

**Antennenkalibrierung: Anforderungen,
Aktuelle Absolute Ergebnisse,
Anwendungen und Vergleiche**

**Gerhard Wübbena, Martin Schmitz,
Gerald Boettcher (Geo++[®] GmbH),**

**Falko Menge, Volker Böder,
Günter Seeber (IfE, Uni Hannover)**

Was ist passiert?

Genauigkeitsanforderung Antennenkalibrierung

Genauigkeit der Absoluten Feldkalibrierung

Spezielle Ergebnisse aus Absoluter PCV Bestimmung

Anwendung von PCV-Korrekturen /
RTK-Test (GNNET-RTK)

Vergleich von Kalibrierverfahren

Antennen-Datei-Format Diskussion

Zusammenfassung und Folgerungen

Was ist passiert?



- absolute PCV der IGS Referenzantenne im Internet bereitgestellt durch IfE/Geo++
- große Akzeptanz der vorgestellten Ergebnisse und Analysen IfE/Geo++ (ION GPS-00, Salt Lake City)
- Anmeldung der „Nullantenne“ zur Aufnahme beim IGS (rcvr_ant.tab)
- Vergleiche absoluter und relativer PCV durch G. Mader beim NGS (IGS Analysis Center Workshop 2000, Washington)
- Vergleiche absoluter PCV aus Feldkalibrierungen und Kammerkalibrierungen durch M. Rothacher (IGS Analysis Center Workshop 2000, Washington)
- Entscheidung für die Nutzung der „Nullantenne“ in der SAPOS-Expertengruppe
- Aktivitäten zur Kalibrierung der Satellitenantennen (G. Mader) unter Verwendung der absoluten PCV aus Feldkalibrierung (Geo++/IfE)
- RTCM 2.3 kurz vor Verabschiedung (Antennentyp, Setup-ID)

Vielzahl von Automatisierten Absoluten Feldkalibrierungen durch Geo++ und IfE (seit März 2000)

| | | #Typ | #Ant | #Cal |
|----------|--------------------|------|------|------|
| AAT* | AeroAntenna Techn. | 2 | 3 | 10 |
| AOA | Allen Osborne Ass. | 1 | 1 | 48 |
| ASH | Ashtech | 5 | 27 | 170 |
| CZJ* | Carl Zeiss Jena | 1 | 2 | 15 |
| DSN* | Dassault Sercel | 4 | 9 | 64 |
| JPS | Javad | 4 | 20 | 122 |
| LEI | Leica | 9 | 63 | 497 |
| NOV | NovAtel | 3 | 12 | 79 |
| SPP | Spectra Precision | 2 | 4 | 122 |
| SYM* | Symmetricom | 1 | 1 | 6 |
| TRM | Trimble | 13 | 28 | 248 |
| Σ | | 45 | 170 | 1277 |

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

Genauigkeitsanforderung Antennenkalibrierung



- Genauigkeit der Positionsbestimmung im RTK-Betrieb oder bei kurzen Beobachtungszeiten (wenige Minuten):

$$s_P = \text{PDOP } s_S$$

| | | |
|-------|---------------------------------|------------------------|
| s_P | Genauigkeit Positionsbestimmung | |
| PDOP | Position Dilution Of Precision: | 1–3 |
| s_S | Genauigkeit Phasenmessungen: | mm |
| | Index s für Meßsignal: | L1, L2, LN, L0– Signal |

- Genauigkeitsabschätzung Einfluss PCV:

$$s_{P,PCV,S} = \text{PDOP } s_{PCV,S}$$

$$s_{P,PCV,S}^2 = s_{\text{Offset},S}^2 + \text{PDOP}^2 s_{PCV,S}^2$$

L0-Signal Linearkombination aus L1 und L2

$$L0 = 2.545 L1 - 1.545 L2$$

Fehlereinflüsse L1, L2 unabhängig und gleich $s_{L1} = s_{L2} = s_L$

$$s_{L0}^2 = (2.545^2 + 1.545^2) s_L^2 \quad \text{oder} \quad s_{L0} = 2.98 s_L$$

- Positionsgenauigkeit L0-Signal, DOP-Faktor 3:

$$s_{P,PCV,L0} = 9 s_{PCV,L}$$

$$s_{P,PCV,L0}^2 = 3^2 s_{\text{Offset},L}^2 + 9^2 s_{PCV,L}^2$$

Genauigkeitsanforderung Antennenkalibrierung



- Qualitätsanforderung aus Positionsbestimmung an PCV

Genauigkeit Offsets und PCV: deutlich besser als 1 mm
für Positionsgenauigkeit: ± 1 cm

- Numerische Abschätzung

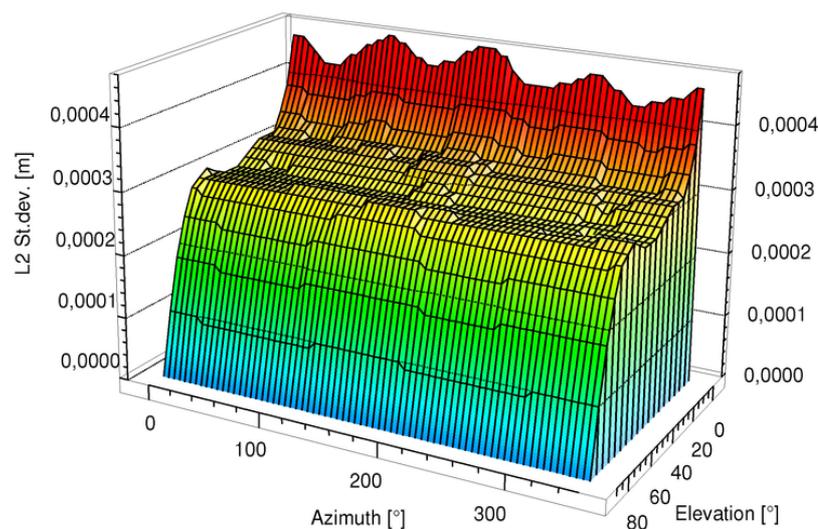
| <i>PCV Genauigkeit</i> | | <i>Einfluß auf Positionsgenauigkeit</i> | |
|-------------------------------|-----------------|--|-------------|
| $S_{PCV,L0}$ | $S_{Offset,L0}$ | s_p Referenz | s_p Rover |
| | | | |
| ± 1 mm | – | ± 9 mm | ± 13 mm |
| | | | |
| ± 1 mm | ± 2 mm | ± 18 mm | ± 25 mm |

Genauigkeit der Absoluten Feldkalibrierung



Eigenschaften der Automatisierte Absolute Feldkalibrierung in Echtzeit

- absolute 3D Offsets
- absolute PCV
- PCV von 0° bis 90° elevation und 0° bis 360° azimuthabhängige PCV
- frei von Multipath Einflüssen

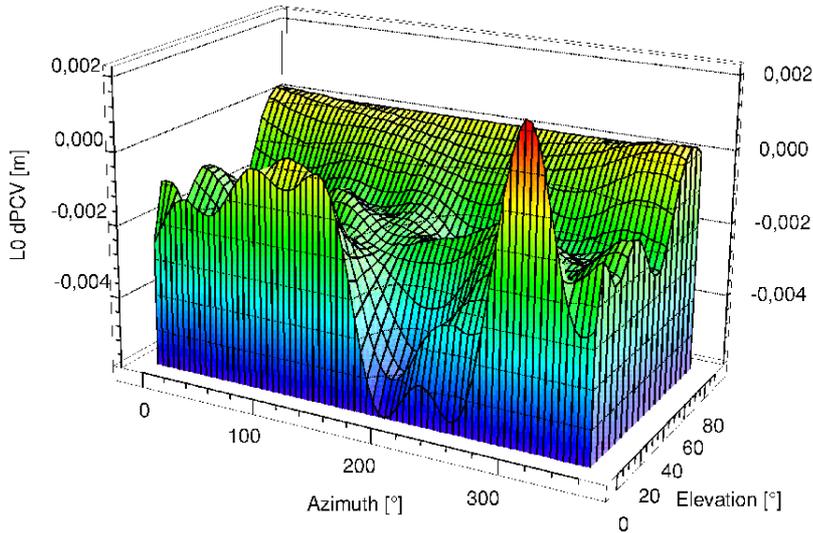


- zwei vollständige Kalibrierungen
- negative Elevation 5°
- Standardabweichung Gesamt-PCV 0.2 – 0.3 mm (1 Sigma)
- Bestätigung der Genauigkeitsmaße durch Wiederholungsmessungen

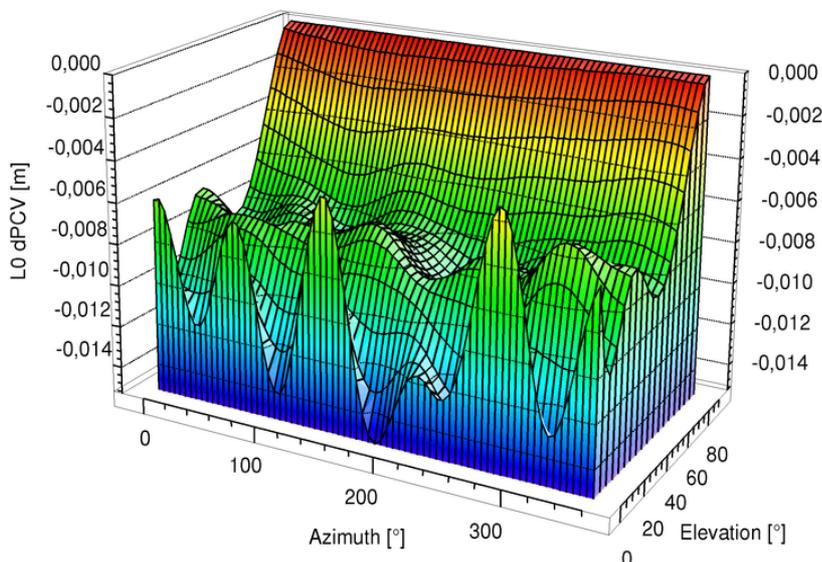
Effekt von Radome-Konstruktionen



- Differenz Absoluter L0 PCV LEIAT504 / LEIAT504 LEIS



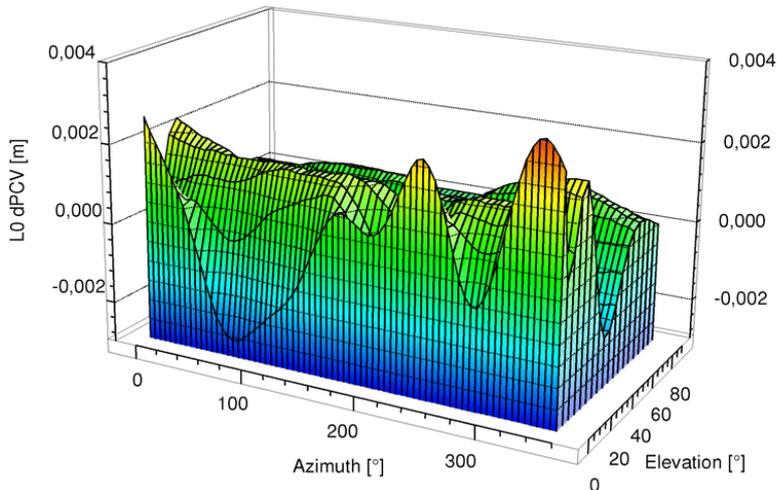
- Differenz Absoluter L0 PCV LEIAT504 / LEIAT504 SCIS



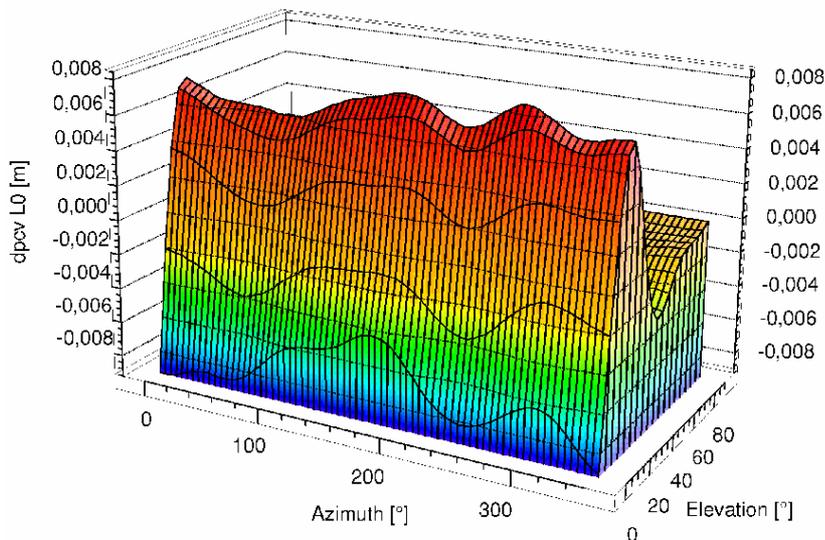
Effekt von Radome-Konstruktionen



- Differenz Absoluter L0 PCV ASH700936M_E / ASH700936M_E SNOW



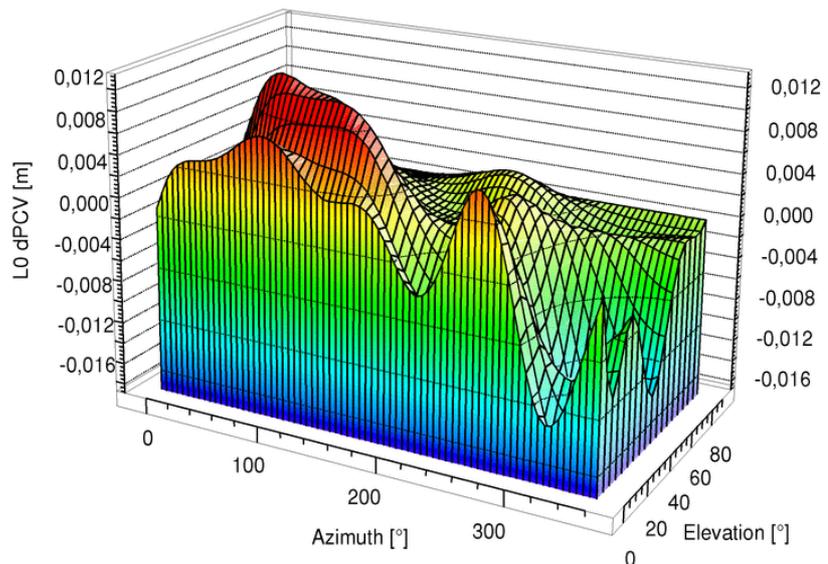
- Differenz Absoluter L0 PCV TRM29659.00 / TRM29659.00 TCWD



Einfluss UHF-Antenne im Nahfeld der GPS-Antenne



- Beeinflussung GPS-Empfangscharakteristik durch zusätzliche Telemetrie-Antennen
- vom Hersteller gelieferte 70cm-Band UHF-Antenne
- UHF-Antenne während Kalibrierung passiv
- Differenz Absolute L0 PCV DSNDGU_002* / DSNDGU_002_UHF*



- Differenzen Offsets DSNDGU_002* ohne und mit passiver UHF-Antenne

| | <i>dNord [mm]</i> | <i>dOst [mm]</i> | <i>dHöhe [mm]</i> |
|----|-------------------|------------------|-------------------|
| L1 | 2.63 | 0.22 | -1.46 |
| L2 | 0.32 | 3.53 | -2.76 |

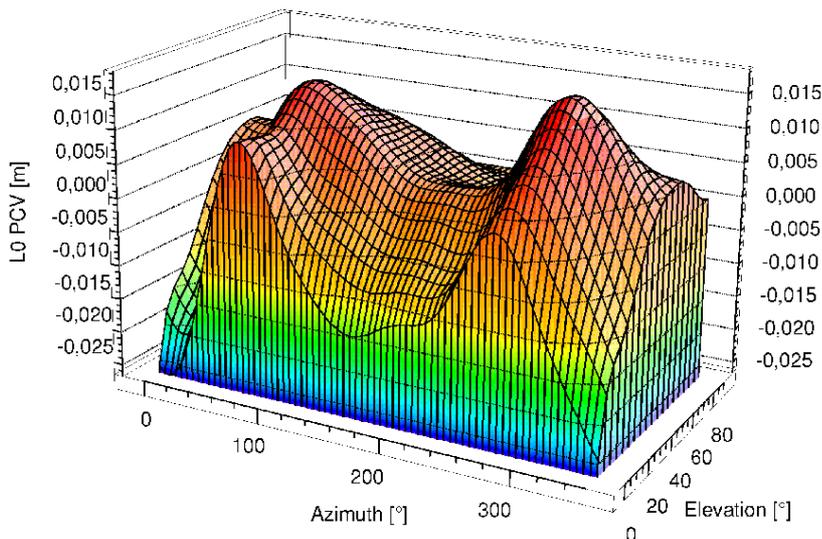
* Zur Aufnahme in die IGS rcvr_ant.tab vorgeschlagen, jedoch noch nicht offizielle IGS Namenskonvention.

PCV Integrierte Antennen- und Empfängersysteme

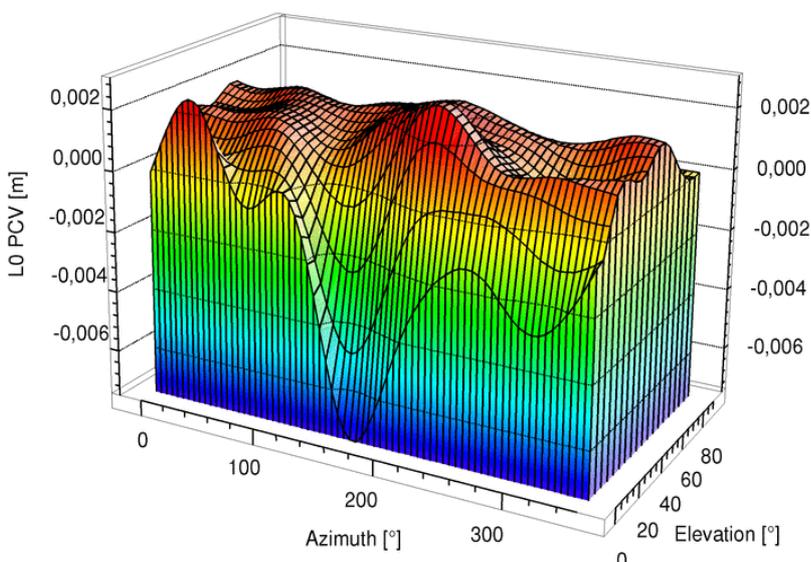


Empfänger und Antenne integriert in einem Gehäuse

- 5–7 mm Nord- und 10–15 mm Ost- Offset für L1 und L2
- Absolute L0 PCV CZJRD24* (Zeiss GePoS Empfänger)



- Absolute L0 PCV TRM4800



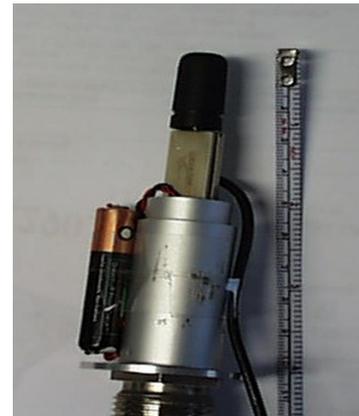
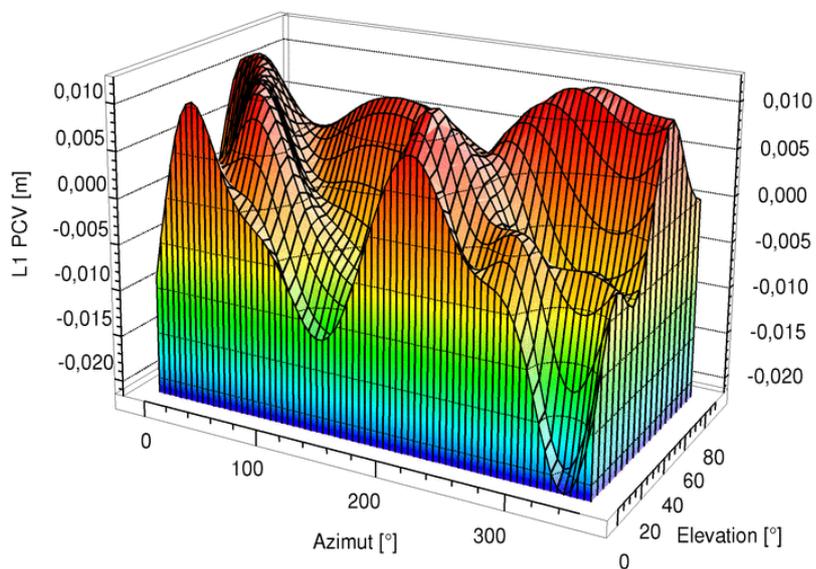
* Zur Aufnahme in die IGS rcvr_ant.tab vorgeschlagen, jedoch noch nicht offizielle IGS Namenskonvention.

Symmetricom Antenne



- Symmetricom L1 Antenne
- „low-cost“ Antenne
- Helix-Antenne

- Absolute L1 PCV SYM*



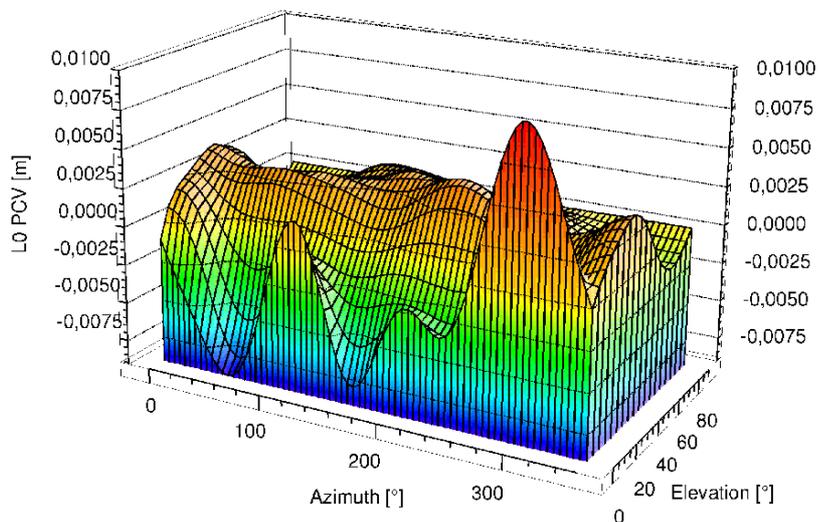
* Nicht offizielle IGS Namenskonvention.

„Pinwheel“ Antenne NOV600



- neue Antennentechnologie „Pinwheel“
- verbesserte PCV und Multipath Eigenschaften angekündigt
- höheres „Rauschen“ als AOAD/M_T

■ Absolute L0 PCV NOV600



■ L1 und L2 Offsets der NOV600

| | <i>Nord [mm]</i> | <i>Ost [mm]</i> | <i>Höhe [mm]</i> |
|----|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| L1 | -1.95 | 1.32 | 65.46 |
| L2 | 0.16 | 1.33 | 69.14 |

Anwendung von PCV-Korrekturen / RTK-Test (GNNET-RTK)



- statische Referenzstation (ASH700936M_E SNOW)
- Roverantenne mit azimuthalen PCV (TRM22020.00-GP)
- „kinematische Rover“ mit unterschiedlich azimuthaler Orientierung (45° Schritte, alle 120 s)
- automatischer Neu-Initialisierung der Mehrdeutigkeiten

- identische Beobachtungen durch Daten-Duplizieren
- identische Multipath-Effekte

- 9-11 Satelliten, L0 Koordinatenschätzung, DOP ~1

- „Nullantenne“ auf Referenzstation
- unterschiedliche absolute Korrektur der Rover-PCV
 - Typmittel Offsets (NGS, relativ)
 - Typmittel elevationsabhängiger PCV (NGS, absolut)
 - individuelle absolute elevationsabhängige PCV
 - individuelle absolute azimuth- und elevationsabhängige PCV (Orientierung berücksichtigt)

- Vergleiche Rechts/Hoch-, Höhe, 2D-, 3D- Bestimmung
- Vergleich Anzahl Initialisierungen und mittlere „Time-To-Fix-Ambiguity“ aus mehreren Experimenten

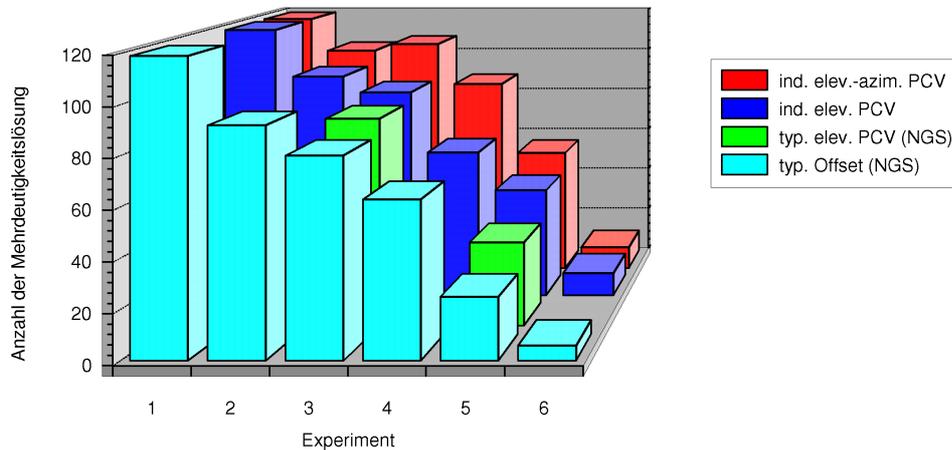
RTK-Test (GNNET-RTK)



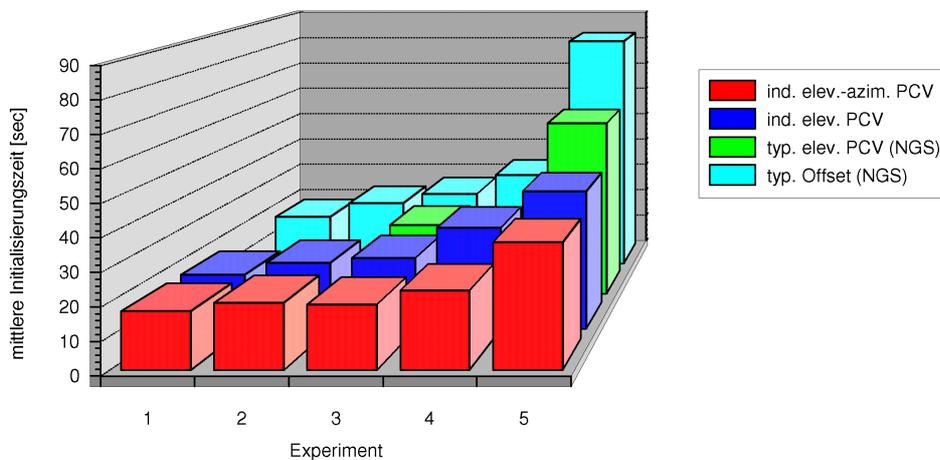
Mehrdeutigkeitslösung

- Referenz „Nullantenne“
- unterschiedliche absolute PCV Korrektur
- unterschiedliche Experimente (Satellitenkonstellation, DOP steigt mit Experiment-Nummer, Rover-Antenne)

- Anzahl der Mehrdeutigkeitslösungen innerhalb 35 min



- Mittlere „Time-To-Fix-Ambiguity“ (Initialisierungszeit)



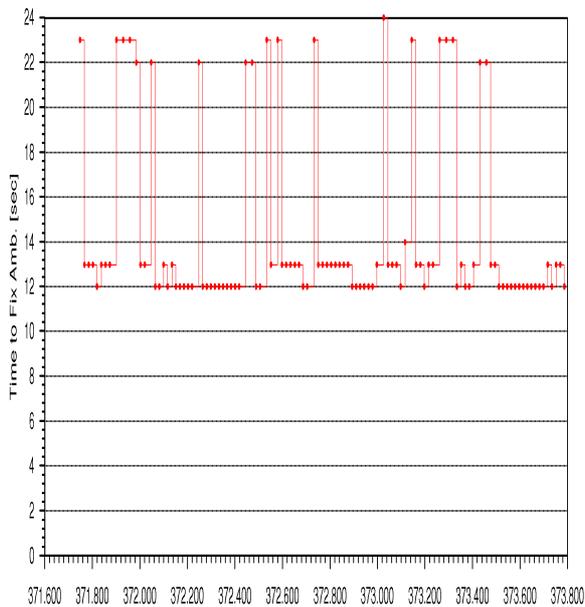
RTK-Test (GNNET-RTK)



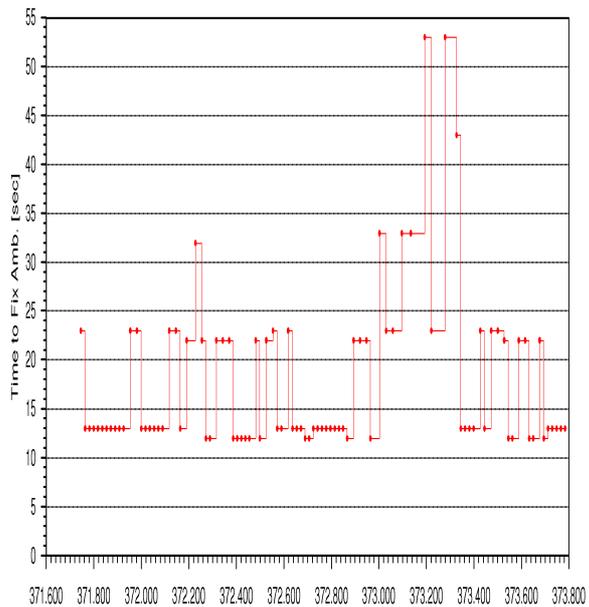
Time-To-Fix-Ambiguity

- Referenz „Nullantenne“
- unterschiedliche absolute Korrektur TRM22020.00-GP

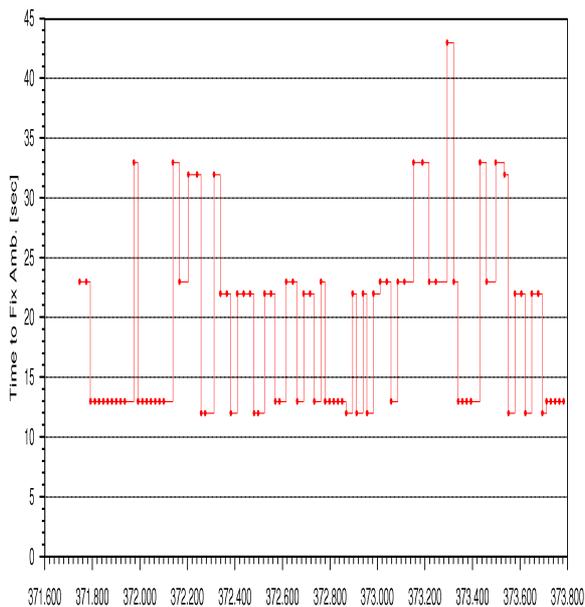
ind. elev.- azim. PCV



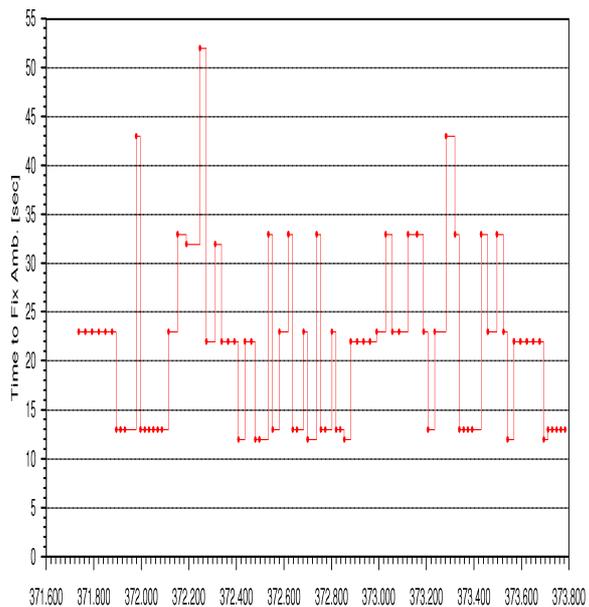
ind. elev. PCV



Typ. elev. PCV (NGS)



Typ. Offset (NGS)



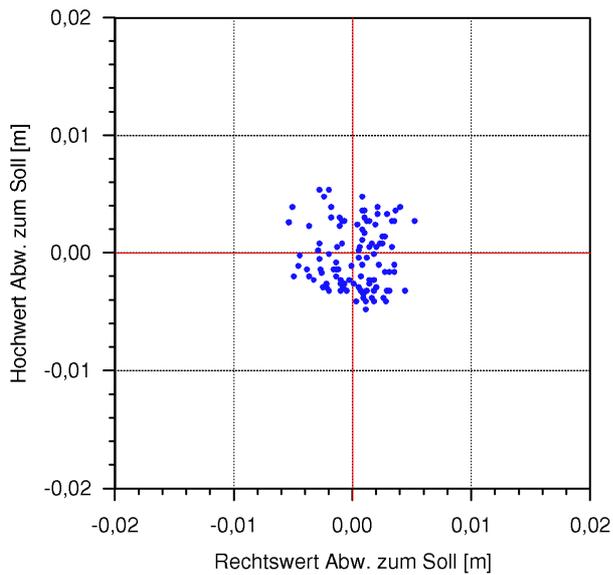
RTK-Test (GNNET-RTK)

Rechts-, Hochwert-Differenzen zu Soll-Koordinaten

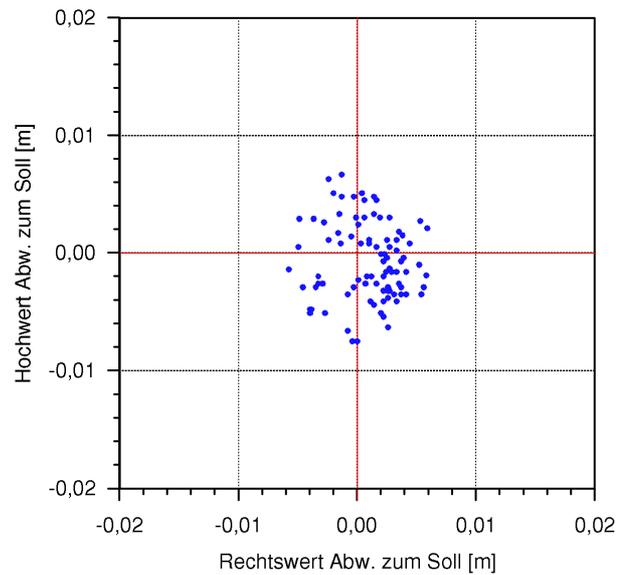


- Referenz „Nullantenne“
- unterschiedliche absolute Korrektur TRM22020.00-GP

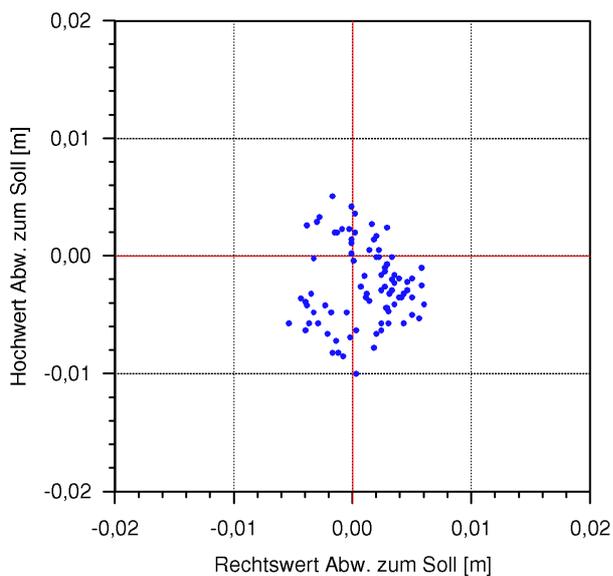
ind. elev.- azim. PCV (\varnothing 3.3 mm)



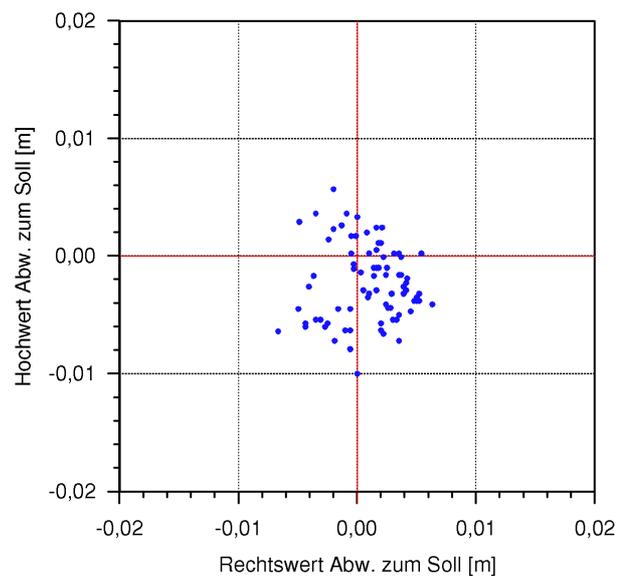
ind. elev. PCV (\varnothing 4.2 mm)



Typ. elev. PCV (NGS) (\varnothing 4.6 mm)



Typ. Offset (NGS) (\varnothing 4.5 mm)



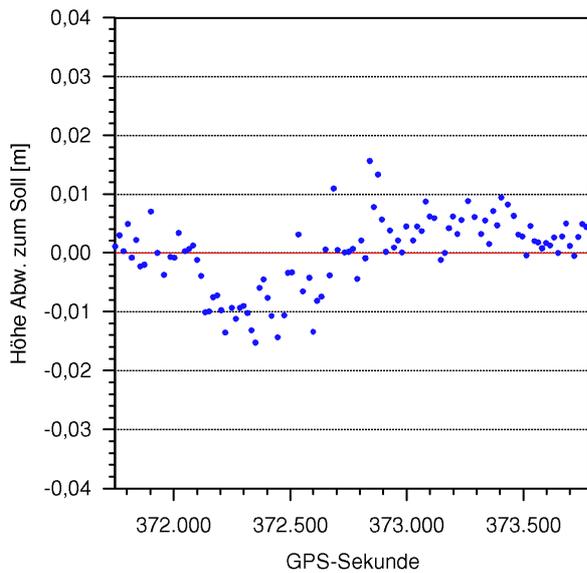
RTK-Test (GNNET-RTK)

Höhen-Differenzen zu Soll-Koordinaten

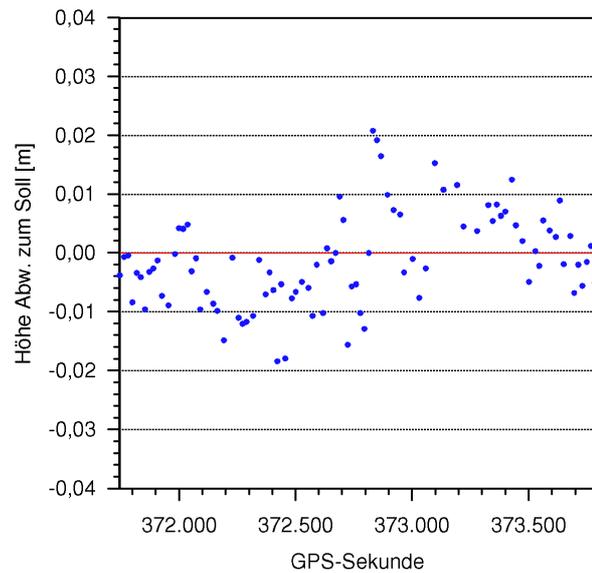


- Referenz „Nullantenne“
- unterschiedliche absolute Korrektur TRM22020.00-GP

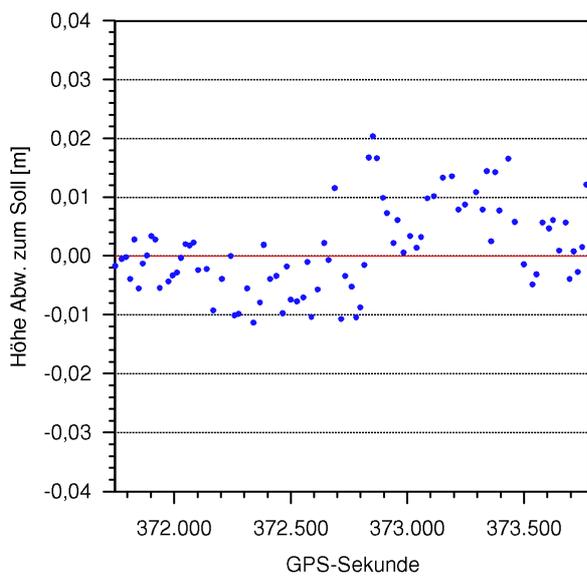
ind. elev.- azim. PCV (\varnothing 0.1 mm)



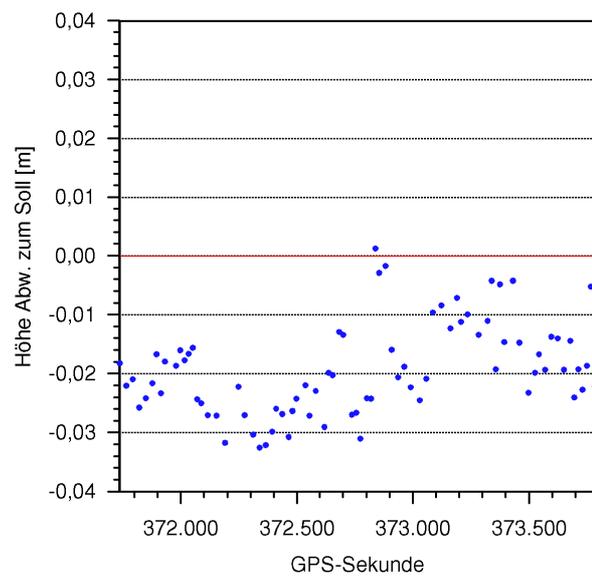
ind. elev. PCV (\varnothing 1.3 mm)



Typ. elev. PCV (NGS) (\varnothing 1.1 mm)



Typ. Offset (NGS) (\varnothing -19.3 mm)



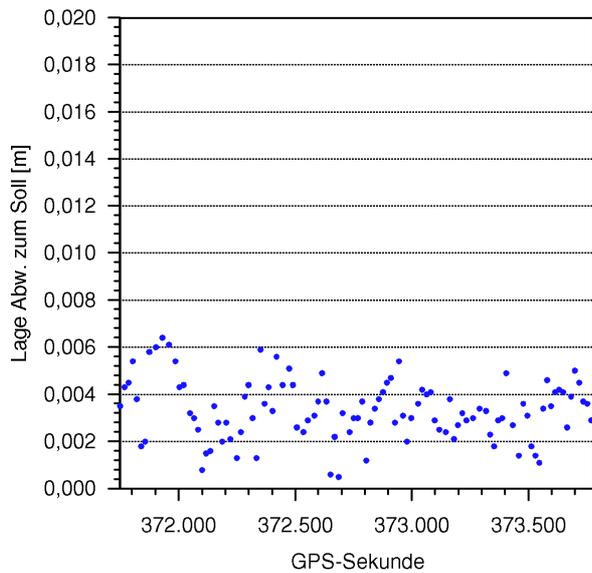
RTK-Test (GNNET-RTK)

2D-Differenzen zu Soll-Koordinaten

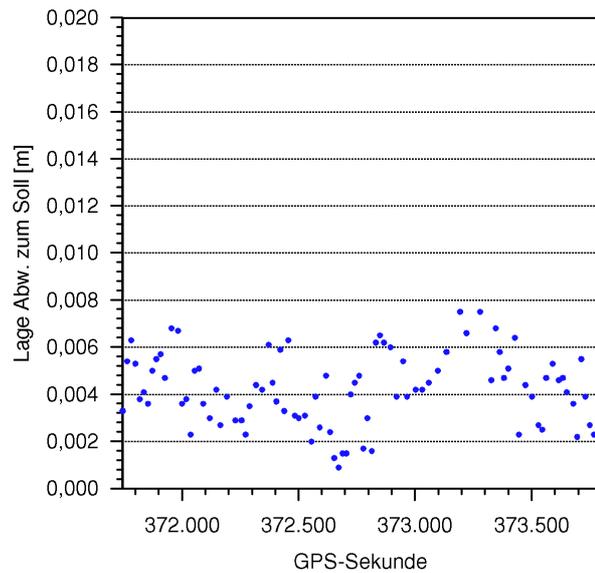
- Referenz „Nullantenne“
- unterschiedliche absolute Korrektur TRM22020.00-GP



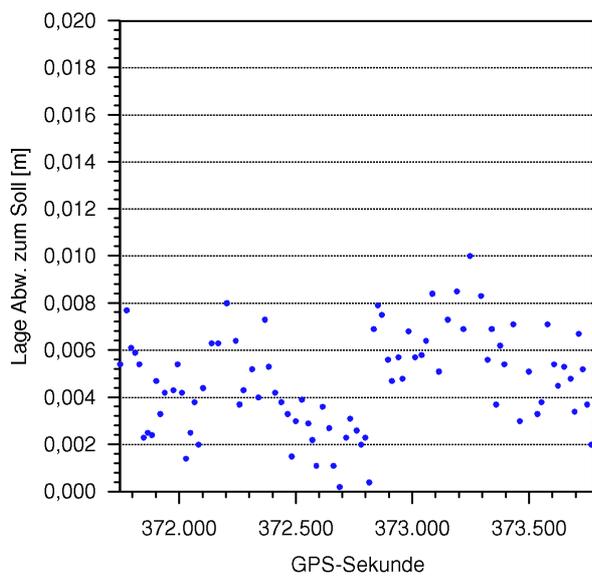
ind. elev.- azim. PCV (\varnothing 3.3 mm)



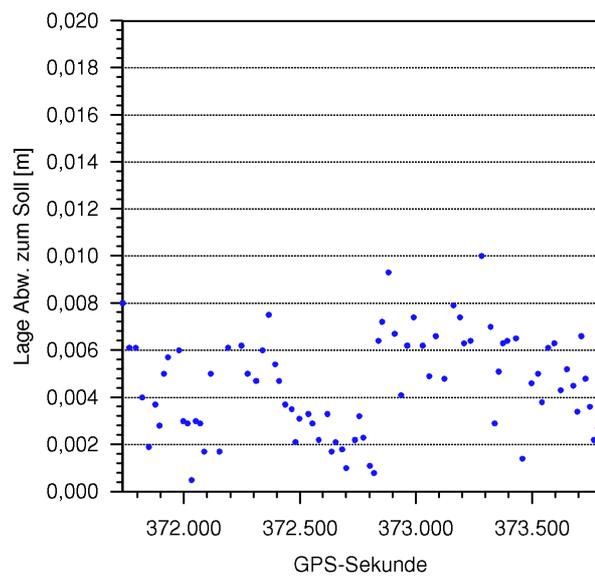
ind. elev. PCV (\varnothing 4.2 mm)



Typ. elev. PCV (NGS) (\varnothing 4.6 mm)



Typ. Offset (NGS) (\varnothing 4.5 mm)



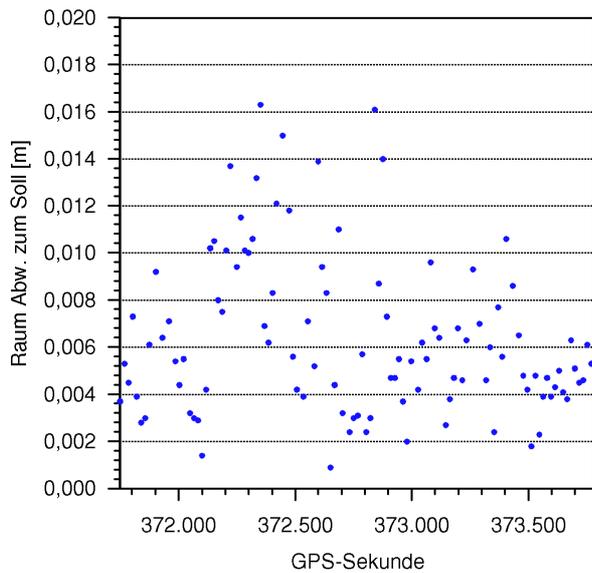
RTK-Test (GNNET-RTK)

3D-Differenzen zu Soll-Koordinaten

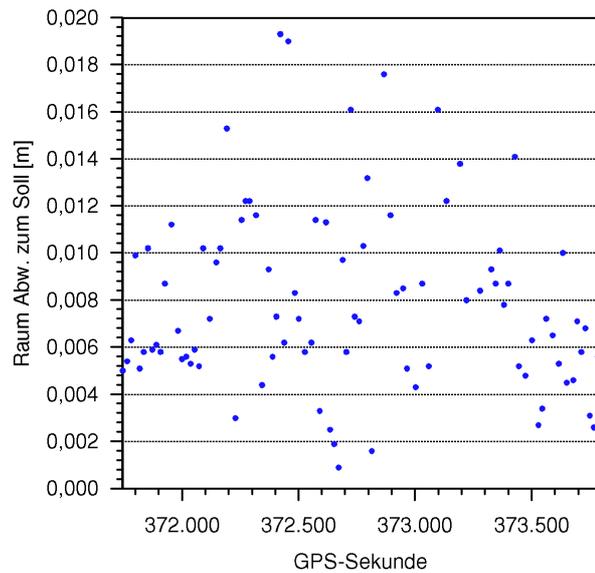
- Referenz „Nullantenne“
- unterschiedliche absolute Korrektur TRM22020.00-GP



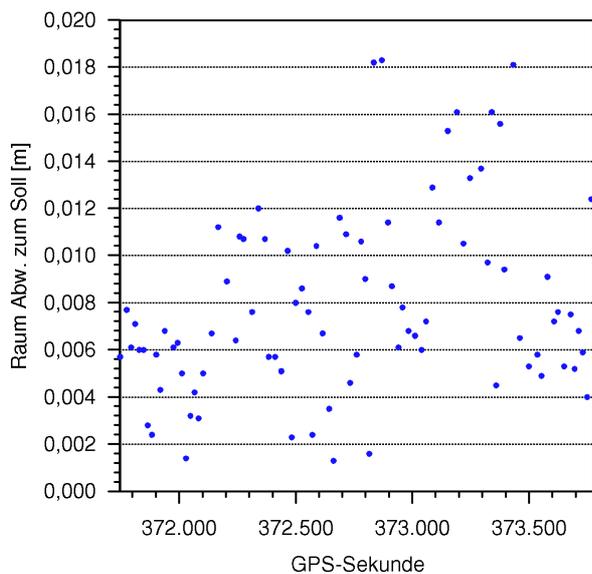
ind. elev.- azim. PCV (\varnothing 6.4 mm)



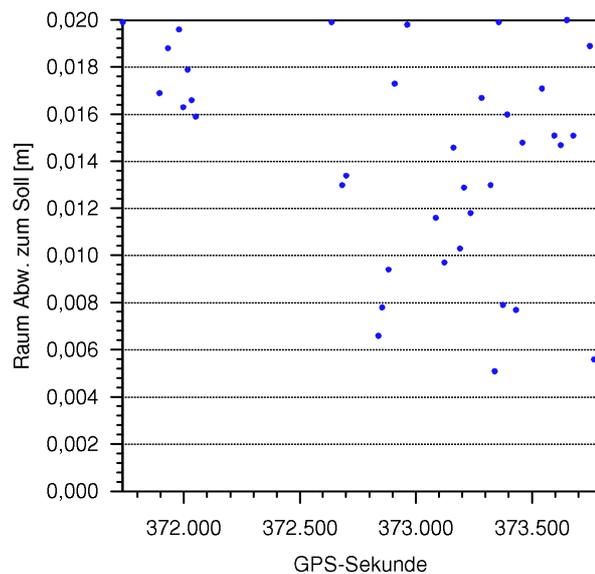
ind. elev. PCV (\varnothing 8.2 mm)



Typ. elev. PCV (NGS) (\varnothing 8.0 mm)



Typ. Offset (NGS) (\varnothing 20.2 mm)



Vergleich von Kalibrierverfahren

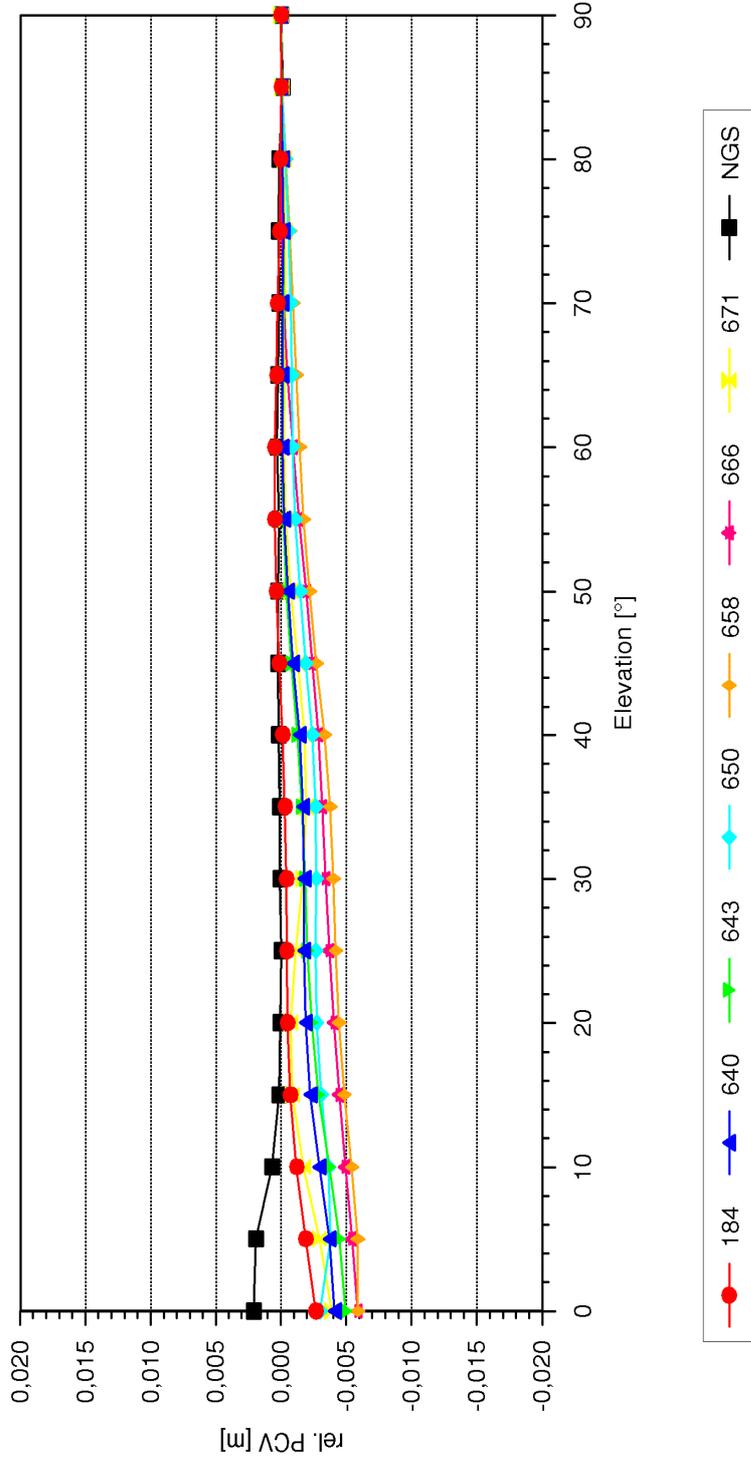


| | |
|-------------|--|
| Geo++: | Automatisierte Absolute Feldkalibrierung |
| GIUB: | Bernese Software |
| LVermA NRW: | WaSoft |
| NGS: | ant_info.003 |

- elevationsabhängige PCV
- Reduzierung auf gleichen Höhen-Offset
- Vernachlässigung der Lage-Offsets, d.h. azimuthaler Variationen
- Umrechnung absoluter PCV in relative PCV (Vergleich- und Lesbarkeit der Graphen)
- geodätische Choke Ring Antennentyp (Kreuzdipol) höchster Genauigkeit „Dorne Margolin Type“
 - LEIAT504
 - ASH700936M_B SNOW sowie Rev. C, D, E
 - TRM29659.00 TCWD
- Choke Ring Antenne (Patch) mit starken azimuthalen Variationen
 - SPP571908273 SPKE

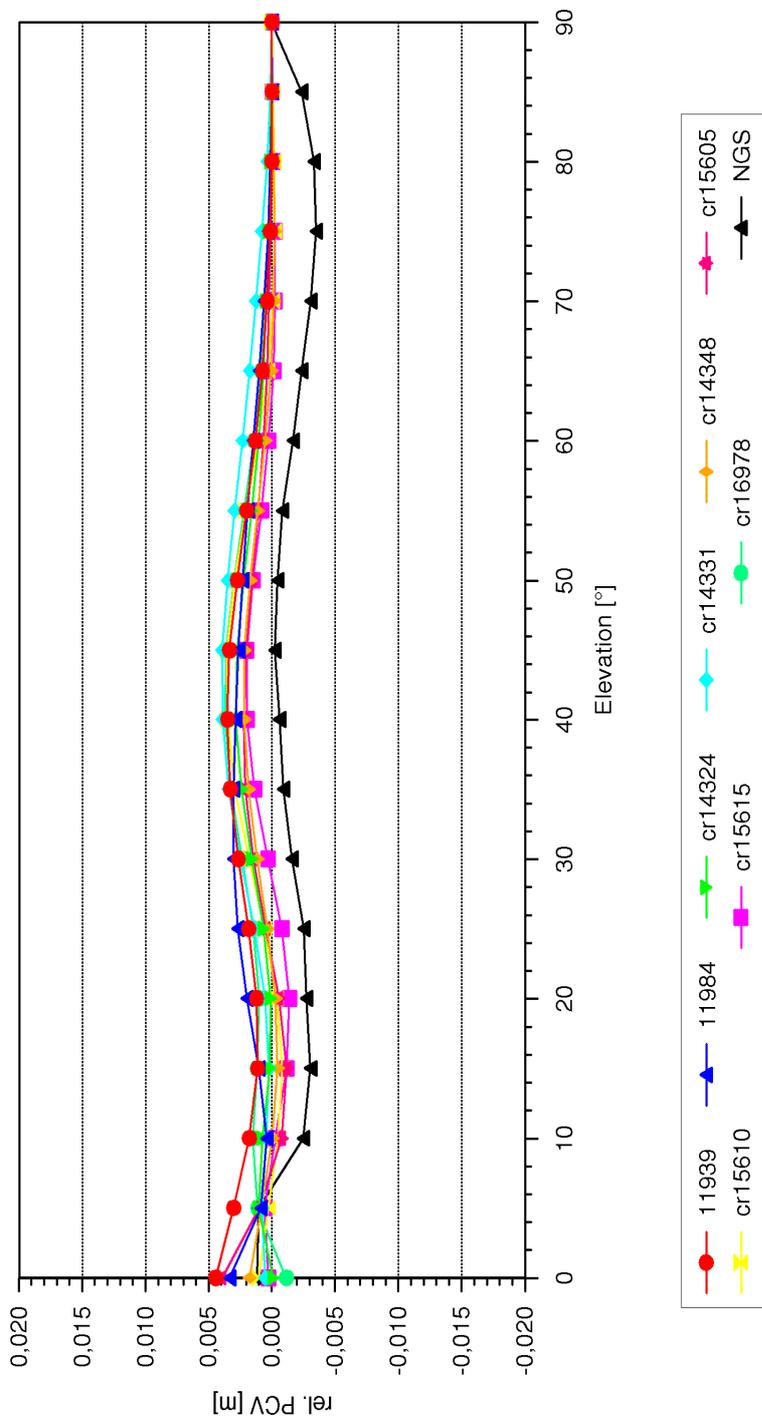
LEIAT504, dAbs PCV Geo++, NGS

relative elevationsabhängige L0 PCV (IGS AOA Offset)



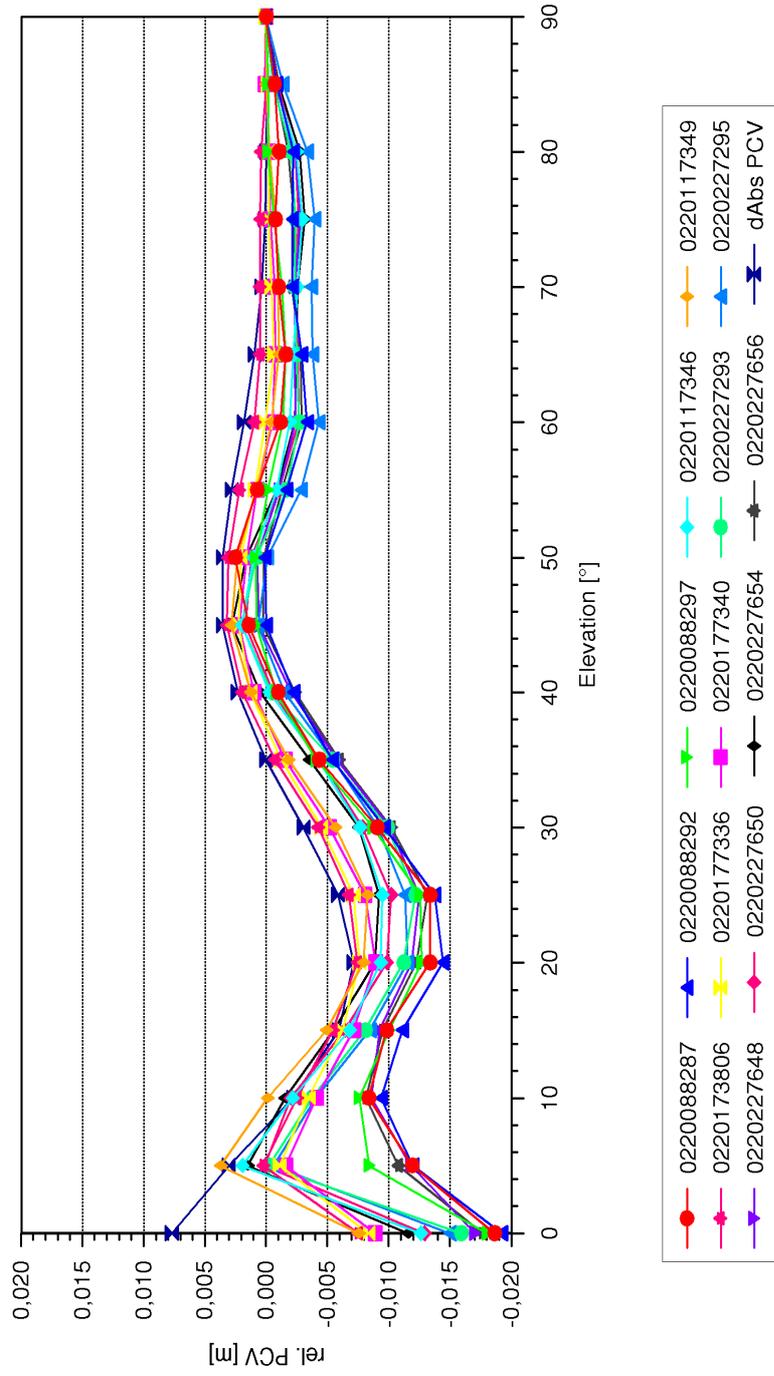
ASH700936M_[B,C,D,E] SNOW, dAbs Geo++, NGS

relative elevationsabhängige L0 PCV (IGS AOA Offset)



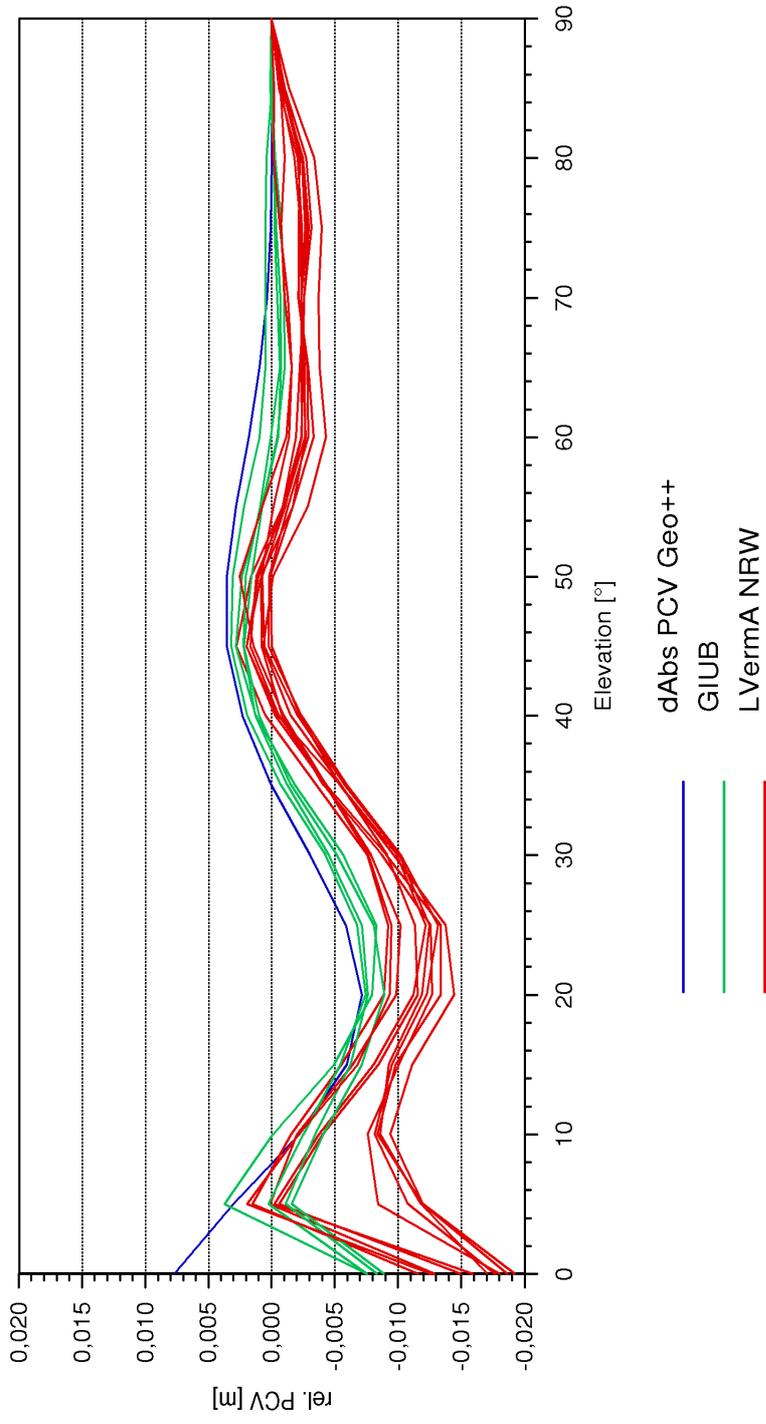
TRM29659.00 TCWD, dAbs Geo++, GIUB, LVerma NRW

relative elevationsabhängige L0 PCV (IGS AOA Offset, Zenit null)



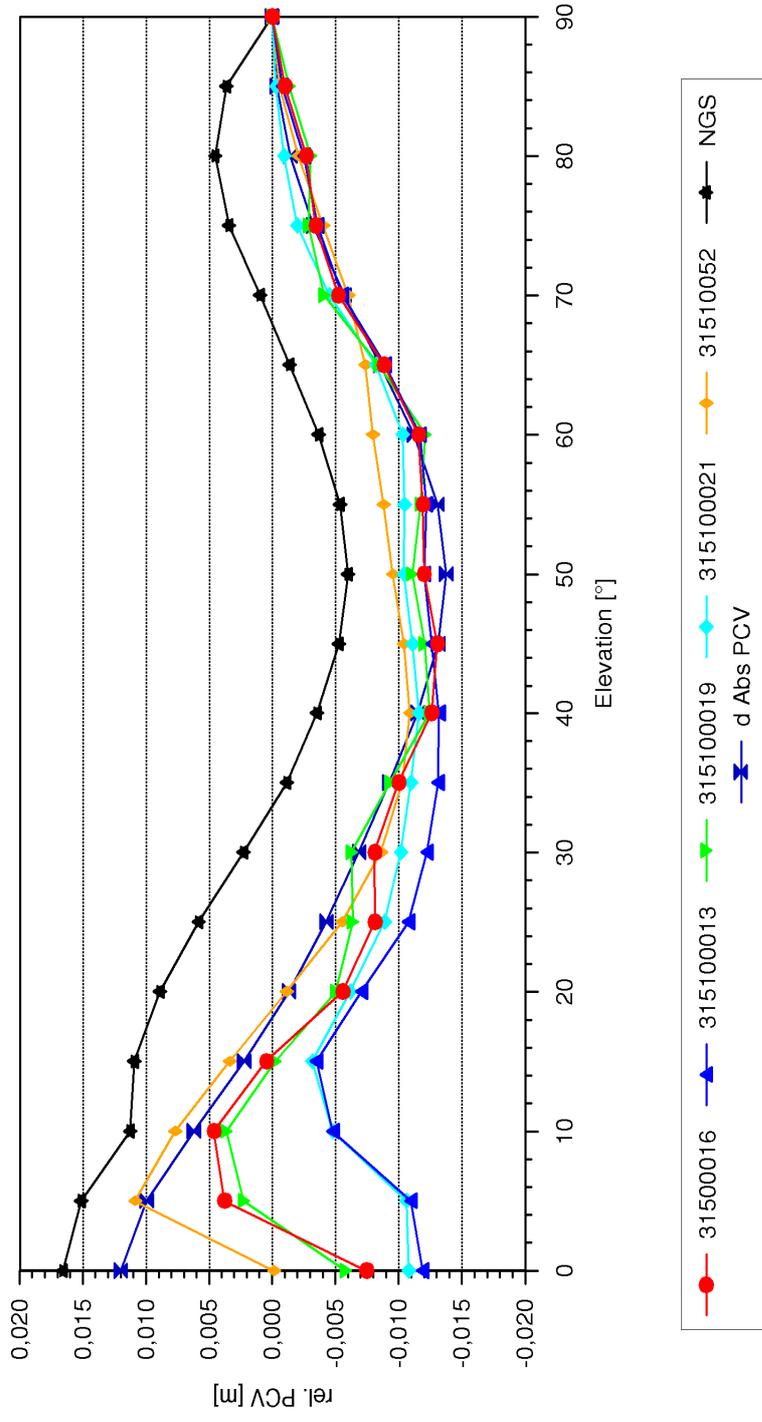
TRM29659.00 TCWD, dAbs Geo++, GIUB, LVerma NRW

relative elevationsabhängige L0 PCV (IGS AOA Offset, Zenit null)



SPP571908273 SPKE, dAbs Geo++, GUIB, LVerma NRW, NGS

relative elevationsabhängige L0 PCV (IGS AOA Offset, Zenit null)



Antennen-Datei-Format Diskussion



■ Geo++ Antennen-Datei:

- flexibel
- offen für Erweiterungen

| | |
|-------------------------------------|--|
| Kommentarzeilen | # |
| IGS Code | TYPE= |
| Offset für individuelle Frequenzen | NO OF FREQUENCIES= OFFSETS L1= OFFSETS L2= |
| elevations- und azimutabhängige PCV | ELEVATION INCREMENT= AZIMUTH INCREMENT= VARIATIONS L1= VARIATIONS L2= |

■ Notwendige Erweiterungen:

| | |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Art der Kalibrierung | PCV TYPE= (ABSOLUTE oder RELATIVE) |
| Seriennummer | SERIAL NUMBER= (Serial No, TYPE MEAN) |
| Setup-ID | SETUP-ID= (RTCM 2.3) |
| Qualitätsangaben | STD DEVS L1= STD DEVS L2= |
| Gültigkeit der PCV Datum | PCV CUT-OFF= CALIBRATION DATE= |

■ Zusätzlich Berücksichtigung von:

| | |
|---------------------------------------|---|
| Kugelfunktion | DEGREE/ORDER SPHERICAL HARMONICS= SPHERICAL HARMONICS L1= SPHERICAL HARMONICS L2= |
| GLONASS, Galileo negative Elevationen | |
| Antennenreferenzpunkt (ARP) | Typbeschreibung der Antennen |
| Nordmarke | Typbeschreibung der Antennen |

- Qualitätsforderung für die Genauigkeit von Offsets- und PCV-Bestimmung deutlich besser als 1 mm

- Radome können große PCV Änderungen verursachen (keine Kalibrierungen z.B. SCIS, TCWD im IGS/NGS)
- Telemetrie-Antennen verändern Antennen-Charakteristik
- Adaption ("Mount") beeinflusst Charakteristik kleiner Antennen

- individuelle absolute PCV-Korrekturen verbessern deutlich „Time-To-Fix“ und Genauigkeit
- Vergleich von Kalibrierverfahren
 - Stationsabhängigkeit (Multipath, „Nordloch“, ...)
 - Verfahrensabhängigkeit (Meßanordnung, Niveau-Übertragung, Genauigkeit, ...)

- dringender Bedarf für Internationalen Standard von Antennen-Dateien (relativ/absolut, azimutale PCV, ...)

Referenzen

- IfE, Geo++® (2000). AOAD/M_T Choke Ring Antenna Absolute PCV Field Calibration at IfE and Geo++®. Internet publication compiled by F. Menge and M. Schmitz, WWW, 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 *GPS Solutions*, 4, No.4, 37–40.
- Menge, F., G. Seeber, C. Völksen, G. Wübbena, M. Schmitz, (1998). Absolute Field Calibration of GPS Antennas. Poster presented at the *AGU Fall Meeting*, G71B–12, San Francisco.
- Menge, F., G. Seeber, C. Völksen, G. Wübbena, M. Schmitz, (1998). Results of Absolute Field Calibration of GPS Antenna PCV. Proceedings of the International Technical Meeting, *ION GPS–98*, Nashville, Tennessee. BEST PAPER AWARD.
- Menge, F., V. Böder, G. Seeber, G. Wübbena, M. Schmitz (1999). Variability of GPS Errors On-site – Investigations of Antenna PCV and Multipath Towards a Station Calibration, *International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG99*, July 19–30, Birmingham, UK, 1999.
- Menge, F., V. Böder, H. Leistner, G. Seeber, G. Wübbena, M. Schmitz (2000). Absolute Feldkalibrierung von GPS–Antennen – Entwicklung und Grundlagen. *GPS–Antennenworkshop*, 10. Mai 2000, Institut für Erdmessung, Universität Hannover, Hannover.
- 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 *GPS Solutions*, 4, No.4, 55–60.
- Schmitz, M. (2001). Spezielle Untersuchungen und Ergebnisse zum PCV von GPS–Antennen. *Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover*, Festschrift Prof. G. Seeber zum 60. Geburtstag, Nr. 239, Hannover, 101–112.
- Seeber, G., F. Menge, C. Völksen, G. Wübbena, M. Schmitz (1997). Precise GPS Positioning Improvements By Antenna and Site Dependent Effects. Presented at the *IAG Symposium*, IUGG Assembly, September 1997, Rio de Janeiro, Brasil. IAG Symposium, No. 115, Springer Verlag.
- Wübbena, G., F. Menge, M. Schmitz, G. Seeber, C. Völksen (1996). A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. Proceedings of the International Technical Meeting, *ION GPS–96*, Kansas City, Missouri, 1205–1214. BEST PAPER AWARD.
- Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, G. Seeber, C. Völksen (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, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000). Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real–Time. Presented at *ION GPS–00*, 19–22 September, Salt Lake City, Utah, USA. BEST PAPER AWARD.
- Wübbena, G., M. Schmitz, G. Boettcher, F. Menge, V. Böder, H. Leistner, G. Seeber (2000). Absolute Feldkalibrierung von GPS–Antennen – Ergebnisse. *GPS–Antennenworkshop*, 10. Mai 2000, Institut für Erdmessung, Universität Hannover, Hannover.
- Wübbena, G., M. Schmitz, V. Böder, F. Menge (1999). Bestimmung und Nutzung absoluter Antennenphasenzentrumsvariationen, *Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS–Antennen*, Geodätisches Institut der Rheinischen Friedrich–Wilhelms–Universität Bonn, April 28, 1999.