

Spezielle Untersuchungen und Ergebnisse zum PCV von GPS-Antennen

Martin Schmitz

1 Einleitung

Der Fehlerhaushalt der GPS-Messungen ist seit langem allgemein bekannt. Die Genauigkeitsforderungen und die erzielten Genauigkeiten des GPS werden jedoch ständig größer. Für bestimmte Anwendungsgebiete wird die jeweils größte Fehlerkomponente zu einem Forschungsschwerpunkt, um eine weitere Verbesserung von Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu erzielen. Somit erreichen als abgeschlossen betrachtete Einflüsse aktuelle Bedeutung und werden wieder intensiv untersucht. Einen solchen Fehleranteil stellten auch die Phasenzentrumsvariationen (PCV) der Empfangsantenne dar. Heute können absolute PCV durch Feldverfahren mit einer gesteigerten Genauigkeit bestimmt werden. Dabei lassen sich durch eine homogene Abtastung der Antenne, eine hohe Auflösung und durch die Eliminierung von Mehrwegeeffekten ebenfalls azimutale Variationen zuverlässig erfassen. Die generellen Vorteile absoluter elevations- und azimutabhängiger PCV für ungleich orientierte Antennen, aber auch für Echtzeitanwendungen wurden inzwischen experimentell nachgewiesen (Wübbena u.a. 2000a, 2000b).

Im folgenden wird auf die Entwicklung der PCV-Bestimmung und Korrektur eingegangen. Die in Zusammenarbeit von Geo++[®] und dem Institut für Erdmessung entwickelte automatisierte absolute Feldkalibrierung in Echtzeit und die erzielten Genauigkeiten des operationellen Verfahrens werden kurz vorgestellt. Es werden dann allgemeine Genauigkeitsforderungen an die PCV-Bestimmung diskutiert. Der größte Teil befaßt sich anschließend mit speziellen Untersuchungen und Ergebnissen zum PCV unterschiedlicher GPS-Antennen und Konfigurationen.

2 Entwicklung und Stand der PCV-Korrekturen

PCV wurden bereits zu Beginn der GPS-Entwicklungen in Laboruntersuchungen bestimmt und analysiert. Sims (1985) gibt elevations- und azimutabhängige absolute PCV für die Antenne des ersten zivilen GPS-Empfängers TI4100 an. In der Praxis wurde jedoch vorwiegend mit gleichen Antennentypen und gleichen Antennenorientierungen gearbeitet, so daß PCV-Effekte sich bei kurzen Basislinien nicht signifikant auswirkten. Vereinfacht gesagt, reichte es aus, die Antennenhöhen zum gleichen Bezugspunkt zu messen. Zudem waren zunächst Effekte durch PCV in statischen Messungen über lange Beobachtungszeiten und kurzen bis regionalen Entfernungen nicht von anderen Effekten zu unterscheiden.

Der Einsatz von unterschiedlichen Antennentypen und Messungen über globale Entfernungen machte eine PCV-Korrektur notwendig, da die Satelliten auf den weit entfernten Stationen unter unterschiedlichen Elevationen gesehen werden. Die verfügbaren absoluten PCV aus verhältnismäßig aufwendigen Kammerkalibrierungen ergaben keine befriedigenden Ergebnisse in der Praxis. Es setzten sich für die Kalibrierung von Antennen relative Feldverfahren durch. Innerhalb dieser einfachen Feldkalibrierungen werden elevationsabhängige PCV relativ zu einer gegebenen Referenzantenne geschätzt. Die PCV der Referenzantenne sind zu Null und die Offsets auf vorgegebene Werte festgesetzt (Rothacher, Mader 1996). Der absolute

PCV-Anteil der Referenzantenne mit einer Variation von 28 mm in L0 wird nicht korrigiert (IfE, Geo++[®] 2000) und verursacht systematische Fehler (Wübbena u.a. 2000b).

Oftmals wurden in GPS-Auswertungen nur Herstellerangaben zum Offset des mittleren L1 oder zusätzlich des L2 Phasenzentrums verwendet. Alternativ wurden auch Offsets in eigenen Testmessungen aus Drehungen bestimmt oder aus frei verfügbaren relativen Kalibrierungsergebnissen entnommen. PCV-Korrekturen wurden meist nicht berücksichtigt. Der vermehrte Einsatz von gemischten Antennentypen (Referenzstationen und Referenzstationsnetze) macht jedoch eine vollständige Korrektur von Offsets und PCV notwendig.

Im Vergleich von relativen und absoluten PCV zeigt sich in globalen Netzen ein Effekt, der in erster Näherung einem Maßstabsfehler von 15 ppb entspricht (Rothacher u.a. 1995, Menge u.a. 1998). Aufgrund von Ergebnissen anderer Meßtechniken wurden als Ursache zunächst absolute PCV angesehen. Der Aufwand zur Bestimmung von absoluten PCV durch Kammerkalibrierungen erschwerte durchgreifende Untersuchungen. Erstmalig wurden durch Wübbena u.a. (1996) absolute Feldverfahren zur Antennenkalibrierung vorgestellt und Nachteile der relativen Verfahren diskutiert. Experimentell kann absoluter PCV als Verursacher des sogenannten „Maßstabsfehler“ in globalen Netzen ausgeschlossen werden. Vielmehr sind andere Fehleranteile (Satellitenantenne, Troposphäre) neu zu untersuchen (Wübbena u.a. 2000b, Rothacher 2000).

Aktuelle Vergleiche von absoluten Kammerkalibrierungen und absoluten Feldkalibrierungen (Rothacher 2000) sowie Vergleiche mit relativen PCV (Mader 2000) bestätigen die allgemeine Richtigkeit der absoluten PCV.

Bislang wurde elevationsabhängiger PCV als größter Anteil angesehen und azimutale PCV-Effekte eine Größenordnung kleiner abgeschätzt. Die Steigerung der Auflösung, Genauigkeit und Zuverlässigkeit durch automatisierte absolute Feldkalibrierungen zeigt jedoch Antennentypen mit signifikanten azimutalen Variationen in vergleichbarer Größe, die insbesondere für Echtzeitanwendungen von Relevanz sind. Ebenso konnte die Notwendigkeit von absoluten PCV für präzise GPS Anwendungen mit geeigneten Antennen auch für kurze Entfernungen aufgezeigt werden (Wübbena u.a. 2000b).

Eine vollständige Beschreibung des Phasenempfangsverhaltens einer Antenne besteht aus dem Antennenreferenzpunkt (ARP), der Nordmarkierung, Angaben für beide Frequenzen für das mittlere 3D-Phasenzentrum (Offset) bezogen auf den ARP und PCV für L1 und L2 zugehörig zu dem angegebenen Offset. Es ist wichtig anzumerken, dass bei Vergleichen von PCV diese immer auf denselben Referenzpunkt bezogen sein müssen. PCV können auf andere Referenzpunkte wie einem mittleren Phasenzentrum oder einen anders definierten ARP umgerechnet werden.

3 Automatisierte Absolute Feldkalibrierung in Echtzeit

Betrachtet man die GPS-Beobachtungsgleichung, so sind die Effekte der stationsabhängigen Fehlerkomponenten PCV und Mehrwegausbreitung (Multipath, MP) nicht zu unterscheiden. Ein wesentliches Grundprinzip bei der absoluten Feldkalibrierung ist die Trennung und somit Bestimmung oder Eliminierung der jeweiligen individuellen Fehleranteile. Undifferenzierte GPS-Auswertansätze sind hierbei wesentlich. Zunächst wurde ein Verfahren mit siderischen Tagesdifferenzen im Post-Prozessing genutzt. Die operationell verfügbare automatisierte ab-

solute Feldkalibrierung in Echtzeit (Wübbena u.a. 2000b) nutzt Kurzzeitdifferenzen. Beide Ansätze zur Berücksichtigung von MP bei Antennenkalibrierungen werden im folgenden kurz angesprochen.

In siderischen Tagesdifferenzen wird der MP-Fehlerterm eliminiert (oder weitestgehend reduziert), indem identische MP-Bedingungen an zwei Beobachtungstagen vorliegen (Wiederholung der Satellitenkonstellation). Die PCV-Differenz zwischen statischen Beobachtungen an einem Referenztag und den Beobachtungen mit gedrehten/gekippten Orientierungen an einem zweiten Tag werden als Eingangsgröße für die PCV-Bestimmung durch eine Kugelfunktionsentwicklung genutzt. Durch die Orientierungsänderungen zwischen den Beobachtungstagen wird PCV bestimmbar und von MP-Effekten getrennt. Alle anderen Parameter der GPS-Ausgleichung werden eliminiert oder geschätzt. Details findet man bei Wübbena u.a. (1997), Seeber u.a. (1998) und Menge u.a. (1998).

Die undifferenzierte Beobachtungsgleichung ist Grundlage für das Echtzeit-Kalibrierungsverfahren. Zusätzlich zu den standardmäßig verwendeten Parametern der GPS-Ausgleichung für kurze Basislinien werden über die hohe Korrelation von MP zwischen zwei aufeinander folgenden Epochen MP-Parameter als stochastische Prozesse geschätzt. Durch die schnellen Orientierungsänderungen des Roboters ist eine Trennung zwischen PCV und MP möglich. Um den undifferenzierten Ansatz zu beschreiben, können als Vereinfachung Triple Differenzen betrachtet werden. Es ist bekannt, dass die Zeitdifferenzen aufeinander folgender Doppelter Differenzen nicht nur von Uhr und atmosphärischen Effekten frei sind, sondern auch vom Mehrdeutigkeitsterm und MP. Durch die Messanordnung wird jedoch das PCV-Signal pro Epoche durch die sich ändernde Orientierung (Drehungen, Kippungen) wieder eingeführt. Die Prozedur ist in einer auf undifferenzierten Beobachtungen basierenden Software implementiert.

Abb. 1 zeigt ein Beispiel mit Doppelten Differenzen, siderischen Tagesdifferenzen zwischen Doppelten Differenzen und Triple Differenzen (in Analogie zum Echtzeit Kalibrierungsansatz). Deutlich ist die Eliminierung von MP sowohl in den siderischen Differenzen als auch in den Triple Differenzen (Kurzzeitdifferenzen) zu erkennen.

Die Echtzeitkalibrierung benötigt schnelle Orientierungsänderungen durch einen Roboter. Zusätzlich ist eine umfangreiche Kalibrierung des Roboters durch Beobachtungen mit einem Theodolit-Messsystem notwendig, die präzise Antennenpositionen von 0.2-0.3 mm mit dem Roboter ermöglicht (siehe Menge u.a. 2000, Wübbena u.a. 2000b). Dies läßt das Verfahren zunächst extrem aufwendig erscheinen.

Demgegenüber bringt die Automation aber zusätzliche Vorteile. Es werden Beobachtungen in mehreren tausend genauen Positionen mit dem Roboter durchgeführt. Ergebnisse aus dem Post-Prozessing zeigen, dass die hohe Anzahl von Positionen notwendig für eine hohe Auflösung und Genauigkeit der bestimmten PCV ist. Die durchschnittliche Anzahl von unterschiedlichen Orientierungen in-

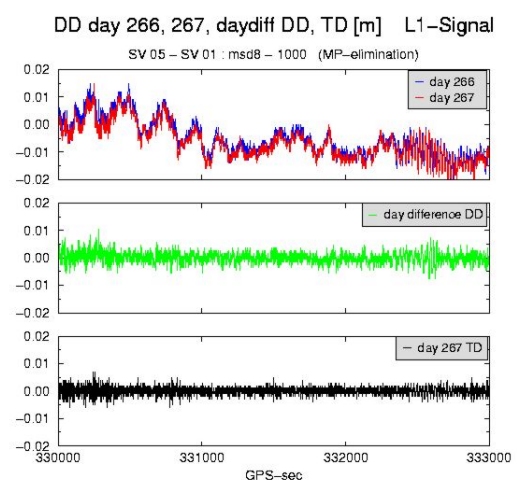


Abb. 1: Eliminierung von Multipath

nerhalb einer Kalibrierung liegt zwischen 6000 und 8000 (zeit- und konstellationsabhängig). Insbesondere azimutale PCV können zuverlässig und genau geschätzt werden. Die Dauer einer Kalibrierung beträgt nur wenige Stunden. Zusätzlich ist das Messprogramm automatisiert, indem die aktuelle Satellitenkonstellation zur Optimierung der Überdeckung, der Beobachtungszeit und der zu erwartenden PCV-Genauigkeit berücksichtigt wird. Eine konsistente und homogene Überdeckung der Antennenhemisphäre wird letztendlich mit Beobachtungen am Horizont erreicht (gekippte Antenne). Die Beobachtungsprogramme sind unterschiedlich und reduzieren deshalb die Möglichkeit systematischer Fehler. Die Kalibrierung wird beendet, wenn eine vollständige Abdeckung der Antennenhemisphäre mit Beobachtungen von z.Z. mind. alle 5° erreicht ist. Weitere Hinweise finden sich in Wübbena u.a. (2000a, 2000b).

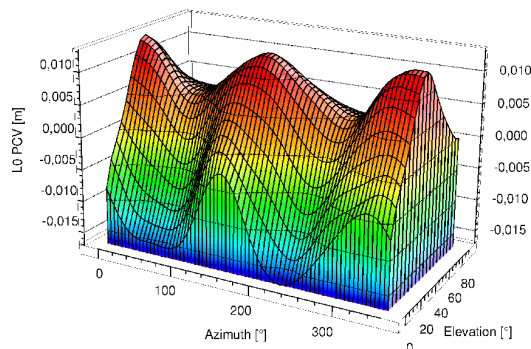


Abb. 2: Absolute L0 PCV LEIAT303_LEIC

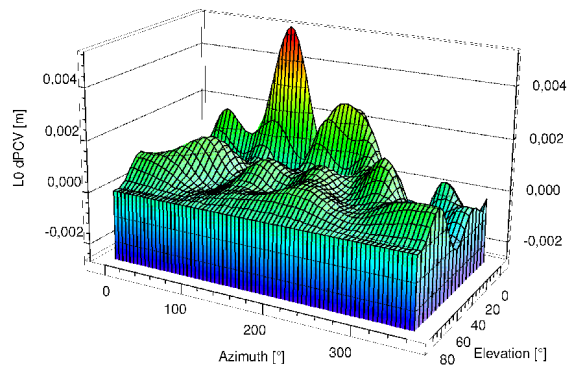


Abb. 3: Differenz zweier L0 PCV LEIAT303_LEIC Kalibrierungen im Abstand von 5 Monaten (von 90° nach 0° Elevation)

Die Wiederholbarkeit der absoluten PCV-Feldkalibrierung wird an den Ergebnissen einer Leica LEIAT303 LEIC aufgezeigt. Die Antenne zeigt azimutale Variationen von ± 6 mm für die L0 Linearkombination (Abb. 2). Die Differenzen zweier Kalibrierungen, die im Abstand von 5 Monaten durchgeführt wurden, sind in Abb. 3 dargestellt. Die Differenzen liegen im allgemeinen unter 1 mm und erreichen nur am Horizont größere Werte. Die Standardabweichungen der PCV aus der Kalibrierung liegen in der Größenordnung von 0.2-0.3 mm (1 Sigma) und decken sich mit den aus Doppelmessungen abgeleiteten Werten der Wiederholung. Die Standardabweichungen gelten für die gesamten PCV inklusive Offsets. Der Einfluss des PCV auf die Positionsbestimmung ist damit kleiner als 1 mm. Die hervorragende Wiederholbarkeit ist durch weitere Kalibrierungsvergleiche anderer Antennentypen mit unterschiedlichen Robotern, auf unterschiedlichen Stationen und zu unterschiedlichen Tageszeiten (Unterschiede in Roboterkalibrierung, MP, Wetter, Konstellation, Messprogramm, Stationsumgebung, Aufbau) nachgewiesen (IfE, Geo++[®] 2000, Wübbena u.a. 2000b) und bestätigt die hohe Qualität und Stationsunabhängigkeit der ermittelten PCV.

4 Genauigkeitsanforderungen an PCV-Korrekturen

Die Genauigkeit der Antennenkalibrierung ist nicht getrennt für die Bestimmung von Offset und PCV anzusetzen, sondern gemeinsam für PCV und Offset. Dies wird offensichtlich, wenn Fehlerfortpflanzung und die ionosphärenfreie Linearkombination (L0) für eine Abschätzung des Einflusses von Offset und PCV auf die GPS-Positionsbestimmung betrachtet wird. Die Standardabweichung des L0 PCV ist ungefähr das dreifache des L1 und L2 PCV. Für die Po-

sitionsbestimmung in ionosphärisch aktiven Zeiten ist das L0 relevant. Oftmals werden getrennte Genauigkeiten von 1-2 mm für L1/L2 Offset sowie von 1-2 mm für L1/L2 PCV als ausreichend diskutiert. Die Standardabweichung der PCV für die Linearkombination L0 liegt dann mit diesen Größenordnungen im Bereich von ca. 4 bis 7 mm.

Der Effekt auf die GPS-Positionsgenauigkeit wird über Standardabweichung der Position s_p , Standardabweichung der Phasenmessungen s_R und einem Maß der Satellitengeometrie, Position Dilution of Precision (PDOP), definiert zu:

Mit einem PDOP Wert von 1-3 ergeben sich durch die Unsicherheiten der PCV-Einflüsse auf die Positionierung im Bereich von ca. 4 bis 21 mm. Dies ist für präzise Anwendungen zu ungenau. Für eine PCV-Bestimmung sind somit bestmögliche Genauigkeiten für die Gesamtheit von Offsets und PCV zu fordern. Es wird ebenfalls oft die Frage nach der Notwendigkeit von individuellen Antennenkalibrierungen gegenüber der Typkalibrierung gestellt. Die obige Abschätzung besitzt auch für individuelle Differenzen einzelner Antennen ihre Gültigkeit.

5 PCV-Untersuchungen und Ergebnisse

5.1 Einfluss durch UHF-Antennen im Nahfeld der GPS-Antenne

Einen bislang wenig untersuchten Aspekt stellt die Beeinflussung der GPS-Empfangerscharakteristik durch zusätzliche Telemetrie-Antennen dar. Eine Antenne im Nahbereich der GPS-Antennenelemente verändert grundsätzlich die elektro-magnetischen Empfangseigenschaften. Eine DSNP Antenne DSNDGU_002* wurde ohne und mit angeschraubter UHF-Antenne (Abb. 4) absolut kalibriert. Die UHF-Antenne war dabei passiv, d.h. weder mit Spannung versorgt noch wurden Daten gesendet oder empfangen. In Abb. 5 sind die Differenzen einer Antenne ohne und mit der vom Hersteller gelieferte 70cm-Band Antenne angegeben. Die Differenzen in den PCV erreichen Werte von +/- 12 mm. Die PCV sind auf einen gemeinsamen Offset umgerechnet. Dies ist in allen Graphiken für einen strengen Vergleich durchge-



Abb. 4: DSNDGU_002_UHF* während absoluter Kalibrierung mit Roboter

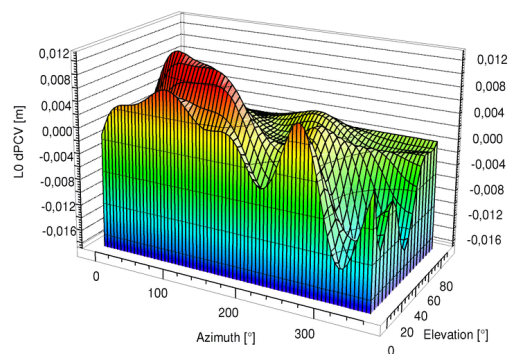


Abb. 5: Differenz absolute L0 PCV DSNDGU_002* ohne und mit passiver UHF-Antenne

* Zur Aufnahme in die IGS rcvr_ant.tab vorgeschlagen, jedoch noch nicht offizielle IGS Namenskonvention.

führt worden. Im allgemeinen sind Offset-Angaben nicht repräsentativ für die Beschreibung der gesamten Antenne. In diesem Fall zeigen die Offsets jedoch deutlich den generellen Unterschied zwischen den Antenneneigenschaften auf (Tab. 1). Die Lage-Offsets lassen sich im allgemeinen mit Sub-Millimeter reproduzieren, doch bereits hier treten Änderungen bis über 3 mm auf.

Der Einfluss einer UHF-Antenne in unmittelbarer Nähe der GPS-Antenne ist demnach in einer nicht zu vernachlässigenden Größenordnung vorhanden. Es sind jedoch weitere Untersuchungen, insbesondere bei aktivem Betrieb und für integrierte UHF-Antennenelemente im GPS-Antennengehäuse, notwendig.

Tab. 1: Differenzen der Offsets, DSNDGU_002* ohne und mit passiver UHF-Antenne

	dNord [mm]	dOst [mm]	dHöhe [mm]
L1	2.63	0.22	-1.46
L2	0.32	3.53	-2.76

5.2 PCV Integrierte Antennen- und Empfängersysteme

Der Einfluss einer UHF-Antenne im Nahfeld der GPS-Antenne wurde bereits aufgezeigt. Aufgrund der unmittelbaren Nähe von Empfänger und Antenne bei integrierten Geräten ist der PCV bei diesen Systemen ebenfalls interessant. Das Gehäuse des Zeiss GePoS Empfängers (CZJRD24*) hat ein Viereck mit gekappten Ecken als Grundriss (Abb. 8). Das Antennenelement ist oberhalb der Empfängerelektronik im gleichen Gehäuse untergebracht. Abb. 6

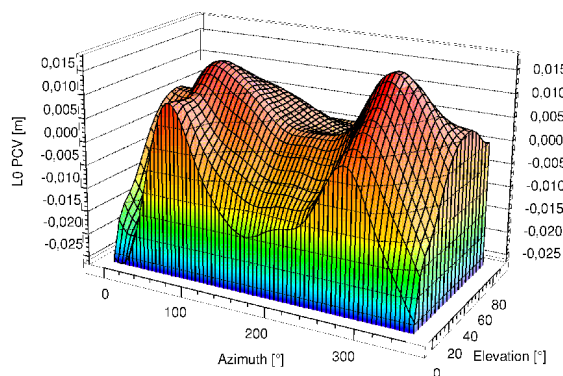


Abb. 6: Absolute L0 PCV integriertes Antennen/Empfängersystem CZJRD24*

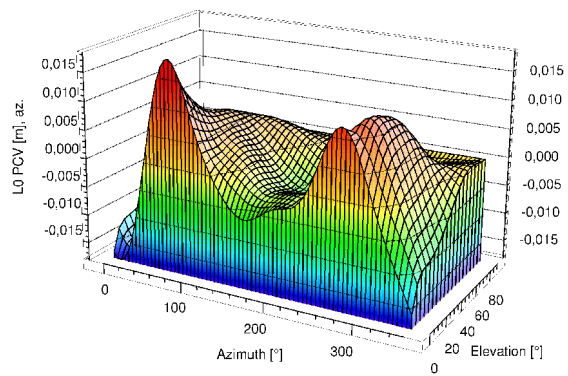


Abb. 7: Rein azimuthale L0 PCV integriertes Antennen/Empfängersystem CZJRD24*



Abb. 8: Integriertes Antennen-/Empfängersystem CZJRD24*



Abb. 9: TRM4800 während absoluter Kalibrierung auf Roboter

zeigt die absoluten L0 PCV mit deutlichen azimuthalen PCV, die unter anderem durch das „eckige“ Gehäuse verursacht werden. In Abb. 7 ist der reine azimuthale L0 PCV-Anteil von ± 15 mm zu erkennen, nachdem der elevationsabhängige PCV entfernt wurde. In Abb. 6 und Abb. 7 sind PCV-Anteile durch Offsets nicht enthalten. Die Offsets für die CZJRD24* weisen mit 5-7 mm im Nord- und 10-15 mm im Ostwert für jeweils L1 und L2 zusätzlich sehr große Werte auf.

Im Gegensatz hierzu sind beim integrierten Trimble System TRM4800 im Bereich von 10° Elevation bis zum Zenit sehr kleine L0 PCV von ± 2 mm und eine geringe Azimutabhängigkeit festzustellen. Erst unterhalb von 10° wird ein stärkerer azimuthaler Effekt mit bis zu 8 mm erkennbar, der mit dem Bedienfeld des Empfängers im Süden zusammenfällt. Das TRM4800 besitzt einen runden Grundriss (Abb. 9). Die rein azimuthalen PCV sind in Abb. 11 angegeben, die nur unterhalb von 10° Elevation und Werte größer als 2 mm annehmen.

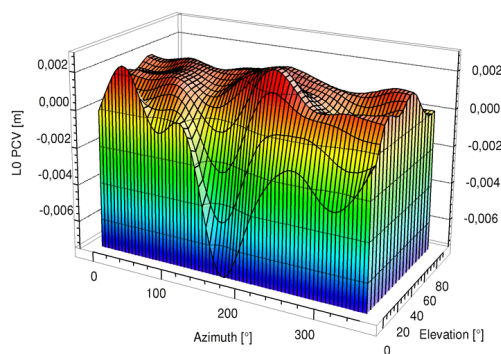


Abb. 10: Absolute L0 PCV integriertes Antennen/Empfängersystem TRM4800

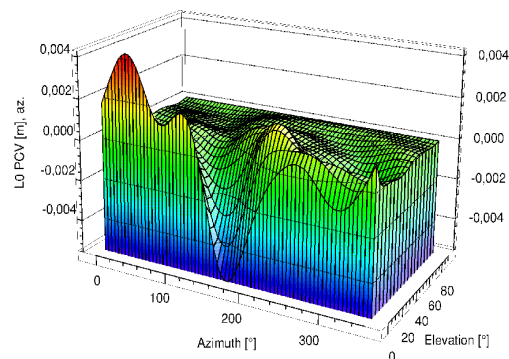


Abb. 11: Rein azimuthale L0 PCV integriertes Antennen/Empfängersystem TRM4800

Grundsätzlich sind somit auch bei einem integrierten Gerät kleine PCV-Werte und nahezu punktförmige PCV-Charakteristik möglich, wenn eine ausreichende Abschirmung in Kombination mit einer abgestimmten Gehäuseform gegeben ist. Es kann aber nicht generell davon ausgegangen werden, dass jeder integrierte Antennentyp dies aufweist.

5.3 Effekt von Dome-Konstruktionen auf PCV

Ein weiterer beeinflussender Faktor für das Phasenempfangsverhalten sind Dome-Konstruktionen. Generell sind Antennen mit einem Dome als anderer Antennentyp mit eigener Empfangscharakteristik aufzufassen. Oftmals wird der Einfluss jedoch unterschätzt und vernach-

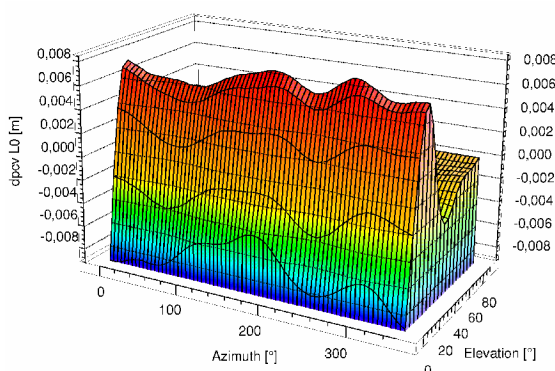


Abb. 12: Differenz absolute L0 PCV TRM29659.00 ohne und mit TCWD



Abb. 13: Trimble Dome-Konstruktion TCWD

lässigt. Konstante Unterschiede im PCV erscheinen zunächst unkritisch. Trotzdem wird jede konstante PCV-Differenz einen Bereich mit starken Gradienten hervorrufen, der negative Auswirkungen auf die Qualität der GPS-Beobachtungen hat.

In Abb. 12 ist die Differenz einer Trimble TRM29659.00 ohne und mit einem TCWD angegeben. Der TCWD Dome ist mit einem Metallband an einer separaten Grundplatte unterhalb der eigentlichen Antenne befestigt (Abb. 13). Der PCV ohne die Konstruktion weicht deutlich von den PCV mit der Dome-Konstruktion ab. Es ist vor allem die große zusätzliche Grundplatte, die die absoluten PCV für L0 über einen Bereich von 16 mm verändert (Wübbena u.a. 2000b). Die Änderungen sind vorwiegend in den niedrigen Elevationen, jedoch auch oberhalb üblicher Elevationsmasken.

Mehrere andere Dome-Typen (ohne zusätzliche Grundplatte), wie der Ashtech SNOW oder der Leica LEIC haben mit ± 1 -2 mm geringere Einflüsse auf das Phasenempfangsverhalten. In Abb. 14 ist die Differenz der absoluten L0 PCV einer LEIAT303 ohne und mit konischem LEIC Dome angegeben. Bei dem Vergleich handelt es sich um dieselbe Antenne ohne bzw. mit Dome. Die Differenzen sind weitgehend gering und nehmen erst zum Horizont hin zu. Im Elevationsbereich 30° bis 0° werden Werte um 2 mm, am Horizont Werte größer 2 mm erreicht.

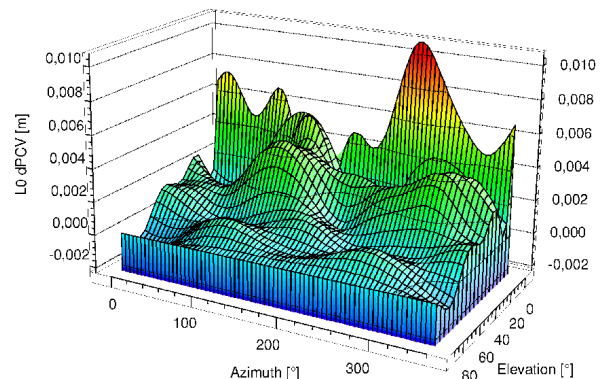


Abb. 14: Differenz absolute L0 PCV LEIAT303 ohne u. mit Dome LEIC (von 90° nach 0° Elevation)

Signifikante Unterschiede im PCV werden auch durch die Ausführung der Dome (Material, etc.) und der Nähe zum Empfangselement der Antenne verursacht. Abb. 15 zeigt die Leica Dome LEIS und SCIS für die LEIAT504 Choke Ring Antenne. Die beiden Dome unterscheiden sich generell, haben aber eine grundsätzlich sphärische Form. Der SCIS Dome wird mit Stahlschrauben befestigt und ist stabiler in einem festeren Kunststoff ausgeführt. Der Durchmesser des SCIS ist größer als der eigentliche Antennendurchmesser (um ca. 3 cm), sodass eine vollständige Halbkugel die Antenne überdeckt. Der LEIS wird direkt mit Kunststoffschrauben am äußeren Choke Ring der Antenne befestigt, sodass es sich um eine Kugelkalotte mit senkrechter Seite handelt. Für die PCV derselben Antenne mit jeweils anderem Dome ergeben sich deutliche Unterschiede von ca. 6 mm, die im Bereich von 25° Elevation bis zum Horizont Werte bis zu 12 mm erreichen (Abb. 16).



Abb. 15: Leica Dome LEIS und SCIS für LEIAT504

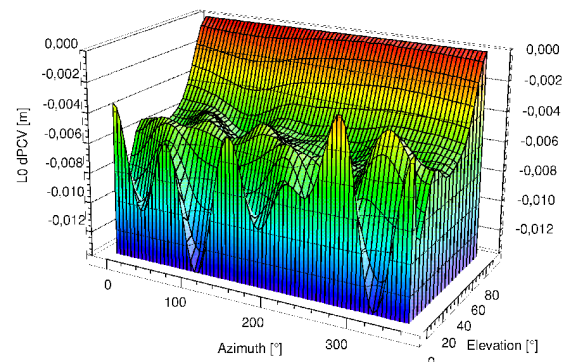


Abb. 16: Differenz absolute L0 PCV AT504 mit LEIS oder SCIS

Abb. 17 und Abb. 18 zeigen die jeweiligen Differenzen zu der Kalibrierung der AT504 ohne Dome. Der LEIS Dome zeigt hierbei eine geringere Beeinflussung des PCV als der SCIS Dome. Für Messungen mit SCIS verändern sich die PCV deutlich im Bereich von 90° bis 60° mit Gradienten teilweise größer $1 \text{ mm}/^\circ$ und einem mittleren Wert von 11 mm bei 10° Elevation. Der LEIS weist ab 65° Elevation bis zum Horizont im Mittel weitgehend Differenzen um 2 mm auf.

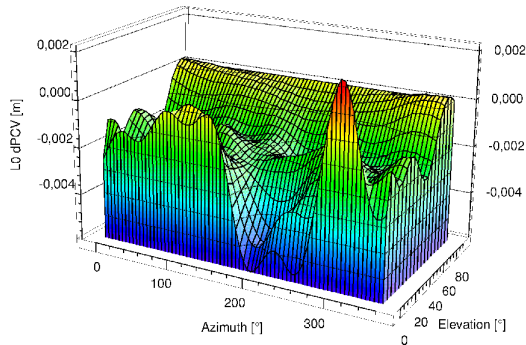


Abb. 17: Differenz absolute L0 PCV LEIAT504 ohne und mit LEIS

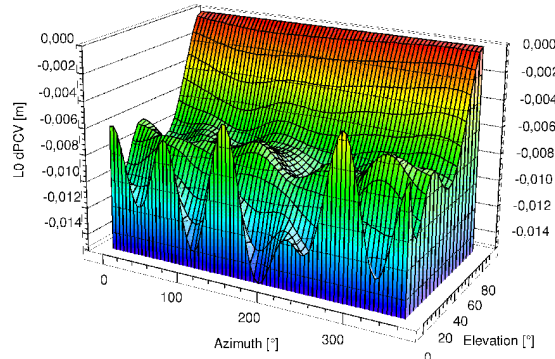


Abb. 18: Differenz absolute L0 PCV LEIAT504 ohne und mit SCIS

5.4 Einfluss einer Grundplatte auf PCV

Bei der Trimble Compact Antenne TRM22020.00 ist die Grundplatte mit einem Durchmesser von 48 cm abnehmbar. Die TRM22020.00-GP ohne Grundplatte zeigt in Abb. 19 PCV über einen Bereich von 30 mm , wobei deutlich große azimuthabhängige PCV erkennbar sind. Die Minima und Maxima der Variationen sind mit den Ecken und Seiten des eckigen Antennengehäuses korreliert. Wird die abnehmbare Grundplatte an der Antenne befestigt, ändert sich das Empfangsverhalten radikal (Wübbena u.a. 2000b). Es sind dann keine vergleichbaren azimuthalen PCV vorhanden und stattdessen große elevationsabhängige PCV-Gradienten von bis zu $1 \text{ mm}/^\circ$ in hohen Elevationsbereichen (Abb. 20). Die Grundplatte (Durchmesser, Material, Stärke, etc.) definiert die grundsätzliche Empfangscharakteristik.

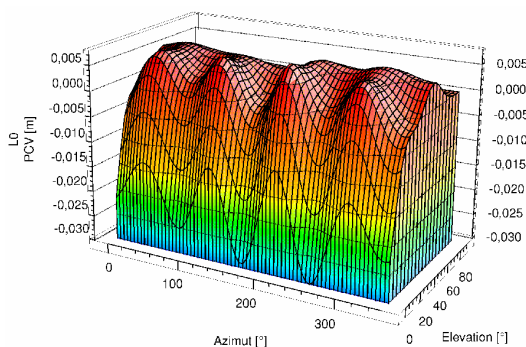


Abb. 19: Absolute L0 PCV TRM22020.00-GP

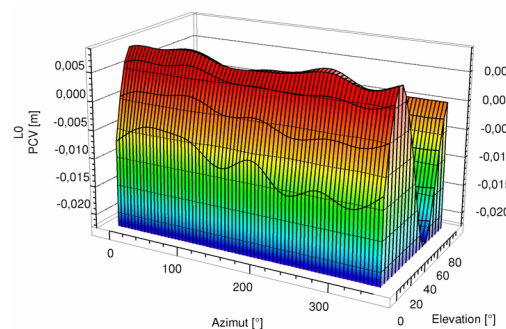


Abb. 20: Absolute L0 PCV TRM22020.00+GP

5.5 PCV einiger Rover-Antennen

Rover-Antennen zeichnen sich im allgemeinen durch sehr kleine Durchmesser aus, wodurch sie handlicher und leichter werden. Die geringen Grundplattendurchmesser sind vermutlich auch die Ursache dafür, dass die PCV oftmals sehr kleine Bandbreiten (wenige mm) haben und einer absolut kalibrierten, also punktförmigen Antenne, sehr nahe kommen. Verschiedene Rover-Antennen wurden bereits in Wübbena u.a. (2000b) vorgestellt.

Eine interessante Rover-Antenne ist die NovAtel NOV600^{*}, die laut Herstellerangaben keine Lage-Offsets, identischen Höhen-Offset für L1 und L2 und keine Elevations- und Azimutabhängigkeiten aufweist. Die Kalibrierungen der NOV600^{*} zeigen ein erhöhtes Rauschniveau der Beobachtungen im Vergleich zu ähnlichen Antennentypen. Hierbei wird deutlich, dass neben den PCV zur Beschreibung von Antennen weitere Kenngrößen entwickelt werden müssen.

Die Lage-Offsets sind in der Größenordnung 1-2 mm sowie die Differenz des L1/L2-Höhen-Offsets bei 3.7 mm. Abb. 21 zeigt die L0 PCV der NOV600^{*}, die oberhalb von 10° Variationen um +/- 1–2.5 mm und keine signifikanten azimuthalen PCV aufweist.

Ebenfalls geringe PCV-Werte weist die Leica LEIAT502 in Abb. 22 auf. Die PCV am Horizont erreichen zwar für L0 bis zu 12 mm, für den Großteil der Antenne sind die PCV jedoch in einem Bereich von 2-5 mm.

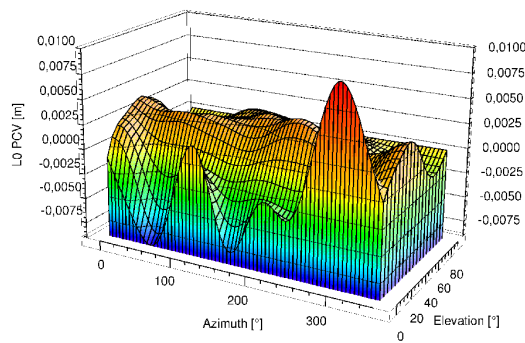


Abb. 21: Absolute L0 PCV NOV600^{*}

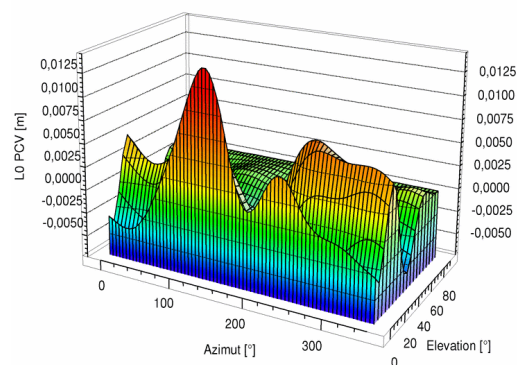


Abb. 22: Absolute L0 PCV LEIAT502

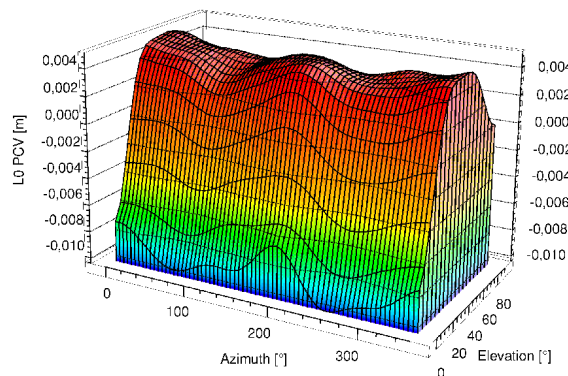


Abb. 23: Absolute L0 PCV JPSLEGANT

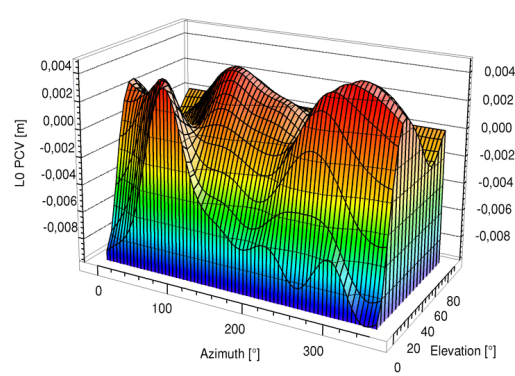


Abb. 24: Absolute L0 PCV DSNAP_002^{*}

Die Javad Antenne JPSLEGANT in Abb. 23 hat Variationen über einen Bereich von 14 mm für L0. Dabei sind für diese individuelle Antenne geringe azimuthale PCV von ± 1.5 mm vorhanden. Im Vergleich zu den vorherigen Rover-Antennen zeigt sich ein deutlich größerer, vorwiegend elevationsabhängiger PCV-Anteil.

In Abb. 24 ist der absolute L0 PCV einer DSNP Antenne DSNNAP_002* dargestellt. Die Antenne zeigt eine verhältnismäßig unsymmetrisches Verhalten. Ein Vergleich mehrerer Antennen dieses Typs zeigten jedoch eine grundsätzliche sehr gute Übereinstimmung der PCV-Form. Die PCV-Werte liegen bei ± 4 mm und erreichen erst zum Horizont größere Beträge.

PCV von Rover-Antennen können ebenfalls Größenordnungen annehmen, die nicht zu vernachlässigen sind. Insbesondere können auch azimuthale Variationen vorhanden sein (TRM22020.00-GP, Abb. 19). Moderne Rover-Antennen streben eine Charakteristik mit kleinen Variationen an (Wübbena u.a. 2000b), wobei Offsets im allgemeinen zusätzlich vorhanden sind.

6 Zusammenfassung

Die absolute PCV-Feldkalibrierung in Echtzeit ist ein operationelles Verfahren mit einer hohen azimuthalen und elevationsabhängigen Auflösung, die ausschließlich für die vorgestellten Untersuchungen verwendet wurde. Die Wiederholbarkeit wurde an einer Antenne mit azimuthalen PCV aufgezeigt. Die Genauigkeitsanforderungen an Antennenkalibrierungen wurden diskutiert. Um Unsicherheiten in der GPS-Koordinatenbestimmung auszuschließen, ist die Summe der Effekte aus Offsets und PCV mit einer Qualität deutlich besser als 1 mm Standardabweichung zu bestimmen. Für hohe Genauigkeitsforderungen sind individuelle Antennenkalibrierungen zwingend notwendig.

An den vorgestellten Beispielen zeigt sich, dass sich PCV einer Antenne nicht ohne eine eingehende Untersuchung durch eine Kalibrierung mit entsprechend hoher Auflösung und Genauigkeit abschätzen lässt. Die Einflussfaktoren auf die PCV-Charakteristik sind zu komplex, um verallgemeinert zu werden. Es wurde gezeigt, dass signifikante Änderungen im Nahfeld der Antenne durch UHF-Antennen, Gehäuseformen, Dome-Konstruktionen und Grundplatten vorhanden sind.

Anhand einiger Rover-Antennen wurden unterschiedliche Charakteristiken von Antennen aufgezeigt. Moderne Rover-Antennen zeigen oftmals eine sehr kleine Bandbreite der PCV (wenige mm), die einer absolut kalibrierten, also punktförmigen Antenne sehr nahe kommen. Trotzdem können auch bei Rover-Antennen große PCV-Werte und insbesondere azimuthale PCV vorliegen, die in Abhängigkeit von der geforderten Genauigkeit der Anwendungen individuelle Kalibrierungen notwendig machen.

Durch die Entwicklung absoluter Feldkalibrierungen und der zuverlässigen Bestimmung von absoluten PCV ergeben sich neue Gesichtspunkte für zukünftige Forschungen. In den nächsten Jahren werden verstärkt die Fehleranteile Multipath (auch für Echtzeitanwendungen) und Troposphäre untersucht werden. Insbesondere PCV der Satellitenantennen wird eine bislang für geodätische Anwendungen noch nicht ausreichend analysierte Fehlerkomponente sein.

7 Referenzen

- IfE, Geo++[®] (2000). AOAD/M_T Choke Ring Antenna Absolute Phase Variations, Results of Absolute PCV Field Calibrations at IfE and Geo++[®]. Internet Publikation zusammengestellt von F. Menge und M. Schmitz, World Wide Web, http://www.ife.uni-hannover.de/~web/AOA_DM_T.
- Mader, G. (2000). A Comparison of Absolute and Relative GPS Antenna Calibrations. IGS Analysis Workshop 2000, Proceedings Vorabdruck, IGS Electronic Mail, 20. Nov., Message Number 3107. Auch eingereicht bei GPS Solutions.
- Menge, F., V. Böder, G. Seeber, G. Wübbena, M. Schmitz (2000). Absolute Feldkalibrierung von GPS-Antennen - Entwicklung und Grundlagen. 2. Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen, 10. Mai 2000, Institut für Erdmessung, Universität Hannover.
- Menge, F., G. Seeber, C. Völkse, G. Wübbena, M. Schmitz (1998). Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV. Proceedings International Technical Meeting, ION GPS-98, Nashville, Tennessee.
- Rothacher, M. (2000). Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations. IGS Analysis Workshop 2000, Proceedings Vorabdruck, IGS Electronic Mail, 20. Nov., Message Number 3107. Auch eingereicht bei GPS Solutions.
- Rothacher, M., G. Mader (1996). Combination of Antenna Phase Center Offsets and Variations. Antenna Calibration Set IGS_01, Word Wide Web, IGS_01.txt, June 30.
- Rothacher, M., S. Schaer, L. Mervat, G. Beutler (1995). Determination of Antenna Phase Center Variations Using GPS Data. Vorgestellt beim IGS Workshop, May 15-17, Potsdam, Germany.
- Sims, M.L. (1985). Phase Center Variation in the Geodetic TI4100 GPS Receiver System's Conical Spiral Antenna. Proceedings First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, 227-244.
- Wübbena, G., F. Menge, M. Schmitz, G. Seeber, C. Völkse (1996). A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. Proceedings International Technical Meeting, ION GPS-96, Kansas City, Missouri, 1205-1214.
- Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, G. Seeber, C. Völkse (1997). A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. Navigation, Journal of The Institute of Navigation, Vol. 44, No. 2, 247-256.
- Wübbena, G., M. Schmitz, G. Boettcher, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000a). Absolute Feldkalibrierung von GPS-Antennen, Ergebnisse. 2. Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen, 10. Mai 2000, Institut für Erdmessung, Universität Hannover.
- Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000b). Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. Proceedings International Technical Meeting, ION GPS-00, Salt Lake City, Utah.

Dank

Dank gilt der „Antennen und Multipath Arbeitsgruppe“ in Hannover mit Prof. Dr. G. Seeber, V. Böder und F. Menge am IfE sowie Dr. G. Wübbena und G. Boettcher bei der Geo++[®]. Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung, BMBF und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR unter den Nummer 50NA9809 gefördert.