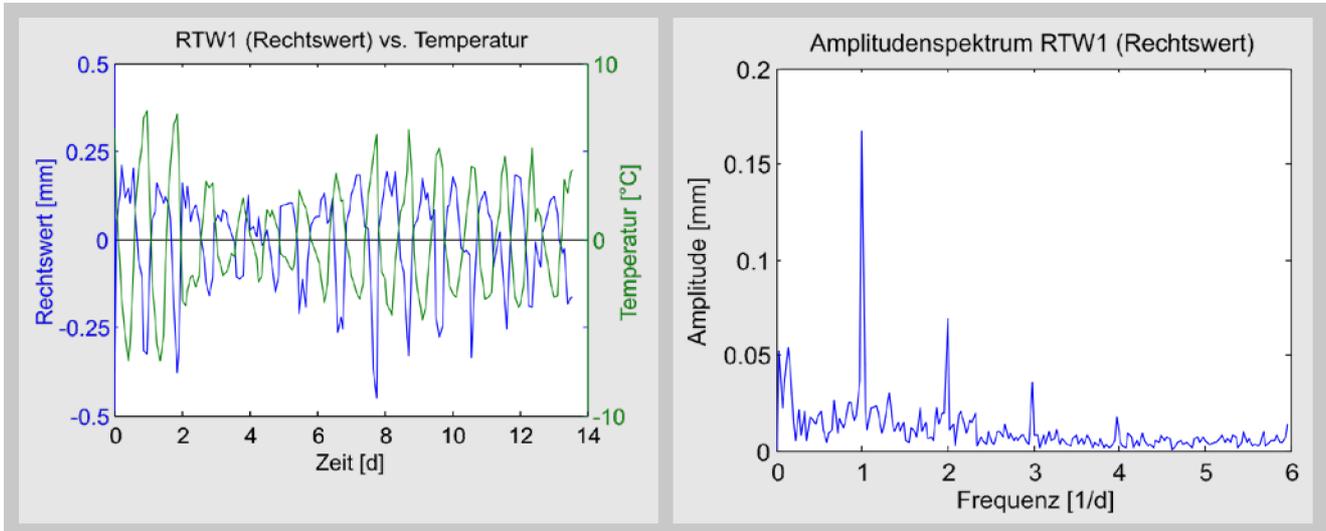


Abb. 7: Zeitreihe (links) und Amplitudenspektrum (rechts) eines Punktes am Monument

reihenanalyse durchgeführt wurde. Hierbei stellten sich die schon angesprochenen Datenlücken als problematisch heraus. Grundsätzlich lassen sich kleinere Messausfälle wie von Welsch et al. 2000 oder Neuner und Foppe 2009 empfohlen, problemlos durch Interpolation mit einfachen Regressionsfunktionen schließen. Aufgrund von mehrtägigen VLBI-Experimenten und Wartungsarbeiten am Radioteleskop existieren jedoch bei den Punkten an der Teleskopkabine sehr große Datenlücken von zum Teil

Grades geschlossen und anschließend epochenweise gemittelt (gestapelt). Ein positiver Nebeneffekt dieser Vorgehensweise war, dass unerwünschte Langzeittrends aus dem Datenmaterial automatisch eliminiert wurden, deren Ursache aufgrund der vorhandenen mehrtägigen Lücken im Beobachtungszeitraum nicht bestimmbar war. Im Ergebnis lagen so mittlere Tagesgänge für alle drei Punkte an der Teleskopkabine vor. Das schränkt zwar die Möglichkeiten einer Zeitreihenanalyse ein, jedoch konnten Informationen, die aus den Beobachtungen zu Punkten am Monument, bei denen die Datenreihen fast vollständig vorlagen, zusätzlich genutzt werden, um Annahmen zu stützen.

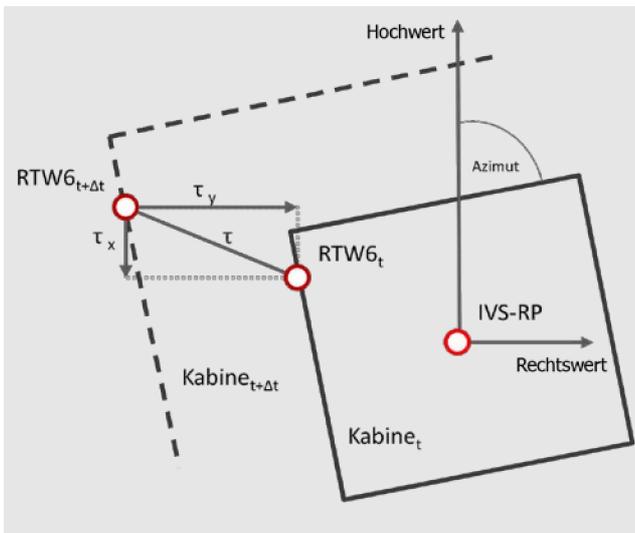


Abb. 8: Schematische Darstellung der Teleskopkabinenausdehnung und deren Korrektur

Die Tagesgänge der drei Kabinenpunkte (RTW6, RTW7 und RTW8) zeigen die mittlere Taumelbewegung des Radioteleskops, vgl. Abb. 9. Auffällig sind die unterschiedlich großen Amplituden der einzelnen Punkte, die mit der räumlichen Anordnung der Punkte am Teleskop insbesondere der unterschiedlichen Höhen (Abb. 5) korrelieren. Für eine Modellbeschreibung dieser Tagesverläufe bietet sich eine Fourierreihe (3) an (z.B. Welsch et al. 2000). Die Koeffizienten a_k und b_k einer solchen Reihe können durch eine Ausgleichung bestimmt werden, wenn feste Frequenzen f_k vorgegeben werden.

$$g(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^N (a_k \cos(2\pi f_k t) + b_k \sin(2\pi f_k t)) \quad (3)$$

Mithilfe der Amplitudenspektren lassen sich die in der Ausgleichsrechnung festzuhaltenden Frequenzen f_k ableiten. Abb. 7 rechts zeigt das Amplitudenspektrum einer Datenreihe von ca. einem Monat zu einem Punkt, der sich am feststehenden Monument befand. Gut zu erkennen sind der Peak bei $1/d$ sowie weitere Oberschwingungen bei $2/d$ und $3/d$, die für die Beschreibung des Signalverlaufs notwendig sind. Die Bestimmung der Fourier-

Radioteleskops auf die einzelnen Koordinatenkomponenten umzurechnen.

$$\tau = \alpha_{Stahl} (T - T_0) b \tag{5}$$

Die Anwendung von Gleichung (5) setzt jedoch die Kenntnis der Objekttemperatur T voraus, die nicht direkt gemessen wurde. Aus diesem Grund ist T aus der Umge-

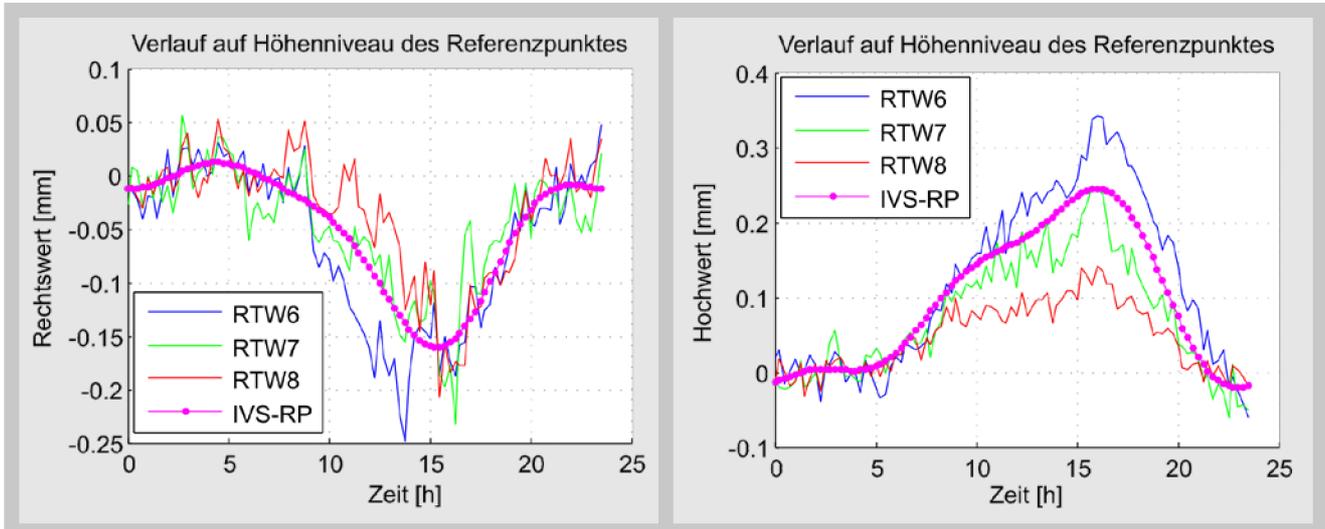


Abb. 9: Mittlerer gemessener Tagesgang der drei Kabinenpunkte sowie der daraus geschätzte mittlere Tagesgang auf dem Höhenniveau des IVS-Referenzpunktes

koeffizienten erfolgte mit diesen Frequenzen für die Punkte an der Teleskopkabine für Hoch- und Rechtswert getrennt.

Da sich kein Reflektor in der Höhe h des Referenzpunktes befand, wurde der theoretische Tagesverlauf auf dem Referenzpunkthöhenniveau mithilfe einer linearen Funktion $f(h)$ für Rechts- und Hochwert bestimmt, wobei der unbekannte Maßstabsfaktor m jeweils durch eine Ausgleichsrechnung geschätzt wurde.

$$f(h_j) = y_j = y_i (1 + m_i (h_j - h_i)) \tag{4}$$

Mit der von (Lösler 2008) bestimmten Referenzpunkthöhe ergeben sich die in Abb. 9 dargestellten mittleren Tagesgänge für den Rechts- bzw. Hochwert auf dem Höhenniveau des Referenzpunktes. Da die Tagesgänge der Reflektoren jedoch an der Außenseite der Teleskopkabine bestimmt wurden, ist zur Beschreibung des Referenzpunktverlaufs im inneren der Kabine die temperaturbedingte Ausdehnung in Abhängigkeit der Entfernung b der Reflektoren zum Referenzpunkt zu berücksichtigen.

Die infolge von Temperaturänderungen hervorgerufenen Variationen τ der Kabinenaußenwände (s. Abb. 9) lassen sich bei einem vorgegebenen Ausdehnungskoeffizient für Stahl von $\alpha_{Stahl} = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ m/K}$ und einer Bezugstemperatur $T_0 = 2^\circ\text{C}$ bestimmen und sind anschließend mithilfe der registrierten Azimutposition des

Temperatur abzuleiten. Neben dem Außentempersensor existieren vier weitere Sensoren im inneren des Radioteleskops, wovon sich einer direkt in der Teleskopkabine befindet (Zernecke 1999). Zur Berechnung von τ wurden die Außentemperatur, bei der eine Latenzzeit von vier Stunden Berücksichtigung fand, und die Kabinentemperatur zu jeweils gleichen Teilen herangezogen, vgl. Gleichung (6). Die Latenzzeit Δt wurde dabei aus der Kreuzkorrelationsfunktion von Innen- und Außentemperatur abgeleitet.

$$T_i = 0,5 (T_{Innen,i} + T_{Außen,i+\Delta t}) \tag{6}$$

Die Temperaturdifferenz des mittleren Tagesgangs des Materials betrug $\Delta T = T_{max} - T_{min} = 5,8^\circ\text{C}$. Mit den getroffenen Annahmen bezüglich des Tagesverlaufs eines Punktes auf dem Referenzpunkthöhenniveau an der Kabinenaußenwand (vgl. Abb. 9) und der temperaturbedingten Ausdehnung ergibt sich für den Referenzpunkt der in Abb. 10 dargestellte mittlere Tagesgang. Im Rechtswert sind Bewegungen von $\Delta y = 0,15 \text{ mm}$ und im Hochwert von $\Delta x = 0,25 \text{ mm}$ erkennbar. Während der Rechtswert vor allem durch die Richtungsmessung bestimmt wird, ist der Hochwert maßgeblich von der Streckenmessung beeinflusst, vgl. Abb. 2. Eine unzureichende EDM-Korrektur, die beispielsweise durch den nicht erfassten Temperaturverlauf entlang des Messstrahls verursacht wird, führt somit fast ausnahmslos zu einer Verfälschung des Hochwertes. Ein Temperaturunterschied von $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ ruft bei einer Stre-

cke $l = 50$ m bereits eine Differenz von $\Delta l = 0,1$ mm hervor, welche, da nur mit einem Instrument beobachtet wurde, unentdeckt bliebe. Der Rechtswert ist zwar weitgehend unabhängig von der Streckenunsicherheit, jedoch wird dieser maßgeblich durch die Korrektur der Kabinenausdehnung geprägt. Hierbei entspricht ein Modellfehler bei der Bestimmung der Objekttemperatur von $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ bereits einer Verschiebung $\Delta q = 0,05$ mm des Rechtswertes.

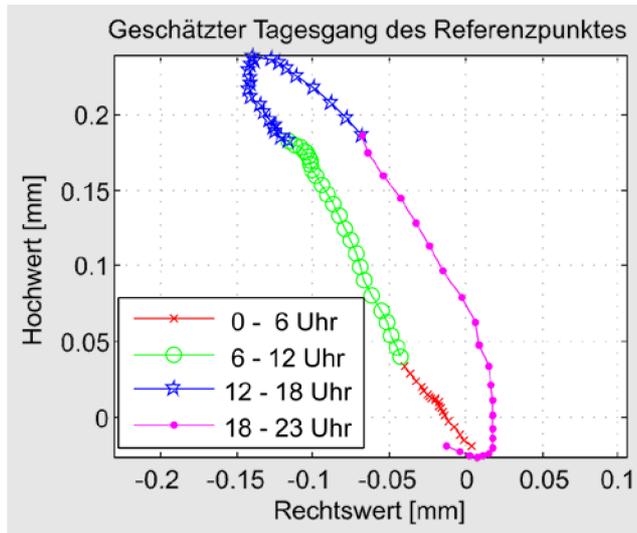


Abb. 10: Geschätzter Referenzpunktverlauf

Die ermittelten Variationen des Referenzpunktes sind im Hinblick auf die im GGOS angestrebten Genauigkeiten von deutlich unter einem Millimeter für die local-tie-Vektoren in jedem Fall nicht vernachlässigbar. Insofern kann die generelle Fragestellung nach der Notwendigkeit zur permanenten Überwachung bejaht werden. Da die Größe der Amplitude des Tagesgangs neben der Temperatur auch von der Teleskophöhe abhängt, sind jedoch für die kompakten Teleskope der 2010er-Generation wie beispielsweise den TWIN-Teleskopen in Wettzell (Hase et al. 2008) geringere Deformationen zu erwarten.

Grundsätzlich erscheint aufgrund der extrem kleinen Deformationen der Einsatz von mindestens einem weiteren Instrument und zusätzlichen Sensoren wie beispielsweise Neigungssensoren oder Globalstrahlungsmessensoren empfehlenswert. Eine zusätzliche Beobachtung von Pfeiler 3 (vgl. Abb. 2) würde nicht nur die Redundanz der Messung erhöhen, sondern auch die Netzgeometrie stabilisieren. Eine Steigerung der Auflösung durch ein Gerät mit besseren Spezifikationen erscheint nicht zielführend, solange die atmosphärischen Einflüsse nur unzureichend erfasst und korrigiert werden können. Insofern muss auch in diesem Bereich das Sensorennetz verdichtet werden.

Aufgrund des regulären Stationsbetriebs und den damit verbundenen mehrtägigen VLBI-Experimenten existieren sehr große Datenlücken, die nur mit einer längeren Beobachtungskampagne zuverlässig geschlossen werden können. Weiterhin lassen sich durch eine permanente

Installation von Messsensoren mögliche Langzeittrends detektieren, die mit den in dieser Machbarkeitsstudie erhobenen Daten nicht modellierbar sind. Da ein direkter Zusammenhang zwischen der Temperatur und Größe der Bewegung besteht, könnte mithilfe einer solchen Langzeitdatenreihe eine Übertragungsfunktion für die Lagevariationen des Referenzpunktes letztlich abgeleitet werden und, ähnlich dem Modell zur Kompensation der Höhenvariationen von Wresnik et al. 2007, in die VLBI-Datenanalyse integriert werden.

6 Resümee

An der Fundamentalstation in Wettzell wurde ein kontinuierliches Überwachungssystem, HEIMDALL, welches am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe entwickelt wurde, zur permanenten Beobachtung des 20 m VLBI-Radioteleskops über mehrere Monate eingerichtet. Ziel war es zu prüfen, wie stabil der oft als invariant bezeichnete Referenzpunkt ist.

Mithilfe der aufgezeichneten Daten konnte ein mittlerer Tagesgang für den IVS-Referenzpunkt durch eine Zeitreihenanalyse modelliert werden, aus dem sich temperaturbedingt Positionsänderungen im Zehntelmillimeter-Bereich ableiten lassen. Für die neue Generation an Radioteleskopen, die im Rahmen der Agenda VLBI2010 geschaffen werden, fallen die tageszeitlichen Variationen aller Wahrscheinlichkeit nach noch geringer aus, da deren Bauweise deutlich kompakter ist.

Um die Langzeitstabilität beurteilen zu können, sind längere Zeitreihen notwendig. Grundsätzlich ließen sich dann auch gesicherte Korrekturmodelle für die Positionsvariationen z. B. in Form einer Übertragungsfunktion, die eine Prädiktion des Referenzpunktverlaufes anhand des Temperaturganges ermöglicht, ableiten, die zur Verbesserung der Ergebnisse von VLBI-Daten führen. Der Einsatz von mehreren fest installierten Messsensoren wäre hierfür notwendig und sollte beim Bau neuer Radioteleskope berücksichtigt werden. Da local-tie als Verknüpfungsvektor die räumlichen Beziehungen zwischen den Referenzpunkten zweier Raumverfahren beschreibt, sollte der Fokus dabei jedoch nicht allein auf den Radioteleskopen liegen.

Danksagung

Ein besonderer Dank geht an die sehr engagierte VLBI- und Vermessungsgruppe in Wettzell, die uns nicht nur ein Tachymeter zur Verfügung stellte, sondern auch über den gesamten Zeitraum von drei Monaten dafür gesorgt hat, dass die Sichten zu allen Punkten frei blieben. Für anregende Diskussionen im Zuge der Arbeit sei Herrn Prof. Dr. Rüdiger Haas vom Onsala Space Observatory gedankt. Ferner danken wir der MSR Electronics GmbH für die schnelle und unbürokratische Bereitstellung der

Funktionsbibliothek für den Umgebungssensor, mit der der Datenlogger als aktiver Sensor direkt in HEIMDALL eingebunden werden konnte.

Literatur

- Altamimi, Z.; Collilieux, X.; Legrand, J.; Garayt, B.; Boucher, C.: ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *J. Geophys. Res.*, 112, B09401, S. 1–19, doi:10.1029/2007JB004949, 2007.
- Benning, W.: Statistik in Geodäsie, Geoinformation und Bauwesen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007.
- Bergstrand, S.; Haas, R.: Continuous Local Deformation Monitoring of an Arctic Geodetic Fundamental Station. ARCFAC Projekt Report, verfügbar unter: http://arcfac.npolar.no/pdf/Project_Reports/ID2008_58_Bergstrand_Rprt.pdf (zuletzt besucht: 18. Sep. 2009), 2009.
- Dawson, J.; Sarti, P.; Johnston, G.; Vittuari, L.: Indirect approach to invariant point determination for SLR and VLBI systems: an assessment. *J Geod*, 81, S. 433–441, doi: 10.1007/s00190-006-0125-x, 2007.
- Eschelbach, C.: Störanfälligkeit geodätischer Präzisionsmessungen durch lokale Temperaturschwankungen. In: Brunner, F. (Hrsg.): Beiträge zum 15. Internationalen Ingenieurvermessungskurs, Graz, S. 169–180, 2007.
- Eschelbach, C.: Refraktionskorrekturbestimmung durch Modellierung des Impuls- und Wärmeflusses in der Rauigkeitsschicht. München, Bayer. Akademie d. Wissenschaften, Deutsche Geodätische Kommission (DGK), Reihe C, Heft-Nr. 635, 2009.
- Eschelbach, C.; Haas, R.: The IVS-Reference Point at Onsala – High End Solution for a Real 3D-Determination. In: Schwegmann, W.; Thorandt, V. (Hrsg.): Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt/Leipzig, S. 109–118, 2003.
- Golther, Wolfgang: Handbuch der Germanischen Mythologie. Marix Verlag GmbH, Wiesbaden, 2004.
- Hennes, M.: Zum Refraktionseinfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und der Instrumentenentwicklung. *FuB*, Heft 2, S. 73–86, 2002.
- Hase, H.; Dassing, R.; Kronschnabl, G.; Schlüter, W.; Schwarz, W.; Kilger, R.; Lauber, P.; Neidhardt, A.; Pausch, K.; Göldi, W.: Twin Telescope Wettzell – a VLBI2010 radio telescope project. In: Finkelstein, A.; Behrend, D. (Hrsg.): Measuring the Future, Proceedings of the 5th IVS General Meeting, S. 109–113, 2008.
- Jäger, R.; Müller, T.; Saler, H.; Schwäble, R.: Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren. Ein Leitfaden für Ausbildung und Praxis von Geodäten und Geoinformatikern. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2005.
- Lösler, M.: Reference point determination with a new mathematical model at the 20 m VLBI radio telescope in Wettzell. *J App Geod*, 2, S. 233–238, doi: 10.1515/JAG.2008.026, 2008.
- Lösler, M.; Haas, R.: The 2008 local-tie determination at the Onsala Space Observatory. In: Bourda, G.; Charlot, P.; Collioud, A. (Hrsg.): Proceedings of the 19th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Bordeaux, S. 97–101, 2009.
- Neidhardt, A.; Ettl, M.; Zeitlhöfler, R.; Plötz, C.; Mühlbauer, M.; Dassing, R.; Hase, H.; Sobarzo, S.; Herrera, C.; Alef, W.; Rottmann, H.; Himwich, E.: A concept for remote control of VLBI-telescopes and first experiences at Wettzell. In: Bourda, G.; Charlot, P.; Collioud, A. (Hrsg.): Proceedings of the 19th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Bordeaux, S. 136–140, 2009.
- Neuner, H.; Foppe, K.: Grundlagen der Zeitreihenanalyse im Zeitbereich. In: Foppe, K.; Knaack, L.; Pawel, B. (Hrsg.): Beiträge zum 85. DVW-Seminar, Zeitabhängige Messgrößen – Verborgene Schätze in unseren Daten, Augsburg, 2009.
- Niell, A.; Whitney, A.; Petrachenko, B.; Schlüter, W.; Vandenberg, N.; Hase, H.; Koyama, Y.; Ma, C.; Schuh, H.; Tuccari, G.: VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems. In: Behrend, D.; Baver, K. (Hrsg.): IVS Annual Report 2005, NASA/TP-2006-214136, S. 13–40, 2006.
- Nothnagel, A.: Conventions on thermal expansion modelling of radio telescopes for geodetic and astrometric VLBI, *J Geod*, 83, S. 787–792, doi: 10.1007/s00190-008-0284-z, 2009.
- Ray, J.; Altamimi Z.: Evaluation of co-location ties relating the VLBI and GPS reference frames. *J Geod*, 79, S. 189–195, doi: 10.1007/s00190-005-0456-z, 2005.
- Rothacher, M.; Beutler, G.; Bosch, W.; Donnellan, A.; Gross, R.; Hinderer, J.; Ma, C.; Pearlman, M.; Plag, H.-P.; Richter, B.; Ries, J.; Schuh, H.; Seitz, F.; Shum, C.K.; Smith, D.; Thomas, M.; Velacogna, E.; Wahr, J.; Willis, P.; Woodworth, P.: The future Global Geodetic Observing (GGOS). 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-Verlag, Heidelberg/Berlin, 2009.
- Schlüter, W.; Brandl, N.; Dassing, R.; Hase, H.; Klügel, T.; Kilger, R.; Lauber, P.; Neidhardt, A.; Plötz, C.; Riepl, S.; Schreiber, U.: Fundamentalstation Wettzell – ein geodätisches Observatorium. *zfv*, 132, S. 158–167, 2007.
- Schuh, H.: The IVS on its way to the next generation VLBI system. Geodätische Woche 2009, Karlsruhe, 2009.
- Welsch, W.; Heunecke, O.; Kuhlmann, H.: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. In: Möser, M.; Müller, G.; Schlemmer, H.; Werner, H. (Hrsg.): Handbuch Ingenieurgeodäsie, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2000.
- Wresnik, J.; Haas, R.; Boehm, J.; Schuh, H.: Modeling thermal deformation of VLBI antennas with a new temperature model. *J Geod*, 81, S. 423–431, doi: 10.1007/s00190-006-0120-2, 2007.
- Zernecke R.: Seasonal variations in height demonstrated at the radio telescope reference point. In: Schlüter W.; Hase H. (Hrsg.): Proceedings of the 13th working meeting on European VLBI for geodesy and astrometry, Viechtach/Wettzell, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Fundamentalstation Wettzell, S. 15–18, 1999.

Anschrift der Autoren

Michael Lösler | Cornelia Eschelbach | Andreas Schenk
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Geodätisches Institut
 Englerstraße 7, 76131 Karlsruhe
www.gik.uni-karlsruhe.de
loesler@gik.uni-karlsruhe.de
eschelbach@gik.uni-karlsruhe.de
schenk@gik.uni-karlsruhe.de

Alexander Neidhardt
 Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie der TU München
 Geodaetisches Observatorium Wettzell
 Sackenrieder Straße 25, 93444 Bad Koetzing
www.fs.wettzell.de
neidhardt@fs.wettzell.de