
Zur Bestimmung des ILRS-Referenzpunktes am Satellite Observing System Wettzell

Michael LÖSLER, Cornelia ESCHELBACH, Stefan RIEPL und Torben SCHÜLER

Zusammenfassung

Die Kombination von geodätischen Raumtechniken ist essentiell für die Bestimmung eines globalen geodätischen Referenzrahmens sowie von Erdrotationsparametern. Eine direkte Verknüpfung der unterschiedlichen Raumtechniken ist aufgrund der geringen physischen Verknüpfungen nicht ohne Zusatzinformationen sinnvoll möglich. Eine Schlüsselrolle spielen hierbei lokale Verbindungsvektoren (Local-Ties), die zwischen den geometrischen Referenzpunkten der Raumtechniken definiert sind. Diese Verbindungsvektoren lassen sich an Forschungseinrichtungen wie dem Geodätischen Observatorium Wettzell durch präzise terrestrische Vermessung bestimmen. Eine besondere Herausforderung stellen hierbei die Referenzpunkte von VLBI-Radio- und SLR-Laserteleskopen dar, da diese nicht materialisiert und direkt taktil bestimmt werden können.

In diesem Beitrag wird eine indirekte Methode zur Bestimmung des geometrischen Referenzpunktes eines VLBI-Radio- bzw. SLR-Laserteleskopes vorgestellt. Das entwickelte Modell erlaubt eine automatisierte und prozessbegleitende messtechnische Erfassung aller relevanten Größen. Der neue Modellansatz erfordert darüber hinaus keine Synchronisation zwischen dem Messinstrument und dem Teleskop, sodass Messunsicherheiten minimiert werden. Eine erfolgreiche Validierung erfolgte 2018 am Satellite Observing System Wettzell, bei der die Datenerhebung vollständig automatisiert mit dem Lasertracker AT401 durchgeführt wurde, und der Referenzpunkt mit einer Unsicherheit von 50 μm bestimmt werden konnte.

1 Einleitung

Ein präziser globaler geodätischer Referenzrahmen ist essentiell, um die Erdfigur und ihre raum-zeitlichen Variationen zu beschreiben. Dieser Referenzrahmen ermöglicht die Entwicklung von globalen Lösungsstrategien für ein nachhaltiges Denken und Handeln. Die Notwendigkeit eines geodätischen Referenzrahmens wird nicht zuletzt durch die 2015 verabschiedete *Resolution on A Global Geodetic Reference Frame for Sustainable Development* der Vereinten Nationen unterstrichen (UNITED-NATIONS 2015).

Die Ableitung eines globalen geodätischen Referenzrahmens basiert auf der kombinierten Analyse der Messergebnisse der vier geodätischen Raumtechniken, DORIS¹, GNSS², SLR³

¹ Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite

² Global Navigation Satellite System

³ Satellite Laser Ranging

und VLBI⁴, welche durch den Internationalen Dienst für Erdrotation und Referenzsysteme (IERS) und dessen Services koordiniert werden (z.B. ALTAMIMI ET AL. 2011, ALTAMIMI ET AL. 2016). Eine sinnvolle Kombination ist aufgrund der schwachen physischen Verknüpfungen zwischen den vier Raumtechniken kaum möglich, sodass üblicherweise geometrische Zusatzinformationen im Auswerteprozess zu berücksichtigen sind. Diese bereitzustellenden Zusatzinformationen beschreiben hierbei die vektoriellen Beziehungen zwischen den geometrischen Referenzpunkten der Raumtechniken und werden häufig als Local-Ties bezeichnet (z.B. BRUNI 2017). Die Bestimmung der Local-Ties erfolgt durch terrestrische Präzisionsvermessung an Forschungseinrichtungen, die über mindestens zwei Raumtechniken an einem Standort verfügen. Da die Qualität der Local-Ties die globalen Ergebnisse direkt beeinflusst (z.B. GLASER ET AL. 2018), ist für deren Bestimmung eine Genauigkeit von unter 1 mm anzustreben (vgl. ROTHACHER ET AL. 2009). Aufgrund unvorhersehbarer Ereignisse wie Setzungen und Erdbeben oder aufgrund von Reparaturen und Instandsetzungsarbeiten können sich die Positionen der Referenzpunkte ändern (z.B. NEIDHARDT ET AL. 2011, BACHMANN ET AL. 2016). Des Weiteren unterliegen die Raumtechniken saisonalen Veränderungen, sodass Referenzpunktpositionen keine Invarianten sind (vgl. ZERNECKE 1999, MÄHLER ET AL. 2018). Das Global Geodetic Observing System (GGOS) regt daher ein prozessintegriertes Monitoring der Referenzpunkte an, um etwaige Variationen modellierbar zu machen, aber auch um plötzlich auftretende Veränderungen zu erkennen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen (ROTHACHER ET AL. 2009).

Während die geometrischen Referenzpunkte von GNSS- und DORIS-Antennen durch das Einmessen von vorhandenen Referenzmarken an den Antennen vergleichsweise einfach bestimmbar sind (vgl. POYARD ET AL. 2017), liegt die messtechnische Herausforderung bei der Bestimmung der geometrischen Referenzpunkte an SLR-Laserteleskopen bzw. VLBI-Radioteleskopen. Der geometrische ILRS⁵- bzw. IVS⁶-Referenzpunkt dieser Teleskope ist als Schnittpunkt zwischen der Primär- und der Sekundärachse definiert. Schneiden sich beide Achsen konstruktionsbedingt nicht, so ergibt sich der geometrische Referenzpunkt als orthogonale Projektion der sekundären Achse auf die primäre Achse (BERGSTRAND ET AL. 2014). Hierdurch ist der Punkt i.A. unzugänglich und nicht materialisierbar. Eine direkte Bestimmung durch antastende Messsysteme ist nicht möglich, sodass indirekte Bestimmungsmethoden anzuwenden sind. Üblicherweise werden Reflektoren an der Alhidade des Teleskops in verschiedenen Teleskoporientierungen messtechnisch erfasst und der Referenzpunkt unter Berücksichtigung von geometrischen Bedingungen aus den Trajektorien dieser Punkte zurückbestimmt (z.B. ESCHELBACH & HAAS 2003, KLÜGEL ET AL. 2012).

Eine indirekte Bestimmungsmethode, die ein prozessintegriertes Referenzpunktmonitoring erlaubt, wurde von LÖSLER (2008, 2009) vorgeschlagen und an verschiedenen Forschungseinrichtungen wie bspw. in Wettzell (Deutschland), Onsala (Schweden) oder Metsähovi (Finnland) erfolgreich eingesetzt (vgl. LÖSLER ET AL. 2013, KALLIO ET AL. 2016, MÄHLER ET AL. 2018). Das Modell kombiniert zur Referenzpunktbestimmung terrestrische Beobachtungen und Winkelmessungen vom Teleskop, sodass eine Synchronisation zwischen beiden Instrumenten zwingend ist. Diese Synchronisation ist insbesondere während Referenzpunktbestimmungen im regulären Stationsbetrieb zu berücksichtigen, da das Laserteleskop

⁴ Very Long Baseline Interferometry

⁵ International Laser Ranging Service

⁶ International VLBI Service for Geodesy and Astrometry

beim Tracken eines Satelliten die Erdrotation ausgleicht und der Satellitenbahn folgt und somit permanent eine rotative Bewegung ausübt. Während die hierbei auftretenden Unsicherheiten der terrestrischen Messungen sowie der Teleskopwinkelencoder aufgrund von Erfahrungen, Spezifikationen und Kalibriermessungen repräsentativ abgeschätzt werden können, ist die sachgerechte Bestimmung von Synchronisationsabweichungen zwischen dem terrestrischen Instrument und dem Teleskop herausfordernd. LÖSLER ET AL. (2016) schätzen mittels Monte-Carlo Simulation ab, dass die auftretenden Synchronisationsabweichungen eine zusätzliche Unsicherheit der Teleskopwinkelencoder von 10^{-4} rad hervorruhen. Umgerechnet auf eine Position, die einen Abstand zur Rotationsachse von 1 m aufweist, ergibt sich hierdurch eine zusätzliche Positionsunsicherheit von 0,1 mm. Mit zunehmendem Abstand von der Rotationsachse erhöht sich die resultierende Positionsunsicherheit und erreicht einen signifikanten Anteil im Unsicherheitsbudget.

In diesem Beitrag wird ein modifiziertes Verfahren zur prozessintegrierten Bestimmung des geometrischen Referenzpunktes vorgeschlagen, welches durch eine spezielle Messanordnung und Auswertestrategie die Synchronisation zwischen terrestrischem Instrument und Teleskop umgeht. Hierdurch verringert sich die Gesamtunsicherheit des abgeleiteten Referenzpunktes um den Anteil der Synchronisationsunsicherheit. Zur Validierung der neuen Analysestrategie wurden vollautomatisierte Messungen mit dem mobilen Lasertracker AT401 (Hexagon) am Satellite Observing System Wettzell (SOS-W) im Frühjahr 2018 durchgeführt und die Ergebnisse mit bisherigen Bestimmungsmethoden verglichen.

2 Referenzpunktbestimmung an SLR- und VLBI-Teleskopen

2.1 Beobachtungsgleichung zur Referenzpunktbestimmung

Die prozessintegrierte Bestimmung des geometrischen Referenzpunktes basiert auf einer Transformation zwischen einem Objektkoordinatensystem, welches durch das Teleskop vorgegeben wird, und einem übergeordneten terrestrischen Koordinatensystem, welches in Abhängigkeit vom Anwendungsfall ein lokales topozentrisches oder ein globales geozentrisches System sein kann. Das terrestrische Koordinatensystem ist üblicherweise durch festvermarktete Punkte (z.B. Vermessungspfeiler) an den Stationen vorhanden und wird in regelmäßigen Zyklen gewartet (z.B. KLÜGEL ET AL. 2012, MÄHLER ET AL. 2018). Das objektbezogene Teleskopkoordinatensystem ergibt sich aus der geometrischen Definition eines idealen Teleskops. Die Primär- und die Sekundärachse korrespondieren hierbei mit der z_{Tel} -Achse und der x_{Tel} -Achse. Der Ursprung liegt im Schnittpunkt beider rechtwinklig zueinanderstehenden Achsen. Die y_{Tel} -Achse verläuft durch den Ursprung und steht senkrecht auf der x_{Tel} - und z_{Tel} -Achse und vervollständigt das kartesische Teleskopsystem. Der Ursprung des Teleskopsystems entspricht somit dem geometrischen Referenzpunkt \mathbf{P}_{IRP} . Die Transformation des j -ten Punktes im Teleskopsystem

$$\mathbf{P}_{\text{Tel},j} = (x \quad y \quad z)^T \quad (1)$$

ins übergeordnete terrestrische Referenzsystem

$$\mathbf{P}_{\text{TRF},j,k} = (X \quad Y \quad Z)^T \quad (2)$$

ergibt sich durch

$$\mathbf{P}_{\text{TRF},j,k} = \mathbf{P}_{\text{IRP}} + \mathbf{R}_z^T(\kappa_k) \mathbf{R}_x(\omega_k) \mathbf{P}_{\text{Tel},j} \quad (3)$$

worin die Matrix \mathbf{R} eine Rotation um den eingeklammerten Winkel, um die im tiefgestellten Index angegebene Koordinatensystemachse beschreibt. Die Winkel κ und ω sind die Drehwinkel um die primäre bzw. sekundäre Teleskopachse. In einem Teleskop, bei dem die Azimut- und Elevationsachse mit der Primär- bzw. Sekundärachse zusammenfällt, erfolgt die Rotation um die Elevationsachse gegen den Uhrzeigersinn. Der Drehsinn der Azimutachse ist hingegen im Uhrzeigersinn definiert, weshalb in Gl. (3) die inverse Rotation für \mathbf{R}_z angegeben ist.

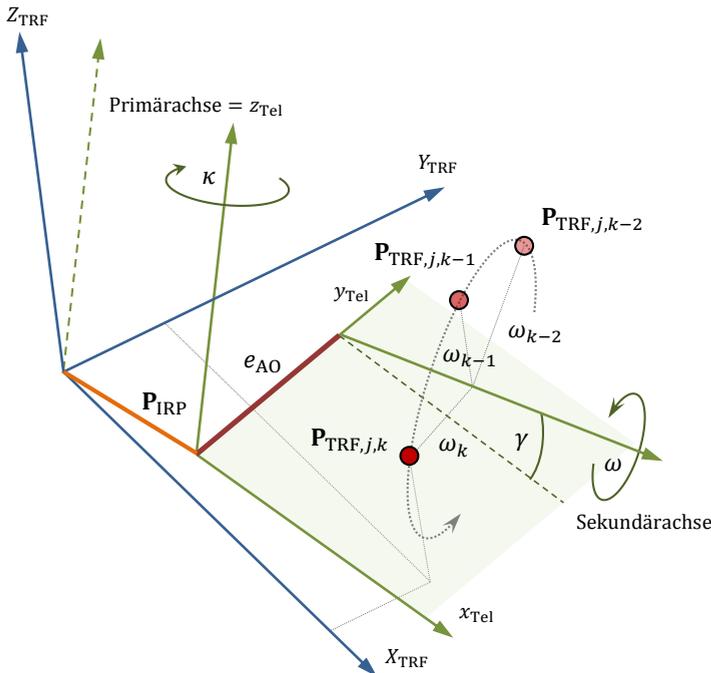


Abb. 1: Schematische Darstellung der Beziehungen zwischen dem in grün dargestellten Objektkoordinatensystem (Tel) und dem in blau dargestellten übergeordneten terrestrischen Referenzsystem (TRF), sowie die zu berücksichtigenden fertigungsbedingten Abweichungen. Die Position des j -ten Punktes ist in verschiedenen Teleskoporientierungen dargestellt, welche durch den Index k kenntlich gemacht sind.

Sowohl Fertigungstoleranzen als auch Designanforderungen führen zu Differenzen zwischen dem idealen (geometrischen) Teleskopmodell und dessen Realisierung. Weder eine mögliche Abweichung in der Orthogonalität γ noch ein möglicher Offset zwischen der Primär- und Sekundärachse $\mathbf{E}_{\text{AO}} = (0 \ e_{\text{AO}} \ 0)^T$ wird in Gl. (3) modelliert. Eine Berücksichtigung dieser konstruktionsbedingten Abweichungen führt zu

$$\mathbf{P}_{\text{TRF},j,k} = \mathbf{P}_{\text{IRP}} + \mathbf{R}_z^T(\kappa_k) \mathbf{R}_y(\gamma) (\mathbf{E}_{\text{AO}} + \mathbf{R}_x(\omega_k) \mathbf{P}_{\text{Tel},j}). \quad (4)$$

Wird weiterhin berücksichtigt, dass die z_{Tel} -Achse des Teleskopsystems nicht parallel zur Z_{TRF} -Achse des terrestrischen Koordinatensystems ist, so ergibt sich die finale Transformationsgleichung (LÖSLER 2009, LÖSLER ET AL. 2018A)

$$\mathbf{P}_{\text{TRF},j,k} = \mathbf{P}_{\text{IRP}} + \mathbf{R}_x(\beta) \mathbf{R}_y(\alpha) \mathbf{R}_z^T(\kappa_k) \mathbf{R}_y(\gamma) (\mathbf{E}_{\text{AO}} + \mathbf{R}_x(\omega_k) \mathbf{P}_{\text{Tel},j}) \quad (5)$$

worin die Drehwinkel α und β die nicht-Parallelität zwischen beiden Koordinatensystemen parametrieren. Abbildung 1 stellt die Parameter aus Gl. (5) sowie die beiden spezifizierten Koordinatensysteme dar. Da α und β Rotationen um mitdrehende Koordinatenachsen beschreiben, wurden diese beiden Winkel nicht eingezeichnet. Die nicht-Parallelität zwischen z_{Tel} und Z_{TRF} ist jedoch dargestellt.

Das Bestimmen der unbekannt Parameter in Gl. (5), d.h. der Referenzpunkt, das Achsenoffset, die Korrekturwinkel und die Positionen der Punkte im Teleskopsystem, erfordert das Messen von $\mathbf{P}_{\text{TRF},j,k}$ in verschiedenen Teleskopstellungen k , sowie das synchronisierte Erfassen der zugehörigen Winkelencoderwerte κ_k bzw. ω_k des Teleskops. Die Synchronisation ist insbesondere im regulären Stationsbetrieb zwingend, da jede Synchronisationsabweichung die Unsicherheiten für die geschätzten Parameter erhöht (LÖSLER ET AL. 2016).

2.2 Modifiziertes Verfahren zur Referenzpunktbestimmung

Um auf die synchronisierten Teleskopwinkelmessungen zu verzichten, muss die terrestrische Datenerfassung angepasst werden. Während bisher keine konfigurationsbedingten Einschränkungen getroffen wurden, erfordert das Eliminieren der Teleskopwinkelmessungen aus dem Beobachtungsvektor zusätzliche Verknüpfungsmessungen. Hierzu sind m Punkte in derselben Teleskopstellung k (simultan) zu beobachten, d.h. $\mathbf{P}_{\text{TRF},j,k}, \mathbf{P}_{\text{TRF},j+1,k}, \dots, \mathbf{P}_{\text{TRF},j+m,k}$, sodass die Winkel κ_k und ω_k dieser Teleskopstellung als zusätzliche Unbekannten im Ausgleichsalgorithmus schätzbar werden. Derartige Verknüpfungsmessungen sind zwischen allen Punkten im Teleskopsystem notwendig. Eine permanente Simultanmessung dieser Punkte ist hingegen nicht notwendig (LÖSLER ET AL. 2018A).

Da sich die beobachteten Positionen als eigenständige Funktionen von den Unbekannten darstellen lassen, kann Gl. (5) mit der Methode der kleinsten Verbesserungsquadrate formuliert als Gauß-Markov Modell gelöst werden. Das Normalgleichungssystem lautet

$$\mathbf{J}^T \mathbf{W} \mathbf{J} \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{J}^T \mathbf{W} \mathbf{l}. \quad (6)$$

Hierin ist \mathbf{J} die Jacobimatrix mit den partiellen Ableitungen nach den unbekannt Parametern, $\hat{\mathbf{x}}$ der Vektor der geschätzten Zuschläge, die an den Näherungswerten \mathbf{x}_0 anzubringen sind, \mathbf{l} ist der (gekürzte) Beobachtungsvektor und \mathbf{W}^{-1} bezeichnet die Dispersionsmatrix von \mathbf{l} , die das stochastische Modell mit $\mathbf{l} \sim \mathcal{N}(\mathbf{J}\mathbf{x}, \mathbf{W}^{-1})$ repräsentieren (z.B. LEHMANN & LÖSLER 2017).

Aufgrund der funktionalen Abhängigkeit zwischen den Koordinaten \mathbf{P}_{Tel} im Teleskopsystem und dem Absolutbezug von ω besitzt \mathbf{J} in Gl. (6) keinen vollen Spaltenrang und weist einen Datumsdefekt d auf, sodass

$$\text{nullity } \mathbf{J} = \text{nullity } \mathbf{J}^T \mathbf{W} \mathbf{J} = d > 0. \quad (7)$$

Ausgehend von einer festen Punktconfiguration am Teleskop beträgt $d = 1$ (LÖSLER ET AL. 2018A). Um den Datumsdefekt zu beheben, wird das Normalgleichungssystem Gl. (6) üblicherweise um d linear-unabhängige Bedingungsgleichungen $\mathbf{B}^T \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{d}$ erweitert (z.B. LEHMANN & LÖSLER 2017). Die Bedingungsgleichungen können dabei auf verschiedenen Wegen gewonnen werden. Im Folgenden beschränkt sich die Darstellung auf drei geometrisch interpretierbare Bedingungen. Da Gl. (5) lediglich für Winkeländerungen sensitiv ist aber nicht den absoluten Drehwinkel bestimmen kann, besteht die Triviallösung zur Behebung des rotativen Datumsproblems darin, einen Winkel

$$\omega_d = 0 \quad (8)$$

als deterministische Größe vorzugeben. Dies entspricht einer zwangsfreien Ausgleichung mit Nullvarianz-Rechenbasis (vgl. NEITZEL 2004). Nachteilig ist, dass die Wahl willkürlich getroffen werden muss und das Datum demnach durch diesen einen Wert definiert wird. Die Forderung nach einem mittleren Bezugspunkt für alle ω erfüllt die Bedingungsgleichung

$$[\mathbf{0} \quad \mathbf{I}] \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{0} \quad (9)$$

wobei unterstellt wird, dass sich die Winkel ω_k durch entsprechende Sortierung am Ende des Parametervektors befinden. Die Berücksichtigung von Gl. (9) entspricht einer Teilspurminimierung bzgl. der geschätzten Drehwinkel. Während Gl. (8) und Gl. (9) den Rotationsdefekt direkt beheben, kann dieser Defekt auch aus einer linearen räumlichen Helmert-Transformation mit infinitesimalen Drehwinkeln für die kartesischen Koordinaten abgeleitet werden (vgl. ILLNER 1985). Die zu berücksichtigende Bedingungsmatrix

$$\mathbf{B}^T = (0 \quad z_1 \quad -y_1 \quad \cdots \quad 0 \quad z_j \quad -y_j \quad 0 \quad \cdots \quad 0) \quad (10)$$

fordert, dass die Restklaffen zwischen den geschätzten Koordinaten des Teleskopsystems und den Näherungskoodinaten minimal werden. In Gl. (10) wird unterstellt, dass sich die zu den Punkten \mathbf{P}_{Tel} korrespondierenden Zeilen am Anfang von \mathbf{x} befinden. Da auch hier nur ein Teil der Parameter zur Defektbehebung beitragen, handelt es sich wiederum um eine Teilspurminimierung bzgl. der Punkte im Teleskopsystem. Gl. (10) wird standardmäßig sowohl in der Ingenieurgeodäsie im Kontext der freien Netzausgleichung als auch bei der Datenanalyse der Raumtechniken eingesetzt, da diese einfach zu implementieren ist und einen hohen Anschauungsgrad aufweist. Der Vorteil von Gl. (8)-(10) gegenüber dem pauschalen Bilden der Pseudoinverse ist, dass ausschließlich der auftretende Datumsdefekt behandelt wird. Ein möglicher Konfigurationsdefekt z.B. aufgrund unvollständiger Messungen wird nicht behandelt und somit auch nicht verschleiert.

3 Referenzpunktbestimmung am SOS-W

Das im Bayerischen Wald gelegene Geodätische Observatorium Wettzell (GOW) wird kooperativ vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie und der Technischen Universität München betrieben. Es zählt zu den sogenannten GGOS Core-stations und stellt Instrumente für alle vier Raumtechniken bereit. Insgesamt verfügt die Forschungseinrichtung über acht GNSS-Stationen, eine DORIS-Antenne, drei VLBI-Radioteleskope und zwei

SLR-Laserteleskope. Darüber hinaus betreibt das Observatorium auch einen Ringlaser und supraleitende Gravimeter (z.B. SCHLÜTER ET AL. 2007, MÄHLER ET AL. 2018).

3.1 Automatisierte Datenerhebung mittels AT401

Zur Validierung der modifizierten Analyseverfahren wurde im Frühjahr 2018 eine Messkampagne am SLR-Laserteleskop, dem Satellite Observing System Wettzell (vgl. RIEPL ET AL. 2005), initiiert. Das Satellite Observing System Wettzell (SOS-W) befand sich zum Zeitpunkt der Messkampagne aufgrund von Sicherheitsbestimmungen bzgl. der Laserklasse nur nachts im operativen Einsatz und stand tagsüber für lokale terrestrische Messkampagnen zur Verfügung. Im Rahmen der Untersuchung sollte geprüft werden, ob das erweiterte Modell vergleichbare Ergebnisse zu bisherigen Bestimmungsmethoden liefert und somit prinzipiell zur Referenzpunktbestimmung geeignet ist. Mit Hinblick auf die Forderung nach weitgehend automatisierter Referenzpunktbestimmung durch das GGOS, erfolgten alle Messungen mit dem selbstentwickelten Monitoring System HEIMDALL (z.B. LÖSLER ET AL. 2016). Das System wurde dahingegen erweitert, dass es neben Totalstationen auch Lasertracker ansteuern kann, sodass im Rahmen dieser Untersuchung der mobile Lasertracker AT401 (Hexagon) zum Einsatz⁷ kam. Das Instrument ist mit einer Messunsicherheit von $15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m}$ im gesamten Messvolumen spezifiziert (HEXAGON METROLOGY 2012). Voraussetzung ist, dass die meteorologischen Parameter repräsentativ erfasst und berücksichtigt werden. Das SOS-W befindet sich unter einem verschließbaren Radom. Das Netz innerhalb dieses Radoms weist eine Ausdehnung von ca. $5 \times 5 \text{ m}$ auf, sodass von homogenen, stabilen und repräsentativ erfassbaren meteorologischen Bedingungen ausgegangen werden konnte, die den Einsatz eines Lasertrackers rechtfertigen.

Um eine möglichst umschließende Punktabdeckung um das Messobjekt herum zu erhalten, sind Beobachtungen von verschiedenen Standpunkten nötig. Zur Verknüpfung der Standpunkte sind Messungen in einem übergeordneten Referenzrahmen notwendig. Die Realisierung dieses Bezugsrahmens erfolgte durch eine temporäre Installation von 14 Driftnestern, die eine magnetische Aufnahme für glaslose 1,5" Corner-Cube-Reflektoren (CCR) bieten. Eine Installation dieses Reflektortyps an der Alhidade des Teleskops kam aufgrund des limitierten Öffnungswinkels der CCR von lediglich $\pm 30^\circ$ nicht in Frage. Bei einer Messentfernung von $< 2,5 \text{ m}$ zwischen AT401 und SOS-W würde sich nur ein geringer Schwenkbereich für das Teleskop ergeben, in dem die Reflektoren sichtbar sind. Aus diesem Grund wurden vier Cat-Eye-Reflektoren (CER) am SOS-W magnetisch montiert, die einen Öffnungswinkel von $\pm 60^\circ$ aufweisen.

Abbildung 2 zeigt die Sichtbarkeiten von Reflektoren mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln in Abhängigkeit der Azimut- und Elevationsstellung des Teleskops für einen geplanten Standpunkt in einer Entfernung von etwa 2,5 m. Neben dem CCR ($\pm 30^\circ$) und dem CER ($\pm 60^\circ$) ist der mögliche Messbereich für das Super Cat-Eye (SCER) abgebildet, welches einen Öffnungswinkel von $\pm 75^\circ$ aufweist. Die beiden Cat-Eye-Reflektoren decken gegenüber dem CCR erwartungsgemäß einen deutlich größeren Arbeitsbereich ab. Der Mehrwert des SCER gegenüber dem CER wäre für diese Anwendung hingegen gering, da zur vollständigen hemisphärischen Abdeckung in jedem Fall mindestens drei Standpunkte notwendig sind.

⁷ <https://youtu.be/Mdwt1VsWb68>

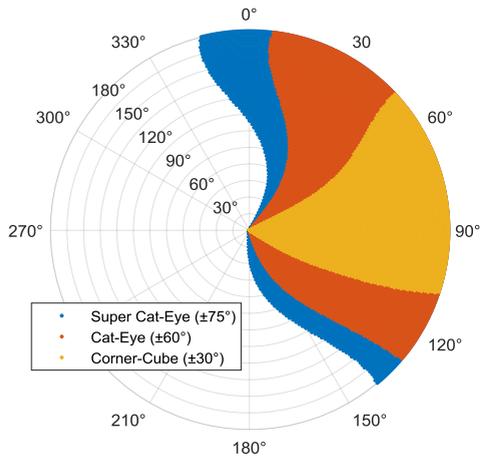


Abb. 2: Skyplot mit den resultierenden Sichtbarkeiten verschiedener Reflektortypen mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln für einen geplanten Standpunkt in Abhängigkeit der Azimut- und Elevationsausrichtung des SLR-Laserteleskops.

Insgesamt wurden an verschiedenen Tagen fünf Referenzpunktbestimmungen durchgeführt. Die Messungen erfolgten jeweils von fünf Instrumentenstandpunkten, die um das SOS-W frei gewählt wurden, sodass eine vollständige hemisphärische Abdeckung resultierte. Bei der Wahl der Standpunkte wurde darauf geachtet, dass mindestens sechs Punkte im übergeordneten Referenzsystem sichtbar waren. Hierbei erwies sich aufgrund von räumlichen Restriktionen die kompakte Bauweise des AT401 als vorteilhaft.



Abb. 3: SOS-W mit vier seitlich montierten und ausgerichteten CER (links) der Konfiguration I und vier frontal installierten CER (rechts) der Konfiguration II. Das Detailbild zeigt einen der verwendeten CER, die einen Öffnungswinkel von $\pm 60^\circ$ aufweisen und magnetisch am Teleskop befestigt wurden.

Für die Anordnung der CER am SOS-W wurden zwei unterschiedliche Konfigurationen gewählt. Während der ersten drei Kampagnen wurde eine seitliche Installation gewählt (Konfiguration I). Für die letzten beiden Kampagnen wurden die CER in Teleskoprichtung montiert und ausgerichtet (Konfiguration II), vgl. Abbildung 3.

Um einen Vergleich zwischen dem originären Modellansatz und der modifizierten Analysestrategie zu ermöglichen, wurde das SLR-Teleskop im Stop-and-Go Modus verfahren. Hierdurch entfallen mögliche Synchronisationsunsicherheiten zwischen Lasertracker und SOS-W, sodass diese beim späteren Vergleich mit dem bisherigen Bestimmungsmodell vernachlässigt werden konnten. Weiterhin erlaubt diese Konfiguration das Erfassen von mehreren Reflektoren in einer Teleskopstellung, wie dies das modifizierte Modell zumindest partiell vorsieht.

3.2 Auswertung und Ergebnisse

Die Auswertung der Lasertrackerdaten erfolgte zunächst durch eine Netzausgleichung. Hierbei wurden die Messungen der verschiedenen Standpunkte miteinander kombiniert und in ein einheitliches Datum überführt. Die Netzauswertung in der industriellen Messtechnik erfolgt üblicherweise unabhängig vom Erdschwerefeld (z.B. ESCHELBACH ET AL. 2017). Neben der Standpunktcoordinate werden zusätzlich zwei Drehwinkel geschätzt, die die Abweichung der lokalen Stehachse des Instruments gegenüber Z_{TRF} berücksichtigt. Die allgemeinen Beobachtungsgleichungen zur Integration der Messungen von einem Standpunkt im übergeordneten Referenzrahmen lauten (vgl. JÄGER ET AL. 2017)

$$\begin{pmatrix} \Delta v \\ \Delta u \\ \Delta w \end{pmatrix}_{i,j} = \mathbf{R}_s \begin{pmatrix} \Delta Y \\ \Delta X \\ \Delta Z \end{pmatrix}_{i,j} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ ih \end{pmatrix}_i + \mathbf{R}_s \mathbf{R}_T^T \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ th \end{pmatrix}_j. \quad (11)$$

Hierin ist die Instrumenten- und Zielpunkthöhe durch ih und th gegeben. Für Lasertrackermessungen können diese i.A. zu $ih = th = 0$ gesetzt werden. Der Vektor $(\Delta Y \ \Delta X \ \Delta Z)^T$ enthält die Koordinatendifferenzen im globalen Referenzrahmen und $(\Delta v \ \Delta u \ \Delta w)^T$ ist der korrespondierende Vektor im Standpunktsystem. Die Rotationssequenz zur Korrektur der Stehachsneigung gegenüber Z_{TRF} lautet für den Stand- bzw. Zielpunkt \mathbf{R}_s bzw. \mathbf{R}_T und enthält jeweils die punktbezogenen Korrekturwinkel ζ_X bzw. ζ_Y , die eine Rotationssequenz um die X - bzw. Y -Achse beschreiben.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \zeta_X & -\sin \zeta_X \\ 0 & \sin \zeta_X & \cos \zeta_X \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \zeta_Y & 0 & \sin \zeta_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \zeta_Y & 0 & \cos \zeta_Y \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Die mittels Gl. (11) resultierenden Beobachtungsgleichungen bezogen auf das Standpunktsystem lauten

$$s_{ij} = \sqrt{\Delta v^2 + \Delta u^2 + \Delta w^2}, \quad (13a)$$

$$t_{ij} = \text{atan}_2 \frac{\Delta v}{\Delta u} - \text{o}, \quad (13b)$$

$$v_{ij} = \text{atan}_2 \frac{\sqrt{\Delta v^2 + \Delta u^2}}{\Delta w} \quad (13c)$$

für die Schrägstrecke, die Richtung und den Zenitwinkel und sind im Ausgleichsprogramm Java·Applied·Geodesy·3D (JAG3D) implementiert (LÖSLER ET AL. 2018B).

Die gemeinsame Ausgleichung aller Messkampagnen lieferte für die ca. 2.200 beobachteten Reflektorpositionen am Teleskop eine Unsicherheit von maximal 80 μm . Basierend auf den geschätzten Koordinaten $\mathbf{P}_{\text{TRF},j}$ und deren Dispersionsmatrix \mathbf{W}^{-1} wurde der geometrische ILRS-Referenzpunkt im originären Modellansatz und mit dem modifizierten Verfahren unter Berücksichtigung von Gl. (10) bestimmt. Ferner erfolgte die Bestimmung des ILRS-Referenzpunktes mit einem Kugelmodell, wie es bei bisherigen Analysen verwendet wurde (vgl. KLÜGEL ET AL. 2012). Unter der Annahme, dass kein Achsenoffset vorhanden ist, korrespondiert der geometrische Referenzpunkt mit dem Kugelmittelpunkt, wobei für jeden Punkt $\mathbf{P}_{\text{Tel},j}$ ein individueller Radius zu berücksichtigen ist.

Tabelle 1: Gegenüberstellung der geschätzten Referenzpunktkoordinaten aus dem originären Modell, dem modifizierten Ansatz und der Kugelausgleichung. Das Achsenoffset ist im Kugelmodell nicht parametrierbar, sodass es nur für das originäre Modell und den modifizierten Ansatz angegeben ist.

	X in m	Y in m	Z in m	e_{AO} in mm
Originäres Modell	100,16246	197,69374	50,01237	-0,03
Modifiziertes Verfahren	100,16246	197,69376	50,01234	-0,02
Kugelmodell	100,16247	197,69375	50,01234	–

Tabelle 1 fasst die Ergebnisse der unterschiedlichen Modellannahmen zusammen. Die Differenzen in den geschätzten Referenzpunktkoordinaten betragen für die horizontale Komponente 20 μm und für die Höhe 30 μm . Das Achsenoffset ist nur im originären Modell und im modifizierten Ansatz parametrierbar und variiert um 10 μm . Bezogen auf die geschätzten Parameterunsicherheit von 50 μm sind diese Differenzen insignifikant. Die modifizierte Modellbildung liefert gegenüber anderen Modellbildungen somit vergleichbare Resultate und ist zur Bestimmung des geometrischen Referenzpunktes geeignet. Da das Offset zwischen Primär- und Sekundärachse beim SOS-W vernachlässigbar ist, ergeben sich hohe Übereinstimmungen zum Kugelmodell. Für Teleskope mit Achsenoffset führt diese Modellannahme jedoch zu einer verzerrten Schätzung für die Referenzpunktkoordinaten, sodass hierfür Modellbildungen wie die hier beschriebenen vorzuziehen sind.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Koordinatendifferenzen des geschätzten Referenzpunktes zwischen dem modifizierten Analyseverfahren und dem Kugelmodell pro Messkampagne und Konfiguration I bzw. II.

	24.04. / I	25.04. / I	26.04. / I	27.04. / II	28.04. / II
ΔX in mm	0,004	0,001	0,008	0,000	0,002
ΔY in mm	0,003	0,006	-0,002	-0,005	-0,008
ΔZ in mm	0,005	-0,002	0,007	0,032	0,033

Tabelle 2 fasst die Differenzen der Einzellösungen zwischen der modifizierten Analysestrategie und dem Kugelmodell zusammen. Alle Differenzen sind $\ll 50 \mu\text{m}$. Die größten Differenzen sind für die Konfiguration II in der Höhenkomponente zu erkennen. Diese wei-

chen um ca. 30 μm voneinander ab. Ob es sich hierbei jedoch tatsächlich um eine konfigurationsbedingte Abweichung handelt, ist aufgrund der abgeschätzten Messunsicherheiten nicht eindeutig zu ermitteln. Die durch das GGOS angeregte Genauigkeitsanforderung für den Referenzpunkt von $\ll 1$ mm wird jedoch erreicht.

4 Zusammenfassung

Die Bereitstellung eines globalen geodätischen Referenzrahmens ist die essentielle Voraussetzung zur Beschreibung der Erdfigur und ihrer raum-zeitlichen Variationen. Es bildet die wissenschaftliche Grundlage für ein nachhaltiges Denken und Handeln und gibt globalen Ereignissen einen eindeutigen Raumbezug. Die Bestimmung eines globalen geodätischen Referenzrahmens erfolgt durch eine kombinierte Auswertung der vier geodätischen Raumtechniken, DORIS, GNSS, SLR und VLBI. Da die Messungen der vier Raumtechniken nur schwache physische Verknüpfungen aufweisen, ist eine sinnvolle Kombination nur durch die zusätzlichen geometrischen Informationen von Local-Ties möglich (BRUNI 2017). Local-Ties sind Vektoren, die zwischen den geometrischen Referenzpunkten der Raumtechniken definiert sind. An Forschungseinrichtungen, die mindestens zwei dieser Techniken betreiben, lassen sich Local-Ties durch präzise terrestrische Ingenieurvermessung mit der erforderlichen Genauigkeit bestimmen. Insbesondere die Bestimmung der ILRS- und IVS-Referenzpunkte an SLR-Laser- bzw. VLBI-Radioteleskopen ist herausfordernd, da hierfür indirekte Verfahren erforderlich sind. Desweiteren strebt das GGOS eine weitgehend automatisierte und kontinuierliche Messung der geometrischen Referenzpunkte an, um etwaige Änderungen frühzeitig zu erkennen und zu berücksichtigen.

In diesem Beitrag wurde eine neue Analyseverfahren vorgestellt, die eine prozessintegrierte Bestimmung des geometrischen Referenzpunktes ermöglicht. Im Gegensatz zum bisherigen Verfahren entfällt die unsicherheitsbehaftete Synchronisation zwischen Teleskop und terrestrischen Messinstrument vollständig. Das neue Verfahren benötigt eine angepasste Messkonfiguration, bei der in einer Teleskopstellung mehrere Punkte eingemessen werden. Ein permanentes simultanes Erfassen der Teleskoppunkte in einer Teleskopstellung ist jedoch nicht nötig. Es ist demnach ausreichend, wenn Verknüpfungsmessungen vor und nach einem Experiment oder innerhalb von Wartungsintervallen durchgeführt werden.

Die neue Analysestrategie wurde am Satellite Observing System Wettzell im Frühjahr 2018 erstmals erfolgreich getestet. Mit dem selbstentwickelten Monitoring Programm HEIM-DALL wurde eine automatisierte Referenzpunktbestimmung durchgeführt. Zur Datenerfassung wurde der mobile Lasertracker AT401 verwendet. Insgesamt wurden in einer Woche fünf Messkampagnen durchgeführt und mehr als 2.200 Positionen am SOS-W erfasst. Die durch die Netzausgleichung mit JAG3D abgeschätzten Unsicherheiten überschreiten 80 μm für die Punkte am Teleskop nicht. Auf der Basis der ausgeglichenen Punkte sowie der zugehörigen Dispersionsmatrix erfolgte die Bestimmung des geometrischen Referenzpunktes und zusätzlicher Teleskopparameter mit dem neuen Analyseansatz. Zusätzlich wurde der Referenzpunkt mit zwei etablierten Bestimmungsverfahren auf derselben Datenbasis bestimmt und den Ergebnissen des neuen Ansatzes gegenübergestellt. Hierbei konnten aufgrund der unterschiedlichen Modellbildung Differenzen von $\ll 50$ μm zwischen den Lösungen festgestellt werden. Unter Berücksichtigung der erzielten Messunsicherheiten sind diese geringen Modellabweichungen als vernachlässigbar anzusehen und der neue Ansatz

liefert Ergebnisse, die vergleichbar zu bisherigen Bestimmungsmethoden sind. Insbesondere werden die durch GGOS geforderten Genauigkeitsanforderungen von $\ll 1$ mm erfüllt.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich ganz herzlich bei Swetlana Mäher für die Bereitstellung der Adapter zur flexiblen Befestigung der Cat-Eye-Reflektoren am SOS-W.

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

Literatur

- Altamimi, Z., Collilieux, X., Métivier, L. (2011): *ITRF2008: An Improved Solution of the International Terrestrial Reference Frame*. Journal of Geodesy, 85(8), S. 457–473. doi: 10.1007/s00190-011-0444-4
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., Collilieux, X. (2016): *ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions*. Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 121, S. 6109–6131. doi: 10.1002/2016JB013098
- Bachmann, S., Thaller, D., Roggenbuck, O., Lösler, M., Messerschmitt, L. (2016): *IVS contribution to ITRF2014*. Journal of Geodesy, 90(7), S. 631–654. doi: 10.1007/s00190-016-0899-4.
- Bergstrand, S., Collilieux, X., Dawson, J., Haas, R., Long, J., Pavlis, E.C., Saunier, J., Schmid, R., Nothnagel, A. (2014): *Resolution on the Nomenclature of Space Geodetic Reference Points and Local Tie Measurements*. IERS Working Group on Site Survey and Co-location.
- Bruni, S. (2016): *Combination of GNSS and SLR measurements: Contribution to the Realization of the Terrestrial Reference Frame*. Dissertation, Department of Physics and Astronomy of the University of Bologna. doi: 10.6092/unibo/amsdottorato/7636
- Eschelbach, C., Haas, R. (2003): *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, BKG, Leipzig/Frankfurt, S. 109–118.
- Eschelbach, C., Lösler, M., Winkemann, P., Arnold, M., Pietralla, N. (2017): *Einsatz mobiler Lasermesstechnik bei der Erfassung von Strahlführungselementen eines Elektronenlinearbeschleunigers*. avn – Zeitschrift für alle Bereiche der Geodäsie und Geoinformation, 124(3), S. 61–69.

- Glaser, S. König, R., Neumayer, K.H., Nilsson, T., Heinkelmann, R., Flechtner, F., Schuh, H. (2018): *On the impact of local ties on the datum realization of global terrestrial reference frames*. Journal of Geodesy, S. 1–13. doi: 10.1007/s00190-018-1189-0
- Hexagon Metrology (2012): *Leica Absolute Tracker AT401 - Absolutely Portable*. Datenblatt.
- Illner, I. (1985): *Datumfestlegung in freien Netzen*. Dissertationen, Reihe C, 309, Deutsche Geodätische Kommission, München.
- Jäger, R.; Gorokhova, L.; Messmer, E. (2017): *Modell- und Sensorintegration zum integrierten 3D-Geomonitoring in moderner Datenkommunikationsstruktur mit Anwendung auf den Stuttgarter Fernsehturm*. In: Lienhart, W. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 17: Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz*, Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach, S. 239–252.
- Kallio, U., Lösler, M., Bergstrand, S., Haas, R., Eschelbach, C. (2016): *Automated Simultaneous Local Ties with GNSS and Robot Tachymeter*. In: Behrend, D., Baver, K.D., Armstrong, K.L. (Hrsg.): *Proceedings of the 9th IVS General Meeting*, S. 154–158.
- Klügel, T., Mähler, S., Schade, C. (2012): *Ground survey and local ties at the geodetic observatory ground survey and local ties at the geodetic observatory*. In: *Proceedings of the 17th International Workshop on Laser Ranging*, Vol. 48, BKG, Frankfurt, S. 127–131.
- Lehmann, R., Lösler, M. (2017): *Congruence analysis of geodetic networks – hypothesis tests versus model selection by information criteria*. Journal of Applied Geodesy, 11(4), S. 271–283. doi: 10.1515/jag-2016-0049
- Lösler, M. (2008): *Reference Point Determination with a new Mathematical Model at the 20 m VLBI Radio Telescope in Wettzell*. Journal of Applied Geodesy, Vol. 2(4), S. 233–238. DOI: 10.1515/JAG.2008.026
- Lösler, M. (2009): *New Mathematical Model for Reference Point Determination of an Azimuth-Elevation Type Radio Telescope*. Journal of Surveying Engineering, 135(4), S. 131–135. doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000010
- Lösler, M., Haas, R., Eschelbach, C. (2013): *Automated and Continual Determination of Radio Telescope Reference Points with sub-mm Accuracy: Results from a Campaign at the Onsala Space Observatory*. Journal of Geodesy, 87(8), S. 791–804. doi: 10.1007/s00190-013-0647-y
- Lösler, M., Haas, R., Eschelbach, C. (2016): *Terrestrial monitoring of a radio telescope reference point using comprehensive uncertainty budgeting – Investigations during CONT14 at the Onsala Space Observatory*. Journal of Geodesy, 90(5), S. 467–486. doi: 10.1007/s00190-016-0887-8
- Lösler, M., Eschelbach, C., Riepl, S. (2018a): *A Modified Approach for Automated Reference Point Determination of SLR and VLBI Telescopes*. tm – Technisches Messen, 85(10), S. 616–626. doi: 10.1515/teme-2018-0053
- Lösler, M., Eschelbach, C., Jarecki, F. (2018b): *Auswerte- und Analysestrategie für automatisierte untertägige Überwachungsmessungen*. In: Benndorf, J. (Hrsg.): 19. Geoki-

- nematischer Tag, 2018-1, Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Freiberg, S. 64–78.
- Mähler, S., Klügel, T., Lösler, M., Schüler, T. (2018): *Permanentes Referenzpunkt-Monitoring der TWIN Radioteleskope am Geodätischen Observatorium Wettzell*. avn – Zeitschrift für alle Bereiche der Geodäsie und Geoinformation, 125(7), S. 210–219.
- Neidhardt, A., Kronschnabl, G., Schatz, R. (2011): *Geodetic Observatory Wettzell: 20-m Radio Telescope and Twin Telescope*. In: Behrend, D., Baver, K.D. (Hrsg.): International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2010 Annual Report, S. 113–116. NASA/TP–2011-215880
- Neitzel, F. (2004): *Nullvarianz-Rechenbasis und Eigenschaften der Koordinaten bei freier Netzausgleichung*. zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, 129(5), S. 335–342.
- Poyard, J.-C., Collilieux, X., Muller, J.-M., Garayt, B., Saunier, J. (2017): *IGN Best Practice for Surveying Instrument Reference Points at ITRF Co-Location Sites*. Tech. Rep. 39, Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), BKG, Frankfurt. ISBN: 978-3-86482-129-5
- Riepl, S., Schlüter, W., Dassing, R., Haufe, K.-H., Brandl, N., Lauber, P., Neidhardt, A. (2005): *The SOS-W – A two colour kilohertz SLR system*. In: Proceedings of the 14th International Laser Ranging Workshop, Ministerio De Defensa, Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA).
- 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.): Global Geodetic Observing System, Springer, Berlin, S. 237–272. doi: 10.1007/978-3-642-02687-4_9.
- 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), S. 158–167.
- United-Nations (2015): *Resolution on A Global Geodetic Reference Frame for Sustainable Development*. 69. Session, Agenda Item 9, a/69/1.53 ed.
- Zernecke, 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, Leipzig, S. 15–18.

Lösler, Michael
Frankfurt University of Applied Sciences
Laboratory for Industrial Metrology
Nibelungenplatz 1, 60318 Frankfurt am Main, Deutschland
michael.loesler@fb1.fra-uas.de

Eschelbach, Cornelia
Frankfurt University of Applied Sciences
Laboratory for Industrial Metrology
Nibelungenplatz 1, 60318 Frankfurt am Main, Deutschland
cornelia.eschelbach@fb1.fra-uas.de

Riepl, Stefan
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Geodätisches Observatorium Wettzell
Sackenrieder Str. 25, 93444 Bad Kötzing, Deutschland
stefan.riepl@bkg.bund.de

Schüler, Torben
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
Geodätisches Observatorium Wettzell
Sackenrieder Str. 25, 93444 Bad Kötzing, Deutschland
torben.schueler@bkg.bund.de