

# **Das Pointingmodell des 100-Meter-Radioteleskops in Effelsberg**

A. Kraus

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Radioobservatorium Effelsberg, 53902 Bad  
Münstereifel-Effelsberg

Camera-ready Copy for  
**Kleinheubacher Berichte**  
Manuscript-No. ???

# Das Pointingmodell des 100-Meter-Radioteleskops in Effelsberg

A. Kraus

Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Radioobservatorium Effelsberg, 53902 Bad Münstereifel-Effelsberg

**Zusammenfassung.** Seit Inbetriebnahme des 100-Meter-Teleskops vor fast 30 Jahren wurde das System ständig verbessert, so daß es jetzt sowohl vom Primär- als auch vom Sekundärfokus bis zu einer Frequenz von 43 GHz voll einsatzfähig ist; gelegentlich werden sogar Interferometrie-Beobachtungen bei 86 GHz durchgeführt. Die Auflösung des Teleskops (d.h. die Öffnung der Antennenkeule) beträgt bei 43 GHz nur noch etwa 20 Bogensekunden. Um diese hohe Auflösung und damit die optimale Empfindlichkeit nutzbar zu machen (und einen effektiven Beobachtungsbetrieb zu gewährleisten), ist eine Positionsgenauigkeit von 2–3'' (10 % der Keule) notwendig. Dazu werden regelmäßig die Instrumentenfehler (z.B. Neigung der Grundebene, Kollimation der Achsen, gravitative Verbiegungen) gemessen, die sich im Rahmen der geforderten Genauigkeit systematisch mit der Zeit ändern. Für widrige Bedingungen wie starke Winde oder differentielle Aufheizung des Teleskops durch Sonnenschein kann die gewünschte Positionsgenauigkeit nicht erreicht werden. Mit der Überwachung der Temperatur in vielen Bauteilen des Teleskops, mit Neigungsmessern nahe der Elevationsachse und mit Windmessungen soll versucht werden, die Grundlagen für eine interaktive Korrektur dieser Umwelteinflüsse zu gewinnen.

**Abstract.** The Effelsberg 100 meter radio telescope is in use for 30 years now. Observations are carried out at frequencies of up to 43 GHz (occasionally VLBI observations at 86 GHz took place). The HPBW of the antenna at those frequencies is about 20 arcsec (10 arcsec, respectively). Therefore, a position accuracy of about 2–3'' is required to ensure effective observations. We present shortly the instrumental properties which are responsible for pointing errors and their determination and variation with time. Strong winds or temperature differences in the telescope structure cause a significantly lower position accuracy. Those effects, their monitoring, and possible corrections are discussed shortly.

## 1 Einführung

Die Pointingtheorie beschreibt den Zusammenhang zwischen den astronomischen Koordinaten einer Radioquelle und den Winkelmessungen des Teleskops. Sie gibt Auskunft über den Positionsunterschied zwischen Antennenkeule und Radioquelle, sie beschreibt also die Genauigkeit der Positionierung des Instruments. Eine erste Formulierung des Pointingmodells für das 100-Meter-Teleskop findet sich bei Stumpff (1972).

Das 100-Meter-Radioteleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie (MPIfR) in Bad Münstereifel-Effelsberg ist ein „Altazimutinstrument“, es ist also um zwei zueinander senkrechte Achsen (die Azimut- bzw. Stehachse, und die Elevations- bzw. Kippachse) drehbar (Abb. 1). Beobachtungen werden bis zu einer Frequenz von 43 GHz durchgeführt (gelegentlich sogar bei 86 GHz); die Antennenkeule hat bei dieser Frequenz eine Halbwertsbreite von etwa 20 Bogensekunden (bzw. 10 Bogensekunden). Somit ist für einen effektiven Beobachtungsbetrieb eine Positionsgenauigkeit von  $\leq 2-3$  Bogensekunden notwendig. Die Steuerung des Teleskops erlaubt eine Positionierung mit  $\leq 1$  Bogensekunde Unsicherheit; dies entspricht einem absoluten Wert von ca. 0,15 mm an der Schiene bzw. am Elevationszahnkranz.

Im folgenden gehen wir davon aus, daß die Position der kosmischen Radioquellen in einem astronomische Koordinatensystem exakt bekannt ist. Dies ist durchaus gerechtfertigt; viele Quellpositionen sind mit den Methoden der Radiointerferometrie mit hoher Genauigkeit ( $\ll 1$  Bogensekunde) bestimmt. Ebenso werden auch die aktuelle Zeit sowie die geographische Breite des Effelsberger Teleskops als bekannt vorausgesetzt. Daraus ergibt sich zu einer bestimmten Zeit durch einfache Koordinatentransformation die Quellposition im Horizontalsystem. Bei der Beobachtung stellt sich jedoch heraus, daß diese berechnete Position von der gemessenen (also von den Ablesungen der Winkelmeßgeräte des Teleskops) abweicht. Der Grund hierfür ist in instrumentellen Eigenschaften zu suchen, die das Pointing beeinflussen.



**Bild 1.** Das 100-Meter-Radioteleskop des MPIfR in Effelsberg.

Hier werden diese Eigenschaften zunächst beschrieben. Die entsprechenden analytischen Korrekturterme werden gezeigt und es wird dargestellt, wie die Pointing-Parameter bestimmt werden. Abschließend wird diskutiert, welche kurzzeitigen Effekte zusätzlich auftreten können.

## 2 Das Pointingmodell

Die folgenden Eigenschaften des Teleskops beeinflussen die Positionierung des Teleskops. In ähnlicher Form ließe sich auch das Pointingmodell für ein beliebiges Teleskop darstellen.

- *Neigung der Grundebene* bzw. der Stehachse des Teleskops (Inklination): Hieraus resultiert eine Abweichung im Elevationspointing in Richtung der Neigung; senkrecht dazu ergibt sich eine Ungenauigkeit in Azimut. Dies wird durch jeweils zwei Korrekturterme (Neigung nach Norden bzw. Osten) für Azimut und Elevation berücksichtigt.
- *Nullpunktsfehler* der Winkelmeßeinrichtungen: Diese verursachen je einen Fehler in Azimut bzw. Elevation.
- *Kollimation der Achsen*: der Winkel zwischen der Azimut- (Steh-) und der Elevations- (Kipp-) Achse sollte im Idealfall  $90^\circ$  betragen. Eine Abweichung hiervon wird durch einen Term in Azimut berücksichtigt.
- *Kollimation des Teleskops*: auch der Winkel zwischen der Antennenkeule und der Elevationsachse beträgt im Idealfall  $90^\circ$ . Wiederum wird eine Abweichung durch einen Term in Azimut korrigiert.
- *Positionsfehler*: Hierunter fallen Unsicherheiten bei der geographische Breite des Observatoriums sowie Fehler in den Koordinaten der Radioquelle. Diese sind heute vernachlässigbar.
- *Verbiegung* beim Kippen: Das Teleskop ist keine starre Konstruktion. Durch die Schwerkraft können beim Kippen Verformungen auftreten, die das Pointing in Elevation verändern. Zur Korrektur war in der ursprünglichen

Pointingtheorie (Stumpff, 1972) ein Term vorgesehen; ein zweiter wurde wenig später als nötig erachtet und hinzugefügt.

- *Refraktion*: Diese ist strenggenommen keine Eigenschaft des Instruments. Da die Refraktion aber zusammen mit dem Pointingfehler korrigiert wird, soll sie hier der Vollständigkeit halber berücksichtigt werden. Die Refraktionskonstante wird direkt aus Wettermessungen (Druck, Feuchte, Temperatur) berechnet.

Mathematisch stellt sich das Pointingmodell durch zwei Korrekturterme für die Positionierung in Azimut und Elevation dar:

|                         |                                   |  |
|-------------------------|-----------------------------------|--|
| Azimut:                 |                                   |  |
| $\Delta A \cdot \cos E$ | $= P_1 \cdot \cos E$              | Nullpunktsfehler                           |
|                         | $+ (P_2 + COL^*)$                 | Kollimation                                |
|                         | $+ P_3 \cdot \sin E$              | Kollimation der Achsen                     |
|                         | $+ P_4 \cdot \cos A \cdot \sin E$ | Inklination 1                              |
|                         | $+ P_5 \cdot \sin A \cdot \sin E$ | Inklination 2                              |
| Elevation:              |                                   |  |
| $\Delta E$              | $= (P_7 + NULE)$                  | Nullpunktsfehler                           |
|                         | $- P_4 \cdot \sin A$              | Inklination 1                              |
|                         | $+ P_5 \cdot \cos A$              | Inklination 2                              |
|                         | $+ P_6 \cdot \cos A \cdot \sin E$ | Positionsfehler (heute zu vernachlässigen) |
|                         | $+ P_8 \cdot \cos E$              | Verbiegungsterm 1                          |
|                         | $+ P_9 \cdot \sin E$              | Verbiegungsterm 2                          |
|                         | $(+ R \cdot \cot E)$              | Refraktion                                 |

Das Pointing des Teleskops hängt also von den 9 Parametern<sup>1</sup>  $P_i$  ab (zuzüglich des Refraktionsterms), die geeignet bestimmt werden müssen (siehe unten). Die Korrekturen werden vor jeder Messung berechnet und die Änderungen den aus den Quellkoordinaten abgeleiteten Winkeln hinzugefügt. Die Konstanten  $COL^*$  und  $NULE$  bezeichnen Korrekturen, die der Beobachter direkt einfügen kann, um kurzzeitige Abweichungen (vgl. unten) zu berücksichtigen.

### 3 Ermittlung der Parameter

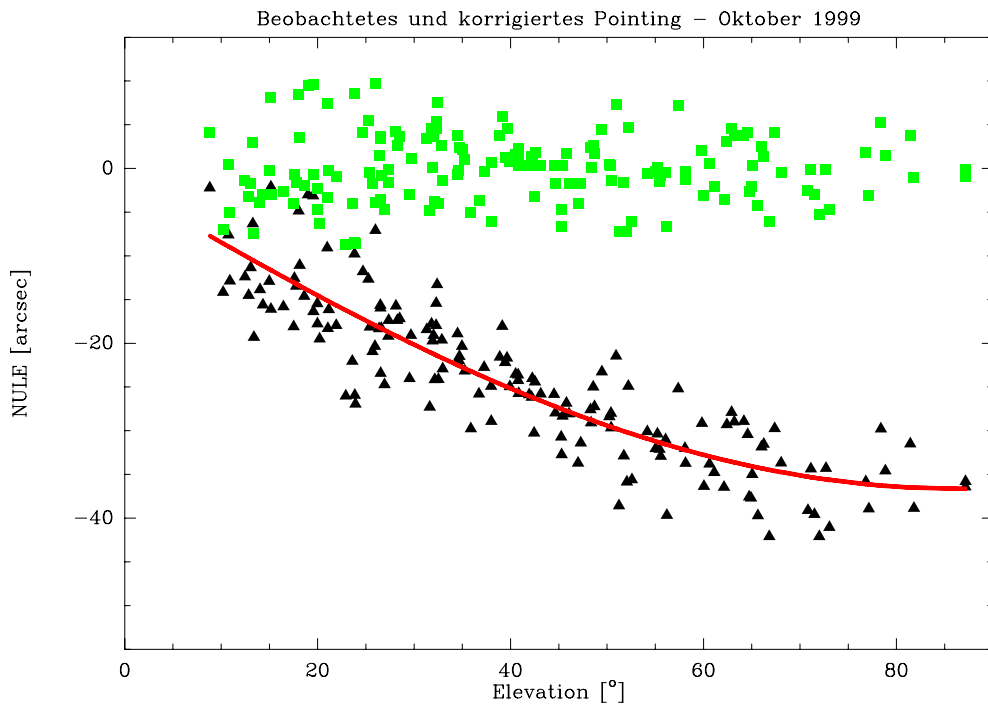
Um die Parameter  $P_i$ , die das Pointing bestimmen, zu ermitteln, wird eine große Anzahl von punktförmigen Quellen, die über den gesamten Himmel verteilt sind, beobachtet. Die Messung der Quellposition (im Horizontalsystem) geschieht durch sogenannte „Kreuzscans“: Dabei wird die Antennenkeule jeweils in Azimut und Elevation über die Quellposition bewegt; dies geschieht bis zu einem ausreichend großen Abstand von der Quelle. Aus der Faltung der gaussförmigen Antennenkeule mit der Punktquelle ergibt sich ein gaussförmiges Signal. Die Amplitude dieser Gaußkurve ist ein Maß für die Flußdichte der Quelle; weiterhin läßt sich die Halbwertsbreite der Antennenkeule ablesen. Schließlich kennzeichnet die Abweichung des Maximums von der Mitte des Scans die Positionsungenauigkeit.

Die Pointing-Parameter werden durch einen „Least-Square-Fit“ der Korrekturterme an die Messungen bestimmt. Ein Beispiel zeigt Fig. 2: Hier ist die Positionierung in Elevation gegen Elevation dargestellt. Die Dreiecke stellen das gemessene Pointing dar, man erkennt unschwer eine signifikante Abhängigkeit von der Elevation. Diese wird von den Verbiegungstermen (Parameter  $P_8$ ,  $P_9$ ; vgl. oben) hervorgerufen. Die durchgezogene Linie kennzeichnet den entsprechenden Teil der Pointingfunktion. Die Quadrate zeigen das korrigierte Pointing; die Verbesserung ist deutlich zu sehen.

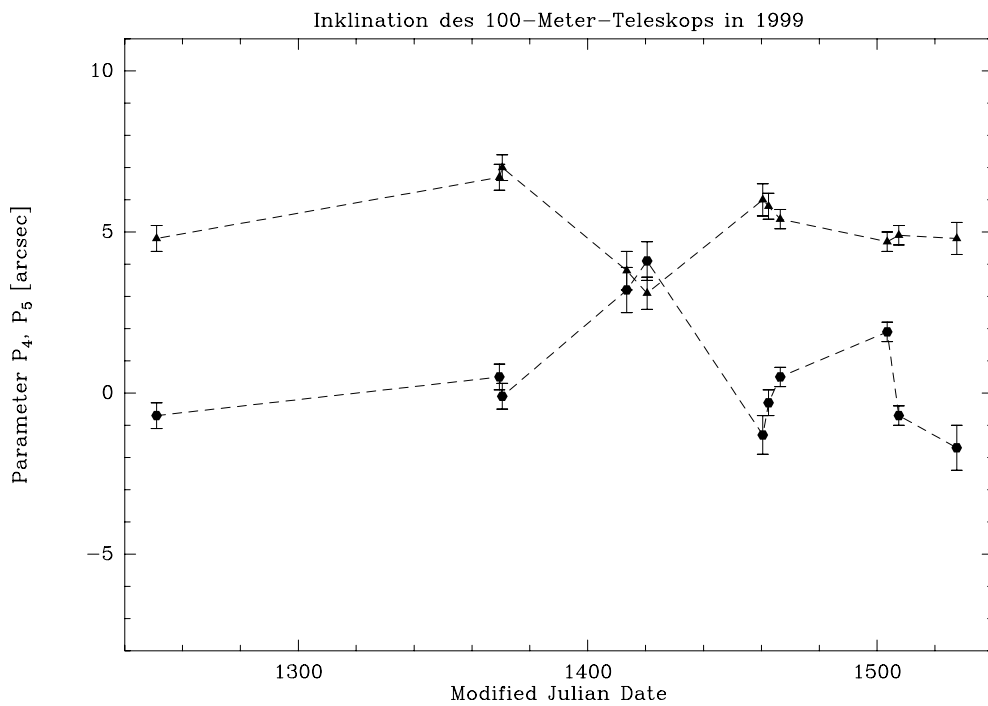
Mit dieser Methode wird eine mittlere Unsicherheit von etwa 3 Bogensekunden (über den gesamten Himmel) erreicht. Die Wiederholbarkeit des Pointings ist allerdings deutlich besser. Direkt aufeinander folgende Messungen zeigen gewöhnlich Abweichungen kleiner als eine Bogensekunde.

Bei erneuter Bestimmung des Pointings im Abstand von einige Wochen bis Monaten wurde festgestellt, daß die Parameter unterschiedlich stark variieren. Beispielhaft ist in Abb. 3 die Veränderung der Parameter  $P_4$  und  $P_5$  (die die Neigung der Grundebene beschreiben) im Jahr 1999 gezeigt. Es zeigen sich Unterschiede von einigen Bogensekunden zwischen den einzelnen Messungen. Somit ist klar, daß sich die Neigung der Grundebene des Teleskops geringfügig, aber signifikant innerhalb von Wochen bis Monaten ändert. Dies ist durch geodätische Messungen qualitativ bestätigt worden.

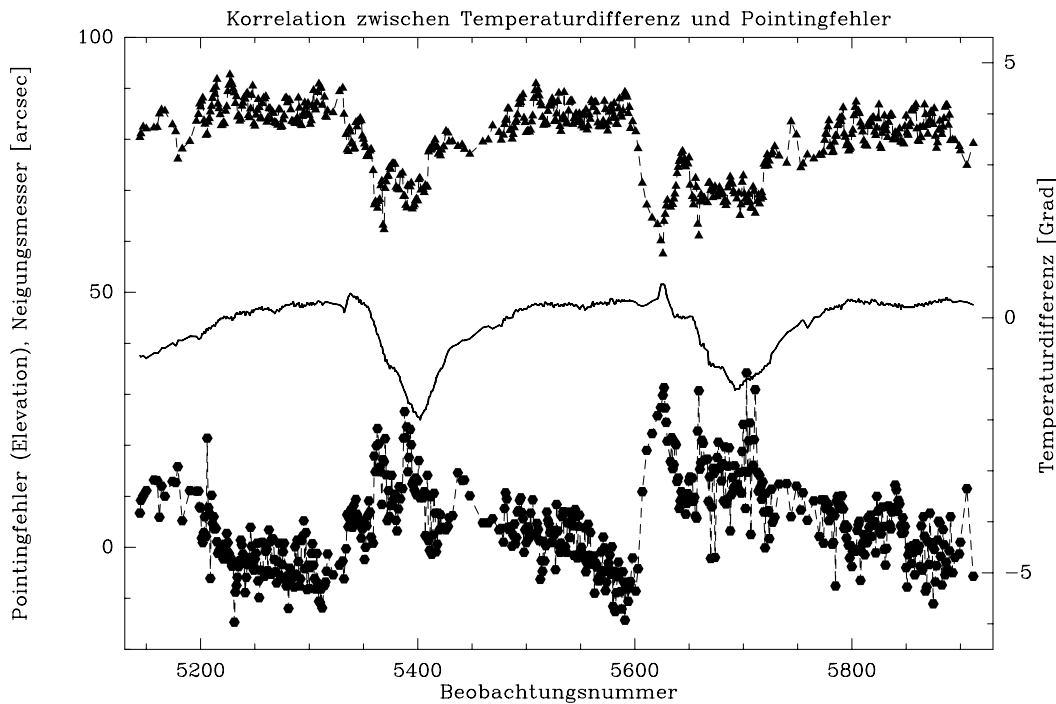
<sup>1</sup>Wie bereits angedeutet können Positionsfehler heute vernachlässigt werden, so daß 8 Unbekannte verbleiben.



**Bild 2.** Positionsfehler in Elevation (in Bogensekunden) gegen Elevation (in Grad): Beobachtetes Pointing (Dreiecke), Anpassung der Korrekturfunktion (Parameter  $P_8, P_9$ ), und korrigiertes Pointing (Quadrate).



**Bild 3.** Veränderung der Neigung der Grundebene des Teleskops (Parameter  $P_4$  - Kreise,  $P_5$  - Dreiecke) im Jahr 1999.



**Bild 4.** Einfluß von Temperaturdifferenzen in der Teleskopstruktur auf das Pointing: Dargestellt sind (in Bogensekunden) die Ausgabe eines Neigungsmessers (Dreiecke) und der Pointingfehler in Elevation (Kreise), sowie (in Grad Celsius) die Temperaturdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite eines Trägers der Stützstruktur (durchgezogene Linie). Die Daten sind gegen eine fortlaufende Beobachtungsnummer aufgetragen (entsprechend einem Beobachtungszeitraum von ca. 60 Stunden). Korrelationen zwischen den drei Größen sind deutlich zu sehen.

#### 4 Kurzzeitige Effekte

Neben den Unsicherheiten durch die langzeitigen Variationen der Pointingkonstanten  $P_i$ , treten auch kurzzeitige Veränderungen des Pointings durch Umwelteinflüsse auf. Es ist leicht einzusehen, daß ein Parabolspiegel mit 100 Metern Durchmesser empfindlich auf Wind reagiert. Temperaturschwankungen und Temperaturdifferenzen zwischen Teilen des Teleskops (z.B. durch seitliche Sonneneinstrahlung) verursachen Verzerrungen in der Struktur des Spiegels und dadurch Pointingfehler (vgl. Bayley et al. (1994)). Dabei wurden Positionsabweichungen von 30 und mehr Bogensekunden beobachtet.

Um diese Effekte genauer zu untersuchen, sind 19 Temperatursensoren an verschiedenen Stellen im Teleskop sowie vier Neigungsmesser nahe der Elevationsachse montiert. (Darüberhinaus werden auch Windrichtung und -geschwindigkeit regelmäßig gemessen.) Damit wird versucht, die Temperaturdifferenzen und die zusätzliche Teleskopneigung mit den beobachteten Pointingfehlern zu korrelieren. Ein Beispiel findet sich in Abb. 4: Hier sind die Pointingfehler in Elevation, die Temperaturdifferenz zwischen Vorder- und Rückseite eines Stahlträgers der Stützstruktur, sowie die Ausgabe eines Neigungsmessers dargestellt. Deutlich sind Korrelationen zwischen den drei Größen zu sehen: Bereits recht klein erscheinende Temperaturunterschiede (von ca. einem Grad) können offensichtlich beachtliche Positionsfehler ( $\geq 20$  Bogensekunden) verursachen.

Kürzlich wurden weitere Temperatursensoren in das Teleskop gebracht. Weitere Untersuchungen in der nahen Zukunft sollen es ermöglichen, die beobachteten Korrelation auch quantitativ zu beschreiben. Das Ziel ist es, auf diese Weise die schnellen Variationen des Pointings auf Grund der Umwelteinflüsse zu korrigieren.

**Danksagungen.** Mein ausdrücklicher Dank gilt Herrn Dr. W.J. Altenhoff für viele nützliche Kommentare und Anregungen.

#### Schrifttum

- Bayley, A. M., Davis, R. J., Haggis, J. S., and Kärcher, H., Thermal effects on the pointing of the 32-m MERLIN radio telescope at Cambridge, *Astronomy and Astrophysics*, 283, 1051–1057, 1994.  
 Stumpff, P., Astronomische Pointingtheorie für Radioteleskope. *Kleinheubacher Berichte*, 15, 431–437, 1972.