

# Zur Problematik des Antennenwechsels auf GNSS-Referenzstationen

Lambert Wanninger, Christian Rost, Gunter Hartlieb und Martin Köhr

## Zusammenfassung

Aufgrund von stationsabhängigen Messabweichungen führt ein Antennenwechsel auf GNSS-Referenzstationen zu Veränderungen in den aus der Auswertung der GNSS-Messungen bestimmten Koordinaten. Anhand von Beispielen werden die Ursachen, Eigenschaften und die Größenordnungen dieser Messabweichungen deutlich gemacht und Empfehlungen zu ihrer Handhabung gegeben.

## Summary

*The exchange of the antenna at a GNSS reference station may cause an apparent shift of the antenna position as determined from the GNSS observations. The reason for such a shift is found in station dependent observation errors, specifically multipath. The paper presents several examples for these effects, analyses their characteristics and suggests procedures of how to deal with them.*

## 1 Einleitung

Stationsabhängige Einflüsse beeinträchtigen die Positionsbestimmung mit Hilfe von Signalen der Global Navigation Satellite Systems (GNSS), wie z. B. GPS, GLONASS oder in Zukunft GALILEO. Dies betrifft insbesondere auch die GNSS-Referenzstationen, die für relative Positionsbestimmungsverfahren notwendig sind und eine besonders hohe Qualität ihrer Koordinaten und auch Messdaten aufweisen sollten. Während die Problematik der Antennenphasenzentren durch die individuelle Kalibrierung der Referenzstationsantennen weitgehend gelöst ist, stellen die Mehrwegeeinflüsse unvermindert ein gravierendes Problem dar.

Ein Teil der systematischen Abweichungen aufgrund dieser stationsabhängigen Einflüsse wirkt auf die Koordinaten als konstanter Bias. Bei einem Antennenwechsel kann dieser dann in der Form von Koordinatenänderungen sichtbar werden. Diese Problematik muss bei jedem Umbau von Referenzstationen bedacht, d. h. durch geeignete Maßnahmen berücksichtigt werden.

Die in diesem Beitrag diskutierten Beispiele basieren alle auf GPS-Beobachtungen. Trotzdem wird bewusst der allgemeinere Begriff GNSS verwendet, um deutlich zu machen, dass die beschriebenen Probleme sehr ähnlich auch für GLONASS gelten oder für GALILEO gelten werden.

## 2 Antennen- und Mehrwegeproblematik

Ein Antennenwechsel auf Referenzstationen hat Auswirkungen auf die stationsabhängigen Einflüsse, die auf die Positionsbestimmung wirken. Es sollen hier nur die langperiodisch wirkenden Einflüsse durch das Antennenphasenzentrum und durch Mehrwegeeffekte näher betrachtet werden, die auf die präzise Bestimmung der Referenzstationskoordinaten Auswirkungen haben.

### Antennenphasenzentrum

Das mechanische Zentrum von GNSS-Antennen fällt nicht mit dem elektrischen Antennenphasenzentrum zusammen. Darüber hinaus ist das elektrische Phasenzentrum eine Funktion der Richtung, aus der das Satellensignal eintrifft, und auch der Signalfrequenz. Korrekturen für GNSS-Antennen werden durch Kalibrierung bestimmt. Zum Teil kann in Abhängigkeit von den Eigenschaften eines Antennentyps und den geforderten Genauigkeiten einer Anwendung auf baugruppenspezifische Korrekturen zurückgegriffen werden. Beim Einsatz von Antennen auf Referenzstationen sollte immer eine individuelle Kalibrierung durchgeführt werden, obwohl dies bis heute in den internationalen Netzen des IGS (International GNSS Service) und des EPN (EUREF Permanent Network) nicht gefordert wird (IGS 2004, EPN 2006).

Unterschiedliche Kalibrierverfahren sind heutzutage im Einsatz. Beim so genannten Roboterkalibrierverfahren wird die zu kalibrierende Antenne kontrolliert gedreht und gekippt, wodurch eine direkte absolute Kalibrierung und gleichzeitig eine weitgehende Vermeidung von Mehrwegeeinflüssen auf die Antennenkorrekturen gelingt (Menge 2003). Beim einfacheren Feldkalibrierverfahren mit Drehung verzichtet man auf die Kippung. Dadurch werden eine direkte absolute Kalibrierung und auch die praktisch vollständige Elimination der Mehrwegeeinflüsse nur noch in den horizontalen Komponenten, aber nicht mehr in der Höhenkomponente durchgeführt. Bei Verwendung einer im Roboterverfahren absolut kalibrierten Referenzantenne gelingt aber auch hier die vollständige absolute Kalibrierung der Antenne (Wanninger 2002). Ein weiteres ganz unabhängiges Verfahren, das so genannte Laborverfahren, verwendet ein selbst erzeugtes Messsignal zur Ausmessung der Antenne. Zur Vermeidung von Mehrwegeeinflüssen wird es in mit Absorbermaterial ausgekleideten Laborräumen durchgeführt. Es wird bisher nicht zur routinemäßigen Kalibrierung von GNSS-Antennen eingesetzt (Campbell et al. 2004).

Werden die alte wie auch die neue Antenne einer GNSS-Referenzstation individuell kalibriert, dann sollten

die unterschiedlichen Antennenphasenzentren bei einem Antennenwechsel keinen bedeutenden Einfluss auf die Positionsbestimmung der Referenzstation haben. Der zu erwartende Einfluss liegt dann in der Größenordnung der Kalibrierengenauigkeit.

### Mehrwegeproblematik

Mehrwegeausbreitung bedeutet, dass nicht nur das Satellitensignal auf direktem Weg die Empfangsantenne erreicht, sondern auch in der Empfangsantennenenumgebung reflektierte Signale, die sich dem direkten Signal überlagern. Inwieweit das direkte Signal verfälscht wird, hängt von den Umweglängen der indirekten Signale, den Reflexionseigenschaften in der Empfangsantennenenumgebung und vom Antennenempfangsverhalten ab. Bei starkem Mehrwegeeinfluss werden in der Praxis häufig Abweichungen von 2 bis 3 cm für das L1- bzw. L2-Signal beobachtet. In der ionosphären-freien Linearkombination L0 verstärken sich diese Einflüsse noch um einen Faktor von etwa 3. Alle bekannten Schutzmaßnahmen gegen Mehrwegeeinflüsse (große Antennengrundplatte, Choke-Ring-Elemente auf der Antennengrundplatte, Vermeidung aller Reflektoren über dem Antennenhorizont) helfen zwar, die mehrwegebedingten Messabweichungen zu verringern, sie können aber diese Problematik nicht vollständig beseitigen. So sind auch viele GNSS-Referenzstationen von starken Mehrwegeeinflüssen betroffen, die durch Reflektoren unterhalb des Antennenhorizonts verursacht werden (Wanninger und May 2000).

Sind die Reflektoren mehr als wenige Dezimeter von der Empfangsantenne entfernt, so ändern sich die Umweglängen der indirekten Signalanteile aufgrund der Satellitenbewegung recht schnell, so dass die Mehrwegeeinflüsse einen stark periodischen Charakter aufweisen. Dann ist zu erwarten, dass sich bei längerer statischer Beobachtungsdauer die Wirkung der Mehrwegeeinflüsse auf die Koordinatenlösung aufgrund der Mittelbildung stark vermindert. Bei Reflektoren im Nahfeld der Antenne (Pfeiler- oder Stativoberkante, Dreifuß) haben die Messabweichungen aber so langperiodischen Charakter, dass sie als konstante Abweichungen in die Koordinatenschätzung einfließen. Untersuchungen zu Nahfeldeffekten wurden durch Wübbena et al. (2003 und 2006) veröffentlicht.

Bei einem Antennenwechsel ändern sich im Allgemeinen die Antennengröße, der Abstand zwischen Antennenphasenzentrum und Reflektoren, die Mehrwegeempfindlichkeit der Antenne und ggf. auch die des eingesetzten Empfängers. Dies führt zu einem veränderten Mehrwegeeinfluss auf die Positionsbestimmung.

### 3 Auswirkungen von Antennenwechseln

Die Auswirkungen eines Antennenwechsels betreffen insbesondere die Höhenkoordinate und werden dementsprechend dort besonders deutlich. Deswegen beschränken

sich die beiden folgenden Beispiele ausschließlich auf die Darstellung von Ergebnissen von Höhenkomponenten.

Das erste Beispiel stammt aus dem Ringvergleich von Antennenkalibrierergebnissen, der 2002/2003 durchgeführt worden war. Im zweiten Teil dieses Vergleichs wurden für umfangreiche Testmessungen im Pfeilernetz der Landesvermessung und Geobasisinformation Niedersachsen (LGN), Hannover, GPS-Höhenunterschiede mit Sollhöhenunterschieden aus Nivellement verglichen (Feldmann-Westendorff 2003). Die Pfeilerabstände betragen nur wenige Meter. Es wurden drei unterschiedliche geodätische GPS-Antennen eingesetzt, die auf wechselnden Pfeilern immer mindestens 24 Stunden betrieben wurden. Die Ergebnisse der gleichzeitig eingesetzten kleineren Antennen für Anwendungen des Real-Time Kinematic (RTK) sollen hier nicht betrachtet werden, da diese Antennen die Anforderungen, die an Referenzstationen gestellt werden, nicht erfüllen.

Die simultanen Beobachtungsdaten, die mit geodätischen Antennen gemessen worden waren, wurden basislinienweise mit dem Programmsystem WaSoft ausgewertet und die Höhenergebnisse mit den Sollhöhenunterschieden aus Nivellement verglichen. Um die Ergebnisse kompakt präsentieren zu können, wurden die jeweils 24 Abweichungen quadratisch gemittelt. Die Berechnungen wurden mehrfach mit verschiedenen Einstellungen durchgeführt. Als absolute Antennenkorrekturen mit azimut-elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen kamen zum einen die Korrekturen der Geo++ GmbH, Garbsen und des Instituts für Erdmessung, Universität Hannover (beide Datensätze aus Roboterkalibrierungen) und zum anderen die Ergebnisse aus Feldkalibrierung mit Drehung der LGN, Hannover und des Geodätischen Instituts der TU Dresden zur Anwendung. Weiterhin wurden vier verschiedene Lösungsarten berechnet: L1-Lösung (simuliert eine kurze Basislinie), L2-Lösung (wird als Koordinatenlösung im Allgemeinen nicht genutzt), ionosphären-freie Lösung L0 (simuliert eine Basislinie mittlerer Länge) und ionosphären-freie Lösung mit Troposphärenschätzung L0+t (simuliert lange Basislinie). Ein Teil dieser Ergebnisse war schon von Wanninger (2003) präsentiert worden.

Die in Tab. 1 dargestellten Ergebnisse lassen sich wie folgt interpretieren. Die Abweichungen zwischen mit GPS bestimmten Höhendifferenzen und nivellierten Höhendifferenzen sind einerseits auf Antennennahfeldeinflüsse zurückzuführen, andererseits – insbesondere bei Feldkalibrierverfahren mit Drehung – auf Restabweichungen der Antennenkorrekturen. Die Nahfeldeinflüsse fallen im Allgemeinen bei L1-Lösungen geringer aus als bei L2-Lösungen. Bei der Bildung der ionosphären-freien Linearkombination L0 werden sie deutlich verstärkt. Noch größer fällt bei diesem Datensatz die weitere Verstärkung der Höhenabweichungen aus, wenn zusätzlich Troposphärenunbekannte in den Auswerteprozess eingeführt werden, wie es bei der Auswertung langer Basislinien oder großräumiger Netze notwendig ist. Bei kurzen Basislinien (L1-Lösung) liegen die Höhenabweichungen

Tab. 1: Quadratische Mittel in mm über jeweils 24 Abweichungen der GPS-Höhendifferenzen von den Sollhöhdifferenzen aus Nivellement für vier verschiedene Lösungsarten

| Quelle der verwendeten Antennenkorrekturen                           | L1  | L2  | L0  | L0+t |
|--|-----|-----|-----|------|
| Geo++ GmbH, Garbsen (Roboter-Kalibrierung)                           | 0,8 | 1,8 | 2,8 | 9,1  |
| Institut für Erdmessung, Universität Hannover (Roboter-Kalibrierung) | 1,5 | 1,9 | 3,2 | 9,0  |
| LGN, Hannover (Feldkalibrierung mit Drehung)                         | 0,9 | 1,1 | 2,2 | 5,7  |
| Geodätisches Institut, TU Dresden (Feldkalibrierung mit Drehung)     | 0,9 | 0,6 | 1,9 | 5,1  |

auf Millimeterniveau. Für lange Basislinien (L0+t) erreichen sie hier dagegen Werte auf cm-Niveau.

Auf den ersten Blick überraschend ist das bessere Abschneiden der Antennenkorrekturen, die im Verfahren Feldkalibrierung mit Drehung gewonnen wurden, im Vergleich zu den Roboter-Kalibrierergebnissen. Ohne Zweifel werden die Roboter-Kalibrierwerte weitgehend frei von Mehrwegeeffekten, auch solchen aus dem Nahfeld der bei der Kalibrierung verwendeten Antennen, sein. Dagegen enthalten die Antennenkalibrierergebnisse aus der Feldkalibrierung mit Drehung bekanntermaßen Resteffekte aufgrund von Mehrwegesignalen, die bei der Kalibrierung auftreten (Wanninger 2002). Ihr besseres Abschneiden muss damit begründet werden, dass gewisse Nahfeldeffekte schon mit in die Antennenkorrekturen eingeflossen sind, so dass sie bei der Anwendung dieser Parameter hier mitkorrigiert werden konnten. Dabei ist aber zu beachten, dass die Kalibrierung an der TU Dresden auf Pfeilern völlig anderer Bauart stattgefunden hat, als sie später bei den Testmessungen bei der LGN Verwendung fanden. Ähnlichkeiten zwischen den Nahfeldeffekten sind aber zu vermuten, da in beiden Fällen auf Pfeilern und mit Dreifüßen gearbeitet wurde.

Insgesamt zeigt der Vergleich von GPS-Höhendifferenzen mit Sollhöhenunterschieden, dass unabhängig vom Antennenkalibrierverfahren mit Restabweichungen auf dem Millimeterniveau für kurze Basislinien und auf dem Zentimeterniveau für lange Basislinien gerechnet werden muss.

Ein weiteres Beispiel veröffentlichten Klein und Klette (2005). Auf vier bayerischen SAPOS-Referenzstationen waren im Jahr 2004 die Antennen ausgetauscht worden. Die jeweiligen Antennen vom Typ LEIAT 303 NONE wurden gegen TRM41249 TZGD ausgewechselt. Sowohl die alten wie auch die neuen Antennen waren individuell kalibriert worden (Roboter-Kalibrierverfahren). Die Auswertung erfolgte mit der Berner Software unter Verwendung der vollständigen Antennenkorrektionsdatensets, also auch unter Verwendung der azimutabhängigen Terme

Tab. 2: Änderung der Höhenkoordinaten durch Antennenwechsel von LEIAT303 NONE nach TRM41249 TZGD (nach Klein und Klette 2005)

| Station            | Änderung der Höhenkoordinate |
|--------------------|------------------------------|
| 0278 – Ihrlerstein | -2,0 cm                      |
| 0280 – Schwandorf  | -0,5 cm                      |
| 0281 – Schönsee    | -1,2 cm                      |
| 0293 – Neukirchen  | -1,5 cm                      |

der Phasenzentrumsvariationen. Koordinatenlösungen wurden unter Verwendung der ionosphären-freien Linearkombination der Phasenbeobachtungen und mit Schätzung von Troposphärenparametern erzeugt (entspricht Lösungsart L0+t). Trotz Berücksichtigung individueller Antennenkorrekturen wurden systematische Veränderungen in der Höhenkoordinate von durchschnittlich -1,3 cm (Tab. 2) im Verhältnis zu den restlichen bayerischen SAPOS-Referenzstationen festgestellt. Als Ursache dafür kann nur die veränderte Wirkung der Mehrwegeeffekte aufgrund des Antennenwechsels in Frage kommen.

#### 4 Auswirkungen des Antennenwechsels auf den sächsischen Referenzstationen

Auf 17 SAPOS-Referenzstationen des Freistaates Sachsen wurden 2005 im Rahmen einer Erneuerung der Empfänger- und Antennentechnik die bis dahin genutzten Antennen vom Typ TRM23903.00 TCWD gegen die neueren Antennen vom Typ TRM41249.00 TZGD ausgetauscht. Alte wie neue Antennen waren 2001 bzw. 2005 im Kalibrierpfeilernetz des Geodätischen Instituts der TU Dresden im Feldverfahren mit Drehung individuell kalibriert worden.

Zur Kontrolle der Stationskoordinaten wurden Beobachtungen der sächsischen SAPOS-Stationen gemeinsam mit Beobachtungsdaten von vier IGS bzw. EPN-Stationen und von weiteren zwölf SAPOS-Stationen benachbarter Bundesländer ausgewertet. Einbezogen wurden Messungen von jeweils zwei Wochen vor dem Antennenwechsel (124.–130. und 227.–233. Tag in 2005) und nach dem Antennenwechsel (299.–305. und 313.–319. Tag in 2005). Die automatisierte Netzauswertung und detaillierte Analyse der Ergebnisse erfolgte mit dem Programmsystem WaSoft/Netz. Dabei wurden präzise IGS-Ephemeriden und individuelle Antennenkorrekturen eingeführt. Die Koordinatenergebnisse der einzelnen Wochen wurden nach ETRS89 transformiert und entsprechend der DREF-Realisierung gelagert (vgl. AdV 2004).

Die Differenzen der Koordinatenergebnisse zwischen den beiden Wochen vor bzw. zwischen den beiden Wochen nach dem Umbau wurden genutzt, um die Wiederholgenauigkeit der GPS-Ergebnisse zu bestimmen. Die quadratischen Mittel über alle Koordinatendifferenzen er-

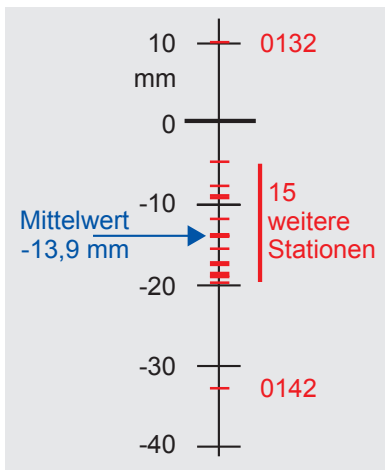


Abb. 1: Höhen-Koordinaten-änderungen von 17 sächsischen Referenzstationen aufgrund des Antennenwechsels von TRM23903.00 TCWD nach TRM41249.00 TZGD berechnet mit WaSoft/Netz

gaben Wiederholgenauigkeiten von deutlich unter 2 mm in beiden horizontalen Komponenten und von etwa 3 mm in der Höhenkomponente.

Im Folgenden sollen ausschließlich die Koordinatendifferenzen der sächsischen SAPOS-Stationen zwischen den Lösungen vor und nach dem Umbau betrachtet werden. In den horizontalen Komponenten betragen sie im Mittel 0,5 mm in Nord und 1,7 mm in Ost. Die Standardabweichungen der einzelnen horizontalen Koordinatendifferenzen liegen bei 1 mm. Keine Koordinatendifferenz erreicht mehr als 5 mm. Im Vergleich zur Wiederholgenauigkeit der Wochenlösungen ergeben sich keine Hinweise auf eine umbaubedingte Veränderung in den horizontalen Komponenten.

In der Höhenkomponente fallen die Koordinatenänderungen zwischen vor und nach dem Umbau dagegen sehr viel größer aus. Ihr Mittelwert beträgt -13,9 mm (Abb. 1). Die größten Abweichungen von diesem Mittelwert liegen bei 10,2 mm (Station 0132) bzw. -32,7 mm (Station 0142). Diese beiden Stationen weisen in Bezug auf Mehrwegeinflüsse aus dem Nahfeld besonders ungünstige Bedingungen auf, da sich in beiden Fällen direkt unter dem Dreifuß eine Metallverkleidung der Gebäudeaußenmauer bzw. des Pfeilers anschließt (Abb. 2).

Eine mögliche Ursache für die mittlere Abweichung von -13,9 mm kann in der Antennenkalibrierung im Feldverfahren mit Drehung liegen, bei der die Mehrwege-



Abb. 2: Fotos der Referenzstationen mit Koordinaten-änderungen in der Höhe, die am weitesten von der mittleren Koordinatenänderung abweichen

einflüsse auf die Höhenkomponente nicht vollständig eliminiert werden. Zwischen der Kalibrierung der alten Antennen im Jahr 2001 und der Kalibrierung der neuen Antennen in 2005 wurden einige Verbesserungen im Kalibrierverfahren des Geodätischen Instituts der TU Dresden vorgenommen, wobei nicht ausgeschlossen werden kann, dass diese zu systematischen Höhenabweichungen führen können. Diese Veränderungen beinhalten insbesondere:

- Wechsel der Referenzantenne und damit auch der zugehörigen absoluten Antennenkorrekturen für diese Antenne,
- Übergang von Antennendrehung mit der Hand und einer Kalibrierdauer von viermal 24 Stunden auf automatische Drehung mit DRB (Frevert et al. 2003) und einer Kalibrierdauer von einmal 24 Stunden.

Aus diesem Grund wurden vier der alten Antennen der aktuellen Kalibrierprozedur unterzogen und alte und neue Kalibrierwerte miteinander verglichen. Für den Vergleich wurde ein Beobachtungsdatensatz von 24 Stunden Dauer dupliziert und die eine Kopie jeweils mit einem alten und die andere Kopie mit dem zugehörigen neuen Kalibrierwert korrigiert. Anschließend wurden zusammengehörige Daten als Nullbasislinien ausgewertet. Jede Koordinatenabweichung von Null kann so nur auf Differenzen zwischen alten und neuen Kalibrierwerten für die identischen Antennen zurückzuführen sein. Diese Art des Vergleichs erlaubt es auch, unterschiedliche Lösungsarten zu berechnen und so den Einfluss auf verschiedene Anwendungen abzuschätzen.

Tab. 3: Differenzen in der Höhenkoordinate für vier Testantennen vom Typ TRM23903.00 TCWD beim Vergleich von alten mit neuen Kalibrierwerten in mm

| Antenne | L1   | L2   | LO   | LO+t |
|---------|------|------|------|------|
| 1       | 0,8  | 1,2  | 0,0  | -7,1 |
| 2       | -1,1 | -1,8 | -0,1 | -7,9 |
| 3       | 1,5  | 0,8  | 2,7  | -3,4 |
| 4       | -0,8 | -4,2 | 4,3  | -1,6 |

Die Übereinstimmungen der alten und neuen Kalibrierwerte in den originalen GPS-Signalen L1 und L2 fallen erstaunlich gut aus (Tab. 3). Trotz eines Zeitabstands von vier Jahren und trotz modifiziertem Kalibrierverfahren stimmt die Wirkung der Korrekturen auf die Höhenkomponente auf besser als 1,2 mm (Standardabweichung) überein. Dabei tritt aber auch ein Ausreißer von -4,2 mm (Antenne 4 auf L2) auf. Die Unterschiede vergrößern sich, wenn auf die ionosphären-freie Linearkombination mit Schätzung von Troposphärenunbekannten (LO+t) übergegangen wird. Da für alle vier Antennen hier die Differenzen das gleiche Vorzeichen aufweisen, ist zu vermuten, dass für diesen Auswerteansatz eine systematische Abweichung vorliegt. Sie beträgt im Mittel -5 mm. Damit wäre

ein Teil der Koordinatenänderung von im Mittel  $-13,9$  mm zwischen vor und nach dem Antennenwechsel erklärlich, aber bei weitem nicht der gesamte Unterschiedsbetrag.

Als mögliche Erklärung verbleiben damit nur Mehrwegeeffekte aus dem Nahfeld des Antennenstandortes, die unterschiedliche Wirkung auf die eingesetzten Antennentypen haben. Diese Einflüsse fallen in der ionosphärenfreien Linearkombination und insbesondere bei Schätzung von Troposphärenunbekannten (LO+t) besonders stark aus und können zu Koordinatenabweichungen in der Höhenkomponente in cm-Größenordnung führen.

## 5 Zusammenfassung und Empfehlungen

Wie die diskutierten Beispiele zeigen, muss bei einem Austausch von GPS-Antennen auf Referenzstationen trotz individueller Antennenkalibrierung mit Koordinatenänderungen in der Höhenkomponente in der Größenordnung von 1 cm gerechnet werden.

Diese betrifft insbesondere die Auswertung mit der ionosphären-freien Linearkombination mit Schätzung von Troposphärenunbekannten, wie sie in regionalen und großräumigen Netzen angewendet werden muss. Bei jeder Art der GPS-Höhenbestimmung, bei der dieser Auswertungsansatz verwendet wird, muss mit systematischen Höhenabweichungen in der genannten Größenordnung gerechnet werden.

Die als Verursacher geltenden Mehrwegeeffekte aus dem Antennennahfeld wirken dagegen sehr viel schwächer auf die Originalsignale L1 und L2, so dass bei deren direkter Anwendung in lokalen Netzen von deutlich geringeren Höhenabweichungen (Größenordnung 1 ... 2 mm) ausgegangen werden kann.

Für Antennenwechsel auf Referenzstationen können somit folgende Empfehlungen abgeleitet werden: Antennenwechsel sollten, wo immer möglich, vermieden werden oder sich auf den Austausch baugleicher Antennen beschränken. Ebenso sind alle Veränderungen im direkten Nahfeld der Antenne zu vermeiden, z.B. bauliche Veränderung des Pfeilers, Wechsel des Dreifußes usw. Individuelle Kalibrierungen der Referenzstationsantennen sind unerlässlich, aber noch keine Garantie gegen Koordinatenänderungen aufgrund eines Antennenwechsels.

Wenn die Möglichkeit besteht, sollten die alte und neue Antenne für einige Zeit parallel betrieben werden (IGS 2004, EPN 2006), so dass ein präziser Koordinatenübergang von alter auf neue Antenne erfolgen kann. Dies setzt voraus, dass die betroffenen Stationen über zwei geeignete Standpunkte und Antennenhalterungen verfügen, was aber meistens nicht der Fall ist und oft nur mit großem Aufwand realisierbar wäre. Bei diesem Ansatz würden in jedem Fall neue Koordinaten eingeführt werden müssen.

Alternativ sollte eine Referenzstation nach einem Antennenwechsel so lange (etwa eine Woche) nicht für einen Positionierungsdienst verwendet werden, bis neue Sta-

tionskoordinaten bestimmt sind. Bei der heute üblichen Form der Positionsbestimmung im Netz von umliegenden Referenzstationen z. B. mit Hilfe von Virtuellen Referenzstationen (VRS) kann in den meisten Fällen auf eine einzelne Referenzstation verzichtet werden, ohne dass die erzielbare Positionierungsgenauigkeit oder Dienstverfügbarkeit stark leidet. Antennenwechsel auf vielen Referenzstationen müssten dann aber sequentiell durchgeführt werden, um den Positionierungsdienst nicht zu beeinträchtigen.

## Literatur

- AdV: Diagnoseausgleichung 2003 der SAPOS-Referenzstationen und Einführung neuer amtlicher Koordinaten für die SAPOS-Referenzstationen. Arbeitskreis Raumbezug der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), 23. Sept. 2004.
- Campbell, J., Görres, B., Siemes, M., Wirsch, J., Becker, M.: Zur Genauigkeit der GPS-Antennenkalibrierung auf der Grundlage von Labormessungen und deren Vergleich mit anderen Verfahren. Allgemeine Vermessungsnachrichten 111, S. 2-11, 2004.
- EPN: Guidelines for EPN Stations & Operational Centres, EUREF Permanent Network (EPN) Central Bureau, 27. Jan. 2006, [http://www.epncb.oma.be/\\_organisation/guidelines/guidelines\\_station\\_operationalcentre.pdf](http://www.epncb.oma.be/_organisation/guidelines/guidelines_station_operationalcentre.pdf)
- Feldmann-Westendorff, U.: Vergleichstest der Kalibrierverfahren für GPS-Antennen: Teil 2 – Vorhaben und Datensatz. 5. GPS-Antennenworkshop, 3. Nov. 2003, Frankfurt am Main, [http://www.sapos.de/pdf/5aws/Feldm\\_AWS03.pdf](http://www.sapos.de/pdf/5aws/Feldm_AWS03.pdf), 2003.
- Frevert, V., Nuckelt, A., Stöcker, D.: Beschleunigte Feldkalibrierung von GPS-Antennen. Tagungsband DGON-Symposium POSNAV 2003, Dresden, 18./19. März 2003. Schriftenreihe des Geodätischen Instituts der TU Dresden, Heft 3, S. 353-359, 2003.
- IGS: IGS Site Guidelines. 13. Sept. 2004, <http://igs.cbl.nasa.gov/network/guidelines/guidelines.html>
- Klein, G., Klette, M.: Monitoring der SAPOS-Stationen in Bayern. Mitteilungen des DVW Bayern, Heft 3/2005, S. 401-424, 2005.
- Menge, F.: Zur Kalibrierung der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen für die hochpräzise Positionsbestimmung. Wiss. Arb. der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 247, 2003.
- Wanninger, L.: Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung. zfv 127, S. 51-58, 2002.
- Wanninger, L.: Erzielbare GPS-Koordinatengenauigkeiten bei Verwendung von Antennenkorrekturen. 5. GPS-Antennenworkshop, 3. Nov. 2003, Frankfurt am Main, [http://www.sapos.de/pdf/5aws/Wanninger-kalib\\_AWS03.pdf](http://www.sapos.de/pdf/5aws/Wanninger-kalib_AWS03.pdf), 2003.
- Wanninger, L., May, M.: Carrier Phase Multipath Calibration of GPS Reference Stations. Proc. ION GPS 2000, Salt Lake City UT, 132-144, 2000.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Boettcher, G.: Zum Einfluss des Antennennahfeldes. 5. GPS-Antennenworkshop, 3. Nov. 2003, Frankfurt am Main, [http://www.sapos.de/pdf/5aws/Schmitz\\_AWS03.pdf](http://www.sapos.de/pdf/5aws/Schmitz_AWS03.pdf), 2003.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Boettcher, G.: Near-field Effects on GNSS Sites. IGS Workshop, 8.-11. Mai 2006, Darmstadt, [http://www.geopp.de/download/gppigs06\\_nf\\_f.pdf](http://www.geopp.de/download/gppigs06_nf_f.pdf), 2006.

## Anschrift der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Lambert Wanninger | Dipl.-Ing. Christian Rost  
Geodätisches Institut, TU Dresden  
01062 Dresden  
[lambert.wanninger@tu-dresden.de](mailto:lambert.wanninger@tu-dresden.de)

Dipl.-Ing. Gunter Hartlieb | Dipl.-Ing. Martin Köhr  
Landesvermessungsamt Sachsen  
Olbrichtplatz 3, 01099 Dresden