

Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS-Antennenkalibrierung

Lambert Wanninger

Zusammenfassung

Die Phasenzentrumsfehler von geodätischen GPS-Antennen, die im Bereich Millimeter bis Zentimeter liegen, müssen bei vielen Anwendungen korrigiert und deswegen durch Antennenkalibrierungen bestimmt werden. Am häufigsten wird dafür das Verfahren der relativen Feldkalibrierung verwendet. Liegen absolute Kalibrierwerte für die Referenzantenne vor, lassen sich mit diesem Verfahren absolute Phasenzentrums-Offsets und -Variationen bestimmen. Mehrwegeeffekte stellen dabei die Hauptfehlerquelle dar. Ihre Wirkung auf die Phasenzentrumskorrekturen wird im Detail untersucht.

Summary

Phase center errors of geodetic GPS antennas ranging from millimeter to centimeter cannot be ignored in many applications and thus they have to be determined by antenna calibration. Relative field calibration is the most commonly used calibration procedure. It yields absolute phase center offsets and variations if absolute phase center corrections of the reference antenna are introduced. Carrier phase multipath is identified as the dominant error source. Its effect on phase center corrections is investigated.

1 Einführung

Für eine präzise relative GPS-Positionierung ist die Berücksichtigung der Phasenzentrumsfehler der verwendeten GPS-Antennen notwendig. Bis heute verlässt man sich bei vielen Anwendungen darauf, dass bei baugleichen Antennen eine ausreichend gute Übereinstimmung der Phasenzentrumsfehler existiert und diese somit bei der relativen Positionierung mit gleich ausgerichteten Antennen keinen Einfluss auf die Koordinatenergebnisse haben. Tatsächlich werden aber innerhalb von Baugruppen geodätischer GPS-Antennen einiger Hersteller immer wieder Ausreißer gefunden, deren Phasenzentrumsfehler um bis zu viele Millimeter von denen baugleicher Antennen abweichen. Weiterhin werden durch die zunehmende Nutzung von Positionierungsservices, z. B. der Landesvermessungsämter, immer häufiger verschiedene Antennentypen bei der Datenauswertung gemischt. Zusätzlich müssen bei allen Anwendungen, die keine Gleichausrichtung der Antennen erlauben, wie z. B. in großräumigen bzw. globalen Netzen oder bei vielen kinematischen Anwendungen, absolute Antennenkorrekturen berücksichtigt werden (Menge und Seeber 1999).

Bei einer idealen GPS-Antenne würde ein punktförmiges Phasenzentrum existieren, welches mit einem mecha-

nischen Referenzpunkt zusammenfällt. Bei tatsächlich existierenden GPS-Antennen kann das Phasenzentrum aber nicht als Punkt, sondern muss als Fläche betrachtet werden, da die wirksamen Phasenzentrumsfehler abhängig vom Einfallswinkel des Satellitensignals sind. Auch ein mittleres elektrisches Phasenzentrum fällt nicht exakt mit dem vorgegebenen mechanischen Referenzpunkt zusammen.

Die Abweichungen zwischen tatsächlich wirksamem Phasenzentrum und mechanischem Phasenzentrum liegen bei geodätischen GPS-Antennen im Bereich Millimeter bis Zentimeter. Die dadurch erzeugten Koordinatenfehler können in Einzelfällen viele Zentimeter erreichen (Rothacher u. a. 1995). Phasenzentrumsfehler sind abhängig von der Frequenz des empfangenen Signals und reagieren empfindlich auf bauliche Veränderungen in der direkten Umgebung des Antennenelements, z. B. durch Hinzufügung oder Wegnahme einer vergrößerten Grundplatte (Rothacher u. a. 1995), Choke-Ring-Elementen oder einer Antennenabdeckung, einem sogenannten Raddom (Kaniuth und Stuber 1999). Zeitliche Variationen wurden bisher – außer nach starker mechanischer Beanspruchung – nicht nachgewiesen.

Das am längsten angewandte Verfahren der GPS-Antennenkalibrierung beruht auf Labormessungen, wobei die Antenne um einen Referenzpunkt gedreht und geneigt wird und dabei die Phasenlage eines Mess-Signals erfasst wird (Sims 1985, Schupler und Clark 2001). Weiter verbreitet sind die Verfahren der Feldkalibrierung, bei denen reale GPS-Signale genutzt werden. Bei der relativen Feldkalibrierung, mit der sich dieser Artikel befasst, werden relative Kalibrierwerte bezüglich einer Referenzantenne bestimmt (Breuer u. a. 1995, Rothacher u. a. 1995). Durch eine einfach zu realisierende Drehung der zu kalibrierenden Antenne können einige Kalibrierkomponenten auch absolut bestimmt werden. Bei der aufwendigeren absoluten Feldkalibrierung werden durch Drehung und Kippung der zu kalibrierenden Antenne absolute Kalibrierwerte bestimmt, die dann unabhängig von der eingesetzten Referenzantenne sind (Wübbena u. a. 1996, 2000).

Die Hauptfehlerquelle der Antennenkalibrierungen im relativen Feldverfahren besteht in den Mehrwegeeffekten auf Referenz- und zu kalibrierender Antenne. Ihr Einfluss wird noch dadurch verstärkt, dass aufgrund der notwendigen langen Beobachtungsdauer unter Sicherheitsgesichtspunkten fast nur Hausdächer als Messorte in Frage kommen. Auf diesen sind fast immer Mehrwegeeffekte zu beobachten.

2 Mess- und Auswerteprozesse

Das Messprinzip der relativen Feldkalibrierung besteht darin, eine kurze, koordinatenmäßig bekannte Basislinie lange zu beobachten. Dabei wird auf einer Station die Referenzantenne betrieben und auf der zweiten Station die zu kalibrierende Antenne. Die Kürze der Basislinie (im Allgemeinen eine Länge von wenigen Metern) ist die Voraussetzung, dass bei der Relativauswertung die Einflüsse durch Satellitenorbitfehler, Ionosphäre und Troposphäre verschwindend klein werden. Eine lange Beobachtungsdauer von mindestens 24 Stunden ist notwendig, um zum einen die vollständige Satellitenüberdeckung zu nutzen und andererseits Mehrwegeeinflüsse weitgehend herauszumitteln.

Alle Differenzen zu den Basislinien-Sollkoordinaten werden als relative Phasenzentrumsfehler betrachtet (Abb. 1). Bildet man Differenzen auf Koordinatenebene, so erhält man Phasenzentrums-Offsets (PZO) und somit Korrekturen für Basislinienkoordinaten. Betrachtet man dagegen vorhandene Differenzen auf Beobachtungsebene, so erhält man Phasenzentrums-Variationen (PZV) und somit Korrekturen für Relativbeobachtungen. Häufig werden nur elevationsabhängige PZV bestimmt und korrigiert. Bei manchen Antennen müssen auch Azimutabhängigkeiten erfasst werden. Die Modellierung der Variationen erfolgt durch Polygone (Rothacher u. a. 1995, Kaniuth u. a. 1998), Polynome (Breuer u. a. 1995) oder Kugelflächenfunktionen (Rothacher u. a. 1995, Wübbena u. a. 1996).

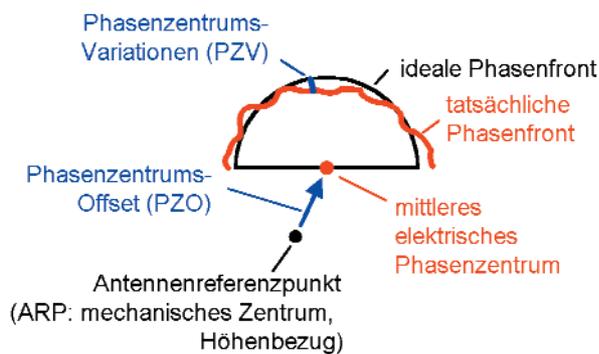


Abb. 1: Phasenzentrums-Offsets und -Variationen bei GPS-Antennen.

Dieses Messprinzip kann durch Austausch, Drehung oder Kippung der Antennen verfeinert werden. Durch den Austausch der Antennen können PZO ohne die Kenntnis von Sollkoordinaten bestimmt werden. Dieses Verfahren soll hier nicht näher betrachtet werden, da aus praktischen Erwägungen alle Veränderungen an der Referenzantenne vermieden werden sollten.

Die Drehung einer oder beider Antennen wird am einfachsten mit der Hand durchgeführt. Es ergeben sich dann Messungen in mehreren Ausrichtungen, also zum

Beispiel zwei Ausrichtungen (Nord und Süd) oder vier Ausrichtungen (alle vier Himmelsrichtungen), in denen jeweils 24 Stunden beobachtet wird.

Wird nur die zu kalibrierende Antenne gedreht, so kann auf die Bestimmung der Lagekomponenten der Basislinie verzichtet werden. Sie werden dann als Unbekannte in der Auswertung mitgeschätzt. Nur der Höhenunterschied zwischen den Antennenreferenzpunkten muss dann noch submillimetergenau gemessen (nivelliert) werden.

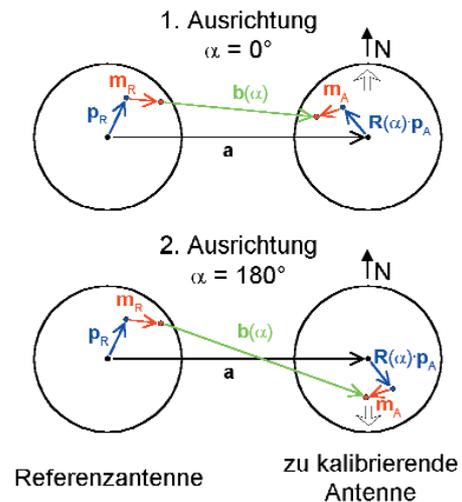


Abb. 2: Bestimmung absoluter PZO-Lagekomponenten durch Beobachtung in unterschiedlichen Ausrichtungen der zu kalibrierenden Antenne.

Vernachlässigt man für die folgende Betrachtung die Höhenkomponente, so lässt sich die Wirkung der Drehung der zu kalibrierenden Antenne wie folgt beschreiben (vgl. Abb. 2). Der aus den GPS-Trägerphasenbeobachtungen bestimmte zweidimensionale Basislinienvektor b ist nicht mit dem Vektor zwischen den Antennenreferenzpunkten a identisch. Zum einen weist die Referenzantenne einen Phasenzentrums-Offset p_R auf, zum anderen wirken auf beide Antennen Mehrwegeeinflüsse, die sich im Tagesmittel als Vektoren m_R und m_A darstellen lassen. Durch die Drehung der zu kalibrierenden Antenne verändert sich nur der Einfluss des Phasenzentrums-Offsets p_A der zu kalibrierenden Antenne auf die gemessene Basislinie. Er lässt sich somit von den anderen Komponenten trennen. Es gilt:

$$b(\alpha) = a - p_R - m_R + R(\alpha) \cdot p_A + m_A \quad (1)$$

$$= s + R(\alpha) \cdot p_A \quad (2)$$

mit

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (3)$$

Tatsächlich werden also bei dem Verfahren der Antennendrehung nicht die Sollkoordinaten der Basislinie (Vektor a) bestimmt, sondern der um mittlere Mehrwegeeinflüsse verfälschte Vektor s zwischen dem mittleren Phasenzentrum der Referenzantenne und dem Antennenreferenzpunkt der zu kalibrierenden Antenne. Die horizontalen Komponenten des Phasenzentrums-Offsets p_A der zu kalibrierenden Antenne sind frei von Mehrwegeeinflüssen. Dies setzt voraus, dass die mittleren Mehrwegeeinflüsse über die Kalibrierdauer (mehrere Tage) konstant sind. Während leichte Veränderungen der Satellitenkonstellation (Hinzunahme oder Ausfall eines Satelliten) geringen Einfluss haben, können Veränderungen in den Antennenumgebungen (z. B. mit und ohne Schneebedeckung) die mittleren Mehrwegeeinflüsse entscheidend beeinflussen. Auf geringe Umgebungsveränderungen während der Kalibrierung ist also zu achten.

Sollen azimutabhängige PZV für die gesamte Antenne bestimmt werden, so sind Beobachtungen in mindestens zwei Ausrichtungen (Nord und Süd) notwendig, wobei beide Antennen gleich ausgerichtet, also beide Antennen gedreht werden müssen. Dann gelingt es auch, PZV für die gesamte Nordseite der zu kalibrierenden Antenne zu bestimmen (Rothacher u. a. 1996). Bei einer Nordausrichtung der Antennen und Messungen in mittleren Breiten der Nordhalbkugel werden ansonsten aufgrund der GPS-Satellitenorbits in diesem Antennenbereich keine Signale empfangen. PZV-Korrekturen der gesamten Antenne sind dementsprechend auch nur notwendig, wenn in anderen geographischen Breiten gemessen oder die Antenne verdreht (bei einigen kinematischen Anwendungen) eingesetzt wird.

Bei der Kalibrierauswertung mit dem hier eingesetzten Programmsystem WaSoft/Kalib werden die Phasenzentrums-Variationen (PZV) mit Hilfe von Kugelflächenfunktionen modelliert. Für die Bestimmung von elevations- und azimutabhängigen PZV werden sie bis zum Grad 8 und Ordnung 5 verwendet. Sollen nur elevationsabhängige PZV berechnet werden, so beträgt die maximale Ordnung 0. Durch die damit vorgegebene flächenhafte Auflösung des Modells werden die Variationen des Antennenphasenzentrums ausreichend genau wiedergegeben, während Mehrwegeeinflüsse, die meist kleinräumiger ausfallen, kaum vom Modell erfasst werden.

Eine motorisierte Drehung der zu kalibrierenden Antenne mit häufig und schnell wechselnden oder vielen Ausrichtungen (Schulte 2001) kann das Messverfahren beschleunigen. Gleichzeitig erhöht sich aber der instrumentelle Aufwand für die Kalibrierdurchführung. Im Vergleich zur Antennendrehung per Hand ergeben sich nur geringe weitergehende Vorteile in Bezug auf die Verringerung des Einflusses von Mehrwegefehlern.

Die schnelle motorisierte Drehung und zusätzliche Kippung der zu kalibrierenden Antenne führt zu den Verfahren der absoluten Feldkalibrierung mit Mehrwegeelimination. Als Ergebnis erhält man absolute Kalibrierwerte, die unabhängig von der verwendeten Referenz-

antenne sind. Die zusätzlich notwendige, kontrollierte Kippung der Antenne um einen genau bekannten Punkt ist nur mit sehr viel größerem Aufwand (z. B. Einsatz eines Roboterarms) erzielbar. Die Durchführungsdauer einer Kalibrierung wird stark verkürzt (Wübbena u. a. 1996, 2000).

3 Bestimmung absoluter Korrekturen im relativen Feldverfahren

Im standardmäßig ausgeführten relativen Feldverfahren können nur relative Antennenkalibrierwerte bestimmt werden. Dreht man die zu kalibrierende Antenne, so werden die Lagekomponenten des PZO-Vektors absolut bestimmbar. Die Höhenkomponente und die PZV werden immer relativ bestimmt. Sie beziehen sich auf die Referenzantenne. Es ist heute üblich, als Referenzantenne eine AOAD/M_T (auch als Dorne Margolin T oder JPL D/M+crT bezeichnet) zu verwenden (Mader 1999, NGS 2001, IGS 2001) oder die erzeugten Kalibrierwerte auf dieses Niveau umzurechnen. Da sich heute eigentlich alle relativen Kalibrierwerte auf die selbe Antenne (bzw. den selben Antennentyp) beziehen, können sie problemlos gemischt verwendet werden.

Diese auf AOAD/M_T bezogenen relativen Kalibrierwerte erfüllen bei allen Anwendungen, bei denen eine Gleichausrichtung der Antennen möglich ist, die gestellten Voraussetzungen. Dagegen müssen in großräumigen bzw. globalen Netzen und bei vielen kinematischen Anwendungen, also immer dann, wenn keine Gleichausrichtung der Antennen durchführbar ist, absolute Antennenkorrekturen berücksichtigt werden (Menge und Seeber 1999, Rothacher 2001).

Auch im relativen Feldverfahren können absolute Kalibrierwerte bestimmt werden. Voraussetzung ist die Kenntnis von absoluten Korrekturen für die Referenzantenne, wie sie z. B. durch das Verfahren der absoluten Feldkalibrierung gewonnen werden kann. Im einfachsten Fall können die absoluten Korrekturen der Referenzantenne zu den relativen Kalibrierwerten der zu kalibrierenden Antenne hinzuaddiert werden, um absolute Korrekturen der zu kalibrierenden Antenne zu erhalten.

Vorteilhafter ist es aber, die Beobachtungen der Referenzantenne mit den vorliegenden absoluten Korrekturen zu verbessern. Die korrigierten Beobachtungen beziehen sich dann auf eine sogenannte Nullantenne, d. h. sie sind frei von Phasenzentrumsfehlern (Menge und Schmitz 2000). Alle Kalibrierungen relativ zu einer Nullantenne ergeben absolute Korrekturen.

Diese absolute Korrektur der Referenzbeobachtungen hat Einfluss auf das Kalibriermessverfahren. Will man azimutabhängige PZV für die gesamte zu kalibrierende Antenne bestimmen, so ist nun die Drehung der Referenzantenne nicht mehr notwendig, da ihre Beobachtungen keine Phasenzentrumsfehler mehr enthalten. Nur

noch die zu kalibrierende Antenne muss in mindestens zwei Ausrichtungen (z. B. Nord und Süd) eingesetzt werden.

Da die Referenzantenne nun bei keiner Art relativer Kalibrierungen mehr verändert werden muss, ergibt sich die Möglichkeit, als Referenz eine GPS-Permanentstation zu nutzen, die schon für andere Zwecke (SAPOS, GREF etc.) Beobachtungsdaten sammelt und auch schon von daher mit einer kalibrierten Antenne ausgerüstet ist. Die relativen Kalibrierungen anderer Antennen sollten dann auf dem selben Dach erfolgen.

Für eine umfassende relative Feldkalibrierung ergibt sich somit folgender Messaufbau:

- (1) feste Referenzantenne, für die absolute Kalibrierwerte vorliegen,
- (2) zu kalibrierende Antenne in mindestens zwei, besser vier Ausrichtungen mit einer Beobachtungsdauer von 24 h in jeder Ausrichtung,
- (3) Bestimmung des Höhenunterschieds zwischen den Antennenreferenzpunkten beider Antennen durch Nivellement (die Lagekomponenten der Basislinie werden bei der Auswertung der GPS-Beobachtungen mitbestimmt).

Zwar beträgt die Messdauer damit mehrere Tage, aber der personelle Aufwand ist trotzdem gering, da die Messungen vollständig automatisch ablaufen, also nur Aufbau, Höhendifferenzbestimmung, Antennendrehungen und Abbau Arbeitskraft bindet. Als Ergebnis der Kalibrierauswertung erhält man dann absolute Korrekturen für die zu kalibrierende Antenne bestehend aus PZO sowie elevations- und azimutabhängigen PZV.

In einem vereinfachten Messverfahren mit nur einer Antennenausrichtung und somit einer einzelnen Messsession von 24 h Dauer können PZO und elevationsabhängige PZV in für die meisten Anwendungen ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Die bei mehreren Ausrichtungen erfolgreiche Mehrwegeelimination für die PZO-Lagekomponenten gelingt hier nicht vollständig. Es ist zwar möglich, den Basislinienvektor s , der auch die mittleren Mehrwegeeinflüsse enthält (vgl. Gl. (1), (2) und Abb. 2), aus vorhergehenden Kalibrierungen mit mehreren Ausrichtungen zu übernehmen. Doch der Mehrwegeeinfluss m_A auf Seiten der zu kalibrierenden Antenne ist u. a. auch von der Mehrwegeempfindlichkeit der eingesetzten Antenne abhängig. Er kann also nur näherungsweise von einem Antennentyp auf einen anderen übertragen werden.

4 Beispiel für Kalibrierergebnisse absoluter Phasenzentrums-Variationen

Die absoluten PZV einer TRM29659.00-Antenne (mit Choke-Ringen) wurden im relativen Feldverfahren auf dem Messdach der TU Dresden – und somit in mehrwegereicher Umgebung – in vier Ausrichtungen bestimmt

und mit WaSoft/Kalib ausgewertet. Sie lassen erkennen, dass dieser Antennentyp starke elevationsabhängige Variationen aufweist, aber kaum azimutabhängige Variationen (Abb. 3, oben). Subtrahiert man die elevationsabhängigen Anteile, so verbleiben die rein azimutalen Anteile (Abb. 3, unten). Sie erreichen Maximalwerte von 1,8 mm in L_1 , 2,0 mm in L_2 und 2,7 mm in der ionosphären-freien Linearkombination L_0 . Die Standardabweichungen über alle azimutalen Anteile liegen für die Originalsignale bei jeweils einem halben Millimeter und betragen 0,9 mm für L_0 . Diese azimutalen Variationen stellen die Summe aus im wesentlichen vier Einflüssen dar:

- (1) den tatsächlichen azimutalen Variationen der zu kalibrierenden Antenne, die sehr gering zu sein scheinen,
- (2) den Fehlern der absoluten Korrekturen für die Referenzantenne, die bei der Datenauswertung Verwendung fanden,
- (3) den Mehrwegefehlern, die auf die Referenzantenne wirken, und
- (4) den Mehrwegefehlern, die auf die zu kalibrierende Antenne wirken.

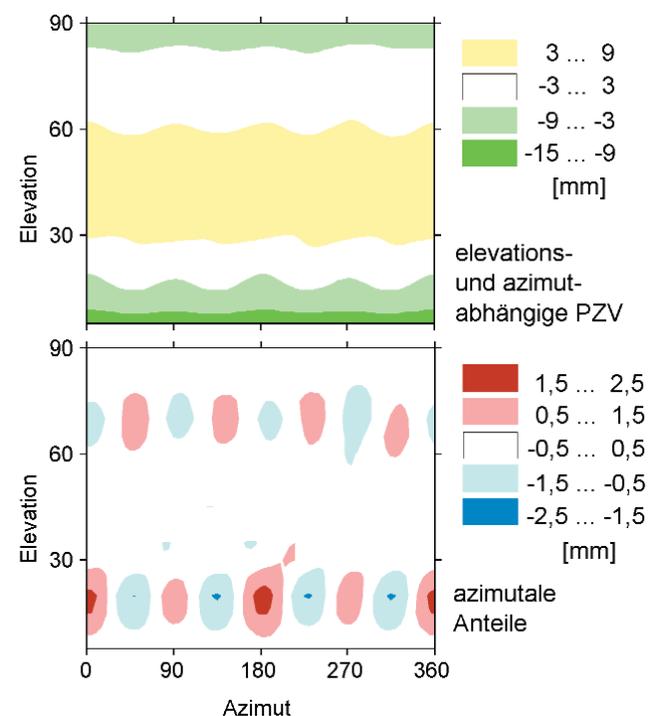


Abb. 3: Im relativen Feldverfahren bestimmte absolute Phasenzentrums-Variationen (PZV) einer TRM29659.00-Antenne: elevations- und azimutabhängige PZV (oben), sowie rein azimutabhängige Anteile (unten).

Aufgrund der Vierfach-Ausrichtung der zu kalibrierenden Antenne erzeugen die Mehrwegefehler und auch die Fehler der absoluten Korrekturen der Referenzantenne ein Muster, welches sich azimutal alle 90 Grad wiederholt. Abweichungen von einer perfekten Symmetrie wer-

den im wesentlichen durch Variationen im Mehrwegeeinfluss aufgrund von Veränderungen in den Antennenumbungen, durch Variationen in der täglichen Beobachtungsverteilung und durch tatsächliche azimutale Variationen der Antenne verursacht.

Wenn man davon ausgeht, dass die kalibrierte Antenne keinerlei azimutalen PZV aufweist, lassen die erkennbaren azimutalen Variationen die Qualität der relativen Feldkalibrierung abschätzen. Bei Standardabweichungen von jeweils einem halben Millimeter in L_1 und L_2 konnte mit diesem Messaufbau auch in mehrwegereicher Umgebung problemlos Millimetergenauigkeit erreicht werden. Größere Restfehler sind bei mehrwegeempfindlicheren Antennentypen zu erwarten. Diese ermöglichen dann aber auch im Feldeinsatz schon allein aufgrund von Mehrwegeeinflüssen kein Erreichen höchster Genauigkeiten.

5 Simulation von Mehrwegefehlern

Um den Einfluss von Mehrwegefehlern auf Antennenphasenkorrekturen und Koordinatenergebnisse näher zu untersuchen, wurden Mehrwegefehler simuliert und entsprechend fehlerbehaftete Kalibrierdaten mit dem Programmsystem WaSoft ausgewertet. So lässt sich unter kontrollierten Rahmenbedingungen der Einfluss einer einzelnen Fehlerquelle auf PZO und PZV detailliert untersuchen.

Auf einem sorgfältig ausgewählten Hausdach werden keine Signalreflektoren, die Mehrwegesignale erzeugen können, oberhalb des Antennenhorizonts vorhanden sein, so dass alle störenden Einflüsse von unterhalb kommen müssen. Reflektierende Flächen sind insbesondere alle Dachoberflächen, wobei ihre Oberflächeneigenschaften und ihre geometrische Lage zu den Antennen die Eigenschaften der durch sie erzeugten Mehrwegeeinflüsse bestimmen. Im Wesentlichen werden die Signale tiefstehender Satelliten negativ beeinflusst sein. Im Allgemeinen sind nur Signale aus begrenzten Azimut-Elevations-Bereichen durch starke Mehrwegeeinflüsse betroffen. Für die Kalibrierung wirksam ist die Summe der Mehrwegeeinflüsse auf Referenz- und zu kalibrierende Antenne.

In Einzelfällen erzeugen auch die Oberflächen der Messpfeiler Mehrwegeeinflüsse, die dann auf die Signale hochstehender Satelliten wirken. Diese Einflüsse sind insbesondere dann zu beobachten, wenn der Pfeilerdurchmesser den Antennendurchmesser überschreitet. Sie sollten schon durch die Wahl geeigneter Pfeiler minimiert werden.

Ausgehend von Erfahrung mit Mehrwegeeinflüssen auf Hausdächern (Wanninger und May 2000) wurden in der Simulation zwei begrenzte Störgebiete (im Koordinatensystem von Azimut und Elevation des Einfallswinkels betroffener direkter Signale) festgelegt, die die Summe der

Mehrwegeeinflüsse für ein Paar von recht stark gestörten Dachstationen wiedergeben (Abb. 4):

- (1) erstes Störgebiet: niedrige Elevation, Ostrichtung, geneigter, naher Reflektor, maximal 2 cm Phasenfehler in L_1 ,
- (2) zweites Störgebiet: mittlere Elevation, Südrichtung, weiter entfernter Reflektor, maximal 2 cm Phasenfehler in L_1 .

Die entsprechenden Fehler für die zweite GPS-Frequenz wurden aus den L_1 -Fehlern unter zufälliger Wahl einer Mehrwegephasendifferenz berechnet. Sie weisen eine größere Wellenlänge und Amplitude (2,5 cm) auf. Aus den L_1 - und L_2 -Fehlern konnten die Fehler der ionosphären-freien Linearkombination L_0 abgeleitet werden, die noch größer ausfallen (Maximalwert 8,9 cm).

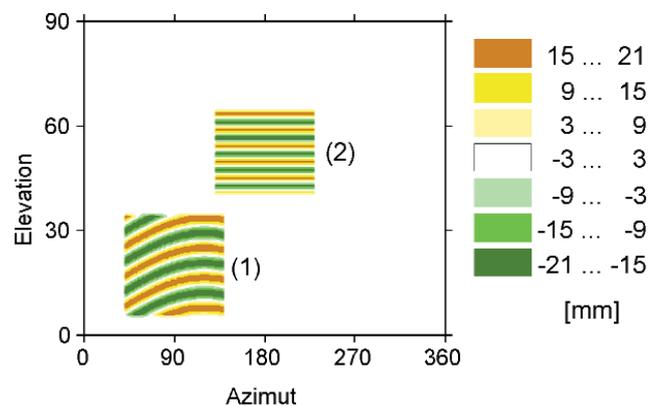


Abb. 4: Simulierte L_1 -Mehrwegefehler.

Für die Simulation wurde ein 24 h-Beobachtungsdatensatz einer Referenzstation ausgewählt. An eine Kopie der Beobachtungen wurden die beschriebenen Mehrwegefehler angebracht. Die Basislinie zwischen diesen beiden Beobachtungsdatensätzen weiß somit relative PZO, relative PZV und auch Basislinienkoordinaten der Größe null auf. Alle Abweichungen von null sind ausschließlich auf die künstlich eingeführten Mehrwegefehler zurückzuführen. Zur Simulation der Antennendrehung wurde dieser Datensatz mehrfach kopiert und weitere Basislinien in die Auswertung einbezogen, wobei dem mehrwegelasteten Datensatz unterschiedliche Antennenausrichtungswinkel zugeordnet wurden.

5.1 Einfluss der simulierten Mehrwegefehler auf die Kalibrierergebnisse

Auf die Phasenzentrums-Offsets (PZO) wirken die mittleren Mehrwegeeinflüsse bei 24 Stunden Beobachtungsdauer. Sie betragen in dieser Simulation für L_1 und L_2 jeweils einige zehntel Millimeter (Tab. 1). In der ionosphären-freien Linearkombination verstärken sie sich auf Werte um 2 mm. Die mehrwegebedingten PZO-Fehler be-

tragen also selbst bei Kalibrierung in einer Ausrichtung nur wenige Prozent der maximalen Originalmehrwegefehler. Arbeitet man mit mehreren Antennenausrichtungen und bestimmt so sowohl die PZO wie auch die horizontalen Basislinienkomponenten, sind die Lage-PZO frei von Mehrwegeeinflüssen. Eine entsprechende Mehrwegeelimination bei der Höhenkomponente kann durch Antennendrehung nicht gelingen.

	eine Ausrichtung			mehrere Ausrichtungen			Basislinie	
	PZO			PZO			Nord	Ost
	Nord	Ost	Höhe	Nord	Ost	Höhe	Nord	Ost
L ₁	0,2	-0,4	0,3	0,0	0,0	0,3	0,2	-0,4
L ₂	-0,9	0,4	-0,6	0,0	0,0	-0,6	-0,9	0,4
L ₀	1,9	-1,7	1,8	0,0	0,0	1,8	1,9	-1,7

Tab. 1: Auswirkungen der simulierten Mehrwegefehler auf geschätzte PZO und Basislinienkomponenten, in mm.

Aufgrund des gewählten Modellierungsansatzes mit Kugelflächenfunktionen bis zum Grad 8 wirken die kleinräumigeren Mehrwegefehler nur in geringem Maße auf die berechneten elevationsabhängigen Phasenzentrumsvariationen (PZV). Die durch die simulierten Mehrwegeeinflüsse erzeugten maximalen Fehler liegen in den Originalsignalen unter 1 mm. Nur in der ionosphären-freien Linearkombination erreichen sie fehlerfortpflanzungsbedingt einen höheren Wert (Abb. 5). Sie betragen also nur wenige Prozent der maximalen Originalmehrwegefehler. Beobachtungen in mehreren Ausrichtungen können die mehrwegebedingten Fehler der elevationsabhängigen PZV nicht verringern.

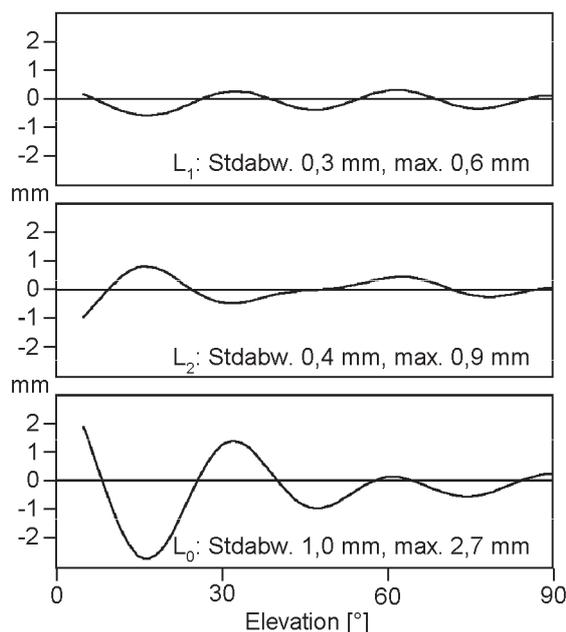


Abb. 5: Auswirkungen der simulierten Mehrwegefehler auf elevationsabhängige PZV.

Auch auf die elevations- und azimutabhängigen PZV wirken sich aufgrund des gewählten Modellierungsansatzes (Kugelflächenfunktionen bis zum Grad 8, Ordnung 5) die kleinräumigeren Mehrwegefehler nur in geringem Maße aus (Abb. 6, Tab. 2). Zusätzlich kann der Mehrwegeeinfluss durch die Beobachtung in mehreren Ausrichtungen deutlich gesenkt werden. Bei einer Antennenausrichtung fehlen Informationen über Signale aus nördlichen Richtungen (Abb. 6 oben). Bei vier Ausrichtungen entsteht das schon aus Abbildung 3 bekannte Vierfach-Muster (Abb. 6 unten). Auch hier betragen die Maximalwerte der mehrwegebedingten PZV-Fehler nur wenige Prozent der maximalen Originalmehrwegefehler.

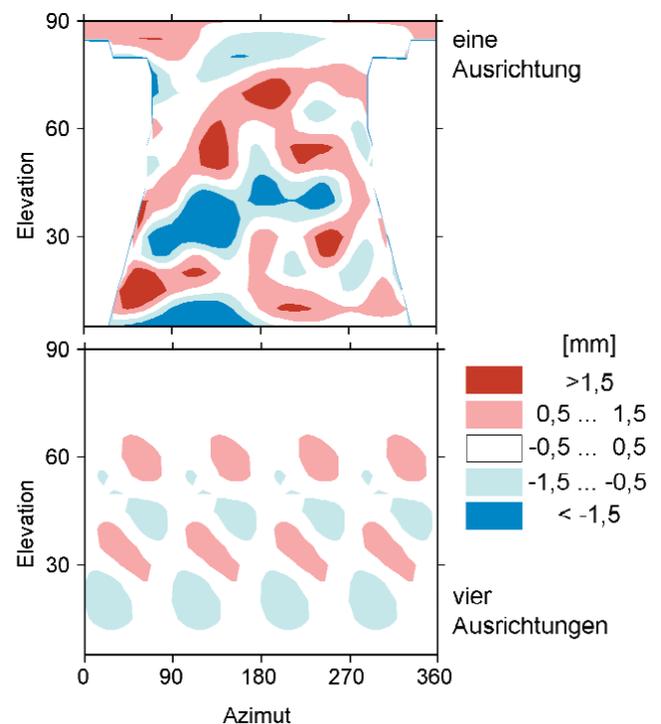


Abb. 6: Auswirkungen der simulierten Mehrwegefehler auf elevations- und azimutabhängige PZV des L₁-Signals: basierend auf 24 Stunden Beobachtungen in einer Ausrichtung (oben) und auf 4 x 24 Stunden Beobachtungen in vier Ausrichtungen (unten).

	eine Ausrichtung		vier Ausrichtungen	
	Stdabw.	Max.	Stdabw.	Max.
L ₁	0,9	4,1	0,5	1,3
L ₂	1,3	4,6	0,5	1,5
L ₀	3,6	16,7	1,5	4,1

Tab. 2: Auswirkungen der simulierten Mehrwegefehler auf geschätzte elevations- und azimutabhängige PZV, in mm.

5.2 Einfluss der simulierten Mehrwegefehler auf Koordinatenergebnisse

Bisher wurde der Einfluss der Mehrwegefehler auf die Kalibrierergebnisse betrachtet. Von noch größerem Interesse ist aber sicherlich die Wirkung auf Positionierungsergebnisse. Dafür wurde ein 24 Stunden-Datensatz dupliziert und Fehlereinflüsse an die Beobachtungen der Kopie angebracht. Die Basislinie zwischen originalen und kopierten Daten ist eine sogenannte Null-Basislinie. Alle Koordinatenabweichungen von null sind somit auf die künstlich eingeführten Beobachtungsfehler zurückzuführen.

In der folgenden Betrachtung sollen zwei Fehlereinflüsse unterschieden werden. Der indirekte Einfluss der Mehrwegefehler auf die Koordinatenergebnisse wird durch die verfälschten Phasenzentrumskorrekturen verursacht. Hier wurden die in den Simulationsrechnungen mit vier Antennenausrichtungen erzielten PZO- und PZV-Werte als Fehler an die Beobachtungen angebracht. Gleichzeitig verursachen aber auch Mehrwegeeinflüsse direkt Fehler in den Beobachtungen. Ihre Größe ist stark von den Antennenumgebungen der Stationen abhängig. Die in der Simulation verwendeten Mehrwegefehler (Abb. 4) sind weder für Referenzstationen auf Hausdächern noch Mess-Stationen im bebauten Gelände ungewöhnlich, so dass sie hier noch einmal verwendet werden.

Koordinatenergebnisse wurden für Beobachtungsdauern von einer Epoche bis zu 24 Stunden und sowohl für L_1 - wie auch für L_0 -Koordinatenlösungen erzeugt. Die in Abbildung 7 dargestellten Koordinatenfehler sind im wesentlichen einfache Standardabweichungen. Bei 24 Stunden Beobachtungsdauer handelt es sich aber um systematische Koordinatenfehler, die sich auch bei noch längerer Beobachtungsdauer nicht weiter verringern würden.

Betrachtet man die Ergebnisse von Einzelepochen oder kurzzeitigen statischen Beobachtungen, so fällt der indirekte Mehrwegeeinfluss durch die Verfälschung der Phasenzentrumskorrekturen ungefähr eine Größenordnung geringer aus als der direkte Mehrwegeeinfluss. Dies gilt auch für die Lagekomponenten bei langzeitigen Messungen. Hier wirken praktisch keine mehrwegebedingten Kalibrierfehler mehr, während die direkten Mehrwegefehler 0,5 mm (L_1) bzw. 2,1 mm (L_0) erreichen. Anders sieht es bei langzeitigen Messungen zur Bestimmung der Höhenkomponente aus. Da hierbei die Mehrwegeeinflüsse bei der PZO-Bestimmung nicht eliminiert werden konnten, liegen direkte und indirekte Fehler in der gleichen Größenordnung.

Dieses Ergebnis hat entscheidende Bedeutung für die Wahl einer geeigneten Kalibrierumgebung. Im Allgemeinen darf die Kalibrierumgebung genauso große Mehrwegeeinflüsse aufweisen wie die späteren Messumgebungen. Es muss sich keine besondere Mühe gegeben werden, besonders mehrwegearme Kalibrierstandorte zu fin-

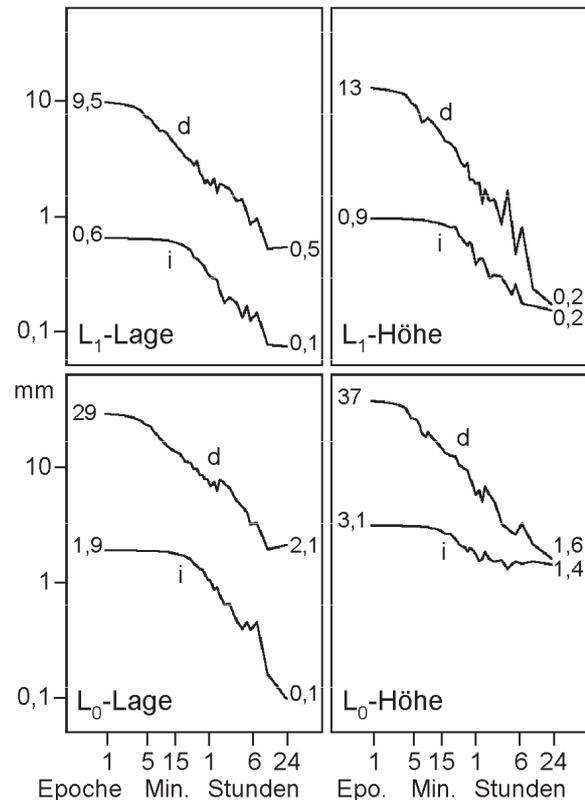


Abb. 7: Koordinatenfehler verursacht durch die simulierten Mehrwegefehler als Funktion der Beobachtungsdauer: direkter Mehrwegeeinfluss (d) und indirekter Einfluss aufgrund der Verwendung mehrwegeverfälschter Phasenzentrumskorrekturen (i).

den, da der indirekte Mehrwegeeinfluss durch die Verfälschung der Phasenzentrumskorrekturen ungefähr eine Größenordnung geringer ausfällt als ein entsprechender direkter Mehrwegeeinfluss.

Anders sieht es nur bei präzisen Höhendifferenzmessungen mit langer Beobachtungsdauer aus. Da hier die indirekten Fehler die gleiche Größenordnung aufweisen wie die direkten Mehrwegeeinflüsse, muss für diese Anwendung eine besonders mehrwegearme Kalibrierumgebung ausgesucht werden. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass es für Höhendifferenzbestimmungen höchster Genauigkeit unbedingt notwendig ist, die Mess-Stationen unter dem Gesichtspunkt von mehrwegearmen Umgebungen auszusuchen. Verwendet man stark mehrwegebeeinflusste Messpunkte, wie man sie z. B. auf vielen Hausdächern vorfindet, so muss bei der Koordinatenschätzung mit der ionosphären-freien Linearkombination und bei zusätzlicher Schätzung von Troposphärenunbekannten mit systematischen Fehlern von einigen bis vielen Millimetern gerechnet werden.

6 Schlussfolgerungen

Der Aufwand für eine Kalibrierung von GPS-Antennen im relativen Feldverfahren ist von den notwendigen Grundinvestitionen und der Messdurchführung her relativ gering. Zwar beträgt die Messdauer zwischen 24 und vier mal 24 Stunden, aber der personelle Aufwand ist nicht hoch, da die Messungen vollständig automatisch ablaufen, also nur Aufbau, Höhendifferenzbestimmung, Antennendrehungen und Abbau Arbeitskraft bindet. Liegen absolute Phasenzentrumskorrekturen für die Referenzantenne vor, so handelt es sich bei den relativ bestimmten Kalibrierwerten auch um absolute Korrekturen. Weiterhin ergibt sich der Vorteil, dass die Referenzantenne nun selbst bei der Bestimmung azimuthaler Phasenzentrums-Variationen nicht gedreht werden muss. Es ist dann möglich, eine schon für andere Zwecke betriebene Permanentstation als Referenz für alle Arten der relativen Feldkalibrierungen einzusetzen.

Mehrwegeeinflüsse auf Referenz- und zu kalibrierende Antenne stellen die Hauptfehlerquellen der relativen Feldkalibrierung dar. Ihre Auswirkungen können aber durch geeignete Mess- und Auswerteverfahren stark verringert und teilweise sogar eliminiert werden. Für fast alle Anwendungsfälle müssen die Kalibrierstandorte keine geringeren Mehrwegebeeinflussungen aufweisen als die Stationen, auf denen die kalibrierten Antennen später eingesetzt werden.

Nur die präzise Höhendifferenzbestimmung auf der Basis von langzeitigen Beobachtungen stellt hier eine Ausnahme dar. Die auf die Höhenkomponente des Phasenzentrums-Offsets wirkenden Mehrwegefehler liegen in der gleichen Größenordnung wie der direkte Einfluss von Mehrwegefehlern auf langzeitige Messungen. Von daher muss für diesen Anwendungsfall der Kalibrierstandort mit besonderer Sorgfalt ausgesucht werden. Dies macht aber nur dann wirklich Sinn, wenn auch die für die Höhendifferenzbestimmung verwendeten Mess-Stationen unter dem Gesichtspunkt geringer Mehrwegebeeinflussung ausgewählt werden.

Literatur

- Breuer, B., Campbell, J., Görres, B., Hawig, J., Wohlleben, R.: Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen. Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation, 49–59, 1995.
- IGS: Datei der vom International GPS Service (IGS) verwendeten bau-typen-spezifischen GPS-Antennenkorrekturen, ftp://igsb.jpl.nasa.gov/igsb/station/gemeral/igs_01.pcv, 2001.
- Kaniuth, K., Kleuren, D., Tremel, H., Schlüter, W.: Elevationsabhängige Phasenzentrumsvariationen geodätischer GPS-Antennen. zfv 319–325, 1998.
- Kaniuth, K., Stuber, K.: Einfluß von Antennen-Radomen auf die GPS-Höhenbestimmung. Allg. Verm. Nachrichten, 234–238, 1999.
- Mader, G. L.: GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey. GPS Solutions, Vol. 3, 50–58, 1999.
- Menge, F., Seeber, G.: Untersuchungen und Beiträge zur Problematik der Phasenzentrumsvariationen von GPS-Antennen. DGK B310, München, 1999.
- Menge, F., Schmitz, M.: AOAD/M_T Choke Ring GPS Antenna Absolute Phase Center Variations, http://www.ife.uni-hannover.de/~web/AOA_DM_T, 2000.
- NGS: GPS Antenna Calibration, Geoscience Research Division, National Geodetic Survey, <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL>, 2001.
- Rothacher, M., Schaer, S., Mervart, L., Beutler, G.: Determination of Antenna Phase Center Variations using GPS Data. Proc. 1995 IGS Workshop, Potsdam, 205–220, 1995 (zu finden unter <http://igsb.jpl.nasa.gov/overview/pubs.html>).
- Rothacher, M., Gurtner, W., Schaer, S., Weber, R., Schlüter, W., Hase, H.O.: Azimuth- and Elevation-Dependent Phase Center Corrections for Geodetic GPS Antennas Estimated from GPS Calibration Campaigns. Proc. IAG Symp. 115, Springer-Verlag, Berlin, 333–338, 1996.
- Rothacher, M.: Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. GPS Solutions, Vol. 4, 55–60, 2001.
- Schulte, M.: Kalibrierung von GPS-Antennen. Der Vermessungsingenieur, 56–61, 2001.
- Schupler, B.R., Clark, T.A.: Characterizing the Behavior of Geodetic GPS Antennas. GPS World, 48–55, Feb. 2001.
- Sims, L.: Phase Center Variations in the Geodetic TI4100 GPS Receiver System's Conical Spiral Antenna. Proc. 1st Int. Symp. Positioning with the GPS, Rockville Md, 227–244, 1985.
- Wanninger, L., May, M.: Carrier Phase Multipath Calibration of GPS Reference Stations. Proc. ION GPS 2000, 132–144, 2000.
- Wübbena, G., Menge, F., Schmitz, M., Seeber, G., Völkens, C.: A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. Proc. ION GPS-96, 1205–1214, 1996.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Böder, V., Seeber, G.: Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. Proc. ION GPS 2000, 2512–2522, 2000.

Anschrift des Autors

Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger
 Ingenieurbüro Wanninger
 Rückertstr. 16, 01129 Dresden
 wanninger@wasoft.de, <http://www.wasoft.de>