
Industriemesssysteme zur Qualitätssteigerung von VLBI-Ergebnissen

Maria Hennes, Universität Karlsruhe
Rüdiger Haas, Chalmers Technical University
Cornelia Eschelbach, Universität Karlsruhe

Zusammenfassung: Der folgende Artikel erläutert, wie Ingenieurvermessung und Industriemesssysteme für die Qualitätssteigerung von VLBI-Ergebnissen eingesetzt werden können. Hochpräzise VLBI-Ergebnisse sind eine unabdingbare Grundlage für die Erstellung und Aufrechterhaltung von internationalen Referenzsystemen. Für die Qualitätssicherung und -steigerung der VLBI-Ergebnisse ist eine exakte Kenntnis der Geometrie der Radioteleskope, die für VLBI-Beobachtungen verwendet werden, bedeutsam. Zur Geometrie gehört neben der Form der Reflektoren vor allem die Festlegung des Referenzpunktes. Diese Aufgaben können mit Methoden der Ingenieurvermessung unter Verwendung von zum Teil neuartigen Systemen der industriellen Messtechnik effizient gelöst werden. Beispiele von Arbeiten am 20 m Radioteleskop in Onsala (Schweden) sowie optimierte Vorgehensweisen werden präsentiert.

1 Einleitung

VLBI-Ergebnisse sind eine wesentliche Grundlage für die Erstellung und Aufrechterhaltung von internationalen Referenzrahmen. In diesem Zusammenhang ist Qualität als die Gesamtheit **aller** Merkmale zu definieren, die zur Festlegung der Referenzrahmen mittels VLBI- und GPS-Beobachtungen mit mm-Genauigkeit beitragen. Es kann von einer hohen inneren Genauigkeit von VLBI-Ergebnissen ausgegangen werden. Mit zunehmender Qualität der VLBI-Beobachtungen ist jedoch die geometrische Anbindung des physikalischen Bezugspunktes, auf den sich ja die VLBI-Beobachtungen beziehen, an den lokalen Referenzrahmen weltweit immer weniger mit ausreichender Qualität realisiert. Deswegen werden in diesem Beitrag qualitätssteigernde Messverfahren zur Anbindung vorgestellt. Sie müssen geeignet sein, den Referenzpunkt eines Teleskops geometrisch festzulegen und sollten nach Möglichkeit auch geeignet sein, seine Stabilität zu überwachen. Des Weiteren ist die Verformung der Teleskopreflektoren und die Lage und Stabilität der Azimutachse von Bedeutung. Um die Ausfallzeiten während der Vermessung der Geometrie so gering wie möglich zu

halten, sollten zur Anwendung kommende Verfahren entweder kurze Messzeiten garantieren oder während des üblichen Betriebs des Teleskops eingesetzt werden können. Das Ziel sollte eine Datenbank sein, die für jede VLBI-Beobachtungsepoche den geometrischen Zustand des Radioteleskops dokumentiert. Darüber hinaus ist anzustreben, qualitativ bekannte Phänomene aufgrund der hierdurch verfügbaren Datenbasis bestmöglich zu modellieren.

2 Internationale Referenzrahmen und VLBI

2.1 Internationale Referenzrahmen

Im Auftrag der International Astronomical Union (IAU) und der International Union for Geodesy and Geophysics (IUGG) erstellt der International Earth Rotation Service (IERS) Realisierungen von international anerkannten Zälestischen und Terrestrischen Referenzrahmen, sowie Referenzwerte für Erdrotationsparameter. Diese Referenzrahmen, der International Celestial Reference Frame (ICRF) und der International Terrestrial Reference Frame (ITRF), stellen Realisierungen idealer Referenzsysteme dar. Zu ihrer Erstellung und Fortführung kombiniert der IERS Ergebnisse verschiedener raumgeodätischer Verfahren wie VLBI, GPS, SLR und DORIS. VLBI kommt dabei unter den verschiedenen raumgeodätischen Verfahren eine besondere Bedeutung zu, da diese Technik eine direkte Verbindung von ITRF und ICRF darstellt. Dies begründet sich dadurch, dass die extraterrestrischen Radioquellen des ICRF in der VLBI direkt beobachtet werden. Des Weiteren zeichnet sich VLBI dadurch aus, dass Nutationskorrekturen direkt bestimmt werden können und der Erdrotationswinkel ohne Beeinflussung durch Satellitenorbits abgeleitet werden kann. Für die Erstellung und Aufrechterhaltung der Internationalen Referenzrahmen ist es von grosser Bedeutung, dass die Qualität der VLBI-Ergebnisse so hoch wie möglich ist. Weiterhin ist für die Verknüpfung von VLBI-Ergebnissen und Ergebnissen der anderen raumgeodätischen Techniken unabdingbar, dass an Kollokationsstationen die lokalen Exzentrizitäten zwischen den Referenzpunkten der verschiedenen Techniken mit hoher Genauigkeit bekannt sind.

2.2 VLBI-Beobachtungen

VLBI ist ein interferometrisches Verfahren, bei dem Signale extraterrestrischer Radioquellen auf zwei Frequenzen im Gigahertzbereich mit mindestens zwei Radioteleskopen gleichzeitig empfangen werden (Sovers, Fanselow und Jacobs, 1998). Die Signale werden in den Megahertzbereich herabgemischt, digitalisiert, mit hochgenauer Zeitinformation versehen und an eine Korrelationsstation weitergeleitet. An der Korrelationsstation werden die so verarbeiteten, digitalen Signale der beiden Radioteleskope dann zusammengeführt, und in einem Korrelationsprozess wird der Laufzeitunterschied der Signale zwischen den beiden Radioteleskopen bestimmt. Letzter ist abhängig von der räumlichen Geometrie der

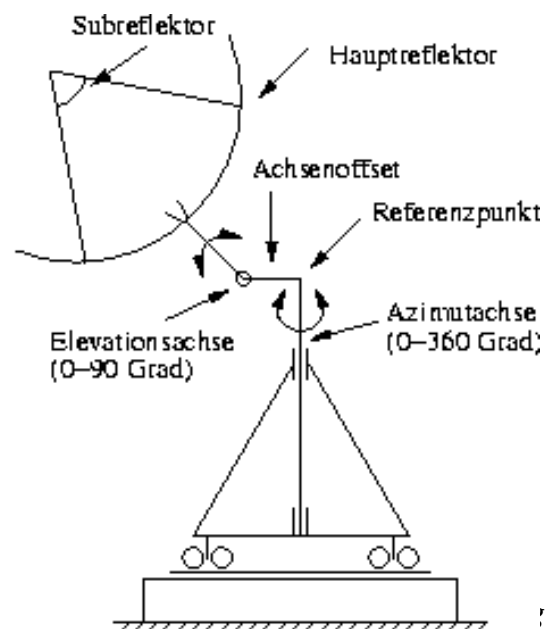
Teleskope zum Zeitpunkt der Registrierung der Signale und der Ausbreitung der Signale durch Weltraum und Erdatmosphäre.

Somit beinhaltet dieser Laufzeitunterschied Information beispielsweise über die Koordinatendifferenz zwischen den beiden Radioteleskopen, die Erdorientierung zum Beobachtungszeitpunkt und die Koordinaten der beobachteten Radioquellen. In einer anschließenden Datenanalyse dieser VLBI-Laufzeitunterschiede lassen sich dann diese Parameter bestimmen. Wichtig hierbei ist, dass sich die VLBI-Laufzeitunterschiede auf einen Referenzpunkt in der Teleskopgeometrie beziehen, der einen festen Bezug zur Erdkruste und damit zu anderen Referenzsystemen hat und bei Teleskopbewegungen während der VLBI-Beobachtungen invariant bleiben soll.

3 Referenzpunkt von VLBI-Radioteleskopen

3.1 Referenzpunktdefinition

Für VLBI-Messungen werden Radioteleskope unterschiedlicher Bauart verwendet, beispielsweise Teleskope mit Azimut-Elevation-Montierung, mit X-Y-Montierung oder mit Äquatorial-Montierung. Allen Montierungen gemein ist, dass eine bewegliche und eine fest montierte Teleskopachse verwendet werden, um das Teleskop in unterschiedliche Richtungen auszurichten. Der invariante Referenzpunkt eines Radioteleskops ist als der Schnittpunkt dieser beiden Teleskopachsen definiert, oder für den Fall, dass sich die Achsen nicht schneiden, als der Punkt der fest montierten Achse mit kürzestem Abstand zur beweglichen Achse (Ma, 1978; Sovers, Fanselow und Jacobs, 1998). Wenn die beiden Achsen sich nicht schneiden, spricht man von einer



eines Radioteleskops der Cassegrain-Bauart mit Azimut-Elevation-Montierung.

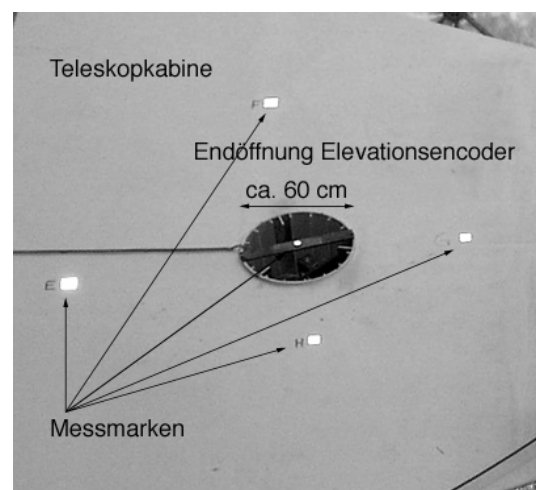
Datenanalyse mit hoher Genauigkeit bekannt sein muss, um qualitativ hochwertige VLBI-Ergebnisse erzielen zu können. Abbildung 1 zeigt schematisch Referenzpunkt und Achsenoffset für ein Radioteleskop der Cassegrain-Bauart mit Azimut-Elevation-Montierung.

3.2 Messtechnische Referenzierung des Referenzpunktes

Üblicherweise ist der Referenzpunkt eines Radioteleskops weder materialisiert noch zugänglich. Auch die Bestimmungselemente (feste und bewegliche Achse) sind als virtuell anzusehen, weil ihre mechanischen Verkörperungen keine Referenzierung tragen. Deswegen muss der virtuelle Referenzpunkt durch Teleskoprotationen zugänglich gemacht werden. Im Folgenden wird dies am Beispiel der Azimut-Elevation-Montierung erläutert. Die Elevationsachse wird definiert durch die Mittelpunktsnormale eines Kreises, der durch eine an dem in Elevationsrichtung beweglichen Teil der Teleskopkonstruktion angebrachten Messmarke (vgl. Abbildung 2: vier große rechteckige weiße Marken) bei Elevationsänderung gebildet wird (Elevationskreis). Da üblicherweise der Kreisradius klein im Vergleich zur Achslänge ist, sollte auf eine Extrapolation über die Normale verzichtet werden und statt dessen auf der Gegenseite des in der Elevationsrichtung beweglichen Teils der Teleskopkonstruktion analog ein Kreismittelpunkt gebildet werden. Die Elevationsachse wird durch diese beiden Mittelpunkte bestimmt.

Die – annähernd vertikale – Azimutachse wird analog gebildet durch die Mittelpunktsnormale eines Kreises (Azimutalkreis), der durch Rotation um die Azimutachse entsteht, wobei wiederum die Spur einer Messmarke betrachtet wird, die an dem in Elevationsrichtung beweglichen Teil der Teleskopkonstruktion angebracht ist. Der Referenzpunkt ist mit dem Mittelpunkt dieses Azimutalkreises identisch, wenn diese Messmarke (kleine Marke im Elevationsachsenendpunkt in Abbildung 2) mit der Elevationsachse zusammenfällt oder – gleichbedeutend – Zentrum eines Elevationskreises ist. Die Justierung der Messmarke auf die Elevationsachse kann iterativ erreicht werden, indem die Bewegung der Marke bei grossen Elevationsänderungen beobachtet und diese solange verschoben wird, bis sie in einem möglichst kollinear zur Elevationsachse ausgerichteten Messfernrohr invariant erscheint. In der Praxis hat sich hierbei eine magnetische Halterung als brauchbar erwiesen (Eschelbach, 2002), jedoch ist im Hinblick auf die zu erreichende Genauigkeit eine Feinpositionierung mittels Justierschrauben empfehlenswert.

Da von einem von Null verschiedenen Achsenoffset auszugehen ist, beschreibt die Messmarke bei beliebigen Rotationskombinationen keine Kugelfläche, sondern näherungsweise ein Rotationsellipsoid.



Messmarken. Vier Messmarken auf der Teleskopkabine (E, F, G, H) und eine auf den Elevationsachsenendpunkt justierte Messmarke (Mitte).

Die entstehende Fläche lässt sich mathematisch in Abhängigkeit der Rotationswinkel und der unbekannt Parameter für die Referenzpunktkoordinaten, das Achsenoffset und die Messmarkenposition (in Bezug auf die Referenzpunktkoordinaten) beschreiben. Wird nun eine ausreichende Anzahl von Punktkoordinaten dieser Fläche messtechnisch ermittelt, lassen sich die unbekannt Parameter bestimmen. Werden ausgewählte Spuren der Messmarke verwendet, vereinfacht sich die Berechnungsmethode (vgl. Abschnitt 4.1 und 5.1), und die als Hilfsparameter eingeführten Rotationswinkel entfallen. Allen Methoden für die qualitativ hochwertige Referenzpunktbestimmung ist gemeinsam, dass das Radioteleskop von einem Netz aus mindestens fünf Punkten umschlossen wird, von denen aus möglichst grosse Segmente des Azimutkreises und ggf. mehrere Elevationskreise beobachtet werden können. Das Netz wird durch die Beobachtung gemeinsamer Objektpunkte und durch die gemeinsamen Kreisgleichungen stabilisiert. Die Verknüpfung des lokalen Beobachtungssystems mit dem übergeordneten Referenzsystem geschieht mit üblichen Methoden, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

3.3 Deformation von VLBI-Radioteleskopen durch Umwelteinflüsse

Radioteleskope sind in der Regel Bauwerke aus Stahl und Stahlbeton, die Umwelteinflüssen ausgesetzt sind. Falls ein Radioteleskop nicht durch eine Radomhülle geschützt ist, können beispielsweise Windkräfte zu Verformungen des Teleskops führen. In jedem Fall entstehen jedoch thermische Deformationen durch sich ändernde Umgebungstemperaturen. Nur zwei der derzeit für VLBI genutzten internationalen Radioteleskope sind mit direkten Messeinrichtungen ausgerüstet, die kontinuierlich die thermische Deformation der Teleskope, zumindest in Vertikalrichtung, messen. Dies sind die Teleskope in Onsala und Wettzell, bei denen eine saisonale Vertikalverschiebung des Referenzpunktes mit einer Amplitude in der Grössenordnung von 2-3 mm gemessen wird (Haas *et al.*, 2003). Es besteht daher ein Bedarf, thermische Deformationseffekte an anderen Teleskopen ingenieurtechnisch zu messen, damit entsprechende Korrekturmodelle für die VLBI-Datenanalyse entwickelt werden können.

3.4 Gravitative Verformung von Radioteleskopen

Für die Beobachtung von Radioquellen muss der Teleskopreflektor eines Radioteleskops entsprechend mit den zwei Teleskopachsen ausgerichtet werden. Dabei wirken gravitative Kräfte auf den Teleskopreflektor und können zu Verformungen des Teleskopreflektors führen, so dass die Teleskopbrennweite verändert wird. Diese Brennweitenveränderung hat eine sinusförmige Elevationsabhängigkeit (Clark und Thomsen, 1988). Auch im Falle dass die Brennweite eines Radioteleskops korrigiert wird, um gravitativ bedingte Verformungseffekte auszugleichen, verbleibt dennoch ein elevationsabhängiger Einfluss auf die Signallaufzeit im Teleskop selbst. Eine fehlerhafte Modellierung dieses ele-

vationsabhängigen Effektes in der VLBI-Datenanalyse schlägt sich in einer systematischen Verfälschung der Vertikalposition nieder (Jacobs und Rius, 1989). Es besteht daher Bedarf, gravitative Deformationseffekte mit Hilfe von ingenieurgeodätischen Methoden messtechnisch zu erfassen, damit entsprechende Korrekturmodelle für die VLBI-Datenanalyse erstellt bzw. existierende Modelle überprüft werden können. Des Weiteren ist zu überprüfen, ob eine Achsschiefe besteht, so dass durch Achstaumeln eine Verlagerung des Referenzpunktes stattfindet.

4 Messmethoden

4.1 Theodolitmesssystem (angulare Methode)

Mit einem Theodolitmesssystem, bestehend aus zwei Präzisionstheodoliten mit automatischer Datenerfassung, werden zur Referenzpunktbestimmung die Spuren der Messmarken durch räumliche Vorwärtsschnitte erfasst. Alle lokalen Messungen werden zunächst gemeinsam ausgeglichen, so dass für die Kreismitelpunktsbestimmungen homogenes Datenmaterial vorliegt. Aus dem optimalen Schnittwinkel von etwa 140gon für durch räumlichen Vorwärtsschnitt bestimmte Punkte lässt sich eine gute Netzkonfiguration ableiten. Sie ist dann gegeben, wenn fünf Standpunkte gewählt werden, deren Abstand zur Azimutachse jeweils etwa der Länge der materialisierten Elevationsachse entspricht. Nach Bill et al. (1985) kann abgeschätzt werden, dass für alle einsehbaren azimutalen Teleskoppositionen der dreidimensionale Punkfehler um nicht mehr als das 1.5-fache in Bezug auf denjenigen bei optimalem Schnittwinkel ansteigt, bei Verdopplung des Abstandes wird etwa der doppelte Betrag zu erwarten sein. Demzufolge resultieren Einschränkungen in den möglichen Spurlängen allein aus eventuellen Sichtbehinderungen, beispielsweise durch den Hauptreflektor selbst.

Da die Zielmarkenposition gleichzeitig von zwei Standpunkten bestimmt wird, muss sich das Teleskop während der Messphase in Ruhe befinden. Deswegen empfiehlt sich hier besonders die vorgängige iterative Elevationsachsenbestimmung, die etwa einen Tag beansprucht. Für die Spur des Azimutkreises können etwa 30 gleichmässig verteilte Stützpunkte als ausreichend betrachtet werden. Ihre messtechnische Bestimmung sollte in einem Tag durchführbar sein. Müssen die Elevationsachsenendpunkte virtuell durch Elevationskreise bestimmt werden, erhöht sich die Messdauer auf bis zu sieben Tagen. Aufgrund dieser langen Messdauer empfehlen sich die Einrichtung von Messpfeilern und die Nutzung eines automatischen Datenflusses mit einem Programm, das eine unmittelbare Formüberprüfung der Elevationskreise gestattet.

4.2 Polare Messsysteme

Polare Messsysteme haben gegenüber den Theodolitmesssystemen den Vorteil, dass 3D-Punktpositionen mit einem einzigen Instrument quasi verzögerungsfrei erfasst werden können: Lasertracker benötigen zwischen 0.3 ms und 10 ms, Robottachymeter im optimalen Fall etwa 0.3 s. Dies bedeutet, dass prinzipiell die Messungen bei bewegtem Teleskop ausgeführt werden können.



Abbildung 3: Lasertracker Faro SI und Leica LTD 500

Für eine Distanz von 10 m lässt sich aus den Herstellerangaben der Firma Faro für ihren Tracker des Typs SI als erreichbare Punktgenauigkeit 0.03 mm ableiten, die Firma Leica spezifiziert für ihren LTD 500 0.05 mm für statische Ziele. Wird beispielsweise ein Elevationskreis mit einem Radius von 0.2 m innerhalb von 10 min erzeugt, entspricht die Punktunschärfe (Bewegung des Punktes während des Messzeitraumes) für eine Messfrequenz von 1000 Hz etwa 0.002 mm bzw. für eine Messfrequenz von 3 Hz etwa 0.6 mm. Sie liegt damit unter bzw. in der Größenordnung der Messgenauigkeit. Für den Azimutalkreis treten grössere Bewegungsgeschwindigkeiten auf. Um die Punktunschärfe nicht zu vergrößern, ist bei einer typischen Teleskopkonstruktion (Abstand Referenzpunkt – Messmarke etwa 3 m) die azimutale Umdrehungszeit auf etwa 2.5 h zu erhöhen. Trotzdem kann im Vergleich zum rein angularen Verfahren der Personalaufwand und die Ausfallzeit des Radioteleskops bei deutlicher Erhöhung der Datenmenge um ein Mehrfaches reduziert werden. Für die Beobachtung des Azimutalkreises und bei Elevationskreisabschnitten mit steilen Visuren sind wegen ihres grösseren Arbeitsbereiches Cateye-Reflektoren geeignet. Werden Einfallswinkel bis 50° zugelassen, darf bei fünf symmetrisch um das Teleskop verteilten Standpunkten die durch die Reflektorposition definierte scheinbare Elevationsachsenlänge das 0.6-fache des Standpunktabstandes zur Stehachse nicht überschreiten. Allerdings müssen die ausrichtungsbedingten Reflektoroffsets korrigiert werden, was aufgrund ihrer Reproduzierbarkeit (Favre, Hennes, 2000; Markendorf, 1998) und der Kenntnis des räumlichen Einfallswinkels unproblematisch ist. Die vom Hersteller angegebene minimale Zielweite der Robottachymeter (Abbildung 4) kann nach ersten Erfahrungen zumindest bei Leica-Instrumenten unterschritten werden, wenn die Ziellinie für das – im Hinblick auf

die Variabilität der Ziellinie kleine – Distanzintervall kalibriert wird (Hennes, 2003).

Die Aufnahmestandpunkte für die Robottachymeter werden wie bei der Theodolitmethode im lokalen Netz messtechnisch eingebunden, was sich mit ausreichender Genauigkeit erreichen lässt (vgl. Kap. 4.1). Da ein Lasertracker nicht mit einer Zwangszentrierung ausgestattet ist, wird er jeweils frei stationiert; seine höhere Messgenauigkeit wird jedoch einen durch die Anbindung an klassische Zentriersysteme entstehenden Genauigkeitsverlust kompensieren.

Systembezeichn.	TCA 2003/5005	II ^{Plus}	SI	LTD 500
Hersteller	Leica	API	Faro	Leica
Typ	Robottachymeter/ RT f. ind. Anw.	Lasertracker	Lasertracker	Lasertracker
Positioniergenauigkeit bis 20 m	1 mm / 0.3 mm	100 µm	27µm + 3 ppm	5 ppm (statisch) 10 ppm (langs. Bew.)
Minimale Zielweite	5 m	k. A.	0 m	2 m
<i>Tabelle 1: Leistungsmerkmale von polaren Messsystemen (Auswahl), Herstellerangaben</i>				

4.3 Laserradar

Unter der Bezeichnung Laserradar MV 200 bietet die Firma MetricVision (Newington, VA) einen hochpräzisen Laserscanner an, der im „Enhanced Modus“ bei einer Datenrate von 2 Messungen/s eine Genauigkeit von 10 µm erreicht (Dold, 2002). Bei maximaler Datenrate (1000 Hz) erniedrigt sich die Genauigkeit auf 0.3 mm. Diese hohe Genauigkeit selbst bei hoher Datenrate wird aufgrund des mit etwa 100 GHz frequenzmodulierten Distanzmesssignals erreicht. Für die Bestimmung der sechs geometrischen Parameter eines frei definierbaren Oberflächenstücks in maximal 10 m Distanz benötigt das System ca. 1 s und erreicht die geforderte Genauigkeit von 0.1 mm (Lupus, 2003). Damit eignet sich dieses System vor allem für Verformungsmessungen, beispielsweise des Hauptreflektors. Sein Messbereich deckt ohne Einschränkung der Genauigkeit den Hauptreflektor bis zur Höhe der Brennweite ab, wenn der Sensorkopf (40 kg) näherungsweise im Fokuspunkt installiert wird. Ausnahme ist der Nahbereich von 1 m Radius. Dies sollte für übliche Antennentypen möglich sein. Der Sensorkopf kann während der Messung beliebig gekippt sein, so dass auch bei beliebigen Elevationen die Antennengeometrie bestimmt werden kann. Aber auch eine exter-



Abbildung 4: Laserradar MV200

ne Aufstellung ist denkbar, wobei die Verknüpfung unterschiedlicher Standpunkte beispielsweise über kugelförmige Passpunkte erfolgen könnte. Bei schätzungsweise 1000 zu bestimmenden Oberflächenstücken (Panellen) eines Antennenreflektors dürfte die reine Messdauer deutlich unter einer Stunde liegen, im Gegensatz zu einem Zeitaufwand von vier Stunden für 120 Panellen mit der herkömmlichen Methode (Benner et al, 1994). Auch die Form der Teleskopkonstruktion kann bei unterschiedlichen Temperaturen gescannt werden, um Ausdehnungsmodelle aufgrund von lokalen Temperaturmessungen zu verifizieren. Allerdings ist aufgrund des Spektrums des Distanzmesssignals davon abzuraten, gleichzeitig das Radioteleskop zur Datenerfassung zu benutzen.

4.4 Onlinefähigkeit und Onlinetauglichkeit

Es ist darauf abzielen, dass Messverfahren zur Anwendung kommen, die die Ausfallzeiten des Radioteleskops minimieren. Optimal sind solche, die Vermessung während des üblichen Einsatzes zulassen. So könnten die hierbei durchgeführten Teleskopbewegungen genutzt werden, um die für die Referenzpunktbestimmung erforderlichen Kreisbogensegmente zu generieren. Wie eine Voruntersuchung ergab, besitzen Lasertracker die erforderlichen Eigenschaften (vgl. Kap. 5.2), Robottachymeter werden momentan diesbezüglich untersucht. Für die Bestimmung des Achsenoffsets ist das in Kap. 3.2 beschriebene funktionale Modell erforderlich, in das als Hilfsparameter die jeweils zum Messungszeitpunkt vorliegende Teleskopausrichtung eingeht. Ähnliches gilt auch für eine allfällige Prismenkorrektur. Da diese von der Software zur Teleskopsteuerung vorgegeben und geregelt wird, wäre es sinnvoll, die Messwerterfassung des Lasertrackers mit dieser zu kombinieren. Leica bietet hierzu seit einigen Monaten ein Programmier-Interface an, mit dem die Erstellung von Modulen für beliebige, plattformunabhängige Applikations-Software gelingt (Embedded System Control). Die Referenzpunktbestimmung kann ohne nennenswerte Ausfallzeit erfolgen und die erforderliche Messzeit richtet sich in diesem Fall allein nach dem Beobachtungsplan. Klassische angulare Verfahren und Vermessungen mit dem Laserradar sind im engeren Sinne nicht onlinefähig.

Allfällige Verformungen laufen langsamer ab als die für die Referenzpunktbestimmung generierten Bewegungen. Trotzdem ist das angulare Verfahren zu zeitaufwändig, um temperaturbedingte Verformungen zu bestimmen. Vom Ansatz her wäre zwar auch die klassische Bestimmung der Hauptreflektorform nach diesem Verfahren möglich, ist aber ebenfalls als sehr zeitintensiv einzustufen. Hier bietet sich das Laserradar an. Die temperaturbedingte Höhenänderung des Referenzpunktes lässt sich weitgehend aus Temperaturmessungen des Sockels ableiten, wenn ein geeignetes Modell bekannt ist. Hier sollen polare Referenzpunktbestimmungen bei unterschiedlichen Temperaturen dazu beitragen, adäquate Parameter zu finden, um danach auf den permanenten Einsatz eines

Lasertrackers verzichten zu können. Mit dem Lasertracker können Modelle über die temperaturbedingte Verformung der Teleskopträgerkonstruktion verifiziert werden.

5 Bisher erzielte Ergebnisse

5.1 Theodolitmesssystem (am Beispiel des Radioteleskops in Onsala)

Im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe und dem Onsala Space Observatory, Chalmers University of Technology, wurde im Frühjahr 2002 der Referenzpunkt des 20 m Radioteleskops in Onsala bestimmt (Eschelbach, 2002). Eine besondere Schwierigkeit dieser Aufgabe bestand darin, dass sich das 20 m Teleskop in einem schützenden Radombauwerk von 30 m Durchmesser befindet. Dadurch sind nur relativ steile Sichten (Zenitwinkel ca. 45 gon) zu Messmarken an der Teleskopkabine möglich. Für die Vermessung wurden fünf symmetrisch um das Teleskop angeordnete Messpfeiler auf dem Radomfundament errichtet und Messmarken an beiden Seiten der Teleskopkabine angebracht. Die neuen Pfeiler wurden in das am Observatorium existierende lokale Vermessungsnetz eingebunden. Das Teleskop wurde in 15 verschiedenen Azimut- und jeweils 10 verschiedenen Elevationsrichtungen positioniert und jeweils zwei Messmarken mit einem Theodolitmesssystem von den Pfeilern aus beobachtet. Dabei wurden ein Leica TCR1102 und Leica T2002 verwendet und insgesamt über 600 Neupunkte bestimmt, die 56 Elevationskreisabschnitte und vier Azimutalkreise bilden. Der Teleskopreferenzpunkt wurde schrittweise im lokalen Netz mit Standardabweichungen von 0.1 mm in der Lage und 0.3 mm in der Höhe bestimmt (Eschelbach, 2002). Die Auswertung des Verlaufs der Höhenkomponenten der virtuellen Elevationsachsenendpunkte in Abhängigkeit von der Azimutpositionierung des Teleskops ermöglichte weiterhin die Bestimmung der Stehachsschiefe des Teleskops und der Nichtorthogonalität der beiden Teleskopachsen.

Bei einer weiteren Messreihe mit magnetischen Messmarken, die auf den Elevationsachsenendpunkten manuell justiert wurden, wurde das Teleskop wiederum in 15 Azimutpositionen positioniert, diesmal aber nicht in unterschiedlichen Elevationen. Die erzielten Ergebnisse für den Referenzpunkt bestätigten die vorhergehenden Messungen. Durch die verbesserten Sichtbedingungen war es weiterhin möglich, diametrale Azimutpositionierungen zu wählen, was wiederum ermöglichte, den Achsenoffset des Teleskops zu bestimmen. Der bis dahin unbekannte Achsenoffset des 20 m Radioteleskops in Onsala beträgt 6.0 ± 0.4 mm.

Die zusätzliche Einmessung des Referenzpunktes der IGS-Station in Onsala ins lokale Netz und mehrwöchige statische GPS-Messungen auf Punkten des lokalen Netzes erlaubten weiterhin die Bestimmung der lokalen Exzentrizität zwi-

schen den IVS- und IGS-Referenzpunkten in Onsala, sowohl im lokalen, als auch in einem globalen Referenzrahmen (Eschelbach und Haas, 2003).

5.2 *Leistungsparameter polarer Messsysteme*

Mit einem Lasertracker Leica LTD500 wurde ein Testdatensatz für eine Kreisbewegung erzeugt. Die Mittelpunktsnormale verlief näherungsweise durch den Sensorkopf des Trackers und der Kreisdurchmesser betrug etwa 0.5 m. Innerhalb von 10 s wurde ein Vollkreis mit etwa 1000 Stützpunkten erfasst. Die gemessenen Punkte passen sich mit einer Standardabweichung von etwa 0.02 mm einem Kreis an, sein Mittelpunkt ergibt sich aufgrund der hohen Stützpunktzahl mit einer Unsicherheit von 0.001 mm. Um die Güte von Kreisabschnitten zu untersuchen, wurde derselbe Datensatz auf sechs Bogenabschnitte aufgeteilt. Dies führt zu Differenzen in den Mittelpunktskoordinaten von maximal 0.09 mm, weswegen anzuraten ist, möglichst grosse und komplementäre Kreisabschnitte zu erfassen. Die Genauigkeit der Mittelpunktskoordinate übertrifft die Herstellerspezifikation für diejenige einer Punktcoordinate bei statischer Messung um etwa Faktor 50. Überträgt man dies auf die mit einem Robottachymeter im kinematischen Modus zu erzielende Punktgenauigkeit (größenordnungsmässig 10 mm), ergibt sich analog für eine Messzeit des Vollkreises von 5 min schätzungsweise 0.2 mm. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Beobachtung mehrerer komplementärer Kreisabschnitte die geforderte Genauigkeit für die Mittelpunktskoordinaten ergibt. Es bleibt allerdings zu untersuchen, welche zusätzlichen Effekte die steilen Visuren hervorrufen und welche Massnahmen zur Vermeidung systematischer Effekte ergriffen werden können.

6 **Ausblick**

Im Hinblick auf die fortschreitende Genauigkeitssteigerung der VLBI-Technik wird die präzise Modellierung des Referenzpunktes und geometrischer Eigenschaften von VLBI-Radioteleskopen in der VLBI-Datenanalyse immer wichtiger. Die vorgestellten Strategien und Ergebnisse zeigen das Potenzial von Ingenieurvermessung und Industriemesssystemen für die Bestimmung von wichtigen geometrischen Eigenschaften von VLBI-Radioteleskopen. Insbesondere aktuelle Entwicklungen wie Embedded System Control und Laserradar werden die für die Vermessung erforderlichen Ausfallzeiten der Radioteleskope verringern.

7 **Literatur**

- BENNER, M.J.; ELLDER, J.; ZARGHAMEE, M. [1994]: Upgrade of a large millimeter wavelength radio telescope for improved performance at 115 GHz. Proc. IEEE, Spec. Issue on Radiotelescopes, vol 82, no 5, 734-741.
- BILL, R.; FOHL, G.; QUASNITZA, H.; STAIGER, R. [1985]: Fehlertheoretische Untersuchungen des elektronischen Mess- und Berechnungssystems ECDS1 von Kern. ZFV, 399-409.

- CLARK, T.A.; THOMSEN, P. [1988]: Deformations in VLBI Antennas. NASA Technical Memorandum 100696, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.
- DOLD, J. [2002]: Autobauer setzen auf mobile Lasermesstechnik. *Auto&Elektronik*, 5/2002, 45-48.
- ESCHELBACH, C. [2002]: Determination of the IVS-reference point at the Onsala Space Observatory in a local reference frame. Diplomarbeit, Geod. Inst., Univ. Karlsruhe.
- ESCHELBACH, C.; HAAS, R. [2003]: The IVS-Reference Point at Onsala – High End Solution for a Real 3D-Determination In: Proceedings of the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, eds. W. Schwegmann und V. Thorandt, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt/Leipzig, 109-118.
- FAVRE, C.; HENNES, M. [2000]: Zum Einfluss der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung. *VPK* 2/00, 72-78.
- HAAS, R.; NOTHNAGEL, A.; CAMPBELL, J.; GUEGUEN, E. [2003]: Recent Crustal Movements Observed with the European VLBI Network: Geodetic Analysis and Results. *Journal of Geodynamics*, 35(4-5), 391-414, doi:10.1016/S0264-3707(03)00003-6.
- HENNES, M. [2003]: Systemeigenschaften von Robottachymetern im Nahbereich – Untersuchungen am Beispiel von Leica-Instrumenten, *FuB*, 300-310.
- JACOBS, C.S.; RIUS, A. [1989]: VLBI Surveying between DSS63 and DSS65. In: Proceedings of the 7th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, ed. A. Rius, Instituto de Astronomía y Geodesia, Madrid, 64-67.
- LUPUS, A. [2003]: pers. Mitteilung (Produktinformation)
- MA, C. [1978]: Very Long Baseline Interferometry Applied to Polar Motion, Relativity and Geodesy. NASA Tech. Memor. 79582, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.
- MARKENDORF, A. [1998]: The Influence Of The Tooling Ball Reflector On The Accuracy Of Laser Tracker Measurements: Theory And Practical Tests. Presentation at Leica Geosystems, 11.2.1998.
- SOVERS, O.J.; FANSELOW, J.L.; JACOBS, C.S. [1998]: Astrometry and Geodesy with Radio Interferometry: Experiments, Models, Results. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 70, No. 4, 1393-1454.
- N.N.: Prospekte, Bedienungsanleitungen und Internetseiten der Hersteller.

Anschriften:

Universität Karlsruhe:
 Prof. Dr.-Ing. Maria Hennes
 Dipl.-Ing. Cornelia Eschelbach
 Geodätisches Institut
 Englerstr. 7
 D-76128 Karlsruhe
 hennes@gik.uni-karlsruhe.de
 eschelbach@gik.uni-karlsruhe.de

Chalmers Technical University:
 Dr. Rüdiger Haas
 Department of Radio and Space Science
 Onsala Space Observatory
 Råö
 SE-439 92 Onsala
 haas@oso.chalmers.se