



J. Campbell & B. Görres

## 5. GPS- Antennen-Workshop 2003

Montag, 3. November 2003

Veranstaltungsort: Congress Center Messe Frankfurt

11.00 Anmeldung, Begrüßung

11.30 Wissenschaftliche Vorträge

### Internationale Standards und Formate

- Rothacher, M., R. Schmid (TU München): Entwicklungen im IGS
- Schmid, R., M. Rothacher (TU München): Einfluss absoluter Phasenzentrumskorrekturen auf globale GPS-Lösungen

### Genauigkeit der Kalibrierverfahren

- Wübbena, G., M. Schmitz, G. Boettcher (Geo++ GmbH): Analyse umfangreicher Messreihen von GPS Antennen PCV aus absoluten Roboter-Feldkalibrierungen seit Januar 2000
- Campbell, J., B. Görres, M. Siemes, J. Wirsch (Uni Bonn), M. Becker (UniBW München): Laborkalibrierung - Genauigkeitsfragen und Vergleiche mit anderen Verfahren

Mittagspause (13.00 - 14.00)

- Uwe Feldmann-Westendorff (LGN Hannover): Vergleichstest der Kalibrierverfahren für GPS-Antennen Teil 2: Vorhaben und Datensatz
- Wanninger, L. (Ingenieurbüro Wanninger): Erzielbare GPS-Koordinatengenauigkeit bei Verwendung von Antennenkorrekturen aus relativen Kalibrierungen

### Referenzstationskalibrierung

- Wübbena, G., M. Schmitz, G. Boettcher (Geo++ GmbH): Zum Einfluss des Antennennahfeldes
- Wanninger, L. (Ingenieurbüro Wanninger): Detailanalyse der Mehrwegeverhältnisse auf dem Dach einer GPS-Referenzstation
- Dilßner, F., G. Seeber (Uni Hannover), U. Feldmann-Westendorff (LGN Hannover), G. Wübbena, M. Schmitz, M. Bachmann (Geo++ GmbH): Absolute Stationskalibrierung im SAPOS-Referenzstationsnetz

Kaffeepause (16.00)

16.30 Kurzbeiträge und Abschlussdiskussion

- Spata, M. (LVerMA Nordrhein-Westfalen): DIN-ISO-Normen zur Antennenkalibrierung und Echtzeitpositionierung
- Landau, H. (Trimble Terrasat GmbH): Zur Notwendigkeit der Kalibrierung moderner GPS-Antennen
- Rothacher, M., V. Lechner (TU München), W. Schlüter (BKG): Antennen-Monitoring: Wettzell GPS Antenna Array

18.00 Workshop-Abend



## **5. GPS- Antennen-Workshop 2003**

### **Zusammenfassung**

Nach den positiven Erfahrungen vom 4. Antennenworkshop in Hannover fand auch der 5. Workshop wieder direkt in Verbindung mit dem SAPOS-Symposium statt. Drei Themenbereiche wurden diesmal in den Vordergrund gestellt: zuoberst wie in jedem Jahr die internationalen Entwicklungen im Bereich des IGS, gefolgt von einem Einblick in die Fragen der Genauigkeit der Antennenkalibrierverfahren und ergänzt durch den Themenkomplex Referenzstationskalibrierung. Abgerundet wurde das Programm wie gewohnt durch Kurzbeiträge und eine Abschlussdiskussion.

Die von der Sache her unumgängliche Einführung des absoluten Kalibrationsstandards im IGS (International GPS Service), stösst weiterhin auf erhebliche logistische Schwierigkeiten (Rothacher, TU München). Die Ursachen des Maßstabsproblems sind zwar weitgehend geklärt und lassen sich auf die fehlende Kalibrierung der Sendeantennen an den Satelliten zurückführen. Ausserdem können unter Einführung des globalen Maßstabes aus VLBI die Antennenparameter der GPS-Satelliten rekonstruiert werden (Schmid, TU München). Eine Neuauswertung aller bisher beobachteten globalen GPS-Daten in einem Guss ist jedoch heute noch nicht möglich, so dass Wege gefunden werden müssen, einen schonenden Übergang zu finden, der z.B. die globalen Positionszeitreihen nicht zerstört.

Die Genauigkeit der Antennenkalibrierung kann an Hand von grösseren Antennen-Messreihen, wie sie z.B. von GEO++ über die vergangenen Jahre bei der Absolutkalibrierung mit dem in Hannover entwickelten Roboterarm gewonnen wurden, immer besser untersucht werden. Inzwischen wurden 95 verschiedene Antennentypen kalibriert, wobei deutliche Unterschiede in der Qualität sichtbar werden (Boettcher, GEO++). Einige Typen zeigen eine markante Gruppenbildung, d.h. es formieren sich zwei signifikant unterscheidbare Antennenparametersätze, die auf Änderungen im elektrischen bzw. mechanischen Aufbau der Antennen einer Typenreihe hindeuten. Bemerkenswert war, dass auch unter den Choke-Ring-Antennen bisweilen grössere Abweichungen von der Norm auffielen. Antennen-Alterung und damit verbundene eventuelle Änderungen der Antennenparameter waren ebenfalls ein Aspekt der Untersuchungen. Bis jetzt ist das Sample der in grösseren Zeiträumen mehrmals kalibrierten Antennen jedoch noch zu klein, um allgemeingültige Aussagen zu erlauben. Bei einer Rover-Antenne wurden Änderungen der Offsets über 2 Jahre von mehr als 20 mm gefunden.

Neue Labormessungen zur Absolutkalibrierung von Antennen standen im Blickpunkt bei dem Versuch, konsistente Genauigkeitsmaße für die Kalibrierergebnisse zu erzeugen (Campbell, Uni Bonn). In Kooperation mit der Universität der Bundeswehr München sind die im 4. Antennenworkshop vorgestellten Arbeiten fortgeführt und ausgeweitet worden und haben für 5 Testantennen sehr positive Ergebnisse geliefert. Bei einer individuellen Antenne (Leica AT503), die bei GEO++ absolut kalibriert worden war, ergab sich eine hervorragende Übereinstimmung sowohl der Offsets (PCO) als auch der Phasenkurven (PCV) auf deutlich besser als 1 mm. Damit konnten erstmalig auch Absolut-Kalibrierungen direkt mit einem völlig unabhängigen Verfahren verglichen werden.

Ein mit den Test-Antennen des Ringversuchs angestellter Vergleich von Positionsbestimmungen auf dem Dach des LGN Hannover (6 Pfeiler) ergab sehr zufriedenstellende Ergebnisse der dort relativ kalibrierten Test-Antennen gegen eine mit gleichen Antennen vorab bestimmte Soll-Lösung (Feldmann-Westendorff, LGN Hannover). Damit war zunächst gezeigt, dass die Verwendung gemischter Antennensätze mit entsprechenden Kalibrierungen durchaus hohe Genauigkeitsniveaus erreichen kann.

Dieser Eindruck wurde durch die Untersuchungen von Wanninger (Ingenieurbüro Wanninger) weitgehend bestätigt: es konnten keine signifikanten Unterschiede mit den Ergebnissen der am Ringversuch beteiligten Kalibrierverfahren (relativ und absolut) festgestellt werden. Die Qualität der Koordinaten-Ergebnisse war eher nach den Standpunkten (die verschiedenen Pfeiler auf dem Dach des LGN) sortiert, d.h. Mehrwege-Effekte und Signal-Beugung überlagern die reine Kalibrierungsgüte. Letzteres bestätigen auch die Untersuchungen mit dem Roboterarm hinsichtlich der Einflüsse des Antennen-Nahfeldes (Schmitz, GEO++). Versuche mit verschiedenen Dreifüßen und Pfeileroberflächen-Attrappen auf dem Roboterarm zeigen einen deutlichen Einfluss der Metallteile in unmittelbarer Nähe der Antennenunterseite. Interessant war auch der Umstand, dass Stativaufstellungen hinsichtlich der Multipath-Signatur kurzweiliger, d.h. leichter herausmittelbar erscheinen, als Pfeiler. Verschieden lange Adapterstücke zeigen deutlich veränderte Multipath-Einflüsse mit Tendenz zu geringeren Einflüssen bei wachsender Länge. Diese und vielerlei weitere Einsichten in das Verhalten der Signale im Nahfeld der Antennen werden in Zukunft die Möglichkeiten zur Bewertung von Standorten verbessern und die Auswahl neuer Stationen erleichtern. Um die Multipath-Effekte einer bestimmten Station modellieren zu können und damit dauerhaft als Korrekturmodell bereitstellen zu können, müssen noch einige Hürden genommen werden. Vielversprechende Ansätze dazu bieten die Messungen mit dem Roboterarm in unmittelbarer Punktnähe (Dillner, TU Hannover) im Rahmen einer Kooperation mit dem LGN.

In den Kurzbeiträgen kamen der Stand bei der Anfertigung von DIN-ISO-Normen zur Antennenkalibrierung (Spata, LVA NRW), die Eigenschaften der neuen Trimble Zephyr-Antennen (Landau, Trimble Terrasat) und Vorschläge zur kontinuierlichen Überwachung der Antennen- und Umgebungseigenschaften an Permanentstationen (Rothacher, TU München) zur Sprache.

Die Abschlussdiskussion zeigte, dass die neuen Erfahrungen und Erkenntnisse über die Einflüsse des Antennen-Nahfeldes und die Punktumgebung ein lebhaftes Echo bei den Teilnehmern fand. Dieser Aspekt und auch die Frage nach einer möglichen Alterung von Antennen sollten verstärkt in weiterführende Untersuchungen eingeplant werden. Damit wurde auch der bereits im 4. Antennenworkshop angesprochene Bereich der Stationskalibrierungen in ein neues Licht gestellt und die Einsicht verstärkt, dass die Antennenkalibrierung allein noch nicht verhindert, dass auf ungünstigen Punkten oder mit ungünstig dimensionierten Untersätzen Fehler im Bereich mehrerer Zentimeter auftreten können (vor allem in der ionosphärenfreien L1/L2-Kombination). Insgesamt wurde das Workshop auch diesmal als sehr informativ und nützlich empfunden und zur Fortsetzung (im Frühjahr 2005) empfohlen.

Das anschließende Beisammensein im Foyer der Congress Center der Frankfurter Messe wurde von der Mehrzahl der Teilnehmer zu persönlichen Gesprächen genutzt und ergänzte in optimaler Weise den von Mitgliedern des BKG professionell organisierten Konferenzrahmen, wofür an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich gedankt werden soll.

---

# Entwicklungen im International GPS Service (IGS)

**Markus Rothacher**

Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, TU München (FESG)

**Ralf Schmid**

Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, TU München (IAPG)

## 5. GPS-Antennen-Workshop 2003

**3. November 2003**

**Frankfurt am Main**

---

## Inhalt

- **Geschichtliche Entwicklung**
- **Momentaner Stand im IGS**
- **Ausblick**

## Geschichtliche Entwicklung (1)

Seit **1992**, bis heute in Gebrauch: relative Phasenzentrumsvariationen (PCVs) für Empfängerantennen



Foto: [www.ngs.noaa.gov](http://www.ngs.noaa.gov)

- PCVs relativ zur **Referenzantenne** AOAD/M\_T aus Feldkalibrierungen
- Fehlerhafte Annahme:  
 $PCV(AOAD/M_T) = 0$
- Systematische Fehler bei **langen Basislinien**: zwei Stationen sehen einen Satelliten unter verschiedenen Elevationen

## Geschichtliche Entwicklung (2)

Mitte der **1990er Jahre**: absolute Empfänger-PCVs aus Kammermessungen



Foto: [www.sn.afrl.af.mil](http://www.sn.afrl.af.mil)

- Kalibrierung in mikrowellentoten Räumen
  - Maßstabsdifferenz von 15 ppb in globalen Netzen
- Zweifel an den Resultaten

## Geschichtliche Entwicklung (3)

Ende der 1990er Jahre: absolute PCVs aus Feldkalibrierung mit Roboter



Foto: [www.ife.uni-hannover.de](http://www.ife.uni-hannover.de)

- Beweis für die Korrektheit der absoluten PCVs: zwei unabhängige Verfahren liefern übereinstimmende Resultate
- Maßstabsdifferenz von 15 ppb kann nicht aus fehlerhaften absoluten PCVs resultieren

→ Augenmerk auf Satellitenantennen

## Geschichtliche Entwicklung (4)

2000: Kalibrierung einer Block IIA-Antenne am Boden

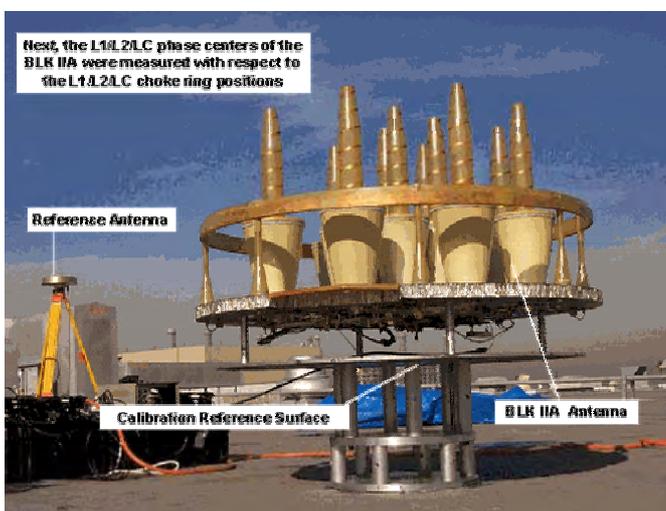


Foto: [www.ngs.noaa.gov](http://www.ngs.noaa.gov)

- Satellitenantenne als Empfangsantenne verwendet
- Kalibrierung unter Verwendung des tatsächlichen Öffnungswinkels von ca.  $14^\circ$  nicht möglich
- auf Bestimmung eines **mittleren Offsets** beschränkt
- keine Korrekturwerte für Block IIR vorhanden

→ Maßstabsdifferenz kann nicht vollständig erklärt werden

## Geschichtliche Entwicklung (5)

Seit 2001: Bestimmung von PCVs der Satellitenantennen  
aus globalen Daten

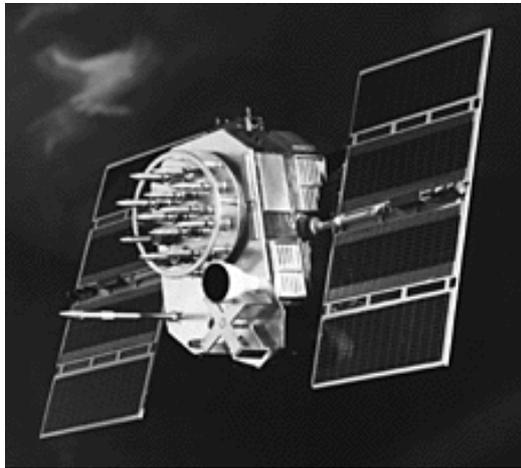


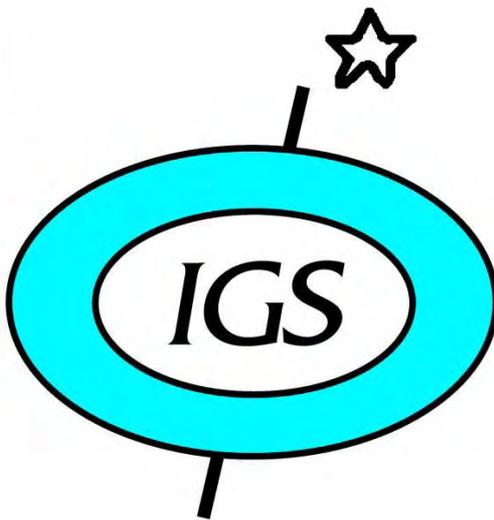
Foto: www.aero.org

- Tägliche Lösungen mit gleichzeitiger Bestimmung aller relevanten globalen Parameter
- Fixierung des globalen Maßstabs erforderlich
- PCVs für Nadirwinkel von  $0^\circ$  bis  $14^\circ$  mit einer Auflösung von  $1^\circ$

→ Maßstabsproblem „gelöst“

## Momentaner Stand im IGS (1)

Zögerliche Einführung im IGS



- **ANTEX-Format** beschlossen
- Grössere Software-Modifikationen erforderlich: neues Format, Satelliten-PCVs
- **Maßstab** von anderen Raumverfahren übernommen und fixiert (ITRF2000)
- **Sprünge in Zeitreihen** von Koordinaten zu erwarten: Langzeiterien werden zerstört (ITRF-Lösungen)

---

## Momentaner Stand im IGS (2)

---

### Software-Implementationen und Tests:

- **CODE (Bern):** zusammen mit TU München
  - Schätzung von Satelliten- und Empfänger-PCVs möglich
  - Einführung der neuen PCVs implementiert
  - Diverse Tests mit neuen PCVs durchgeführt
- **GFZ (Potsdam):**
  - Schätzung von Satelliten-PCVs möglich
  - Einführung der neuen PCVs implementiert
  - Erste Tests in Arbeit
- **MIT (Boston):** zusammen mit SCRIPPS, San Diego
  - Implementation der neuen PCVs in Arbeit
  - Tests vorgesehen
- **JPL (Pasadena):**
  - Schätzung von Satelliten-PCVs möglich
  - Einführung der neuen PCVs implementiert
  - Tests in Arbeit

---

## Ausblick

---

### IGS Workshop in Bern (1. - 5. März 2004):

- Software-Implementationen der Analyse-Zentren sollten abgeschlossen sein
  - Resultate der verschiedenen Tests der Analyse-Zentren vorhanden
  - Diverse Vorträge zum Thema "Antennen" und zu Tests mit den neuen PCV-Sätzen (für Empfänger und Satelliten) zu erwarten
- **Entscheidung über die Einführung der neuen absoluten PCV-Tabellen (ob und wann)**

---

# Einfluß absoluter Phasenzentrumskorrekturen auf globale GPS-Lösungen

Ralf Schmid, Markus Rothacher

Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie  
Technische Universität München

---

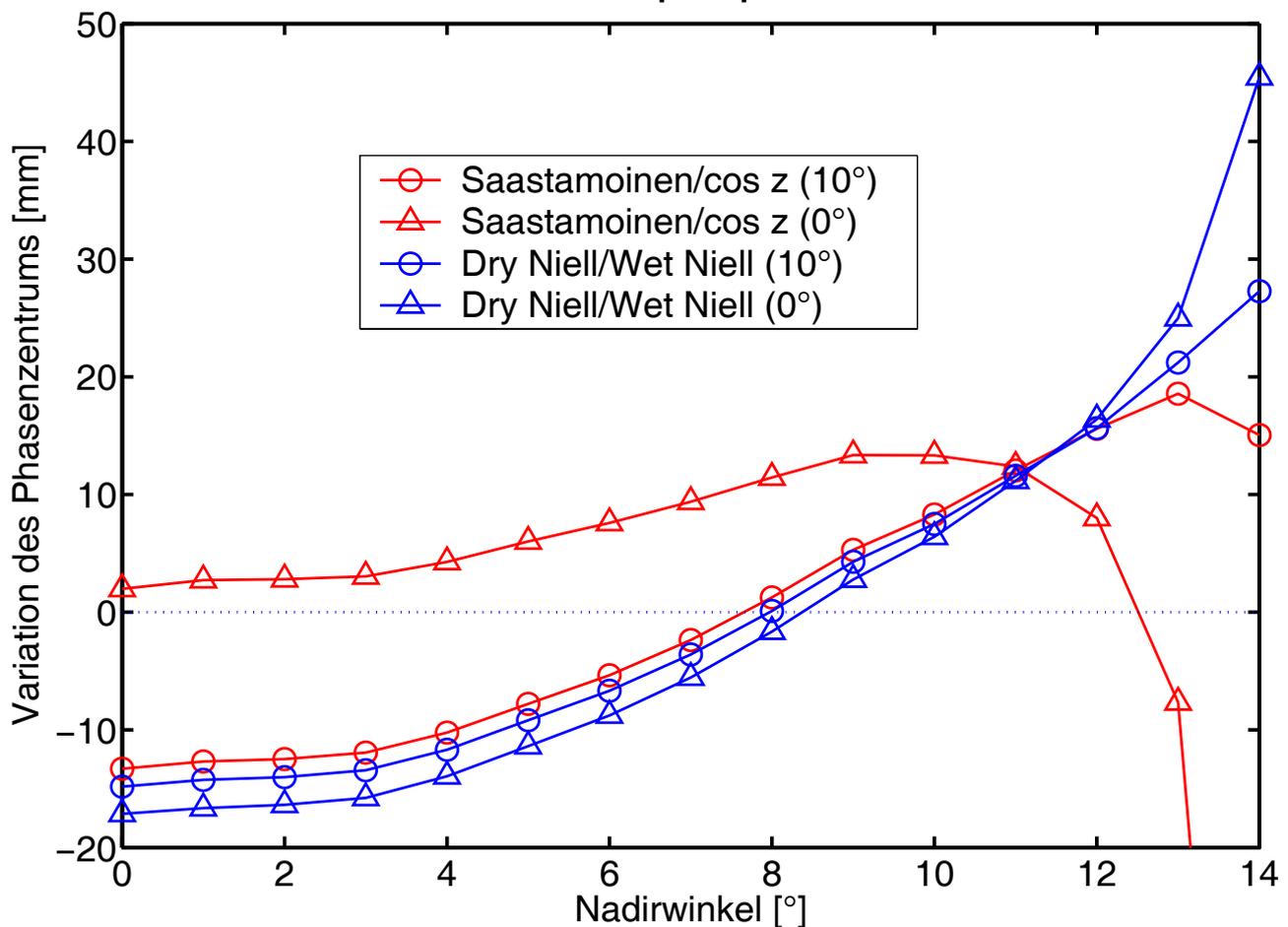
## Gliederung

- GPS-Satellitenantennen
  - Fortschritte beim Schätzen der Phasenzentrumsvariationen (PCVs)
  - Einfluß des Troposphärenmodells
  - Ableitung einer Korrektur für den Antennenoffset
- Vergleich globaler GPS-Lösungen unter Verwendung absoluter bzw. relativer PCVs
  - Troposphärenresultate
  - Koordinaten
  - Abhängigkeit vom *elevation cut-off*
  - Einfluß der Azimutabhängigkeit
- Zusammenfassung

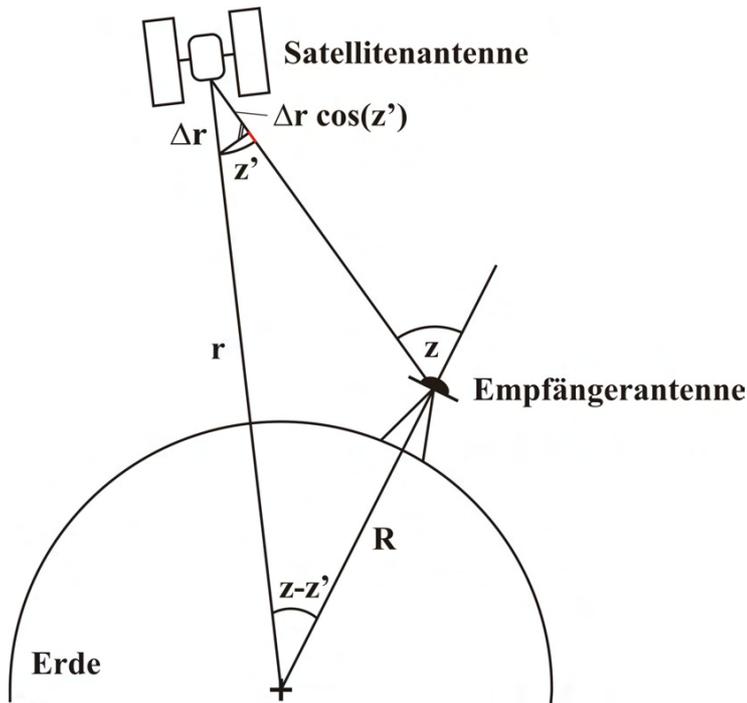
# Fortschritte beim Schätzen der Satellitenantennen-PCVs

- Daten mit einer minimalen Elevation von  $3^\circ$  (statt  $10^\circ$ )
  - ➔ höhere Genauigkeit für große Nadirwinkel
  - ➔ Verwendung des Troposphärenmodells von Saastamoinen nicht mehr erlaubt
- Troposphärenmodell von Niell
- Stationskoordinaten im ITRF2000
- Beseitigung von Zwängen auf Bahnparametern
  - ➔ systematischer Effekt in den Bahnen verschwindet

## Einfluß des Troposphärenmodells



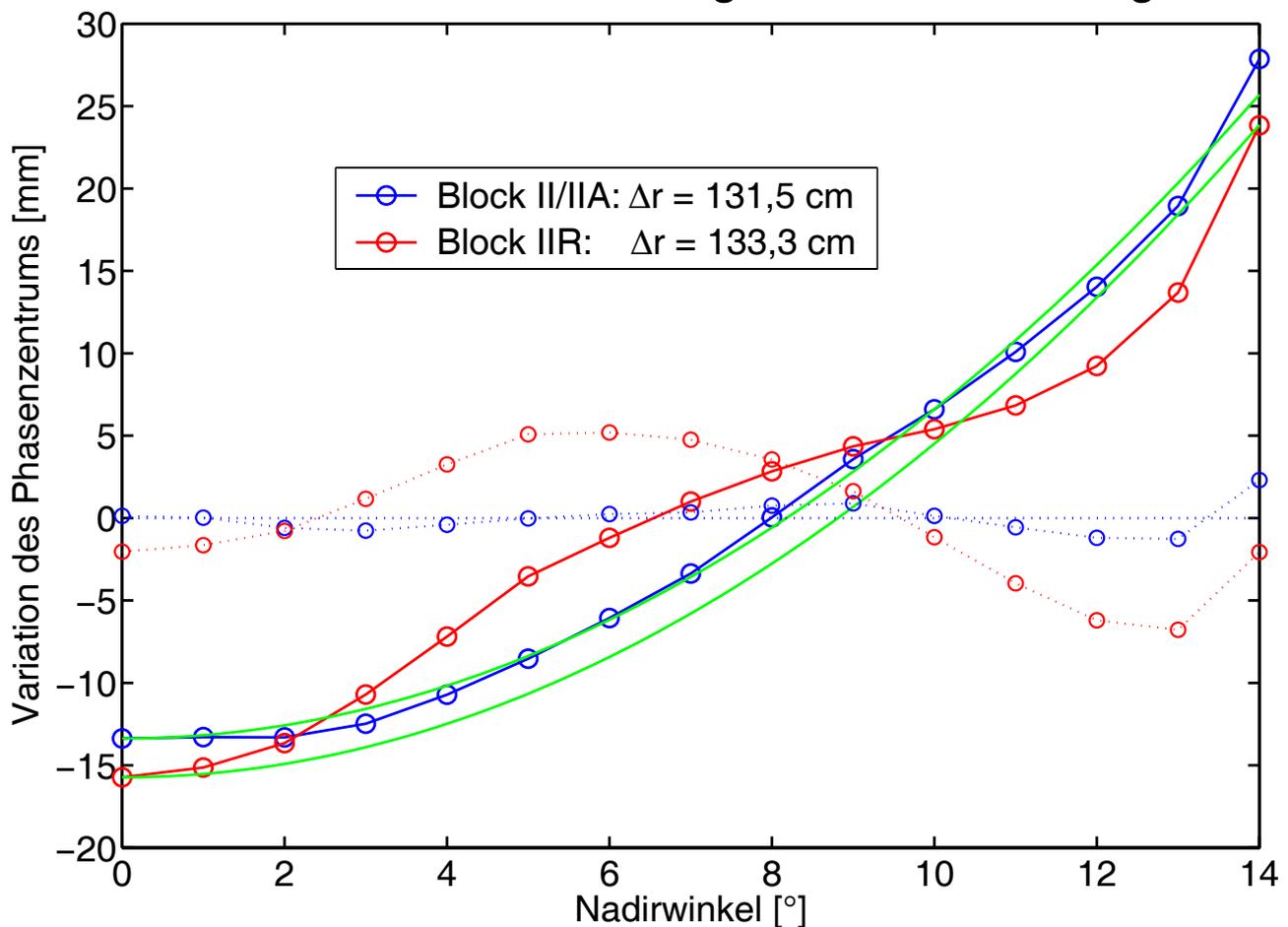
# Zusammenhang zwischen Offset und PCVs



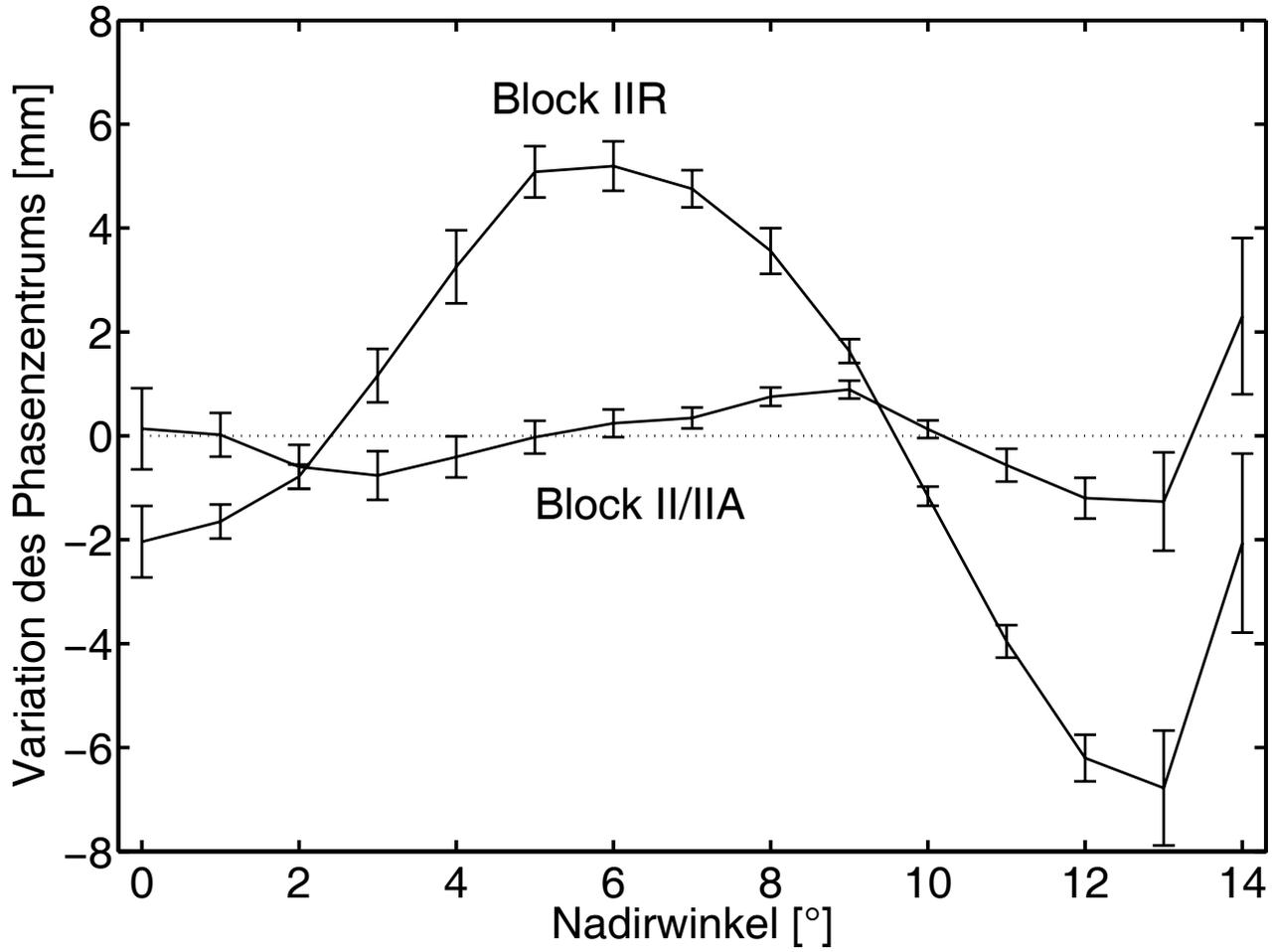
Ein um  $\Delta r$  „fehlerhafter“ Offsetwert fließt in die Satellitenuhr, verursacht jedoch auch PCVs, da nur in Nadirrichtung der volle Betrag von  $\Delta r$  wirksam ist:

$$PCV(z') = -\Delta r \cdot (1 - \cos(z'))$$

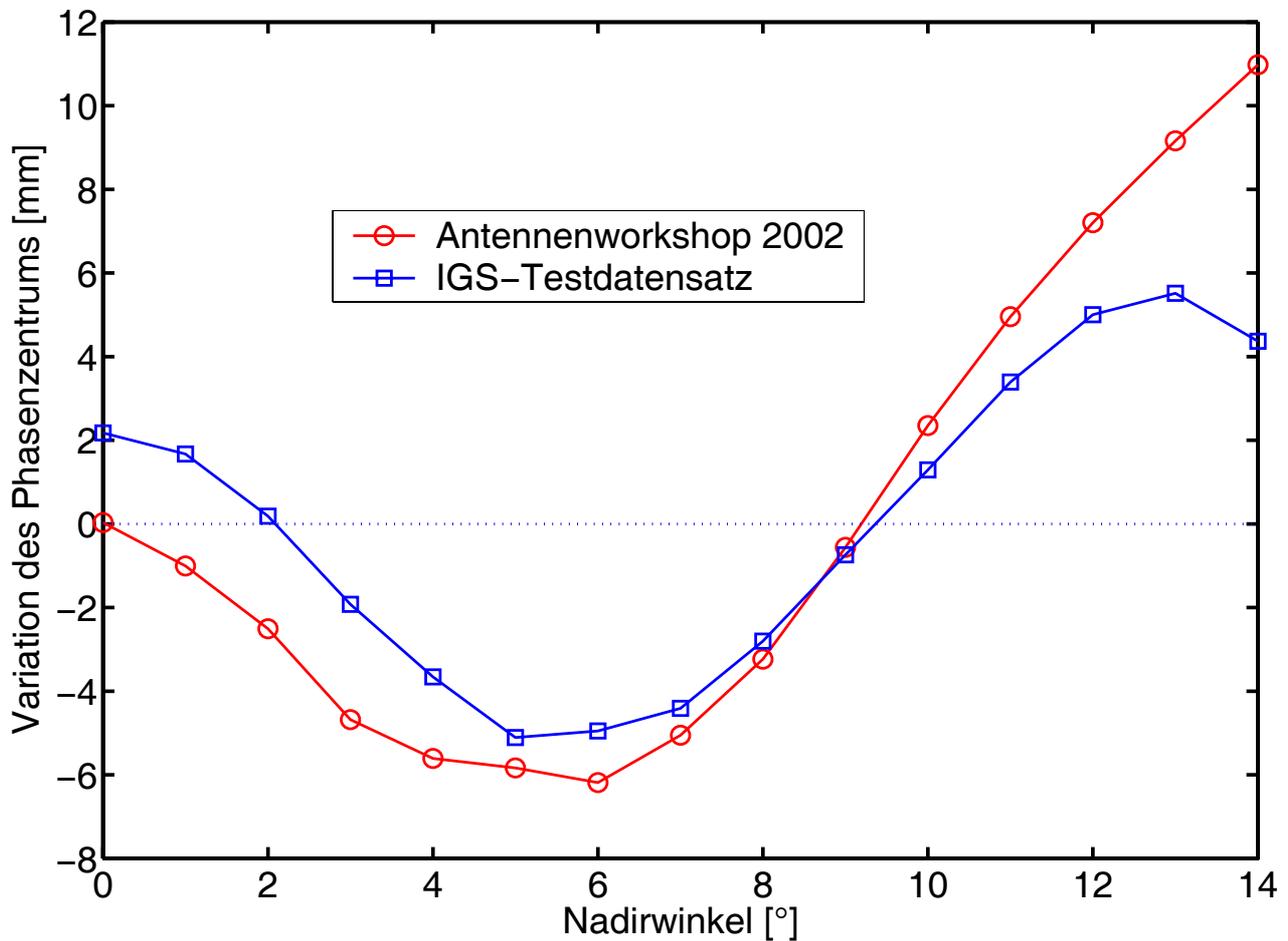
## Offset-Korrektur infolge PCV-Schätzung



# PCVs für IGS-Testdatensatz



# Differenz zwischen Block II/IIA und Block IIR



- Daten von ca. 150 weltweit verteilten IGS-Stationen
- Auswertung mit Hilfe der Berner Software
- Berechnung von Tageslösungen
- verwendete PCVs:
  - relativ: offizieller IGS-Satz *igs\_01.pcv*
  - absolut: IGS-Testdatensatz *pcv\_abs\_proposed11.tst*

## Einfluß auf Troposphärenparameter

Troposphärische Verzögerung in Zenitrichtung:

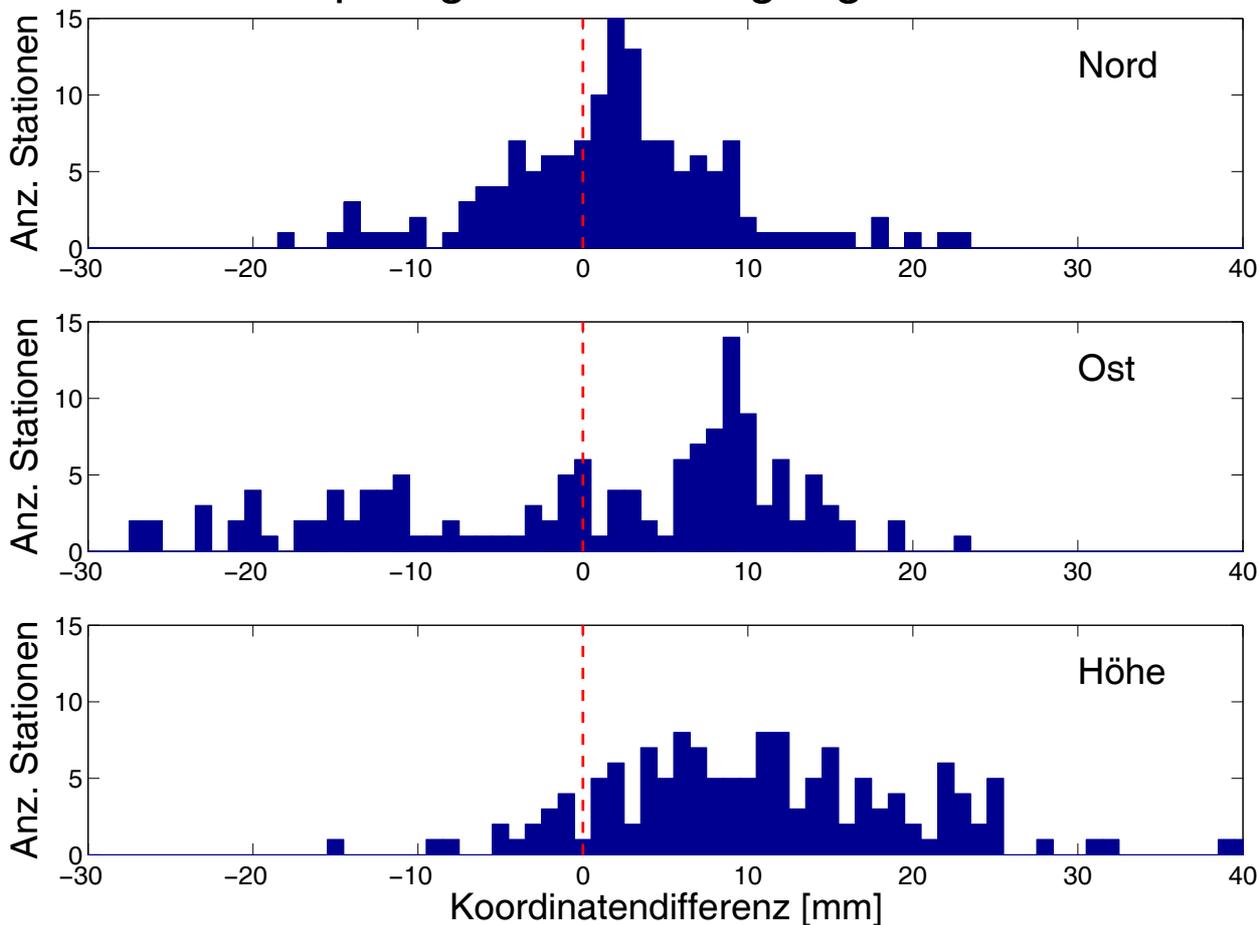
➔ Abnahme des Schätzwertes um 5-10 mm

Vergleich mit Troposphärenparametern aus VLBI:

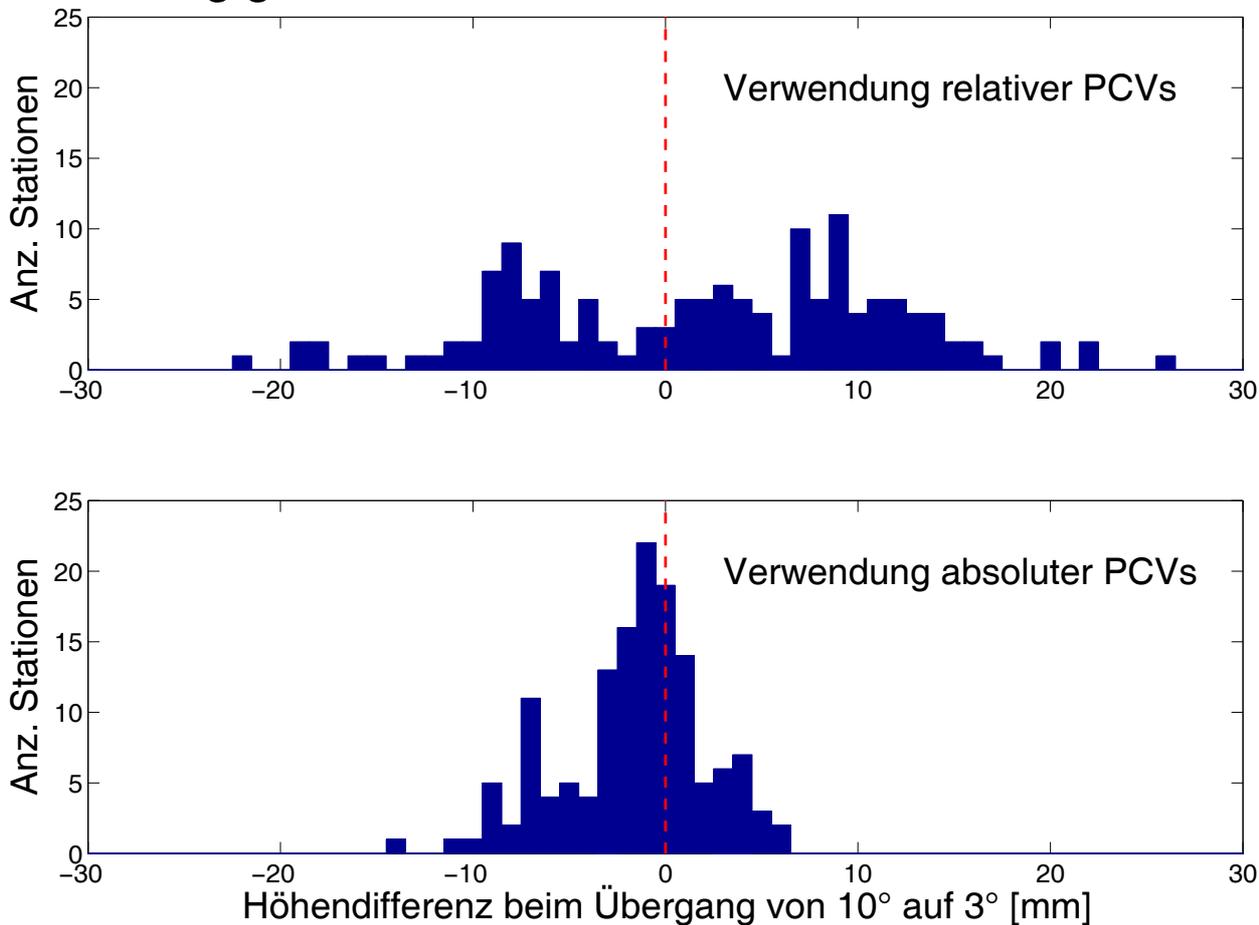
- Tabelle zeigt die Differenz zwischen GPS und VLBI [mm]
- theoretische Differenz infolge des jeweiligen Höhenunterschieds zwischen den einzelnen Antennen:  $\Delta h = 10 \text{ m} \rightarrow \delta\rho_{trop} = 3 \text{ mm}$
- GPS-Lösungen mit einem elevation cut-off von  $3^\circ$

	ALGO	FAIR	HRAO	KOKB	NYAL	ONSA	WEST	WTZR
theoret. Differenz	6.9	3.9	0.5	2.8	0.9	4.1	0.5	0.9
mit relativen PCVs	13.2	5.8	6.8	18.6	2.3	3.6	12.2	5.0
mit absoluten PCVs	5.1	-1.3	1.0	9.3	-2.1	-2.3	2.0	-0.7

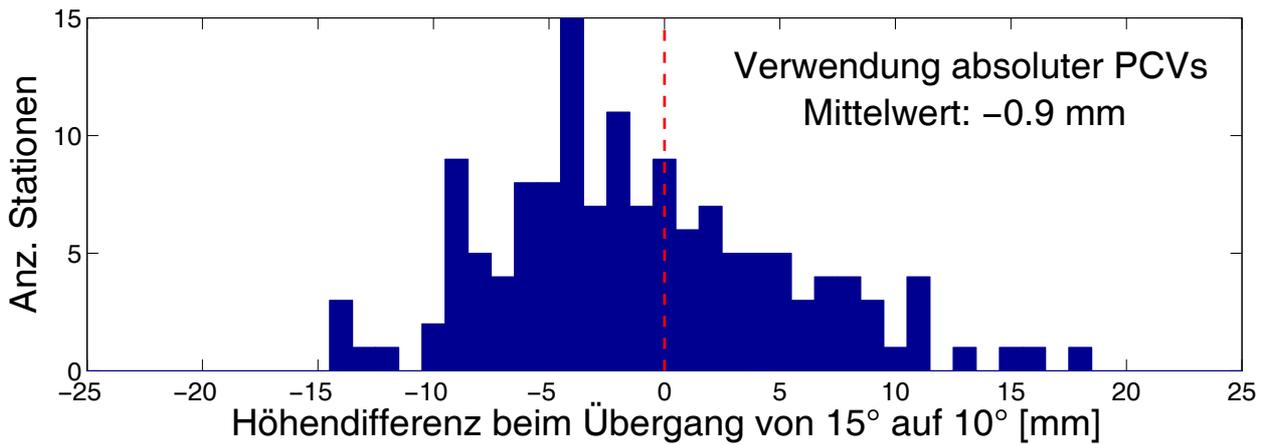
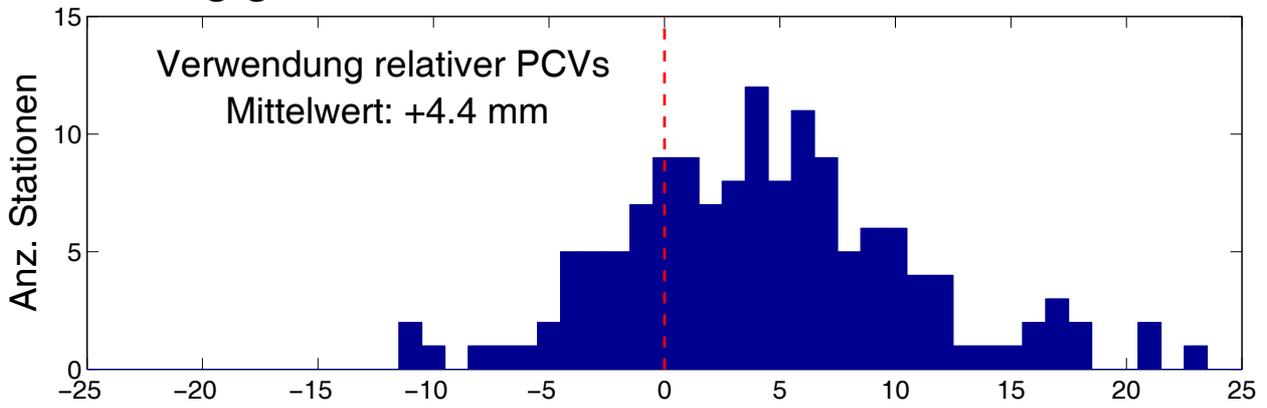
# Koordinatensprünge beim Übergang auf absolute PCVs



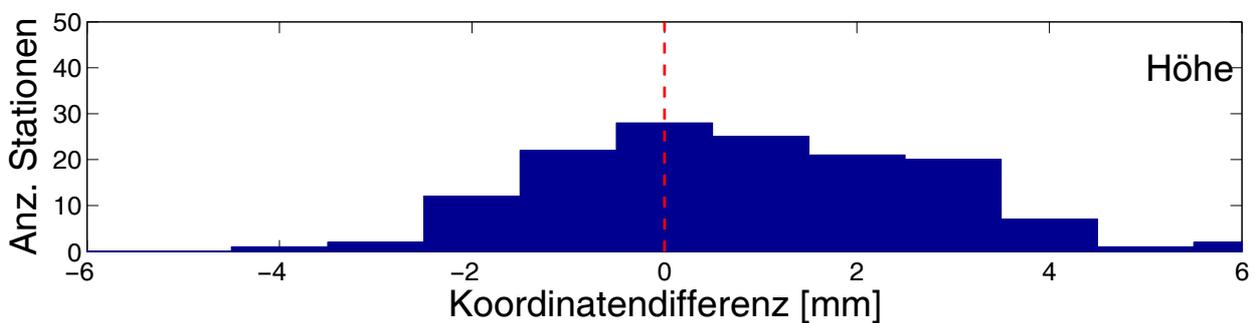
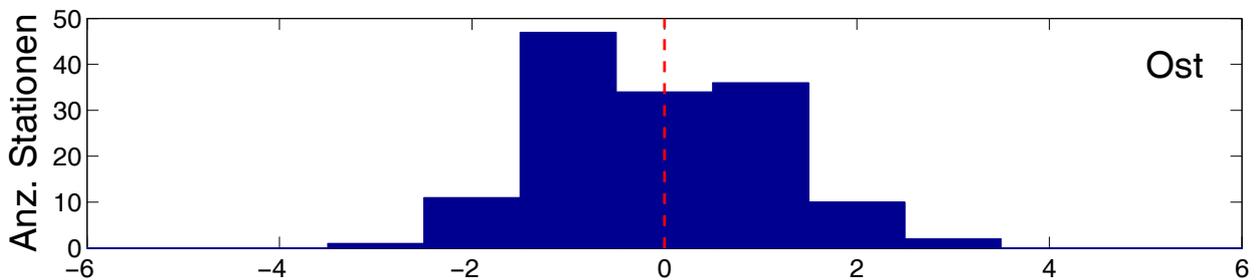
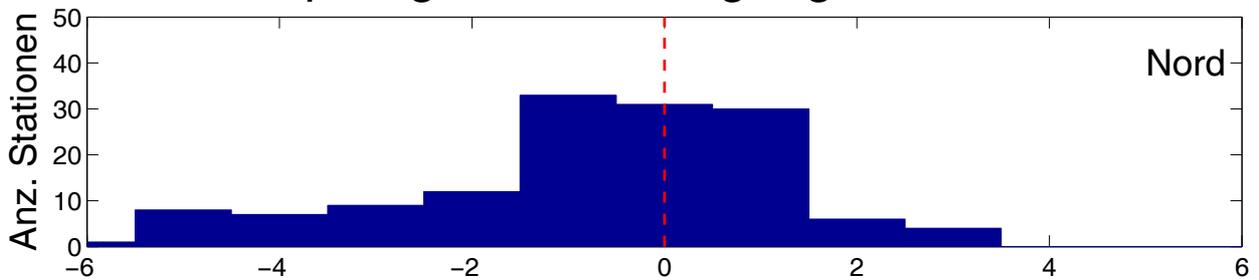
# Abhängigkeit der Stationshöhe vom Elevation Cut-off



# Abhängigkeit der Stationshöhe vom Elevation Cut-off



# Koordinatensprünge beim Übergang auf azimutabh. PCVs



---

## Zusammenfassung

---

- Korrektur der Satelliten-Offsets um ca. +1,30 m:
  - möglichst „flache“ PCV-Kurven
  - Möglichkeit, nur Satelliten-Offsets zu verwenden (bei regionalen Basislinien)
- bei Einführung der absoluten PCVs:
  - bessere Übereinstimmung mit Troposphärenresultaten aus VLBI
  - Koordinatensprünge von bis zu 3 cm
  - geringere Abhängigkeit der Resultate vom *elevation cut-off*
- Verwendung von GPS-Beobachtungen unterhalb einer Elevation von  $10^\circ$  erfordert absolute PCVs
- Azimutabhängige Empfänger-PCVs nur bei hohen Genauigkeitsanforderungen erforderlich (bei Verwendung geodätischer Antennen)

---

# Analyse umfangreicher Messreihen von GPS Antennen PCV aus absoluten Roboter-Feldkalibrierungen seit Januar 2000

Gerhard Wübbena, Martin Schmitz, Gerald Boettcher  
*Geo++®*  
*Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und  
navigatorische Technologien mbH*  
D-30827 Garbsen, Germany  
<http://www.geopp.de>

---

## Inhalt

- Datengrundlage Antennenkalibrierungsdatenbank  
Geo++® GNPCVDB
- Vergleiche von absoluten Antennenkalibrierungen
  - Offsets
  - Systematiken, Ausreißer
  - Einfluss von Dome-Konstruktionen
  - Beurteilung von Antennentypmittel
- Wiederholbarkeit und Zeitverhalten
- Zusammenfassung

# Antennenkalibrierungsdatenbank (Geo++<sup>®</sup> GNPCVDB)

## Absolute PCV Feldkalibrierung

- operationelles und hoch genaues Echtzeitverfahren
- Feldmessungen
- kalibrierter Roboter
- automatisches Messprogramm
- vollständige/redundante Abdeckung der Antennen-Hemisphäre mit PCV Beobachtungen
- multipath frei durch Trennung von PCV und MP
- absolute stationsunabhängige PCV
- hochaufgelöste präzise PCV
  - Std.abw. L1, L2 PCV: 0.2 mm bis 0.4 mm
  - Wiederholbarkeit: 1 mm im Mittel, außer Horizont



# Geo++<sup>®</sup> GNPCVDB - Antennenkalibrierungsdatenbank -



- Typmittel absolut kalibrierter Antennen
  - strenge Ausgleichung mit vollständiger Varianz/Kovarianzmatrix der individuellen Kalibrierungen
- Umfang (Jan. 2000 - Okt. 2003)
  - **95** verschiedene Antennentypen
    - **593** individuell kalibrierte Antennen
    - **3194** individuelle Kalibrierungen
- Zugang
  - über Internet: <http://gnpcvdb.geopp.de/>
  - freier Zugang zu Typbeschreibungen, Bilder und graphischen Darstellungen der PCV
  - kostenpflichtige Lizenz für vollständigen Zugang und Gebrauch absoluter Antennentypmittel (125,- EUR)

5. GPS-Antennen Workshop, 3. November 2003, Frankfurt/Main

© 2003 Geo++<sup>®</sup> GmbH

## Geo++<sup>®</sup> GNPCVDB Zugang



Geo++ GNPCVDB Antenna Database

TPSMGA2  
Antenna Type Azimuthal PCV L0: 1 Antennas, 6 Calibrations

Authentication

Username: boertcher  
Password: [REDACTED]

NetScape  
Absolute Antenna Calibration  
(Characteristics of Antenna Type)

Method  
Geo++ GNPCV Real-Time Calibration

Antenna Data  
Manufacturer: Topcon Positioning Systems, Inc.  
Antenna Type: Dual Frequency GPS+ GLO/NASS Antenna, MSM2  
Product Number: Dual Frequency GPS+ GLO/NASS Antenna, MSM2  
Antenna Number: [REDACTED]  
ICG-Name: TPSMGA2

Antenna Reference Point (ARP)  
Position: [REDACTED]  
Reference: [REDACTED]  
Vertical: [REDACTED]  
Note: ARP is not lowest point of antenna body!

North Mark  
[REDACTED]

5. GPS-Antennen Workshop, 3. November 2003, Frankfurt/Main

© 2003 Geo++<sup>®</sup> GmbH

# Namenskonvention für Antennen

---



- maßgebend International GPS Service (IGS): [rcvr\\_ant.tab](#)
  - IGS Namenskonvention
- neue Antennentypen
  - Vorschlag an das IGS
  - Übernahme/Änderung vom IGS
    - evtl. Anpassung der Bezeichnung
    - Historie der Bezeichnungen
- GPPNULLANTENNA vom IGS aufgenommen (Jan. 2003)



---

## Vergleiche von absoluten Antennenkalibrierungen

# Angewandte Vergleichsverfahren



- **direkte** Differenz absoluter PCV (Zenit PCV=0)
- **Offsetvergleich**
  - Offsets – „mittlerer Einfluss“ der PCV
  - Darstellung in 2D Grafiken
- **elevationsabhängiger Vergleich**
  - Umrechnung auf einheitlichen Bezugspunkt (ARP) im Vollmodell (wandelt Lageoffsets in azimutale PCV)
  - Mittelbildung über die Elevation
  - Darstellung in 2D Grafiken
- **azimut-** und **elevationsabhängiger Vergleich** (Vollmodell)
  - Umrechnung auf einen Bezugspunkt (ARP)
  - Darstellung in 3D Grafiken

# PCV beeinflussende Faktoren

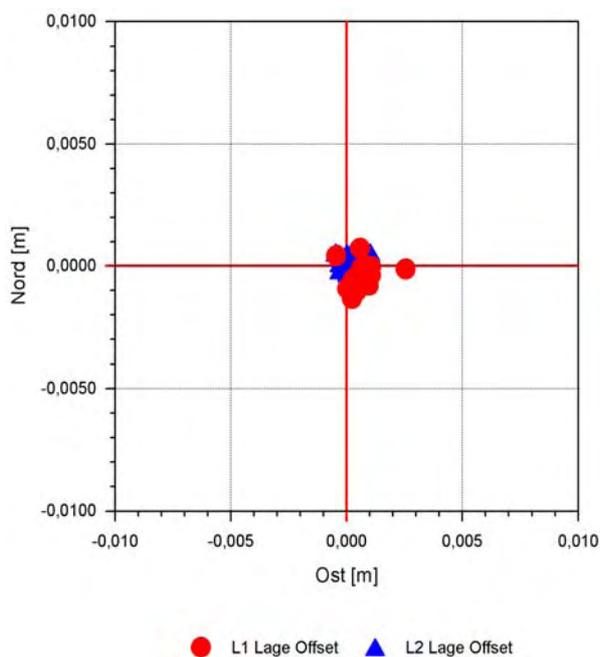


- Form der Antennen
- Durchmesser von Antennen
- Extra Grundplatten
- Dome-Konstruktion (Radome)
- Choke Ring
- Antennenpatch
- Nahfeld
- ...





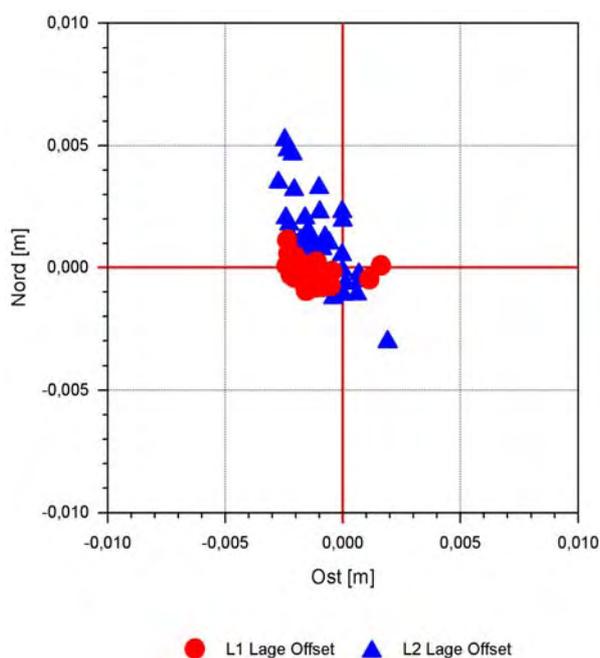
## Absolute Offsets LEIAT503 LEIC



- geodätische Antenne
  - Choke Ring
  - Dome
- **L1** und **L2** Lageoffsets
  - Streuung ca. 1 mm
  - 1 Ausreißer
  - systematischer Effekt



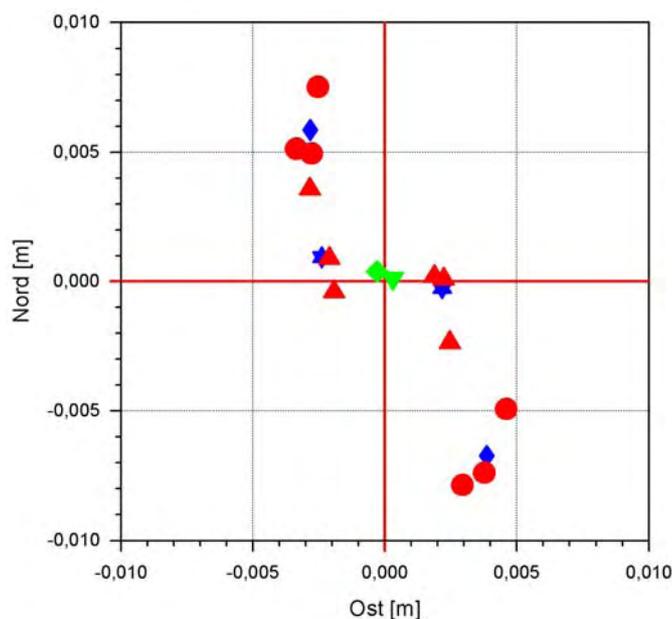
## Absolute Offsets LEIAT502



- Rover Antenne
  - klein
  - leicht
- **L1** und **L2** Lageoffset
  - Streuung 3 mm
  - mehrere Ausreißer
  - systematischer Effekt



# Absolute Offsets SPP571212426 SPKE

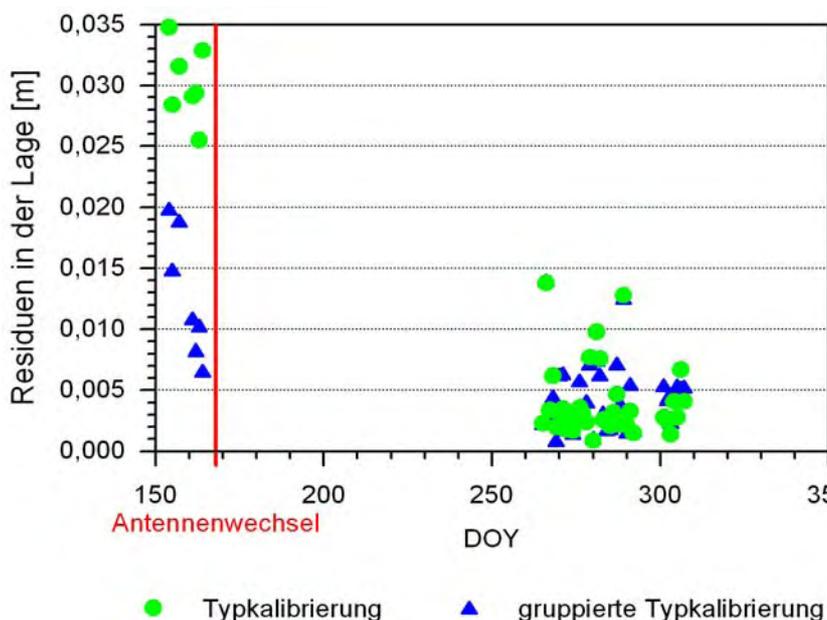


- Individuell - L1    ▼ TYP L1    ◆ Gruppiert - L1
- ▲ Individuell - L2    ◆ TYP L2    ★ Gruppiert - L2

- geodätische Antenne
  - Choke Ring
  - Dome
- **L1** und **L2** Lageoffset
  - bis zu 8 mm
  - systematische Gruppenbildung
- **Typmittel** passt nicht zu individuellen Antennen
- **Gruppierung** der Antennen zur Berechnung unterschiedlicher Gruppen-Typmittel



# Auswirkung im Koordinatenraum



- SAPOS Station
- 8-10h Lösungen an mehreren Tagen
- korrigiert mit **Typkalibrierung** SPP571212426\_SPKE
- Koordinatensprung von 3 cm
  - **Antennenwechsel**
  - **gruppiertes Typmittel**
  - deutliche Verbesserung
  - Restsystematik bleibt

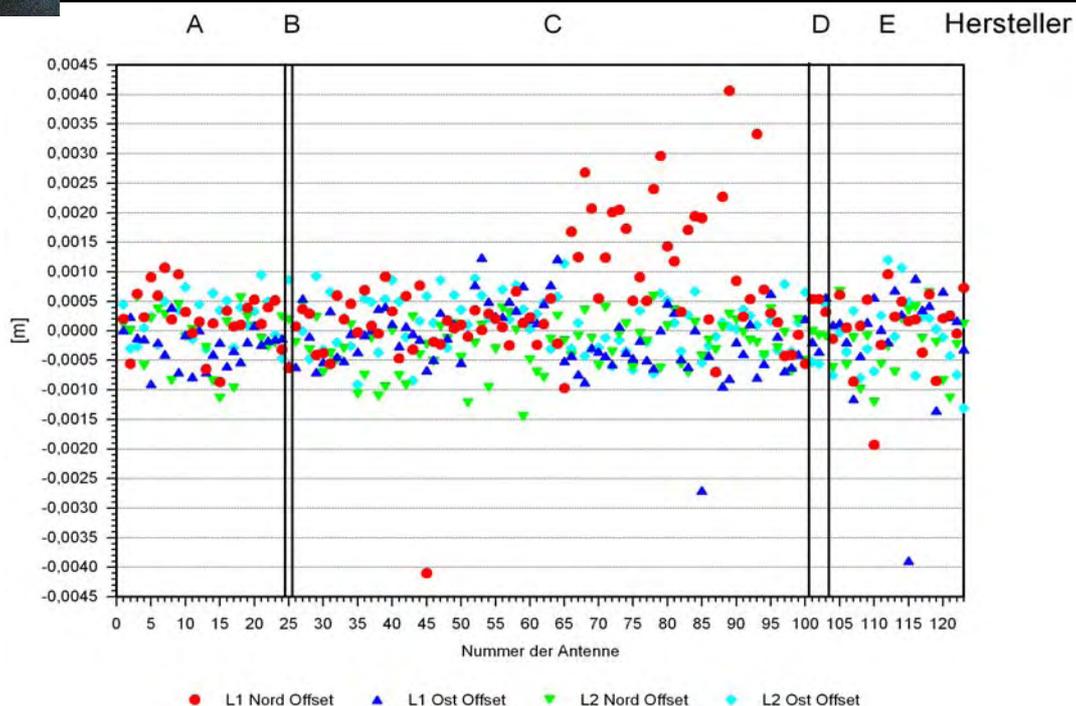
# „Dorne Margoline Typ“



- gilt als **hochwertige** geodätische Antenne
- Referenzantenne für relative Kalibrierungen
- von unterschiedlichen Herstellern vertrieben
- herstellerabhängig
  - Antennenvorverstärker
  - Choke Ring
  - Dome-Konstruktion



## Absolute Lage-Offsets „Dorne Margoline Typ“



Streuung bis 4 mm, Ausreißer, Zunahme der Streuung

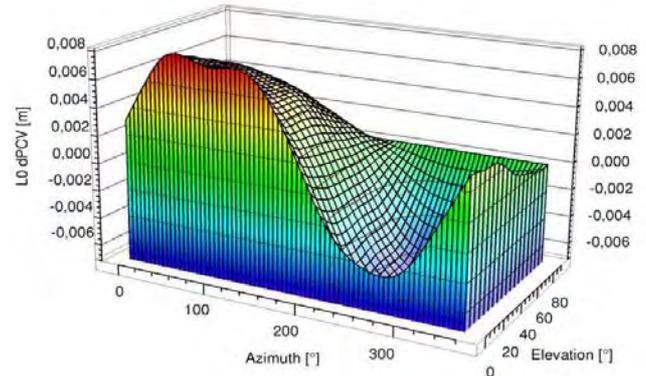


## Beispiel individueller PCV Differenz



- “Dorne Margolin Typ” Choke Ring Antenne
- hochwertige geodätische Antenne
- Beispiel von Ausreißern
  - vorrangig L1 Ost-Offset
  - Effekt für absolute L0 PCV -6 bis 8 mm
- unterschiedliche Hersteller
  - 2 Ausreißer bei 75 Antennen
  - 0 Ausreißer bei 24 Antennen
  - 1 Ausreißer bei 20 Antennen
  - 0 Ausreißer bei 3 Antennen
  - 0 Ausreißer bei 1 Antennen

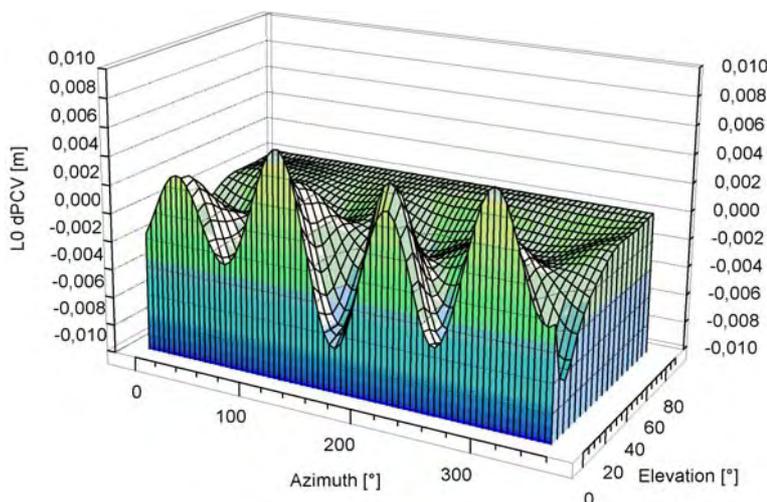
Typ -Individueller Offset	dNord [mm]	dOst [mm]	dHöhe [mm]
L1	-0.2	-4.9	-1.0
L2	+0.1	+0.7	-0.1
L0	-0.7	-13.6	-2.4



## Einfluss eines individuellen Domes

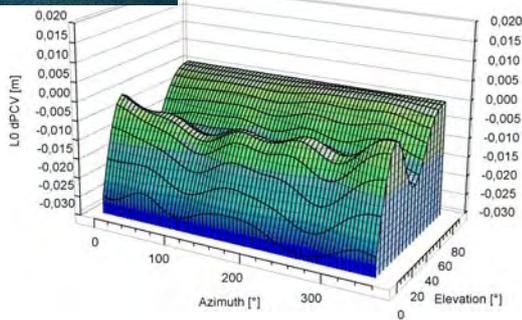


- BEVA Dome mit „Dorne Margoline Typ“ Antenne
- Bauweise ähnlich dem „Grazer Dome“ (GRAZ)
- unterschiedliche Materiallagen, Verklebung, Nester, etc. erkennbar

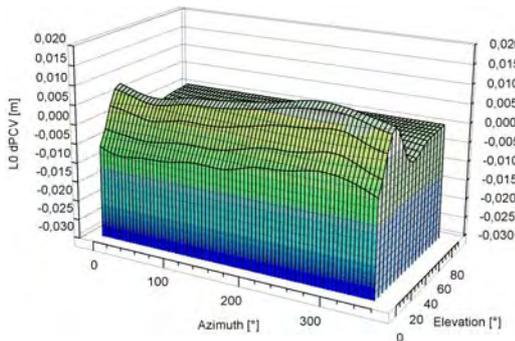




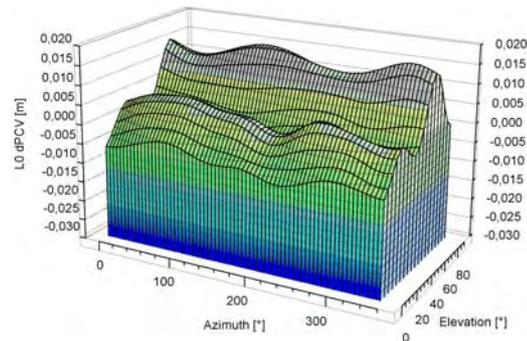
## PCV Differenzen mit TCWD Dome



TRM23903.00 ± TCWD



TRM29659.00 ± TCWD



TRM33429.00+GP ± TCWD

- verschiedene Antennentypen mit gleichen Dome TCWD
- DPCV: 20-30 mm
- stark unterschiedlicher Einfluss für verschiedene Antennen

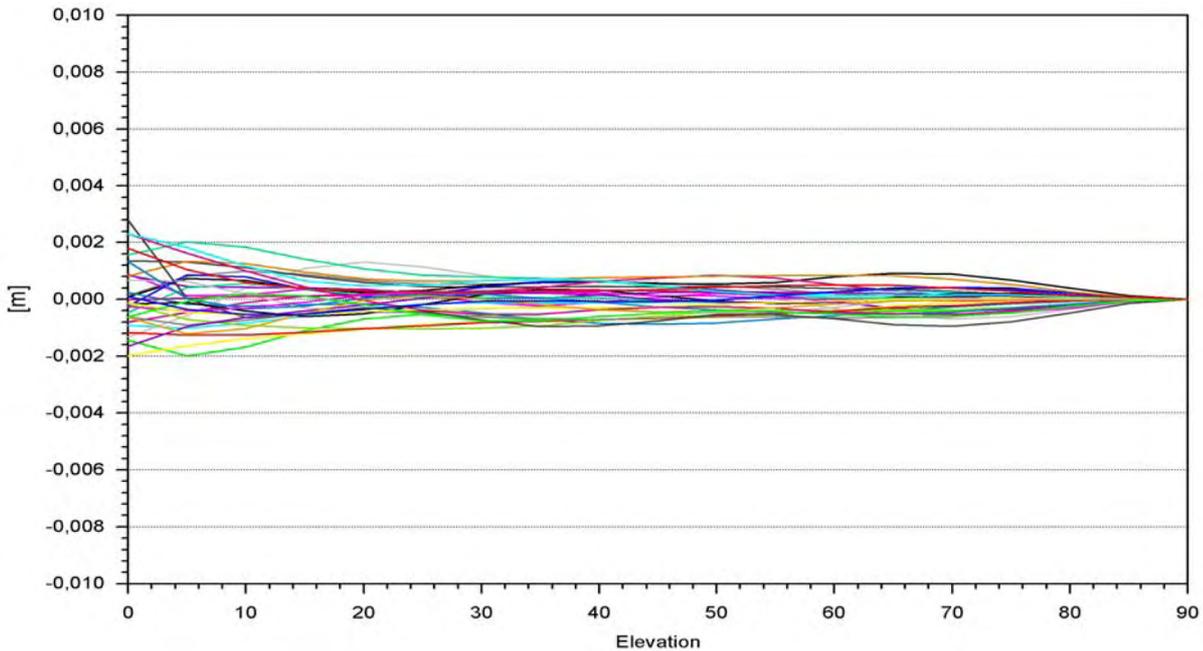
## Beurteilung von Antennentypmittel



- elevationsabhängige Vergleiche
- individuelle Kalibrierung zum Typmittel
- Linearkombination L0
  - „ionosphärenfreies Signal“
  - PCV Effekt repräsentativ für die meisten Anwendungen
  - oft auch als LC oder L3 bezeichnet



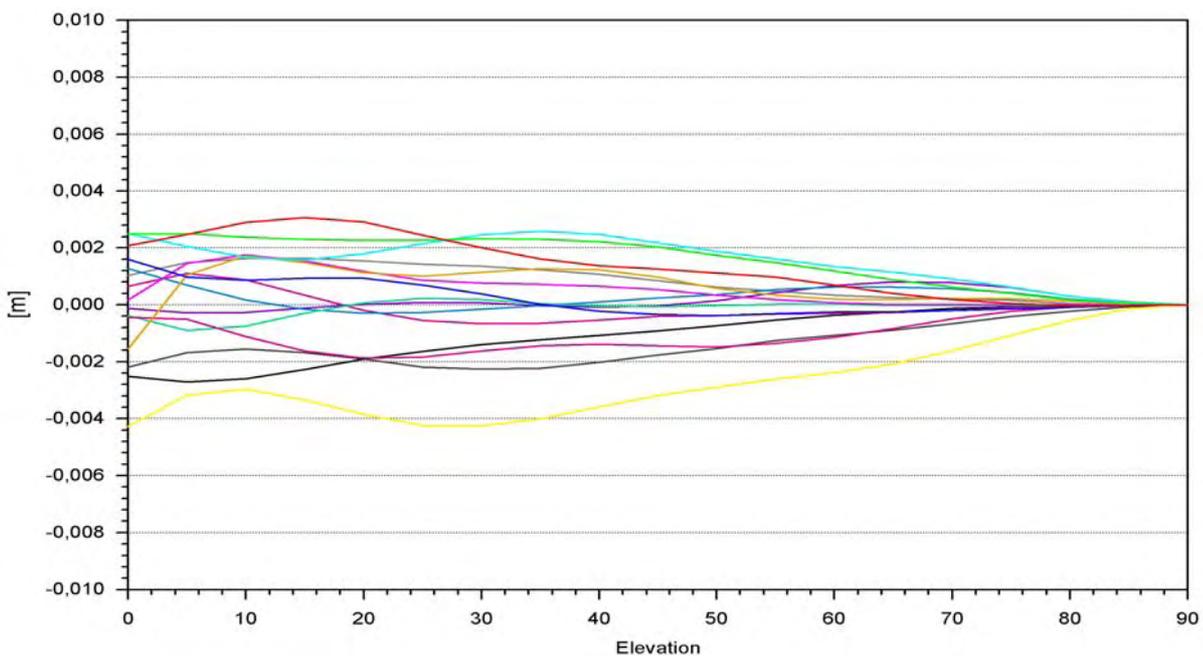
## LEIAT503 LEIC - DPCV L0



- Differenzen individuell/Typ **besser 2mm** innerhalb der Bauserie



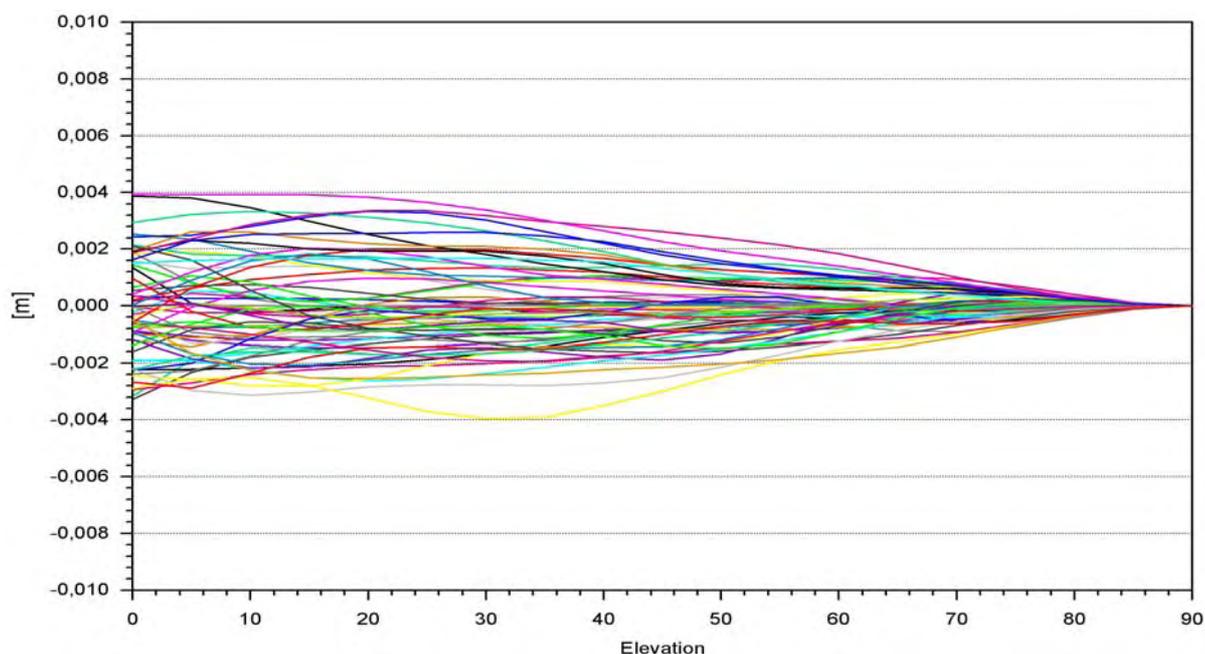
## TPSCR3 GGD CONE - DPCV L0



- Differenzen individuell/Typ **2-3mm** innerhalb der Bauserie



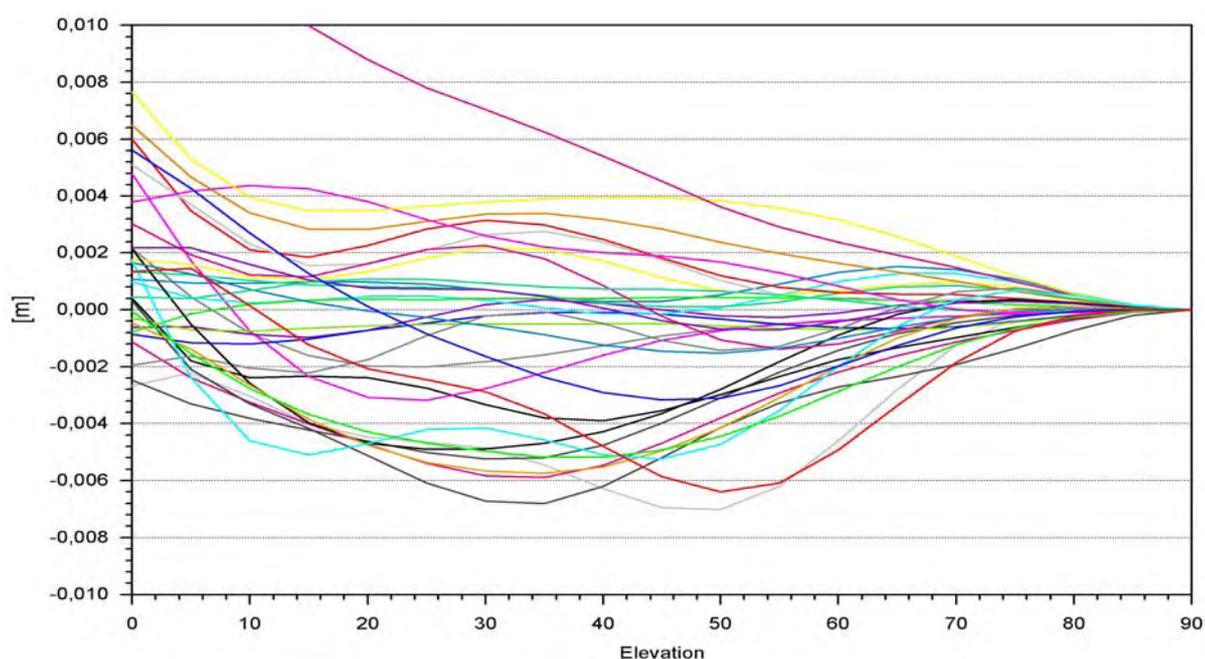
## LEIAT504 LEIS - DPCV L0 („Dorne Margolin Typ“)



- Differenzen individuell/Typ **3-4mm** innerhalb der Bauserie



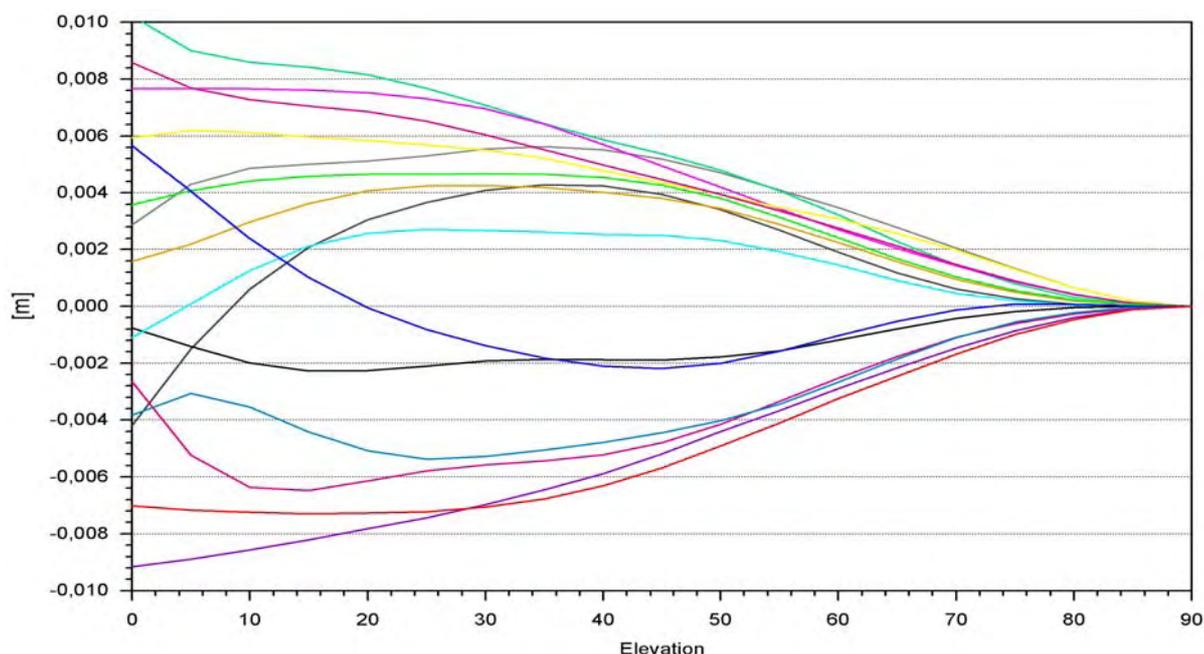
## LEIAT502 - DPCV L0



- Differenzen individuell/Typ **bis zu 7mm** innerhalb der Bauserie



## JPSREGANT DD E - DPCV L0



- Differenzen individuell/Typ **bis zu 8mm** innerhalb der Bauserie
- Gruppenbildung, laut Hersteller Antenne verändert

## Ableitung einer Kenngröße für Antennenphasenvariationen (APV)



- **Phasenvariationen-Standardabweichung (PVS)**
  - quadratische Mittel der L0 PCV *ohne* Offset
    - Maß für die Punktförmigkeit
- **Typvariation der Phasenvariationen-Standardabweichung (TPVS)**
  - quadratische Mittel der L0 PCV Differenzen der individuellen Antennen zum Typmittel
    - Maß für die Streuung innerhalb des Antennentyps

Antennentyp	PVS	TPVS
JPSREGANT_DD_E	6.0 mm	4.5 mm
LEAT502	2.7 mm	4.5 mm
LEIAT503_LEIC	5.9 mm	1.2 mm
LEIAT504_LEIS	9.8 mm	2.1 mm
TPSCR3_GGD_CONE	10.9 mm	1.4 mm

# Individuelle oder Typmittel PCV Korrektion

---



- signifikante Differenzen innerhalb eines Antennentyps festgestellt
  - Herstellerserien
  - Fehler bei der Montage
- Ausreißer selbst bei “**Dorne Margolin Typ**” Choke Ring Antenne
- für **präzise** geodätische Anwendungen individuelle Kalibrierung erforderlich
- Typmittel angemessen für einfache Anwendungen

*Gewissheit  
über PCV einer Antenne gibt  
nur die individuelle Kalibrierung*



---

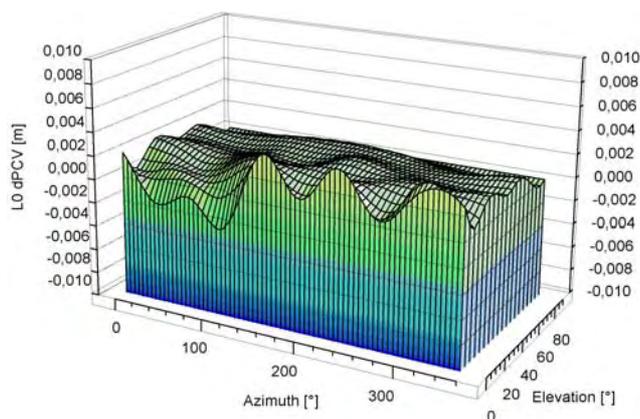
Wiederholbarkeit  
und  
Zeitverhalten



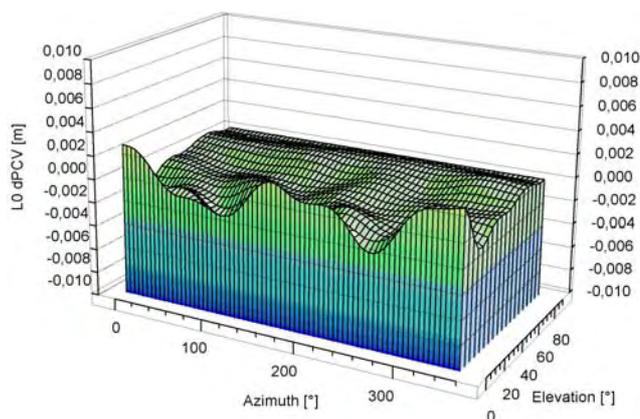
## Wiederholbarkeit ASH700936D\_M SNOW



- nach 2 Jahren wiederholbar
- Differenzen L0 PCV im Mittel 1-2 mm, max. 4 mm



nach 2 Monaten



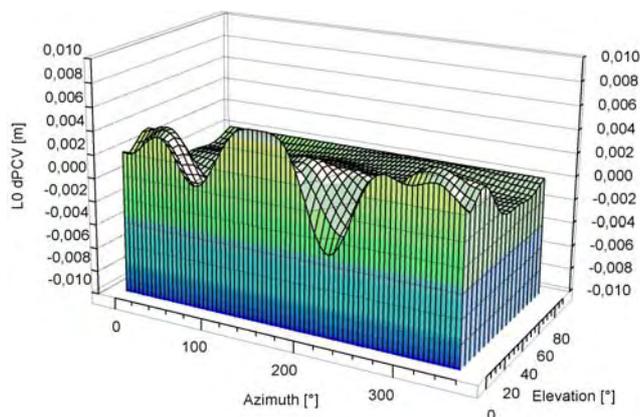
nach 26 Monaten



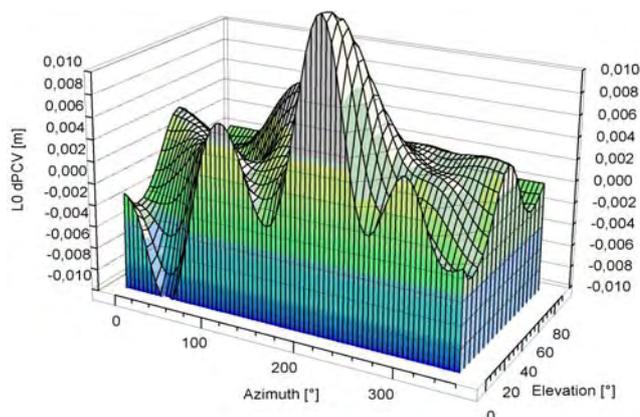
## Wiederholbarkeit TRM39105.00



- nach 2 Jahren nicht wiederholbar
- Differenzen L0 PCV
  - zeitnah 2-3 mm, max. 5 mm
  - zeitfern 6-7 mm, max. 17 mm



nach 1 Woche



nach 26 Monaten

# Stabilität der Antennen PCV

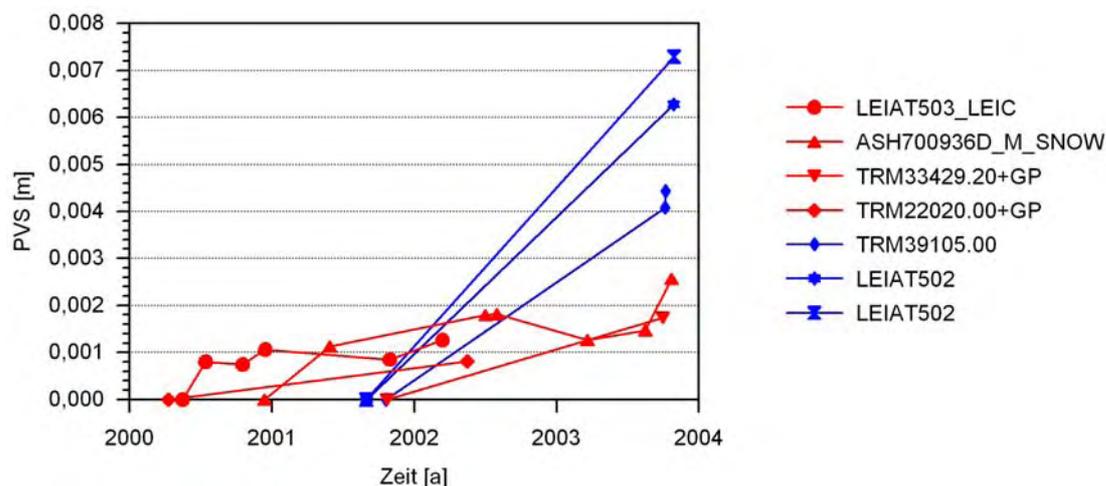


- abhängig von Antennentyp
- geodätische Antennen besser als Rover Antennen
- Differenzen über 20 mm für L0 PCV beobachtet
- mögliche Ursachen
  - Alterung
  - Temperatureinfluss

# Zeitliche Veränderung der PV



- Vergleich der PV individueller Antennen zu unterschiedlichen Kalibrierungszeitpunkten
- PVS bezogen auf Erstkalibrierung

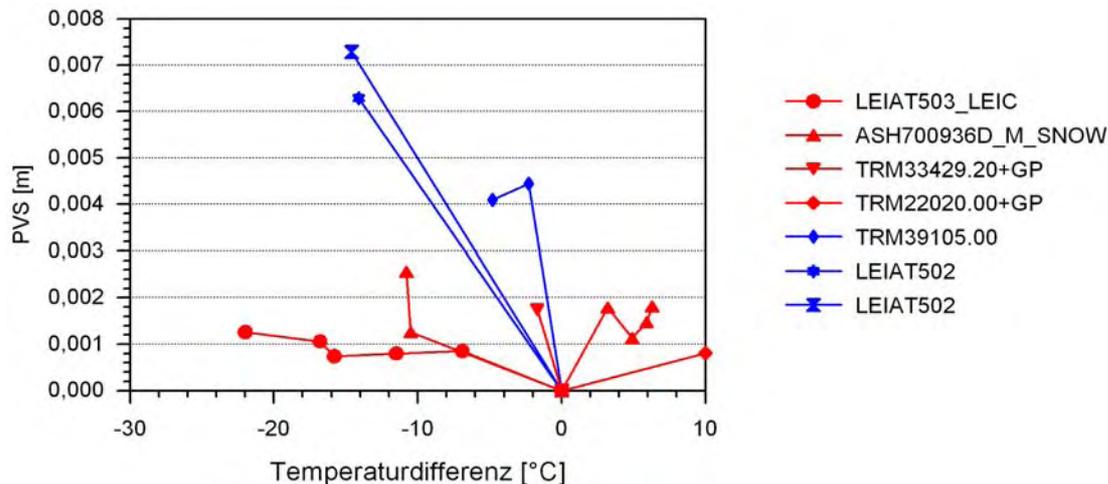


⇒ **geodätische** Antennen stabiler als **Rover** Antennen

# Veränderung der PV durch Temperaturdifferenzen



- Vergleich der PV individueller Antennen bei unterschiedlichen Temperaturen (Tagesmitteltemperatur in Hannover-Herrenhausen)
- PVS bezogen auf Erstkalibrierung



⇒ keine signifikante Abhängigkeit nachweisbar, zu geringer Stichprobenumfang

## Zusammenfassung

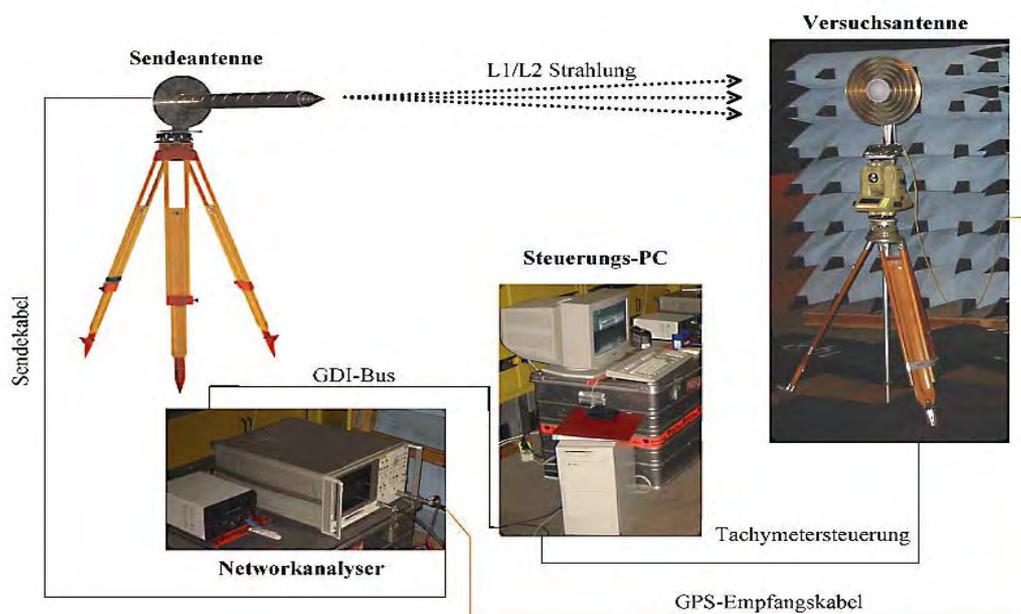


- **Geo++<sup>®</sup> GNPCVDB** stellt Typmittel absoluter Antennenkalibrierungen bereit (unterschiedliche Formate, Niveau)
- für **präzise** Anwendungen sollten **individuelle** Kalibrierungen genutzt werden
- Ausreißer gibt es bei **allen** Antennentypen
- **Stabilität** von Antennen ist unterschiedlich
- Kenngröße **PVS** für die Punktförmigkeit einer Antenne (**Phasenvariationen-Standardabweichung**)
- Kenngröße **TPVS** für die Streuung innerhalb eines Antennentyps (**Typvariation der Phasenvariationen-Standardabweichung**)

# Laborkalibrierung – Genauigkeitsfragen und Vergleiche mit anderen Verfahren

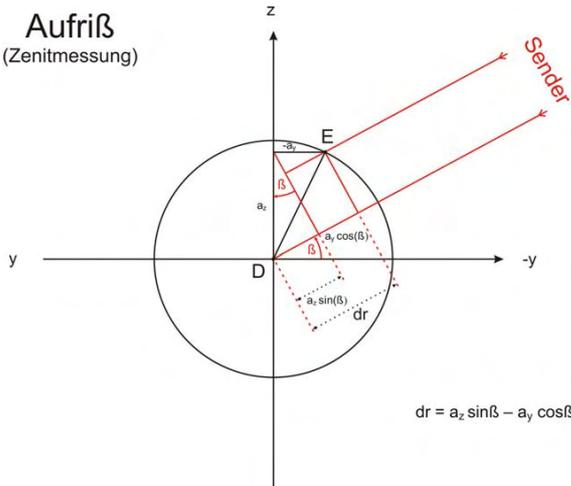
J. Campbell, B. Görres, M. Siemes, J. Wirsch,  
*Geodätisches Institut der Universität Bonn*

M. Becker, *Universität der Bundeswehr, München*

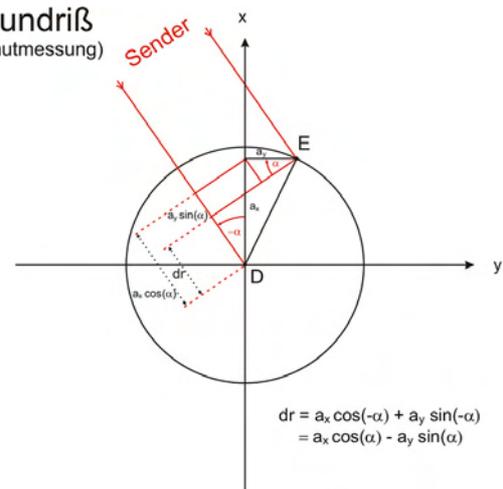


## Versuchsaufbau für Labormessung am EMV-Testzentrum der Bundeswehr in Greding

Aufriß  
(Zenitmessung)



Grundriß  
(Azimutmessung)



**Geometrie der Phasenmessungen im Labor-Aufbau**

**Antennenmodell:**

$$dr(\alpha, \beta) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{r}_0 + \lambda \cdot d\varphi(\alpha, \beta) \quad \text{mit } \mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$$

**Auswertekonzept**

$$dr(\alpha, \beta) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{r}_0 + \lambda \cdot d\varphi(\alpha, \beta) \quad (1)$$

$$dr_i = \mathbf{a} \cdot \mathbf{r}_0 - v_i \quad (1a)$$

wobei  $\sum d\varphi^2 = \sum v_i^2 = \text{Min!}$  im GMM  $\rightarrow$   
 $\sum d\varphi(\alpha, \beta)$  über das Raumwinkelsegment = 0

**Verfahren in drei Schritten:**

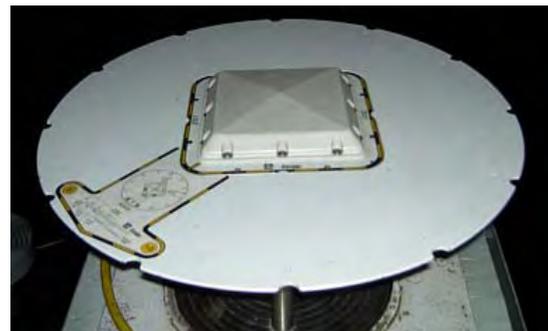
1. Bestimmung des mittleren Phasenzentrums (PCO),
2. Bestimmung eines funktionalen Modells für die PCV:  
 Fourier-Reihe  $dr(\beta) = \sum (a_k \cos \beta + b_k \sin \beta)$ ,  $k = 0, \dots, 3$ , bzw 5
3. Wiederholung von Schritt 1 zur Verifikation der Ergebnisse für die PCO und zur Bestimmung des übrigbleibenden Rauschens bzw. der zugehörigen Standardabweichungen

Antenne	Typen-Nr	Bemerkungen
Leica AT 504		Choke Ring, baugleich mit D/M-T-Antenne
Leica AT 303		modifizierter Choke Ring, mit Radom, baugleich mit AT503
Trimble Compact	22020.00+GP	mit Grundplatte
Trimble Geodetic	14532.00	mit Grundplatte
Trimble Zephyr	41249.00	mit anti-reflex Anstrich (stealth)

Tab.1: Übersicht über die untersuchten Antennen



Leica AT303



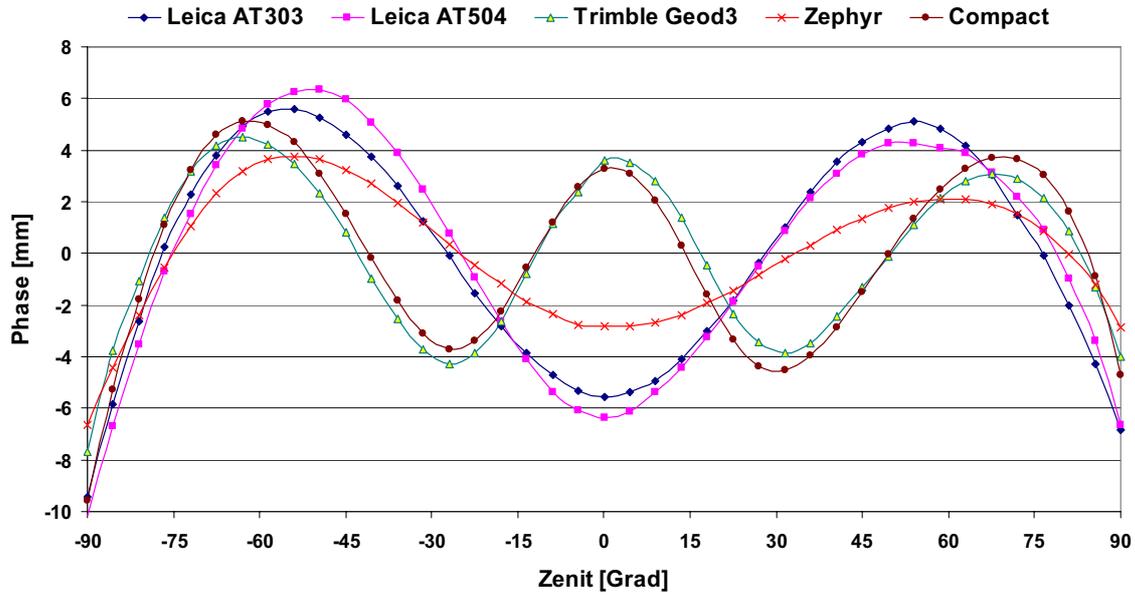
Trimble Compact +GP



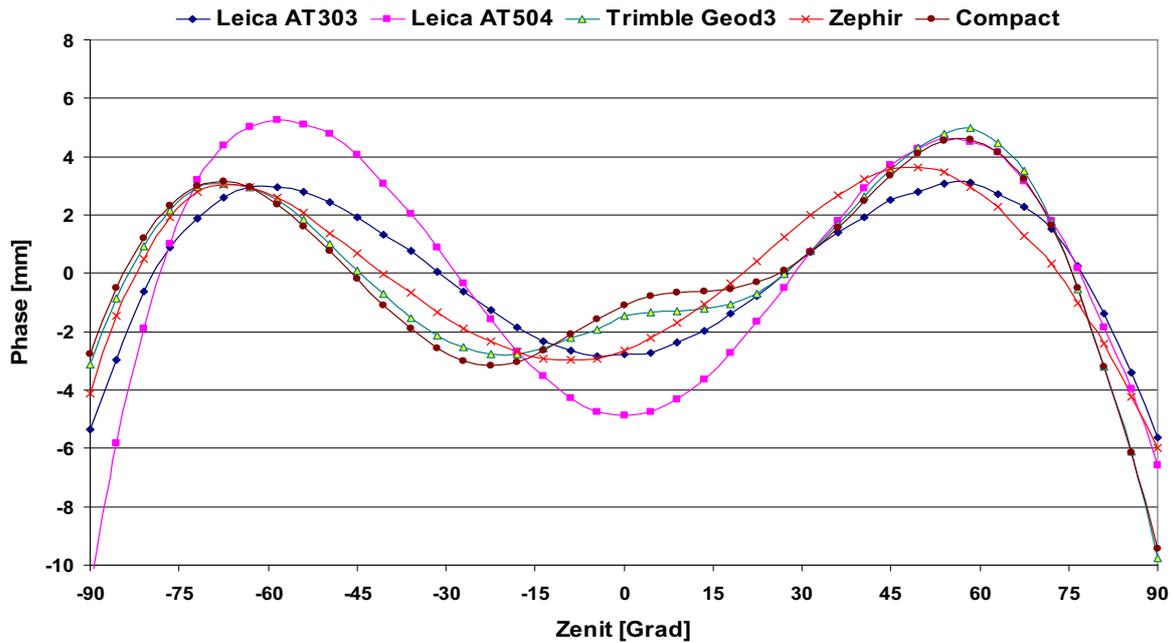
Leica AT504



Trimble Zephyr



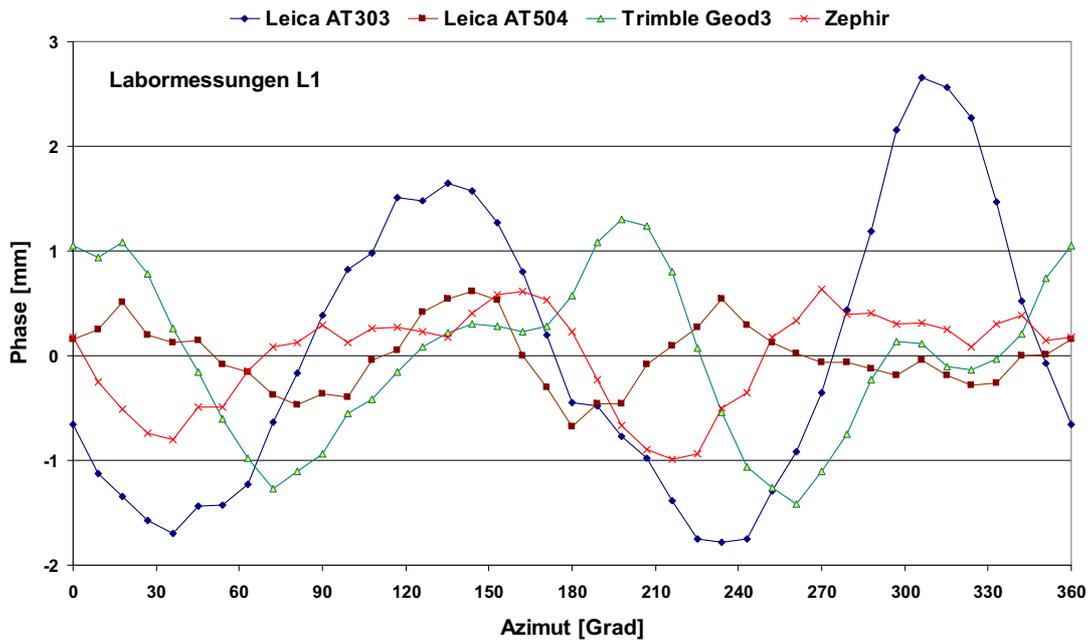
**Laborergebnisse für die elevationsabhängigen PCV – L1**



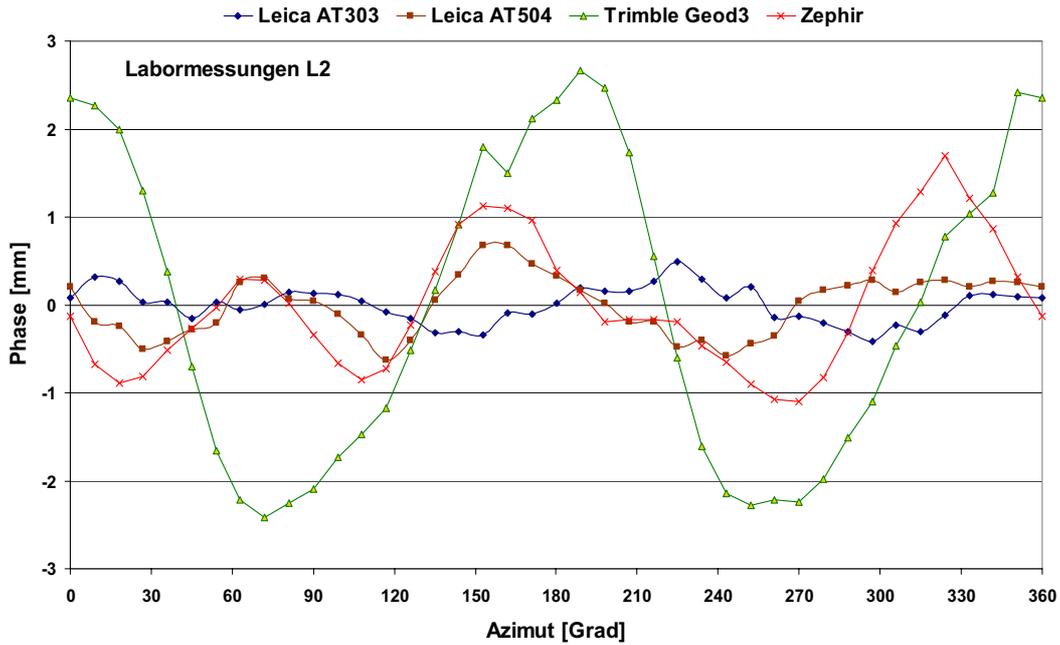
**Laborergebnisse für die elevationsabhängigen PCV – L2**

Antenne		$a_z$	$\sigma_z$	$\sigma_0(1)$	$\sigma_0(3)$
AT504	L1	99,22	0,026	4,6	0,053
	L2	128,07	0,024	4,1	0,049
AT303	L1	69,46	0,027	4,3	0,055
	L2	89,80	0,027	2,5	0,056
TRM Comp	L1	65,14	0,134	3,5	0,275
	L2	70,94	0,040	3,0	0,081
TRM Geod	L1	66,84	0,128	3,1	0,262
	L2	75,26	0,042	3,1	0,086
TRM Zeph	L1	59,19	0,014	2,5	0,028
	L2	62,35	0,022	2,6	0,045

Laboregebnisse für die vertikalen PCO (in mm)



Laboregebnisse für die azimutabhängigen PCV – L1 bei Elevation 12.5 Grad



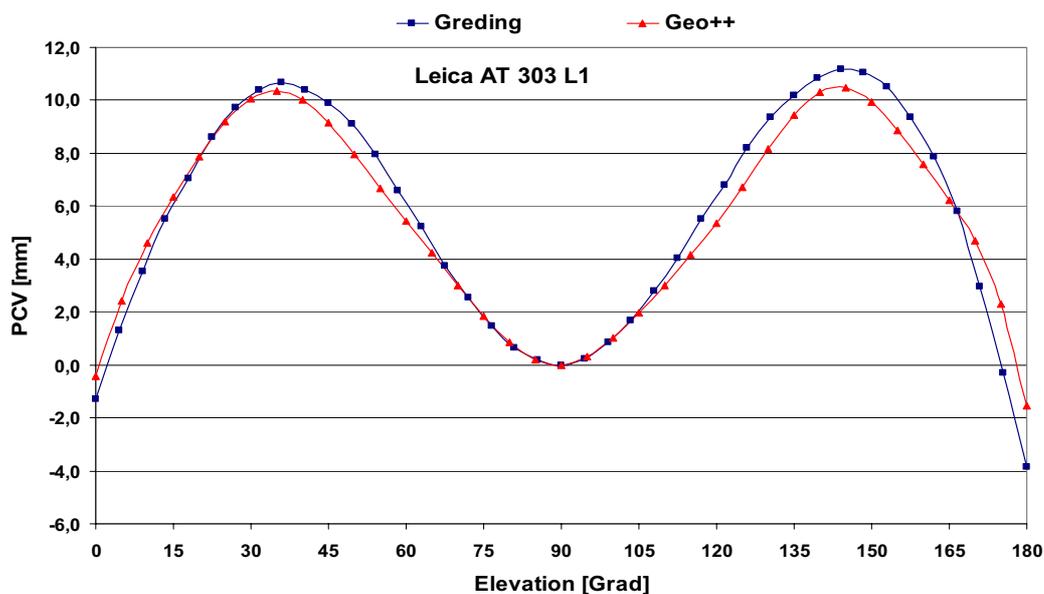
**Laborergebnisse für die azimutabhängigen PCV – L2 bei Elevation 12.5 Grad**

Antenne		$a_x$	$\sigma_x$	$a_y$	$\sigma_y$	$\sigma_0$ (1)	$\sigma_0$ (3)
AT 504	L1	0,27	0,020	- 0,58	0,018	0,32	0,079
	L2	-1,52	0,025	-1,63	0,025	0,35	0,109
AT 303	L1	-1,84	0,033	- 2,22	0,032	1,38	0,139
	L2	-0,12	0,023	- 1,50	0,024	0,22	0,103
TRM Geod	L1	-1,00	0,042	-3,07	0,043	0,80	0,189
	L2	-3,25	0,072	-2,82	0,072	1,81	0,318
TRM Zeph	L1	-0,19	0,022	0,30	0,021	0,47	0,092
	L2	0,03	0,019	0,42	0,020	0,75	0,085

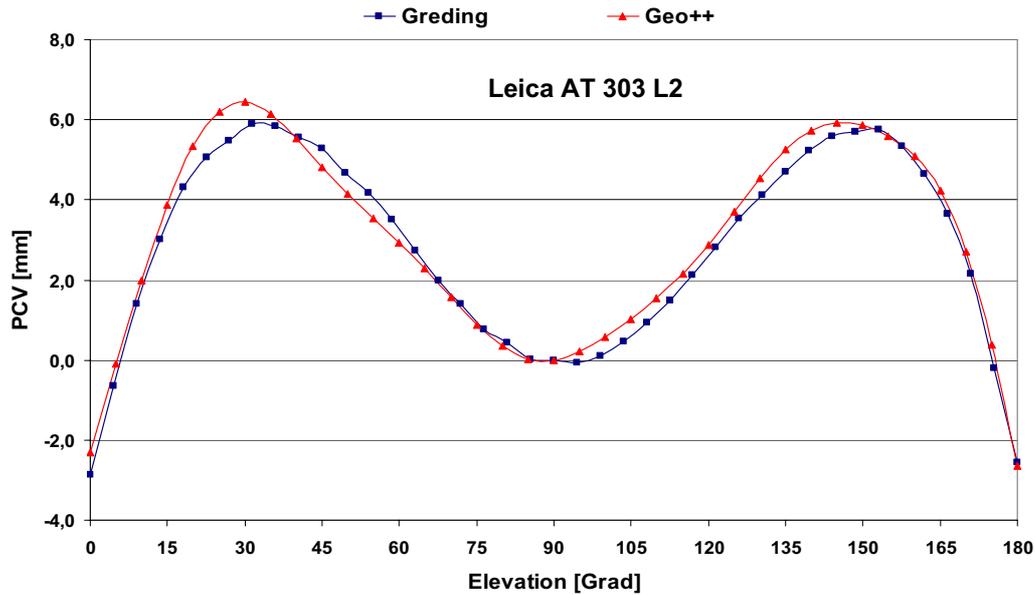
**Laborergebnisse für die horizontalen PCO (in mm)**

Antenne		$a_z$	$\Delta a_z$	$\sigma_0$
AT 504	L1	99,22	4,0	0,51
	L2	128,07	0,5	0,59
AT 303	L1	69,46	-0,3	0,41
	L2	89,80	-0,6	0,16
TRM Comp	L1	65,14	1,5	0,51
	L2	70,94	-5,2	0,78
TRM Geod	L1	66,84	5,1	0,48
	L2	75,26	-1,5	0,71
TRM Zeph	L1	59,19	0,1	0,38
	L2	62,35	-0,2	0,60

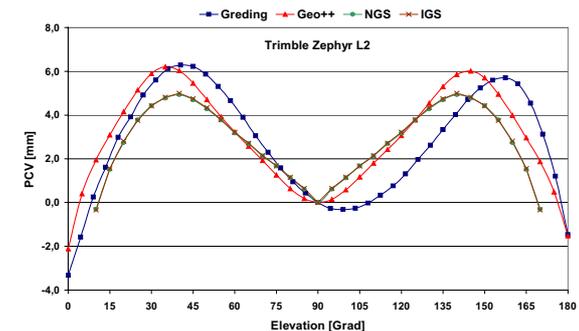
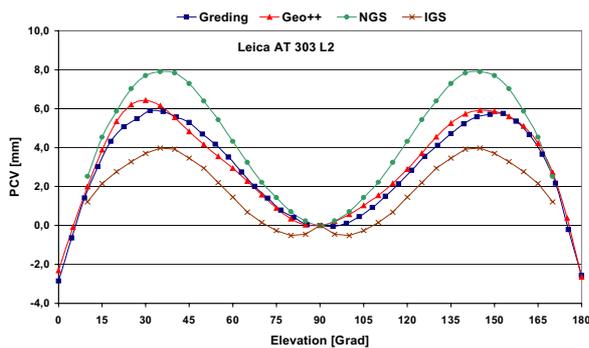
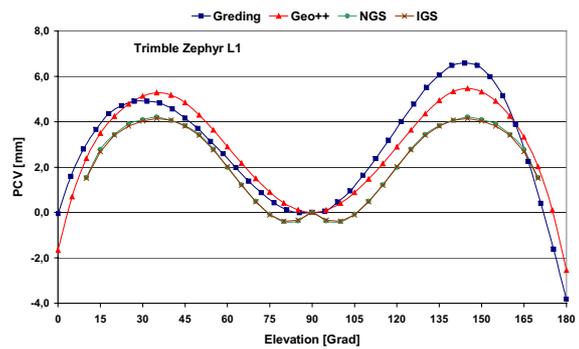
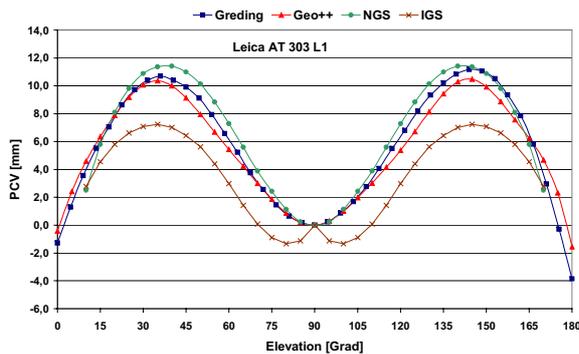
Vergleich der Offset-Parameter und der elevationsabhängigen PCV zwischen Labor (Greding) und abs. Feldverfahren (GEO++)



Vergleich Labormessung (Greding) – Absolutes Feldverfahren (GEO++)  
Leica AT 303 L1 (identische Antenne)

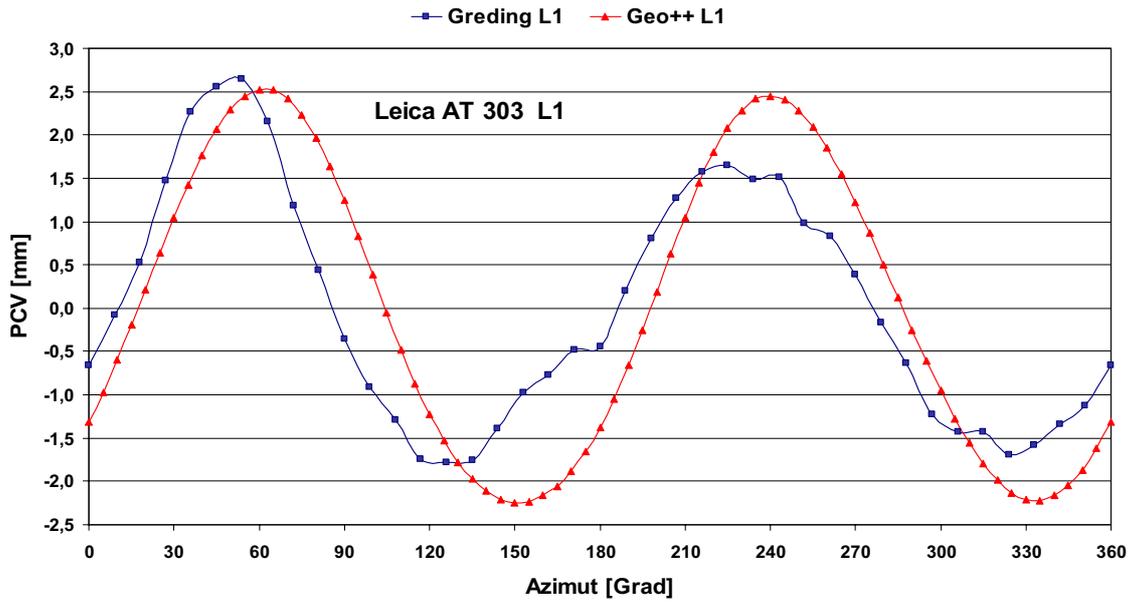


Vergleich Labormessung (Greding) – Absolutes Feldverfahren (GEO++)  
Leica AT 303 L2 (identische Antenne) in Elevation

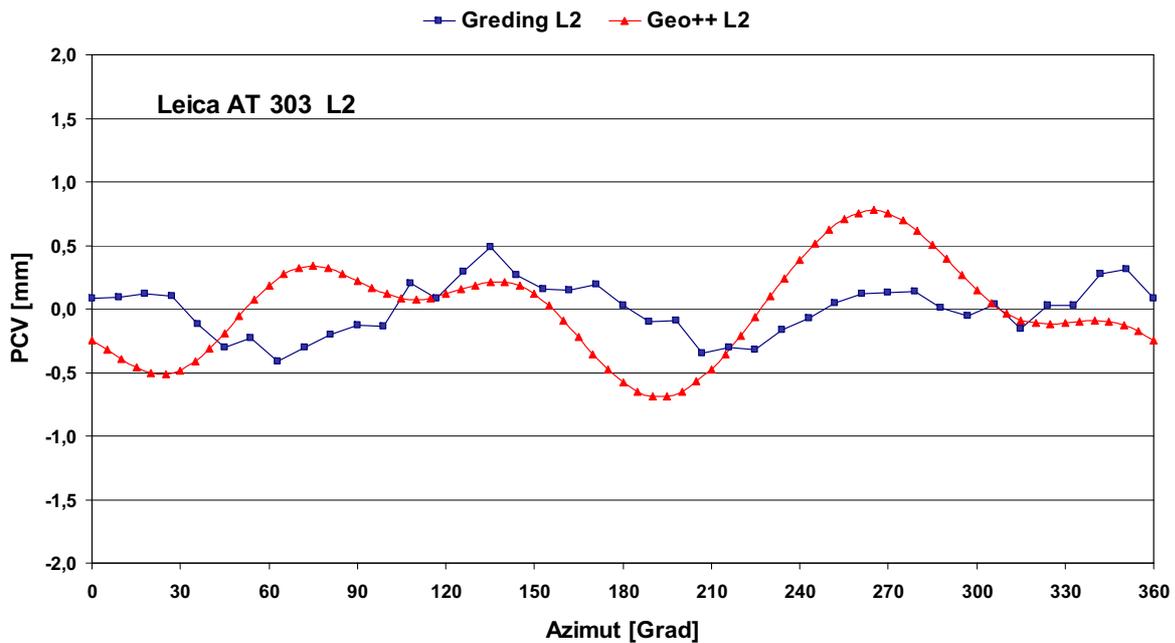


Vergleich der Kalibrierungen in Elevation für die Leica AT 303. Die Labormessungen und die GEO++-Werte (absolutes Feldverfahren) beziehen sich auf die gleiche Antenne. Die NGS- und IGS-Werte sind typenspezifisch.

Vergleich der Kalibrierungen in Elevation für die Trimble Zephyr. Die GEO++-Werte (absolutes Feldverfahren) sind hier wie die NGS- und IGS- Werte typenspezifisch.

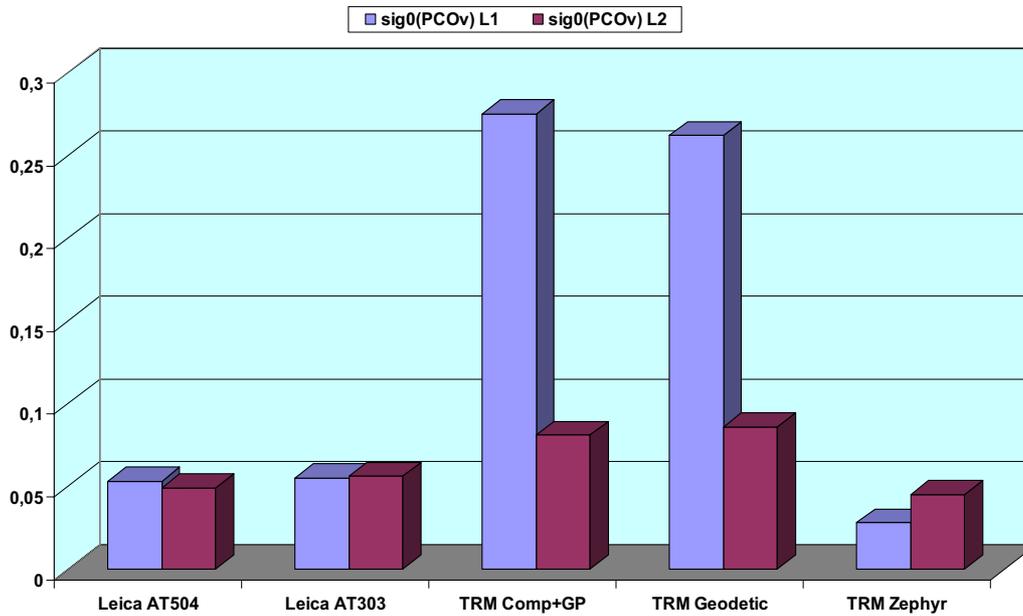


Vergleich Labormessung (Greding) – Absolutes Feldverfahren (GEO++)  
 Leica AT 303 L1 (identische Antenne) in Azimut (bei Elev.12,5°)



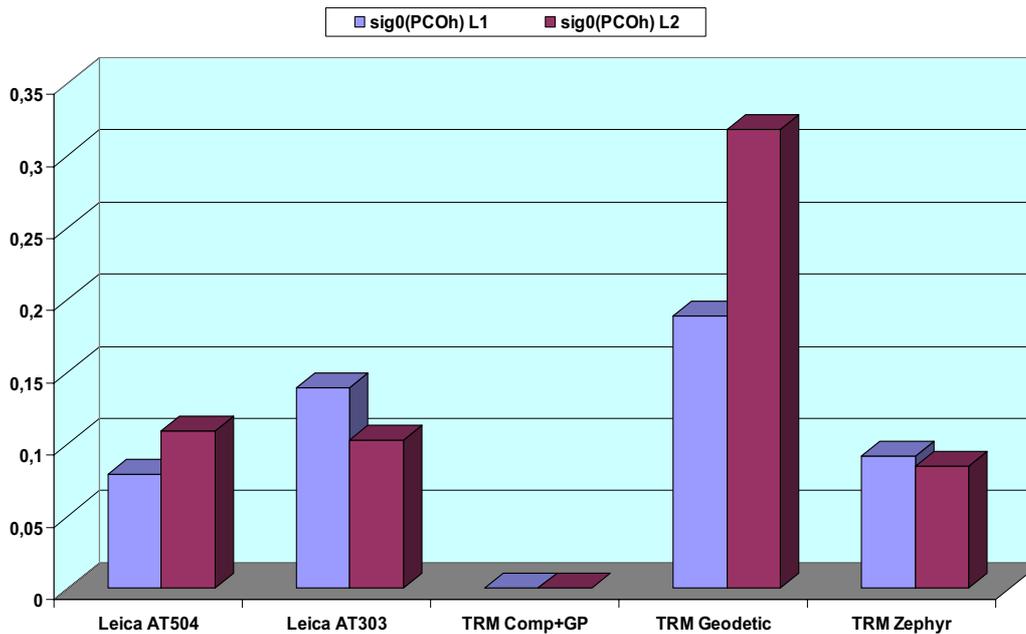
Vergleich Labormessung (Greding) – Absolutes Feldverfahren (GEO++)  
 Leica AT 303 L2 (identische Antenne) in Azimut (12,5°)

Genauigkeit Laborergebnisse PCO vertikal (mm)



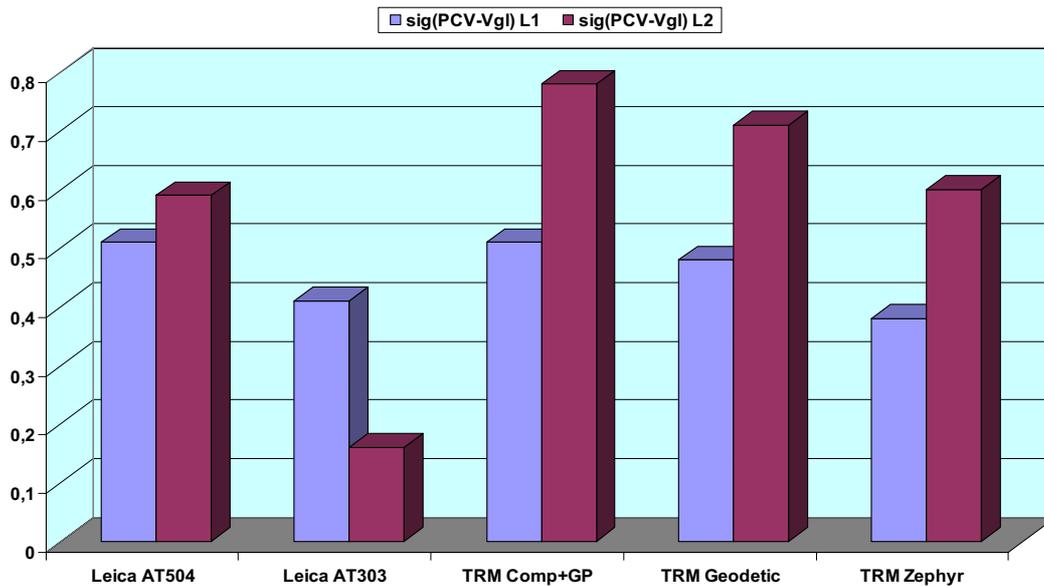
Streuung  $s_0$  nach PCO-Ausgleichung im 3. Schritt

Genauigkeit Laborergebnisse PCO horizontal (mm)



Streuung  $s_0$  nach PCO-Ausgleichung im 3. Schritt

Vergleich PCV Labor/Abs. Feldv. (mm)



Streuung  $s$  aus Differenzen zwischen zwei verschiedenen PCV - Kurven

### Schlussfolgerungen

- Die Messungen in der grossen Absorberhalle des EMV-Zentrums der Bundeswehr belegen die hervorragenden Eigenschaften dieses Labors für die Untersuchung und Kalibrierung von GPS-Antennen
- Der charakteristische Verlauf der PCV-Kurven lässt sich sehr gut durch Fourier-Reihen niedriger Ordnung (3 bzw. 5) darstellen
- Die Fehlermaße der Standardabweichung im Antennenmodell und der quadratischen Abweichung im Vergleich zwischen verschiedenen Kalibrierungen eignen sich gut als Indikatoren für die Güte von Antennen wie für die Vergleichbarkeit von Kalibrierverfahren
- Die vorliegenden Untersuchungen zeigen deutliche Qualitätsunterschiede zwischen der Gruppe der Choke-Ring Antennen (Leica) einschliesslich der Trimble Zephyr und der älteren Trimble Compact und Trimble Geodetic Antennen
- Die gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen für die identische AT303 aus Labor (Greding)- und abs. Feldverfahren mit Roboterarm (GEO++) zeigt, dass beide Verfahren als ebenbürtig angesehen werden dürfen

# Vergleichstest der Kalibrierverfahren für GPS-Antennen Teil 2 - Vorhaben und Datensatz

Uwe Feldmann-Westendorff  
Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen

5. GPS-Antennenworkshop  
im Rahmen des 5. SAPOS® -Symposiums  
Frankfurt am Main, 3. November 2003

---

## Inhalt

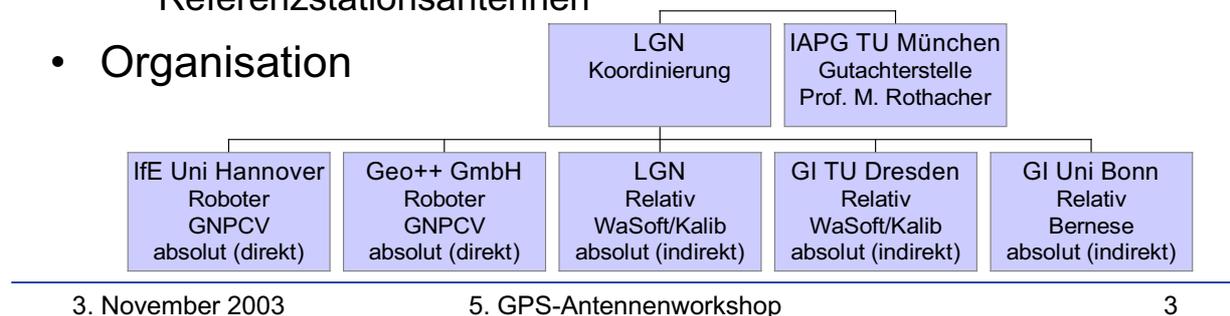
- Rückblick: Vergleichstest Teil 1 - 2002
- Vergleichstest Teil 2 - 2003
  - Referenzkoordinaten
  - Testmessungen
  - Probeauswertung (Verifikation)
- Aktuelle Echtzeitmessungen
- Zusammenfassung

## Rückblick: Vergleichstest Teil 1 - 2002 (1)

- Ziele

- Klärung der Konsistenz im Bereich von SAPOS® vorhandener Kalibrierverfahren
- Aufzeigen verfahrensabhängiger Vor- und Nachteile sowie systematischer Differenzen
- Entscheidungsgrundlage für die AdV zur Formulierung von Genauigkeitsanforderungen an die Kalibrierung von SAPOS®-Referenzstationsantennen

- Organisation



## Rückblick: Vergleichstest Teil 1 (2)

- Ergebnisse

- PCV der verschiedenen Verfahren unterscheiden sich in  $L_0$  um bis zu 8 mm (Elevationsmodell, identischer ARP, PCV Zenit = 0)
- Absolutkalibrierungen (Roboter) weisen eine um ca. Faktor 2 höhere innere Genauigkeit (Konsistenz) auf als Relativkalibrierungen
- Mischung von Kalibriermodellen führt in Abhängigkeit von Antennentyp und Auswertestrategie zu Diskrepanzen von mm bis cm, vor allem in der Höhenkomponente (Zerobaseline-Tests)
- Relativverfahren negativ beeinflusst durch Mehrwegeeffekte der Kalibrierumgebung und PCV-Unsicherheit der Referenzantenne
- Roverantennen weisen höheres Rauschen auf

## Rückblick: Vergleichstest Teil 1 (3)

- Empfehlung von Prof. Rothacher an die AdV:
  - GPS-Antennen sollten für den Bereich 10°-90° Elevation und 0°-360° Azimut mit einer Genauigkeit (RMS über den gesamten Bereich) von 1 mm in L<sub>1</sub> und 1,5 mm in L<sub>2</sub> kalibriert werden
- Umsetzung in der AdV
  - der vorhandene Beschluss des Plenums 110/5: *Kalibrierung von Antennen auf SAPOS®-Referenzstationen* (Kalibrierumfang und -niveau) wurde durch den Beschluss des AK Raumbezug 10/3 Genauigkeit der *Kalibrierung von Antennen auf den SAPOS®-Referenzstationen* ergänzt  
<http://www.sapos.de/einheitlichkeit.htm>

## Vergleichstest Teil 2 - 2003

- Vorhaben
  - Untersuchung der Punktgenauigkeiten bei Verwendung PCV verschiedener Verfahren *und* unterschiedlichen Antennentypen (Erweiterung der bisherigen Zerobaseline-Tests)
  - Vertiefung der Kenntnisse über den Einfluss der näheren Antennenumgebung
- Organisation
  - nochmalige Bereitstellung sämtlicher Antennen des Teils 1
  - umfangreiche Langzeitmessungen auf dem Pfeilerdach der LGN in Hannover
  - Verteilung der Daten an alle beteiligten Gruppen aus Teil 1

## Vergleichstest Teil 2 - Messdach LGN

- Messdach der LGN in Hannover
  - 6 Beobachtungspfeiler (Beton) mit fest justierten Antennen-  
aufnahmen (0009-0014, 0009 identisch mit SAPOS® 0640)



aus Südwest



aus Nordost

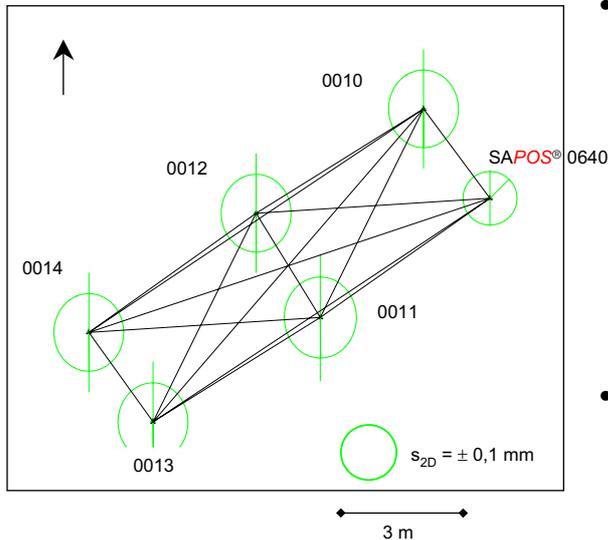
## Vergleichstest Teil 2 - Referenzkoordinaten



aus Südost

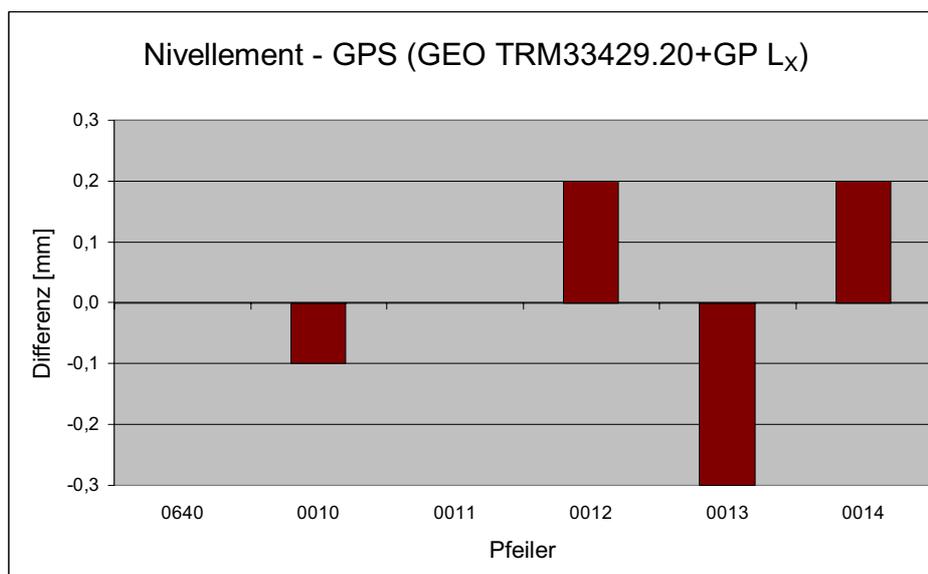
- Beobachtung der Referenzkoordinaten
  - Februar 2003
  - 6 TRIMBLE 4700 (simultan)
  - 6 TRM33429.20+GP vorab individuell kalibriert (Roboter)
  - 4×24 + 1×16 h ( $\Sigma$  114 h)
  - 0° Elevation
  - 15 s Taktrate

## Vergleichstest Teil 2 - Referenzkoordinaten



- Auswertung von Referenzkoordinaten
  - GEONAP
  - Signal  $L_X$  (-iono -tropo -pe)
  - Elevation  $10^\circ$
  - maximale Residuen der Tageslösungen: Lage 0,4 mm und Höhe 0,5 mm
- Genauigkeiten ( $1\sigma$ )
  - $s_N = \pm 0,2 \text{ mm}$
  - $s_E = \pm 0,1 \text{ mm}$
  - $s_h = \pm 0,3 \text{ mm}$

## Vergleichstest Teil 2 - Referenzkoordinaten



Präzisionsnivellement mit NI 1 über alle Antennenaufnahmen Mai 2003

## Vergleichstest Teil 2 - Testmessungen

- Identischer Antennensatz aus Teil 1



5 Antennen wandern gemeinsam in fester Aufstellung über die Pfeiler



- Pfeiler mit Antennenaufnahme, Durchmesser 0,19 m (Beton), 1,10 über Dachoberkante
- jedes Antennen-Setup fotografisch dokumentiert (Kabelzuführung)

3. November 2003

5. GPS-Antennenworkshop

11

## Vergleichstest Teil 2 - Testmessungen

GPS-Antenne	Session 1	Session 2	Session 3	Session 4	Session 5	i [m]
TRM33429.20+GP	0009	0009	0009	0009	0009	0.052
LEIAT502	0011	0013	0014	0012	0010	0.0050
LEIAT303 LEIC	0013	0014	0012	0010	0011	0.1200
TRM33429.20+GP	0014	0012	0010	0011	0013	0.0050
TRM39105.00	0012	0010	0011	0013	0014	0.0050
NOV503 NOKE	0010	0011	0013	0014	0012	0.0997

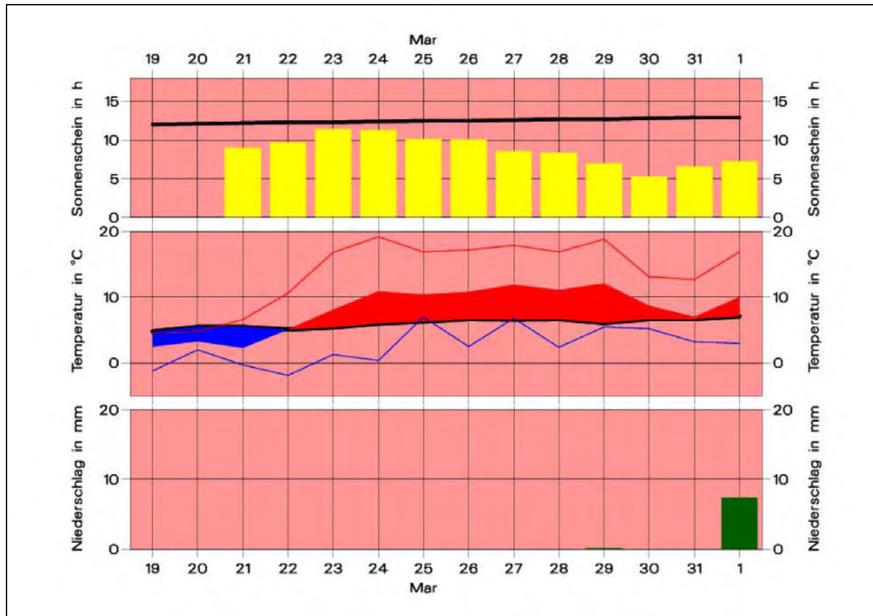
- 5 Sessionen a minimal 24 h ( $\Sigma$  192 h)
- feste Antennenhöhen über Pfeiler OK
- Pfeiler 0009 identisch mit SAPOS® 0640
- TRIMBLE 4700, LEICA SR520 und LEICA SR530

3. November 2003

5. GPS-Antennenworkshop

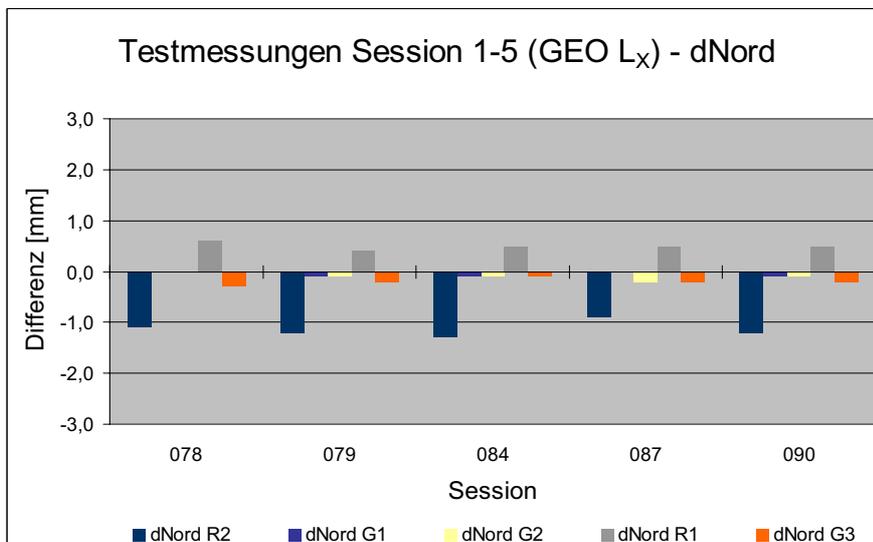
12

## Vergleichstest Teil 2 - Testmessungen



Wetterdaten (Temperatur, Niederschlag) für Zeitraum der Testmessungen

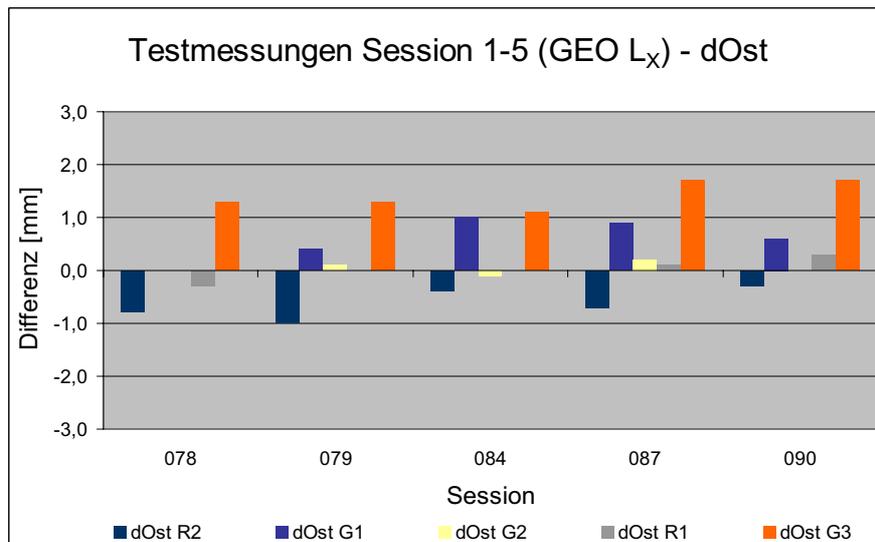
## Vergleichstest Teil 2 - Verifikation der Testdaten



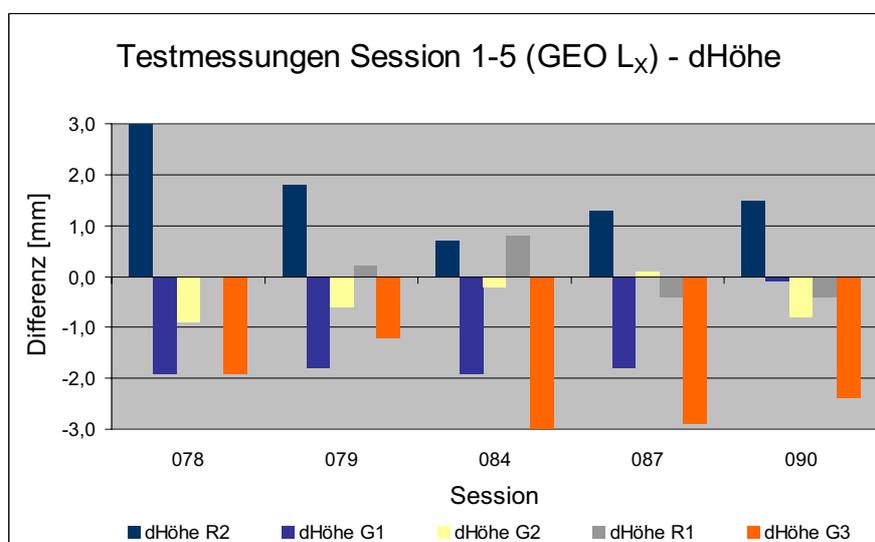
- Probeauswertung
  - 5 Sessionen 24 h
  - Signal L<sub>x</sub> (-iono -tropo -pe)
  - Elevation 10°

- Vergleich mit Referenzkoordinaten (identischer Auswerteansatz)

## Vergleichstest Teil 2 - Verifikation der Testdaten

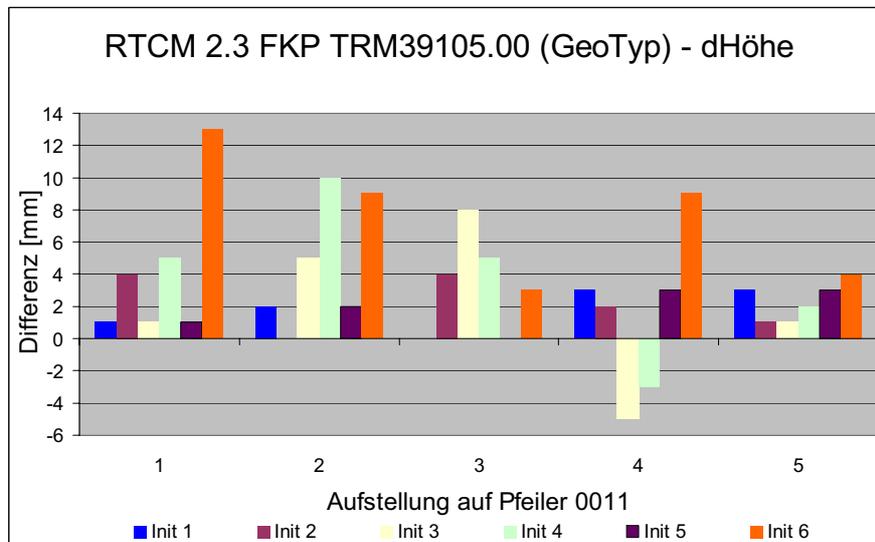


## Vergleichstest Teil 2 - Verifikation der Testdaten



- Offensichtliche Restsystematiken, Ursache?

## Aktuelle Echtzeitmessungen SAPOS®-HEPS



- 5 Sessions im Abstand von etwa 45 min a 6 Initialisierungen ( $\leq 20$  s)
- angehängt an SAPOS® 0640 (5,1 m), 30.10.2003

## Zusammenfassung und Ausblick

- Es liegt ein Datensatz mit hoher Präzision in einem stark durch Umgebungseffekte belasteten Umfeld vor.
- Sehr gute Übereinstimmung (sub-mm) zwischen GPS und Präzisionsnivellement bei entsprechendem Auswerteansatz, aber Restsystematiken bei Verwendung der Testantennen!
- Die Ursachen sind in einer Detailanalyse der Umgebungseffekte zu untersuchen (*erfolgt: Wanninger, Wübbena u. a.*)
- Kann der Datensatz wirklich weitere Erkenntnisse zum Mischen der PCV aus Vergleichstest Teil 1 erbringen? (*erfolgt: Wanninger*)
- Auf jeden Fall: Anstoß für neue Untersuchungen im Umfeld des Projektes *Absolute Stationskalibrierung*

# Erzielbare GPS-Koordinatengenauigkeiten bei Verwendung von Antennenkorrekturen

Lambert Wanninger  
Ingenieurbüro Wanninger, Neuwied

5. GPS-Antennenworkshop, Frankfurt/Main, 3. November 2003

## Antennenkalibrierverfahren

**Absolutes Feldverfahren**

Drehen und Kippen

**GEO++**

**IFE**

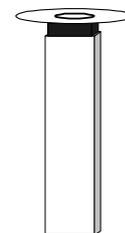


- aufwendigeres Verfahren
- absolute Korrekturen
- weitestgehende Mehrwegeeliminierung
- auch für niedrige Elevationen

Ingenieurbüro Wanninger

**Relatives Feldverfahren**

Drehen



**LGN**

**TUDD**

- einfacheres Verfahren
- absolute Korrekturen, wenn entsprechende Korrekturen für Referenzantenne vorliegen
- Mehrwegeeinfluss:
  - Eliminierung für Lageoffsets
  - Verringerung für PZV
  - unvermindert für Höhenoffset
- untere Elevationsgrenze 5 Grad

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

# Vergleiche von Korrekektionssets

## Betrachtung von verursachten Koordinatenfehlern

- Tagesmittel (=Bias) + Standardabweichung Einzelepochen
- Lage (Nord, Ost) + Höhe
- L1, iono.-freie Linearkombination
- für 3 geodätische (G) und 2 RTK (R) Antennen
- Auswertungen mit WaSoft

## Vergleich 1 (2002)

Antennenkorrektionen im Vergleich untereinander  
(siehe Antennenworkshop 2002 in Hannover)

## Vergleich 2 (2003)

Auswirkungen der Antennenkorrektionen auf relative Positionierung im Vergleich zu Sollösungen; andere Fehlerquellen wirken auch

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Vergleich von Antennenkalibrierverfahren

In dem von den Landesvermessungen Niedersachsens und Brandenburgs initiierten Ringversuch zur Antennenkalibrierung werden zwei Kalibrierverfahren verglichen: das absolute Feldverfahren (Realisierungen durch **Geo++** und **IFE**), bei dem die zu kalibrierende Antenne mit Hilfe eines Roboterarms gedreht und gekippt wird, und zum anderen das relative Feldverfahren (Realisierungen **LGN** und **TUDD**), welches sehr viel einfacher durchzuführen ist, da auf die Kippung der Antenne verzichtet wird und die wenigen notwendigen Drehungen mit der Hand ausgeführt werden können. Das absolute Feldverfahren erzeugt absolute Korrektionen, die weitestgehend mehrwegefrei sind. Auch mit dem relativen Feldverfahren werden absolute Korrektionen erzeugt, wenn entsprechende Korrektionen für die Referenzantenne vorliegen. Mehrwegeeinflüsse werden praktisch vollständig für die Lageoffsets eliminiert. Sie wirken aber unvermindert auf den Höhenoffset. Restfehler verbleiben auch in den Phasenzentrumsvariationen (PZV).

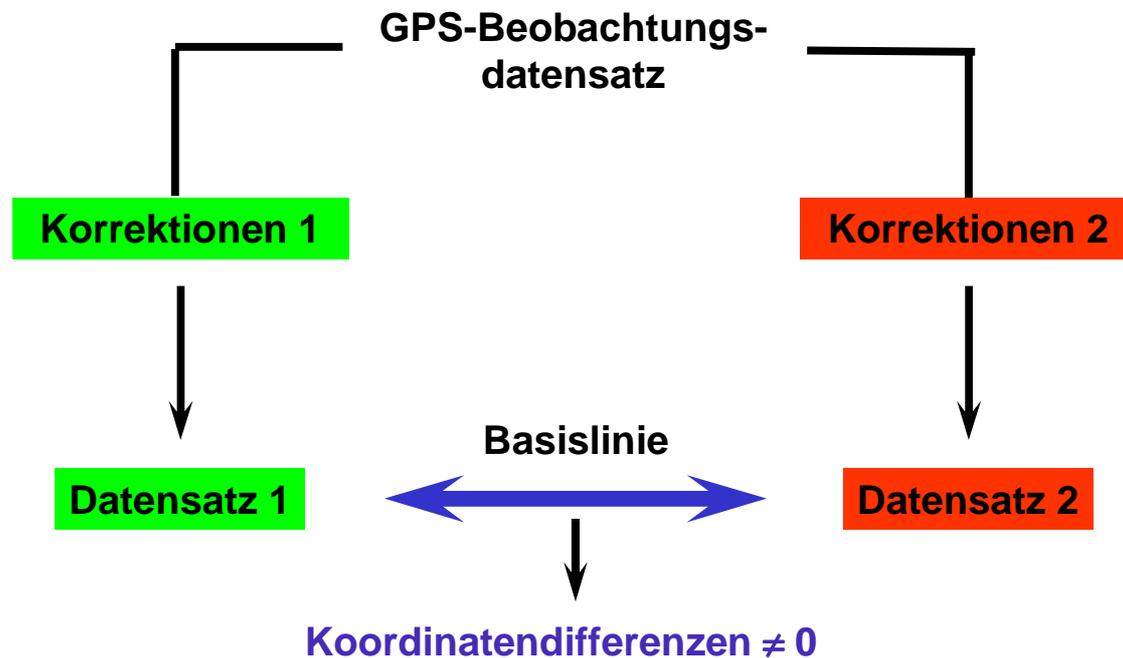
Zum Vergleich der Verfahren werden hier die Auswirkungen der Kalibrierfehler auf die Koordinaten betrachtet. Es erfolgt dabei eine Aufteilung in Fehler des Tagesmittels, die als Bias auf jedes Koordinatenergebnis wirken, und zusätzlich Einzelepochenfehler, die für kurzzeitige Beobachtungen noch hinzu kommen. Im folgenden werden nur Ergebnisse betrachtet, die mit der ionosphären-freien Linearkombination erzeugt wurden. Die L1-Fehler betragen ungefähr 30 % dieser Fehler. Die Antennen werden in zwei Gruppen betrachtet: geodätische (G) und RTK (R) Antennen.

Die Ergebnisse des ersten Vergleichs wurden schon auf dem Antennenworkshop 2002 in Hannover präsentiert und diskutiert. Da keine Sollwerte für die Antennenkorrektionen existieren, ist nur ein Vergleich untereinander möglich. Koordinatendifferenzen ergeben sich ausschließlich aufgrund von Unterschieden der Antennenkorrektionen.

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

# Vergleich 1: Auswerteverfahren



Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

# Vergleich 1: Ergebnisse

- siehe Präsentation Antennenworkshop 2002 in Hannover
- Koordinatenfehler bei iono.-freier Linearkombination,  $L1 \approx 30\%$

im Vergleich zum Geo++-Korrektionsdatensatz

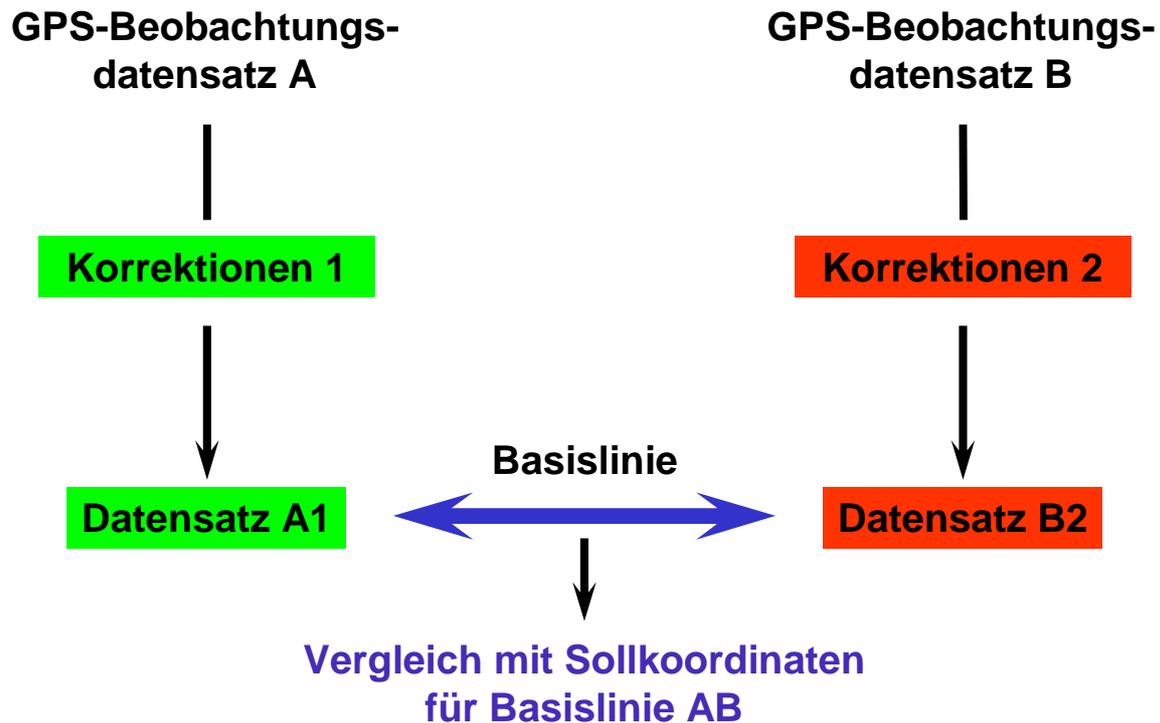
		Tagesmittel (=Bias) Lage / Höhe	Standardabweichung Einzelepochen Lage / Höhe
IFE	G	0,5 / ...2	0,6 / 1
	R	...2 / ...4	2 / 3
LGN/TUDD	G	0,5 / ...5	2 / 3
	R	...4 / ...7	3 / 4

[mm]

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Vergleich 2: Auswerteverfahren



Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Einflüsse auf lokale Basislinien

### Relative Fehler:

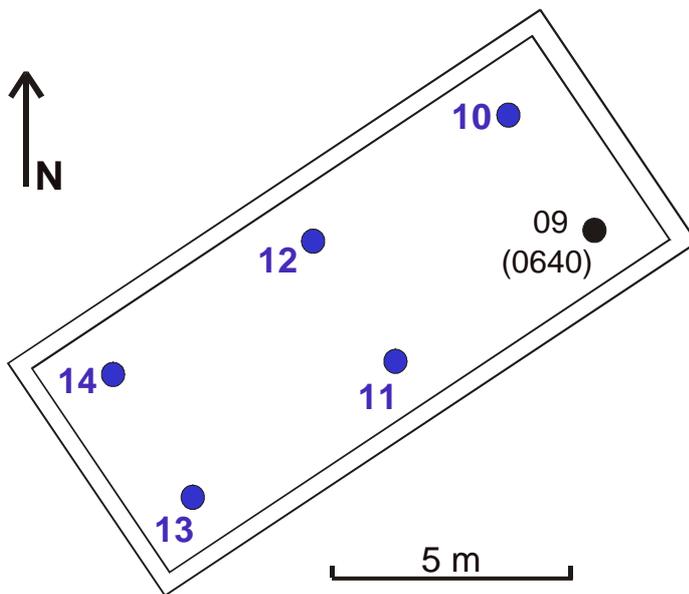
- **Antennenphasenzentren**  
Restfehler der Korrekturensatze
- **Mehrwegeeinflüsse**  
kurzperiodisch: entfernte Reflektoren (>1 m)  
langperiodisch: nahe Reflektoren
- **Signalrauschen**

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

# Vergleich 2: Testdaten

## 5 Pfeiler auf Dach der LGN, Hannover



besetzt für jeweils 24+ h mit  
5 verschiedenen Antennen:

G1  
G2  
G3  
R1  
R2

5 Sessions, jede Antennen  
einmal auf jedem Pfeiler

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

### Neuer Vergleich: Auswirkungen der Antennenkorrekturen auf relative Positionierung

Dieser praxisnähere Vergleich wurde durch umfangreiche simultane Messungen mit den im Ringversuch kalibrierten Antennen ermöglicht. Da Sollkoordinaten für die Pfeiler auf dem LGN-Dach vorliegen, können hier nun absolute Koordinatenfehler bestimmt werden. Weiterhin wirken hier nun nicht nur Kalibrierrestfehler auf die Koordinaten, sondern auch insbesondere Mehrwegeinflüsse.

Verglichen werden hier Koordinatenfehler, die sich ergeben

- wenn ohne Antennenkorrekturen ausgewertet wird,
- wenn baugruppenspezifische Werte des NGS Verwendung finden, nur ele. PZV  
(Quelle: <http://www.ngs.noaa.gov/Antcal/>),
- wenn die individuellen Kalibrierwerte des Ringversuchs eingesetzt werden: azi.-ele. PZV:  
Geo++, IFE, LGN, TUDD,
- wenn die individuellen Kalibrierwerte des Ringversuchs auf ele. PZV reduziert werden:  
Geo++-E, IFE-E, LGN-E, TUDD-E,
- wenn Korrektdatensätze gemischt werden: Antenne A wird mit Korrekturwerten aus Kalibrierung 1 korrigiert, Antennen B mit Werten aus Kalibrierung 2.

Im folgenden wird eine Auswahl der umfangreichen Ergebnisse präsentiert.

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

# APZ-Korrektionsdatensätze

aus individuellen  
Feldkalibrierungen

aus Feldkalibrierungen  
für Baugruppen

absolut (Drehung und Kippung):  
Geo++, IFE

NGS (nur ele. PZV)

relativ (Drehung):  
LGN, TUDD

sonstige

desgleichen, aber nur ele. PZV:  
Geo++-E, IFE-E, LGN-E, TUDD-E

keine Korrektur

und Mischungen von Datensätzen

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Vergleich 2: Koordinatenfehler

		quadr. Mittel über Tagesmittel (=Bias) Lage / Höhe	Mittel über Stdabw. Einzelepochen Lage / Höhe
ohne Korrekturen	G	10,9 / 23,1	18,1 / 24,0
	R	1,5 / 18,7	17,4 / 21,7
NGS	G	7,3 / 3,7	16,3 / 20,2
	G-G3	2,6 / 2,0	16,9 / 20,9
	R	2,8 / 2,0	17,5 / 21,9

iono.-freie Linearkombination [mm]

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Vergleich 2: Koordinatenfehler

		quadr. Mittel über Tagesmittel (=Bias) Lage / Höhe	Mittel über Stdabw. Einzelepochen Lage / Höhe
<b>Geo++</b>	<b>G</b>	1,7 / 2,8	16,1 / 19,6
<b>IFE</b>	<b>G</b>	1,5 / 3,2	16,0 / 19,5
<b>LGN</b>	<b>G</b>	1,6 / 2,2	16,0 / 19,5
<b>TUDD</b>	<b>G</b>	1,6 / 1,9	16,0 / 19,7
<b>Geo++</b>	<b>R</b>	1,8 / 6,2	17,6 / 22,0
<b>IFE</b>	<b>R</b>	2,0 / 3,0	17,4 / 21,8
<b>LGN</b>	<b>R</b>	2,9 / 5,7	17,5 / 21,9
<b>TUDD</b>	<b>R</b>	3,9 / 4,6	17,9 / 22,2

iono.-freie Linearkombination [mm]

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Vergleich 2: Koordinatenfehler

### Vergleich azi.-ele. PZV mit ele. PZV

		quadr. Mittel über Tagesmittel (=Bias) Lage / Höhe	Mittel über Stdabw. Einzelepochen Lage / Höhe
<b>Geo++</b>	<b>G</b>	1,7 / 2,8	16,1 / 19,6
<b>Geo++-E</b>	<b>G</b>	3,4 / 3,4	16,3 / 19,9
<b>LGN</b>	<b>G</b>	1,6 / 2,2	16,0 / 19,5
<b>LGN-E</b>	<b>G</b>	3,5 / 2,8	16,2 / 19,9
<b>Geo++-E</b>	<b>G-G3</b>	3,3 / 1,7	16,9 / 20,7
<b>LGN-E</b>	<b>G-G3</b>	4,4 / 3,9	16,8 / 20,6
<b>NGS</b>	<b>G-G3</b>	2,6 / 2,0	16,9 / 20,9

iono.-freie Linearkombination [mm]

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Ergebnisse des neuen Vergleichs

Ohne Korrekturen ergeben sich insbesondere Höhenoffsets in der Größenordnung von wenigen cm. Sie werden durch konstruktionsbedingte Unterschiede zwischen den Antennentypen, die unterschiedliche Abstände zwischen Antennenreferenzpunkt (ARP) und mittlerem Phasenzentrum aufweisen, verursacht.

Die baugruppen-spezifischen Korrekturen des NGS verringern die Koordinatenfehler deutlich für vier der fünf Antennen. Die fünfte Antenne (G3) weist dagegen so große individuelle Lageoffsets auf, dass hier baugruppen-spezifische Korrekturen nicht verwendet werden sollten.

Beim Übergang auf individuelle Korrekturen ergibt sich eine deutliche Fehlerverringering für die Antenne G3. Für alle anderen geodätischen Antennen ist nur ein geringer Genauigkeitsgewinn erkennbar. Die Höhenoffsets aus relativen Kalibrierungen sind geringer als die aus absoluten Kalibrierungen. Es ist zu vermuten, dass ein Anteil der langperiodischen Mehrwegeeinflüsse, der in den Antennenkorrekturen aus relativen Feldverfahren als Fehler vorhanden ist, hier als Mehrwegekorrekturen wirkt. Für die RTK-Antennen schneiden die individuellen Kalibrierungen z.T. sogar schlechter ab als die NGS-Werte. Eine Entscheidung welche individuelle Kalibrierung die besten Ergebnisse liefert ist nicht möglich, da sich die Ergebnisse insgesamt wenig unterscheiden (G) bzw. sich sehr heterogene Resultate ergeben (R).

**Schlussfolgerung: Die Kalibrierrestfehler spielen im Vergleich zu den wirkenden Mehrwegeinflüssen eine untergeordnete Rolle.**

Insbesondere bei den Lageoffsets schneiden die azi.-ele. PZV deutlich besser ab als die ele. PZV. Eine Mischung unterschiedlicher Korrekturendatensätze, z.B. die im SAPOS-Netz häufig anzutreffende Kombination Geo++ zu TUDD, führt nur zu geringen Genauigkeitsverschlechterungen.

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Vergleich 2: Koordinatenfehler

### Mischung von Korrekturendatensätzen

		quadr. Mittel über Tagesmittel (=Bias) Lage / Höhe	Mittel über Stdabw. Einzelepochen Lage / Höhe
<b>Geo++</b>	<b>G</b>	1,7 / 2,8	16,1 / 19,6
<b>TUDD</b>	<b>G</b>	1,6 / 1,9	16,0 / 19,7
<b>Geo++/TUDD</b>	<b>G</b>	1,9 / 3,7	16,6 / 20,4
<b>Geo++</b>	<b>R</b>	1,8 / 6,2	17,6 / 22,0
<b>TUDD</b>	<b>R</b>	3,9 / 4,6	17,9 / 22,2
<b>Geo++/TUDD</b>	<b>R</b>	4,4 / 6,5	18,1 / 22,4

iono.-freie Linearkombination [mm]

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

# Schlussfolgerungen

## Anwendung der Korrekturen auf bekannte Basislinien

- Antennenkorrekturen für präzise Anwendungen unverzichtbar
- geringe Genauigkeitsdifferenzen zwischen den Kalibrierverfahren, da andere Fehlereinflüsse dominant
- für einige Antennen: gute Ergebnisse mit baugruppen-spezifischen Korrekturen
  
- azi.-ele. PZV besser als ele. PZV
- leichte Genauigkeitsverluste bei Mischung von Korrekturensätzen

---

# Zum Einfluss des Antennennahfeldes

Gerhard Wübbena, Martin Schmitz, Gerald Boettcher

Geo++®

*Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und  
navigatorische Technologien mbH*

D-30827 Garbsen, Germany

<http://www.geopp.de>

---

## Inhalt

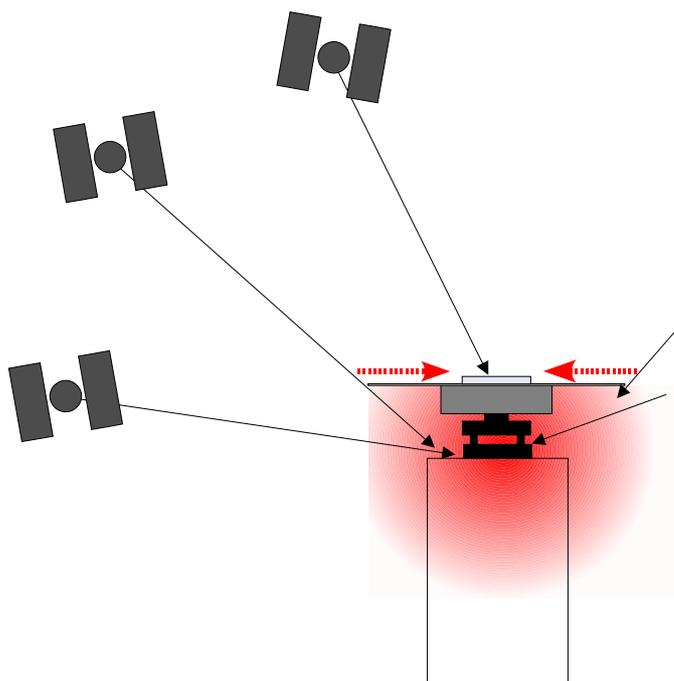
- Motivation
- Multipath im Nahfeld
- Untersuchungen zu Nahfeld/Multipath  
auf PCV-Kalibrierung
- Untersuchungen zu Nahfeld/Multipath  
auf GPS-Messungen
- Zusammenfassung ...
- Ist die Welt noch in Ordnung?

# Motivation



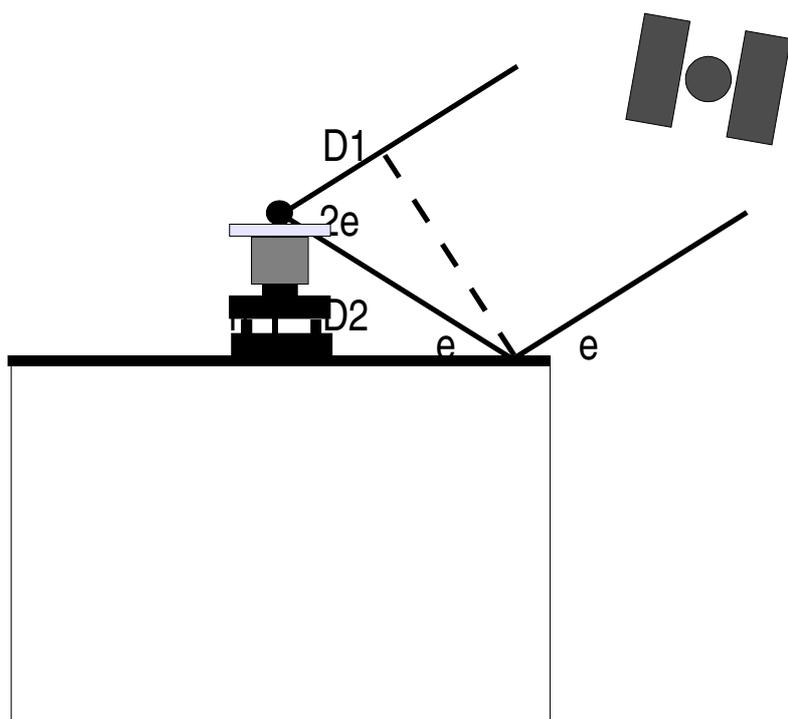
- **präzise absolute PCV Feldkalibrierung** mit Roboter
  - Standardabweichung: 0.2 bis 0.4 mm für L1/L2 PCV
  - Wiederholbarkeit: 1 bis 2 mm L0 PCV im Mittel, Ausnahme Horizont
- **AdV-Benchmark Test 1**, Vergleich Kalibrierverfahren auf absolutem Niveau
  - systematische Differenzen der bestimmten PCV
  - Effekte im Koordinatenraum bis zu 3 cm 3D
  - verbleibender Multipath? weitere Effekte?
- **AdV-Benchmark Test 2**, GPS Datensatz (Feldmann-Westendorff 2003)
  - Ergebnisse und Analyse veranlassen Detailuntersuchungen
  - Multipath im Nahbereich Antenne (z.B. Elosegui et al. 1995)
- **Untersuchung:** PCV-Kalibrierungen mit verändertem Nahfeld
- **Untersuchung:** GPS-Messungen unterschiedlicher Aufstellung/Nahfeld

## Wirkungsweise des Multipath im Nahfeld



- Antennennahfeld
  - Pfeiler, Stativ, Dreifuß, Adaption, etc.
- Wirkung auf Signal
  - Diffraktion/Beugung
  - Reflexion
  - Imaging?
  - elektro-magnetische Koppelung?
- Multipath im Nahfeld
  - konstante Geometrie Antenne/Nahfeld
  - systematischer Effekt
  - keine Mittelung über Zeit

# Multipath durch Horizontalen Reflektor

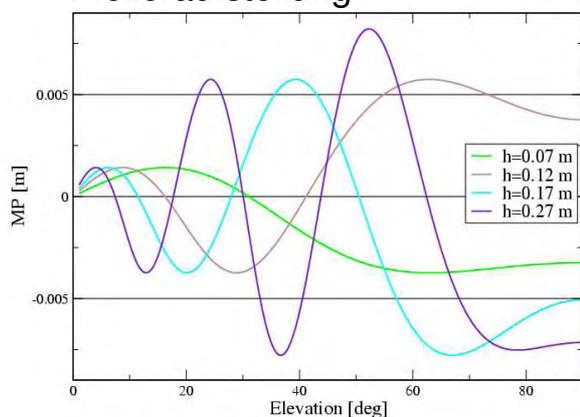


- isotrope (punktförmige) Antenne
- unendlicher horizontaler Reflektor
- Effekt Funktion von
  - Elevation Satellit
  - Umweg bzw. Höhe
  - Reflexionskoeffizient
  - Frequenz

# Theoretischer Multipath Anteil

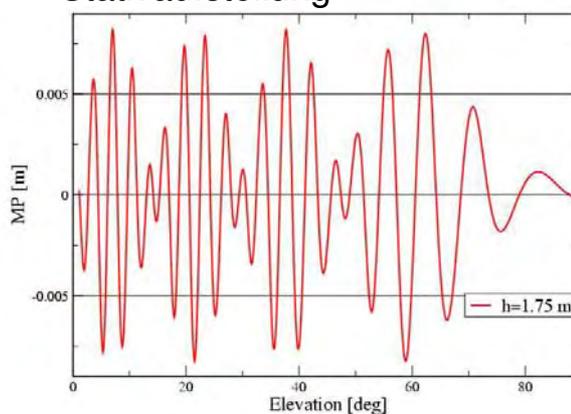


## • Pfeileraufstellung



- niedrige Frequenz
- Effekt in hohen Elevationen
- Einfluss systematisch und elevationsabhängig

## • Stativaufstellung



- hohe Frequenz
- „vergleichbar“ über Elevation
- Einfluss „geringer“

# Auswirkung bei Anwendungen



## GPS-Messung

- systematische Effekt auf Koordinate
- systematischer Effekt über „verfälschte“ PCV (Pfeilerkalibrierungen)
- Effekt abhängig
  - Aufstellung (Pfeiler, Stativ, etc.)
  - Adaption (Dreifuß, etc.)
  - unterschiedlich für Antennentyp (Grundplatte, Antennengehäuse, etc.)

## Antennenkalibrierung

- systematischer Anteil im PCV (Pfeilerkalibrierungen)



## PCV-Kalibrierung



# Untersuchungen Nahfeld/Multipath auf PCV-Kalibrierung



- identische Antenne TRM33439.00+GP
- Rekonstruktion von Pfeilerköpfen (Zement beschichtete Holzplatte)
- Roboter ermöglicht Kalibrierung in unterschiedlicher Konfiguration (konstante Geometrie relativ zur Antenne)
- Kombinationen aus

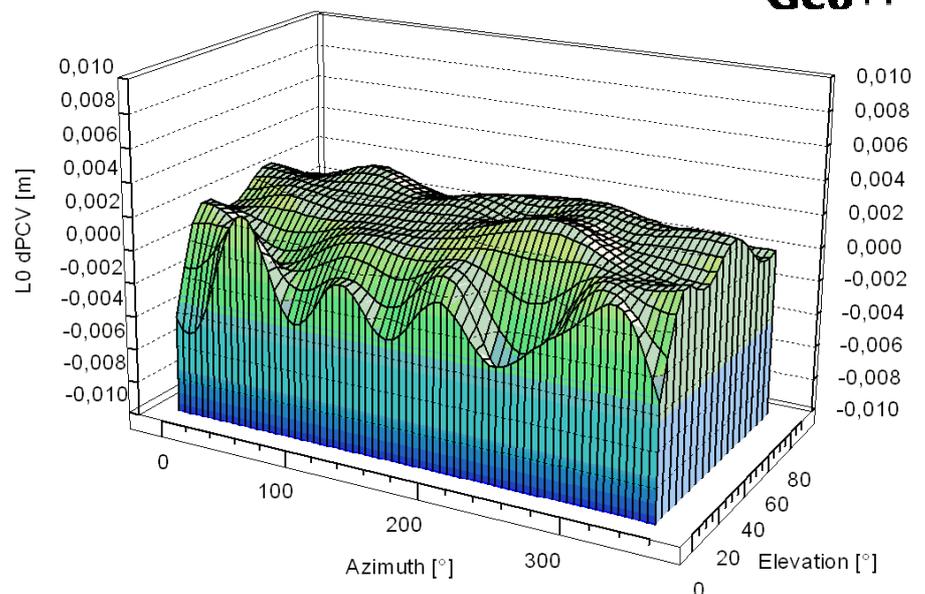
<i>Pfeilerkopf</i>	<i>Dreifuss</i>	<i>Adaption</i>
Ø 19 cm	△ Zeiss	0.5 cm
30x30 cm	⊗ Bämpfer	5.8 cm
-	-	10.0 cm



## TRM33429.20+GP



- Referenz aktuelle Kalibrierung der TRM33439.00+GP (Antenne aus AdV-Benchmark)
- Wiederholbarkeit
  - Differenz L0 PCV nach zwei Jahren 1-2 mm
- zufällige Differenzen
- Bestätigung der absoluten Feldkalibrierung mit Roboter

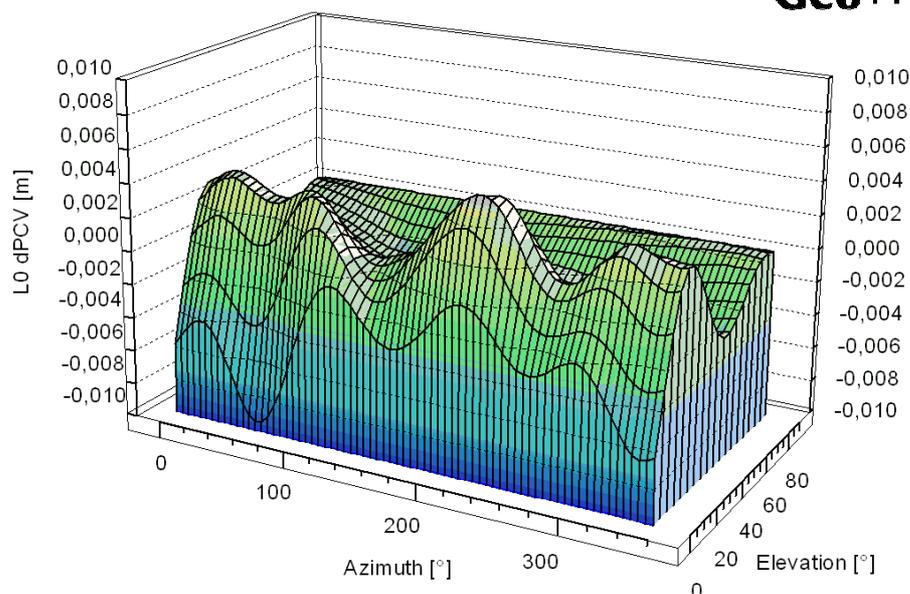




## -/⊗ Bämpfer/0.5 cm



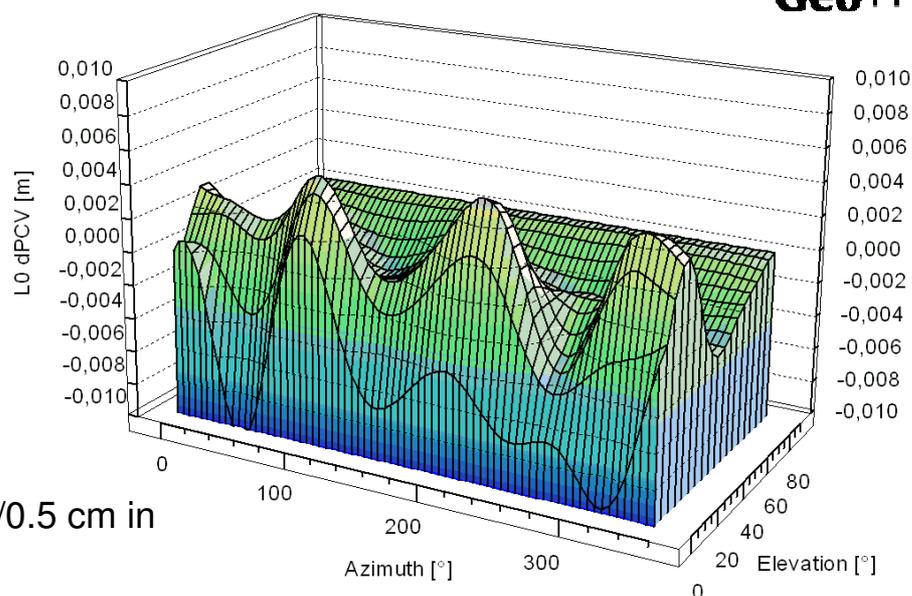
- **Dreifuß**
- Differenz L0 PCV zur Referenz
  - 10-30° +2.5 mm
  - 40-70° -2.5 mm
- systematische Differenz



## - /Δ Zeiss/0.5cm



- **Dreifuß**
- Differenz L0 PCV zur Referenz
  - 10-30° +2.0 mm
  - 40-70° -2.5 mm
- systematische Differenz
- Verstärkung azimutale Variation zu -/⊗ Bämpfer/0.5 cm in niedrigen Elevationen\*



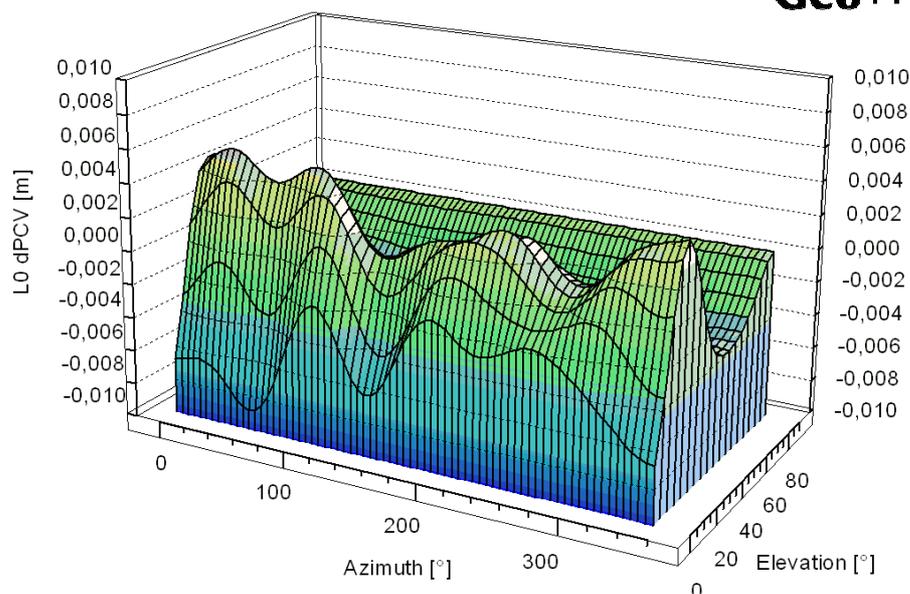
\* zu berücksichtigen Bedingung  $PCV(90^\circ)=0$



## 30x30cm/⊗ Bämpfer/0.5cm



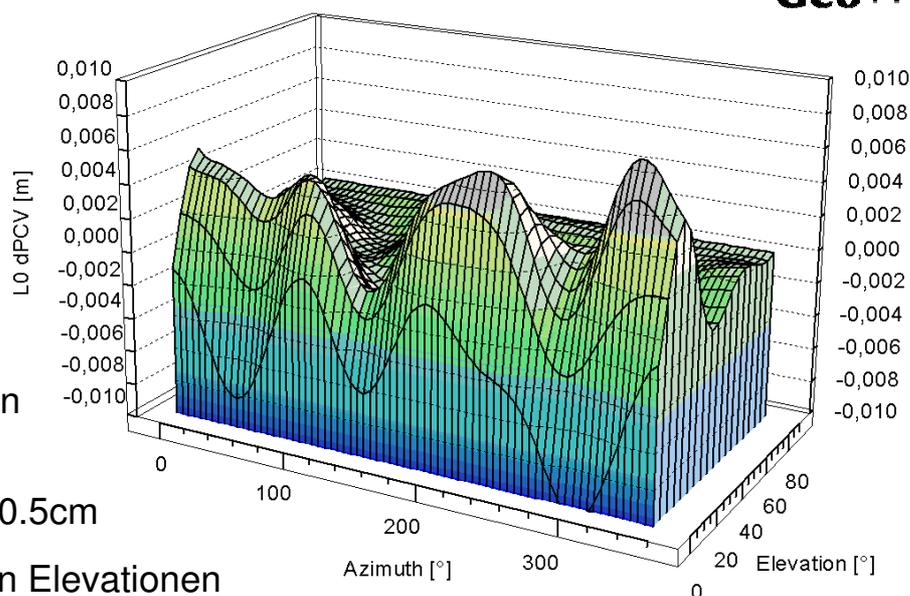
- **Pfeilerkopf**
- Differenz L0 PCV zur Referenz
  - 10-30° +3.0 mm
  - 40-70° -3.5 mm
- systematische Differenz
- Verstärkung durch Pfeilerkopf



## 30x30cm/△ Zeiss/0.5cm



- **Pfeilerkopf**
- Differenz L0 PCV zur Referenz
  - 10-30° +4 mm
  - 40-70° -1 mm
- systematische Differenz in niedrigen Elevationen
- zu 30x30cm/⊗ Bämpfer/0.5cm
  - Verringerung in hohen Elevationen
  - Verstärkung azimutale Variation

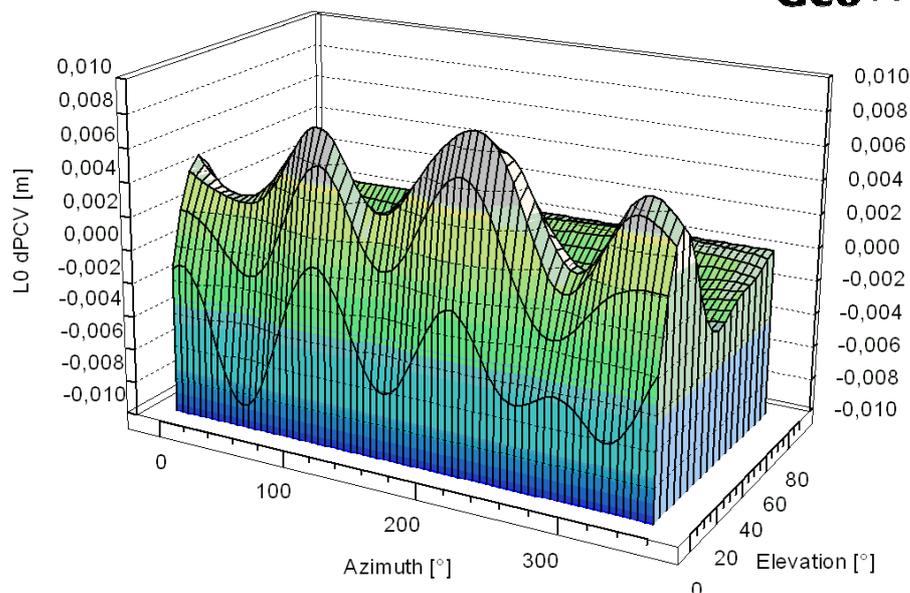




## Ø 19cm/Δ Zeiss/0.5 cm



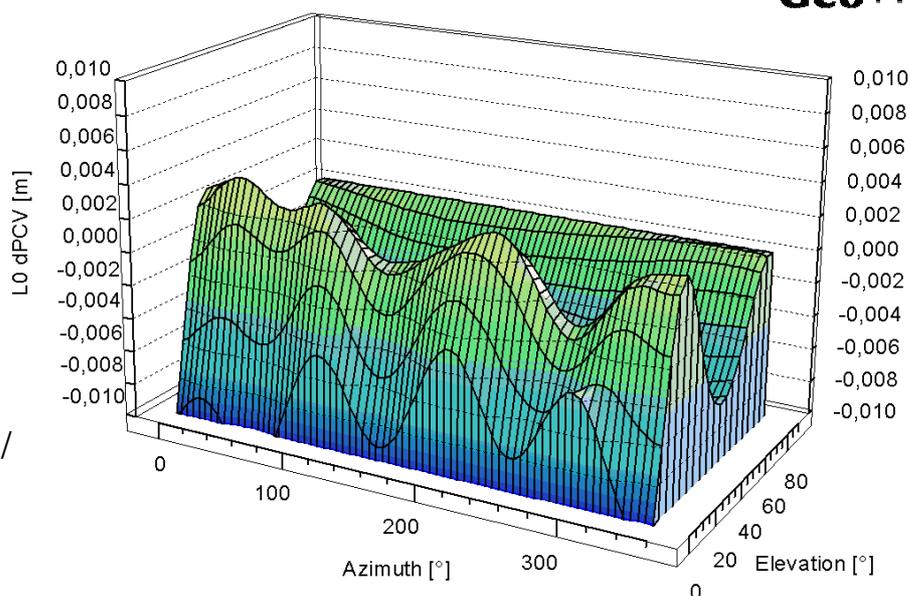
- Pfeilerkopf/Dreifuß
- Differenz L0 PCV zur Referenz
  - 10-30° +5.0 mm
  - 40-70° -1.5 mm
- systematische Differenz in niedrigen Elevationen
- geringe Änderung zu 30x30cm/Δ Zeiss/0.5cm



## Ø 19cm/⊗ Bämpfer/0.5 cm



- Pfeilerkopf/Dreifuß
- Differenz L0 PCV zur Referenz
  - 10-30° +2.0 mm
  - 40-70° -5.5 mm
- systematische Differenz
- Verstärkung zu 30x30cm/⊗ Bämpfer/ 0.5cm
- Verstärkung zu Δ Zeiss
- vergleichbar Adaption AdV-Benchmark Teil 2

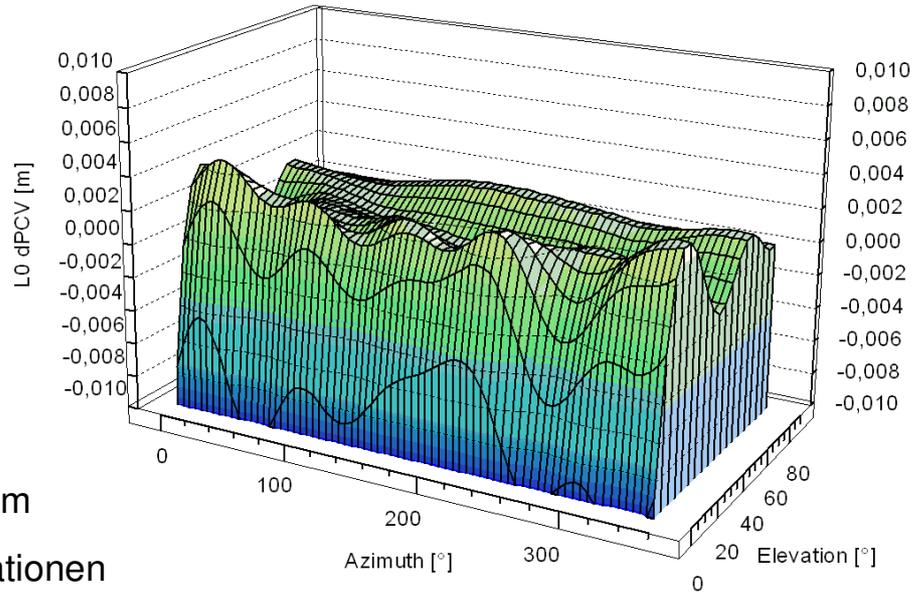




## ∅ 19cm/⊗ Bämpfer/5.8 cm



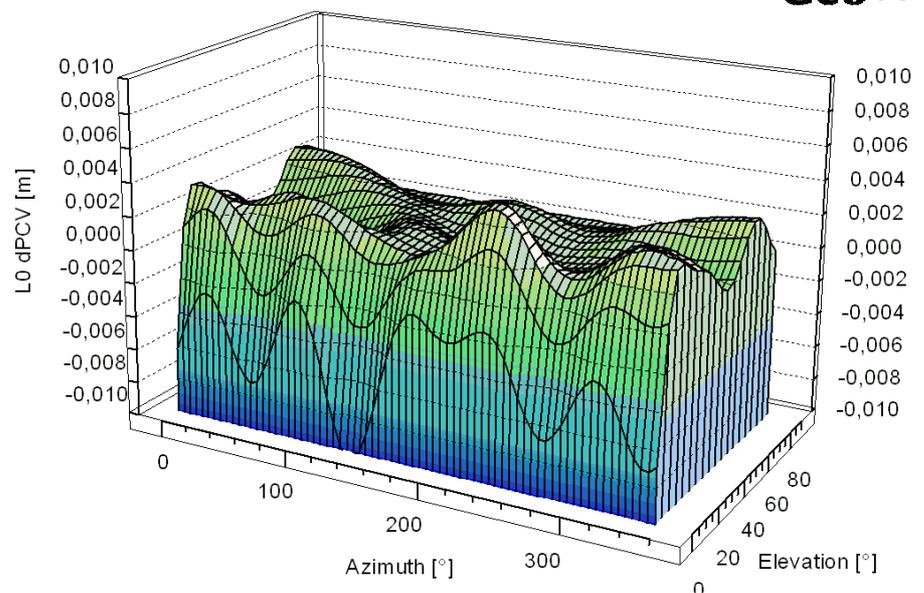
- **Abstand**
- Differenz L0 PCV zur Referenz
  - 10-30° +2.0 mm
  - 50-80° -1/+1.5 mm
- systematische Differenz
- Verbesserung zu ∅ 19cm/⊗ Bämpfer/0.5 cm
- Änderung in hohen Elevationen



## 30x30cm/△ Zeiss/5.8cm



- **Abstand**
- Differenz L0 PCV zur Referenz
  - 10-30° +2.0 mm
  - 50-80° +1.5 mm
- Einfluss
- nah an Referenz

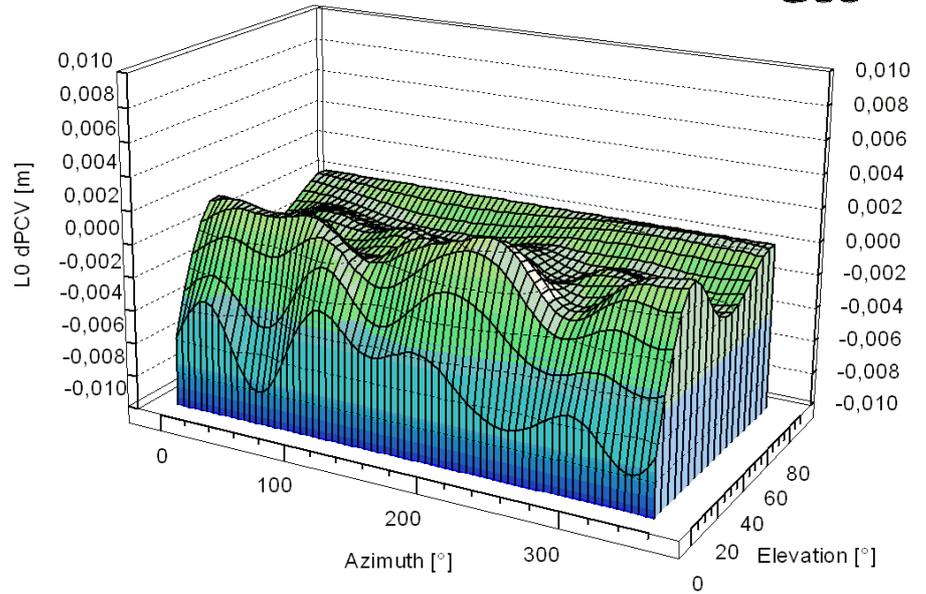




- / - /5.8 cm



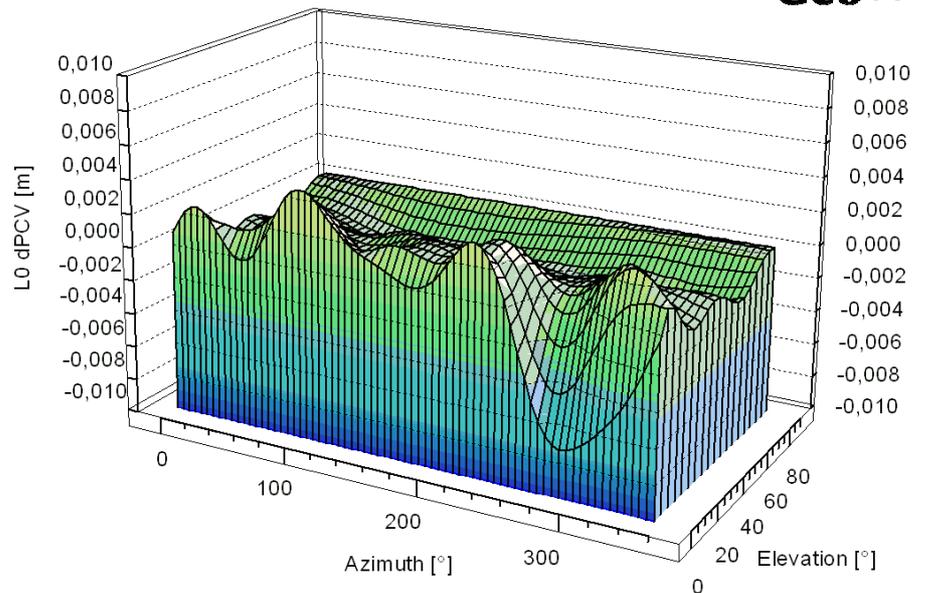
- **Abstand**
- Differenz L0 PCV zur Referenz
  - 10-30° +1 mm
  - 40-70° -1 mm
- Einfluss
- nah an Referenz



∅ 19cm/⊗ Bämpfer/10.8 cm



- **Abstand**
- Differenz L0 PCV zur Referenz
  - 5-20° +1 mm
  - 50-80° -1.5 mm
- Einfluss
- nah an Referenz



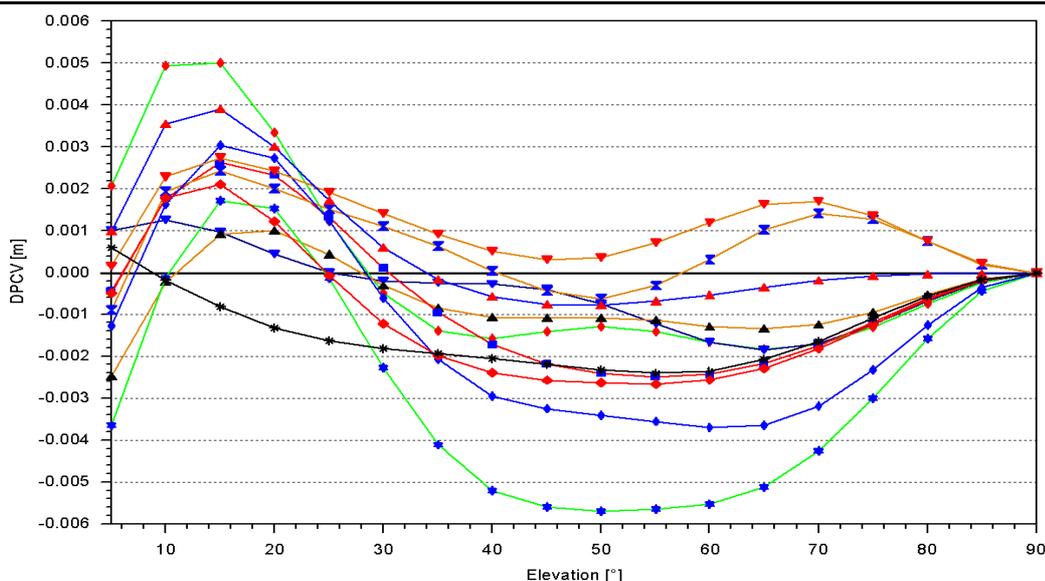
# Ergebnis der Vergleiche



Differenzen der PCV im Vollmodell

- unterschiedlicher **Einfluss Dreifuß**
  - Effekt stärker durch Symmetrie
- unterschiedlicher **Einfluss Pfeilerkopf**
  - Effekt stärker durch Symmetrie
- unterschiedlicher **Einfluss durch Abstand**
  - Bestätigung Theorie Nahfeld/Multipath
- Differenzen rein elevationsabhängiger PCV
  - Mittelung der azimuthalen PCV
  - reduzierte Information

## Vergleich elevationsabhängiger PCV - Nahfeld/Multipath -



- generelle Bestätigung der Ergebnisse Vollmodell
- Vergleich mit Theorie möglich

# GPS-Messungen

## Untersuchungen Nahfeld/Multipath auf GPS-Messungen



- **3 unterschiedliche Antennentypen**
  - TRM22020.00+GP
  - TRM33439.00+GP (aus AdV-Benchmark)
  - TRM39105.00 (aus AdV-Benchmark)
- 36 Tage Messungen auf/über Pfeiler Geo++ Messdach
- **siderisch** entsprechenden Zeiten

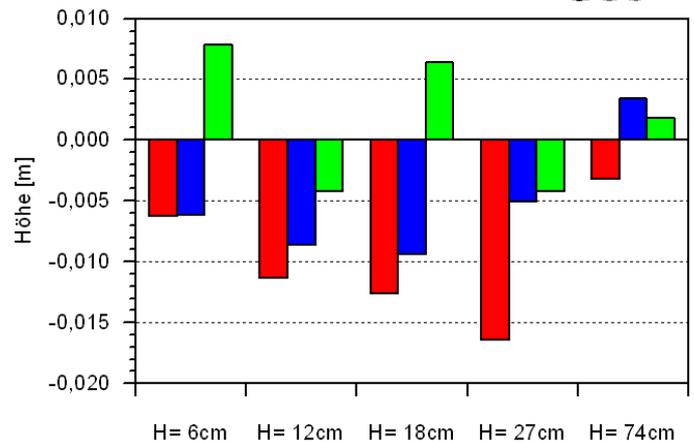
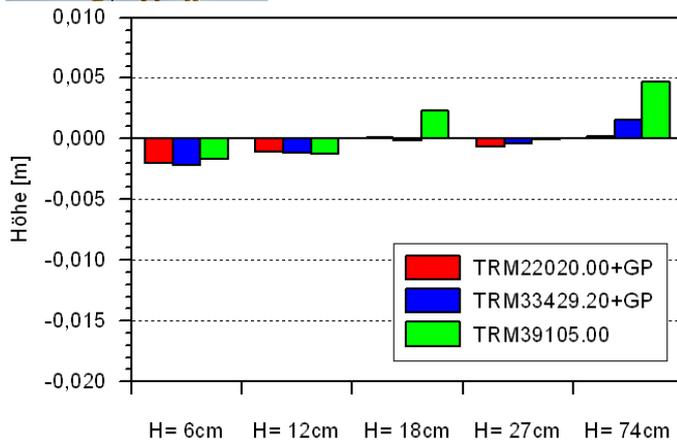
- **5 Adaptionen**

<i>Kopf</i>	<i>Dreifuss</i>	<i>Adaption</i>
30x30 cm	$\Delta$ Zeiss	6 cm
30x30 cm	$\Delta$ Zeiss	12 cm
30x30 cm	$\Delta$ Zeiss	15 cm
30x30 cm	$\Delta$ Zeiss	27 cm
Stativ	$\Delta$ Zeiss	74 cm

- absolute individuelle PCV Korrektur
- **Referenzkoordinaten** aus ca. 22 Tagen Daten



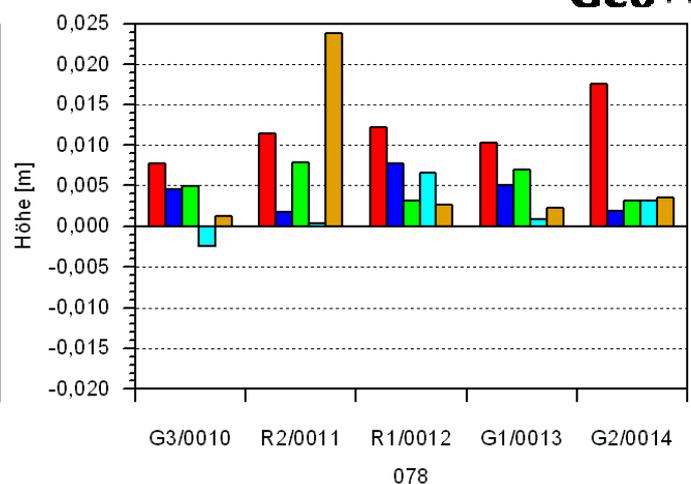
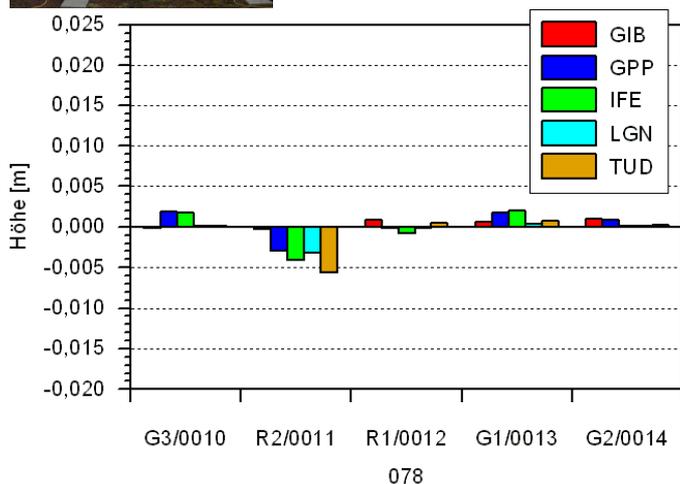
## Effekt Nahfeld – Multipath - Adaptionstest 8h -



- Koordinatenschätzung LX
  - geodätische Antenne < 2 mm
  - Rover Antenne < 5 mm
- Koordinatenschätzung L0+Troposhäre
  - systematische Differenzen
  - bis 15 mm abhängig vom Abstand
- Stativaufstellung < 3 mm



## Effekt Nahfeld - Multipath - AdV-Benchmark Teil 2 -

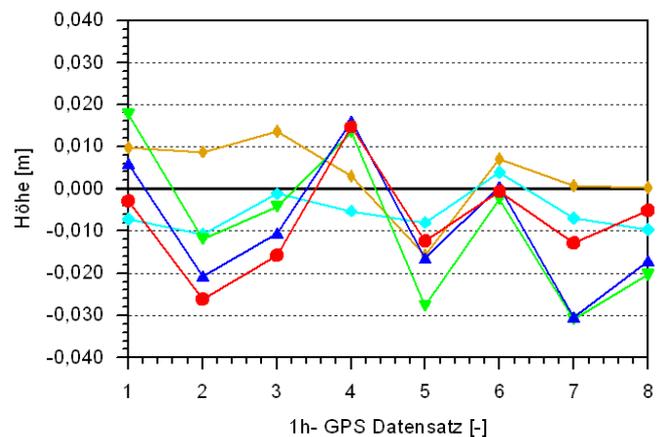
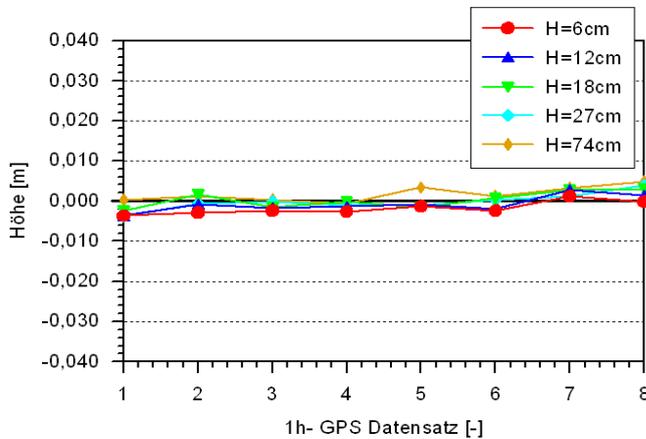


- Effekte aus Nahfeld/Multipath dominieren
- keine Aussagen über PCV-Qualität möglich (siehe AWS 2002)
- aber: aktuelle Ergebnisse zu Nahfeld/Multipath



## Effekt Nahfeld - Multipath - Adaptionstest 1h -

exemplarisch: Höhenkomponente TRM33439.00+GP



- Koordinatenschätzung LX
- Differenzen < 2 mm
- Koordinatenschätzung L0+Troposhäre
- systematische Differenzen **bis 30 mm**
- Multipath Einfluss erkennbar

## Zusammenfassung ...



- Theorie Nahfeld/Multipath
  - systematische Effekte durch nahe horizontale Reflektoren
  - keine Mittelung des Nahfeld/Multipath
- Untersuchung von Nahfeld/Multipath auf PCV-Kalibrierung
  - signifikante Effekte durch Pfeilerkopf, Dreifuß, etc.
- Untersuchung von Nahfeld/Multipath auf GPS-Messung
  - Bestätigung Theorie
  - Bestätigung Erkenntnisse aus PCV-Kalibrierungen mit Nahfeld/Multipath Veränderungen

# Ist die Welt noch in Ordnung?



stationsabhängige Fehleranteile

- **Antenne**

- absolute Antennenkalibrierung
- Pfeilerkalibrierungen: Effekte durch Nahfeld/Multipath

=> **Kalibrierung Nahfeld-Effekte** mit Roboter/Rekonstruktion

- **Multipath**

- systematischer Effekt (Nahfeld/Multipath)
- Umgebungs-Multipath (Mittelung über Zeit)

=> **Multipath Stationskalibrierung** erfasst beide Effekte

- **Stationsstabilität/Stationsauswahl**

- Zeitreihenanalyse
- systematische Störung von Pfeileraufstellungen durch Nahfeld/Multipath

## Dank



- Arbeitsgruppe Antennen- und Stationskalibrierung



- Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen



- Förderung in 1998-2002 durch Bundesministerium für Bildung, Forschung und Technologie (BMBF) and das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) unter 50NA9809



# Detailanalyse der Mehrwegeverhältnisse auf dem Dach einer GPS-Referenzstation

Lambert Wanninger  
Ingenieurbüro Wanninger, Neuwied

5. GPS-Antennenworkshop, Frankfurt/Main, 3. November 2003

## Mehrwegeeinflüsse

### entfernte Reflektoren (> 1 m)

- kurzperiodisch (< 60 Minuten),
- z.T. große Amplitude (cm+ auf iono.-freier Linearkombination)

### nahe Reflektoren

- langperiodisch
- in der Praxis vielfach kleine Amplitude (mm auf iono.-freier Linearkombination)
- kaum zu trennen vom Einfluss des Antennennahfeldes (Pfeiler-, Stativoberkante)

## Mehrwegeinflüsse auf dem Pfeilerdach der LGN

Mehrwegeinflüsse sind eine der dominanten stationsabhängigen Fehlereinflüsse. Gerade permanent betriebene Referenzstationen, die sich im allgemeinen auf Hausdächern befinden, weisen vielfach starke Reflektoren in der Antennenumgebung auf, die Mehrwegeinflüsse erzeugen. Beim Aufbau einer Referenzstation wird darauf geachtet, dass keine Reflektoren oberhalb des Antennenhorizonts anzutreffen sind. Dabei wird vielfach unterschätzt, dass auch die Reflektoren unterhalb des Antennenhorizonts, selbst bei Antennen mit vergrößerter Grundplatte oder sogar Choke-Rings, große Fehler erzeugen können.

Der für den Ringversuch der Antennenkalibrierung erzeugte Datensatz von simultanen Messungen mit kalibrierten Antennen auf allen sechs Pfeilern der LGN stellt nicht nur für eine Analyse im Hinblick auf Antennenkalibrierung, sondern auch für die Mehrwegeanalyse einen sehr wertvollen Datensatz dar. Dabei kann sowohl der Mehrwegeinfluss auf die einzelnen Pfeiler getrennt untersucht werden, wie auch die Mehrwegeempfindlichkeit der fünf beteiligten Antennentypen. Da Koordinatensollwerte dieses lokalen Netzes vorliegen, kann der Einfluss der Mehrwegeeffekte auf die Koordinatenbestimmung abgeleitet werden.

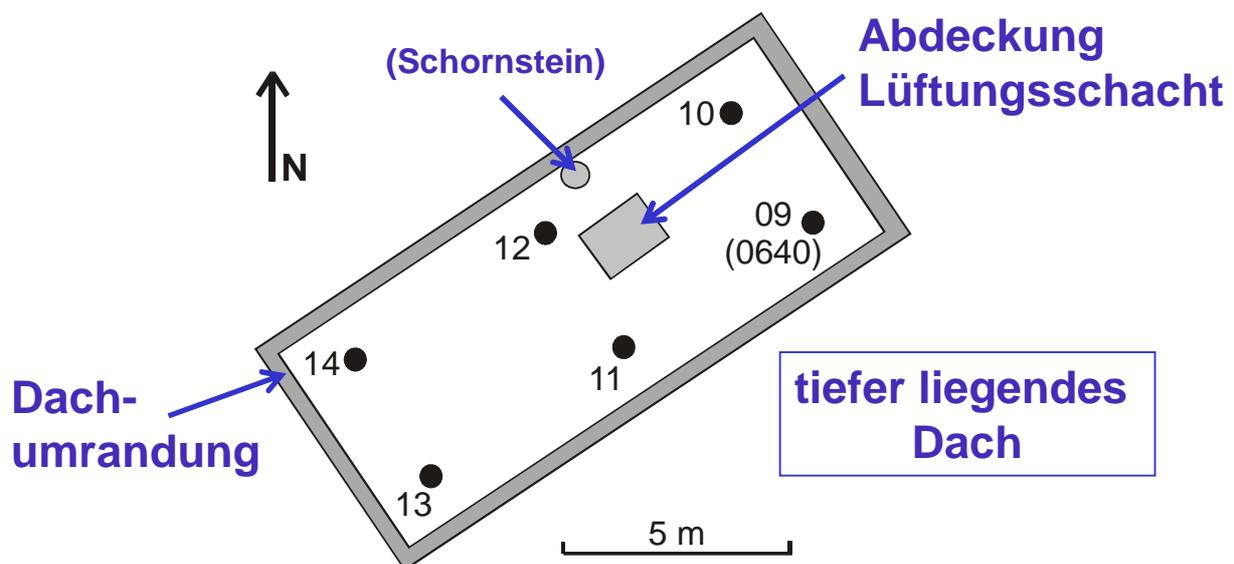
Zwei Analysemethoden werden hier angewandt:

- die Detektierung, Lokalisierung und Quantifizierung kurzperiodischer Mehrwegeanteile in einem Netz von Referenzstationen und
- der Mehrwegeinfluss auf die Höhenkoordinate bei Verwendung der typischen Auswerteparameter für großräumige Netze (ionosphäre-freie Koordinatenlösung mit Troposphärenschätzung).

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Pfeilerdach der LGN



Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Blick nach Nordosten



(LGN, 2003)

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Blick nach Südwesten



(LGN, 2003)

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Zu erwartende Einflüsse auf dem Pfeilerdach der LGN

Das Pfeilerdach der LGN weist eine Vielzahl von metallenen Reflektoren auf, von denen man erwarten würde, dass sie starke Mehrweegeinflüsse erzeugen. Dabei sind insbesondere zu nennen:

- die Abdeckung eines Lüftungsschachtes zwischen den Pfeilern 09-10-11-12 und
- die Dachumrandung.

Weiterhin gibt es im Südwesten ein tiefer liegendes Dach, welches als Reflektor wirken könnte.

Durch die Anordnung der Pfeiler und der potentiellen Reflektoren ist zu erwarten, dass die Mehrwegeausbreitung im Vergleich der Pfeiler stark variieren wird.

Die folgenden Untersuchungen kommen zu einem überraschenden Ergebnis, welches hier schon vorweg genommen werden soll. Zwar zeigen sich wie erwartet große Unterschiede zwischen den Pfeilern. Aber dass z.B. der Pfeiler 10 der mit Abstand am stärksten beeinflusste Pfeiler ist, war nicht zu erwarten. Insgesamt scheinen die erwarteten Reflektoren keinen großen tatsächlichen Einfluss zu haben, während die tatsächlich wirksamen Reflektoren auf ersten Augenschein hin nicht einwandfrei zu identifizieren sind. Dies zeigt, dass die tatsächlichen Mehrwegeverhältnisse nur durch die Analyse von durchgeführten Beobachtungen abgeschätzt werden können.

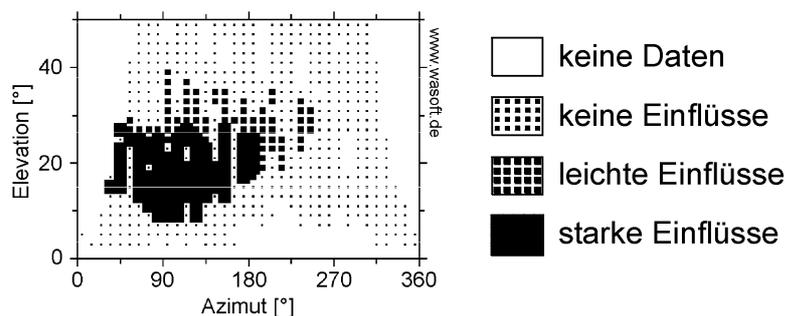
Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

# Phasenmehrwegeerkennung

## Detektierung, Lokalisierung, Quantifizierung mit WaSoft/Multipath

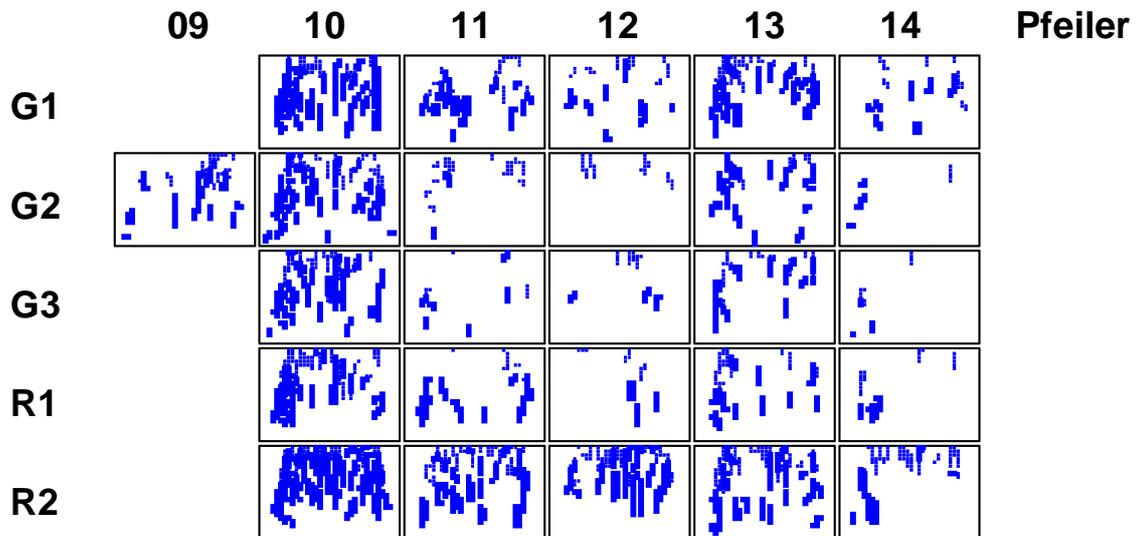
- kurzperiodische Anteile (< 30...60 min)
- hoch stehende Satelliten als Referenz
- im Netz von Stationen
- wenig gestörte Signale anderer Stationen als Referenz
- Identifizierung von aussendendem Satelliten und der Station



Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

# Mehrwegeanalyse 1



Antenne

# Mehrwegeanalyse 1

Mehrwegeindex

	09	10	11	12	13	14	Mittel
G1		34	15	6	21	6	17
G2	(13)	25	4	2	13	2	9
G3		27	4	3	11	1	9
R1		23	10	4	11	4	10
R2		42	24	24	24	11	25
Mittel		30	11	8	16	5	

# Rangliste der Stationen/Antennen

## Mehrwegeanalyse 1

### Stationen

### Antennen (+Empfänger)

schwach mehrwegebeeinflusst

wenig mehrwegeempfindlich

14  
12  
11

G2 G3  
R1

09 13

G1

10

R2

stark mehrwegebeeinflusst

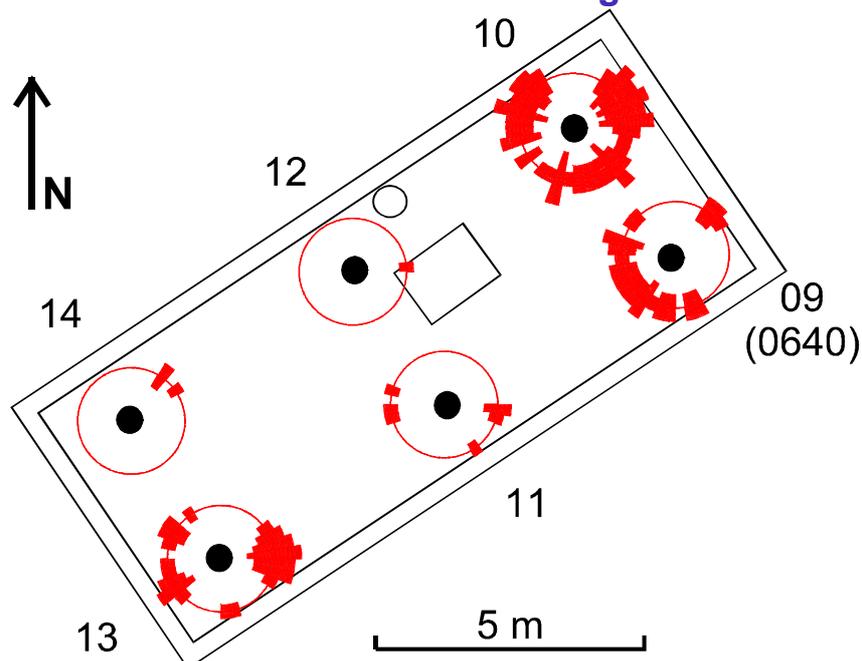
stark mehrwegeempfindlich

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Mehrwegeanalyse 1

### Azimutbereiche starker Mehrwegeeinflüsse



Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

### Interpretation Analyse 1:

Die Untersuchung der kurzperiodischen Mehrwegeinflüsse weist große Variationen der Mehrwegeeffekte an den einzelnen Pfeilern und auch große Unterschiede der Mehrwegeempfindlichkeit der einzelnen Antennentypen nach. Besonders betroffen sind Pfeiler 10, 13 und 09. Besonders empfindlich sind die Antennen R2 und G1. Letzteres ist um so erstaunlicher als dass die Antenne G1 eine Antenne mit vergrößerter Grundplatte und *Choke-Rings* (aber nicht baugleich mit einer Dorne-Margolin-Antenne) ist.

Die identifizierten Richtungen zu den wirksamen Reflektoren widerspricht den Vorüberlegungen zu potentiellen Reflektoren auf dem LGN-Dach. Die tatsächlich wirksamen Reflektoren lassen sich auf ersten Augenschein hin nicht einwandfrei in der Örtlichkeit identifizieren.

### Interpretation Analyse 2:

Bei der Analyse der durch Mehrwegeinflüsse verursachten Höhenfehler bei einer ionosphärenfreien Koordinatenlösung mit Schätzung von Troposphärenparametern zeigen sich Variationen dieser Höhenfehler von bis zu 3 cm zwischen bestimmten Pfeiler/Antennen-Kombinationen. Bei den drei geodätischen Antennen haben die Pfeiler 11, 12 und 14 ein sehr ähnliches Verhalten. Die geodätischen Antennen zeigen geringere Variationen zwischen den fünf Pfeilern als die 2 RTK-Antennen. Wechselt man auf einem der Pfeiler eine geodätische Antenne gegen eine andere geodätische Antenne aus, so muss man mit einer mehrwegeverursachten Höhendifferenz von ungefähr 1 cm rechnen.

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Mehrwegeanalyse 2

### Höhenkoordinatenfehler in Basis zu Station 09

iono.-frei, tropo. Schätzung, 24 h, Geo++-APZ-Korrekturen  
berechnet mit WaSoft

	Pfeiler	10	11	12	13	14	MAX-MIN
Ant.	G1	1,1	9,8	9,2	4,5	9,6	8,7
	G2	-6,7	1,9	1,4	-5,2	2,0	8,7
	G3	3,9	8,5	10,3	8,2	10,1	6,4
	R1	-8,1	1,2	4,8	-0,7	-0,2	12,9
	R2	-21,3	-2,1	-8,7	-7,0	-5,9	19,2
MAX-MIN G		10,6	7,9	8,9	13,4	8,1	
MAX-MIN G+R		25,2	11,9	19,0	15,2	16,0	[mm]

**Antennenwechsel G: ... ~ 10 mm Höhenveränderung**

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

# Rangliste der Stationen/Antennen

## Mehrwegeanalyse 2

### Stationen

schwach mehrwegebeeinflusst

11 12 14

10 13

stark mehrwegebeeinflusst

### Antennen (+Empfänger)

wenig mehrwegeempfindlich

G3  
G1 G2

R1

R2

stark mehrwegeempfindlich

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)

## Schlussfolgerungen

### Mehrwegeanalyse LGN-Dach: 6 Pfeiler, 5 Antennen

- große Unterschiede der Mehrwegeeinflüsse auf einzelne Pfeiler
  - geringer Einfluss durch erwartete Reflektoren
  - tatsächliche Reflektoren durch Augenschein nicht einwandfrei identifizierbar
  - SAPOS-Station auf mittelmäßigem Pfeiler 09
- große Unterschiede in Mehrwegeempfindlichkeit der Antennen
- Antennenwechsel kann zu mehrwegebedingten Höhendifferenzen von 1 cm führen

Ingenieurbüro Wanninger

[www.wasoft.de](http://www.wasoft.de)



---

# Absolute Stationskalibrierung im SAPOS<sup>®</sup>-Referenzstationsnetz Niedersachsen

*Florian Dillßner, Günter Seeber*

Institut für Erdmessung, Universität Hannover

*Uwe Feldmann-Westendorff*

Landesvermessung+Geobasisinformation Niedersachsen

*Gerhard Wübbena, Martin Schmitz, Mark Bachmann*

Geo++<sup>®</sup> GmbH

---

*„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt*

---

## Projektfinanzierung



- Forschungs Kooperation mit dem Landesbetrieb Landesvermessung + Geobasisinformation Niedersachsen (LGN)
- Dauer: 01.09.2002 bis 31.08.2005

---

*„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt*

# Projektzielsetzung

---



Einsatz und Weiterentwicklung des „Hannoverschen Verfahrens zur Absoluten Stationskalibrierung“ mit dem Ziel der

- Qualitätssicherung im SAPOS®-Referenzstationsnetz Niedersachsen
- Verbesserung der Genauigkeit und Sicherheit für den Nutzer des Dienstes
- Erschließung neuer GNSS-Anwendungen

---

*„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt*

# Mehrwegeeffekt

---



- Ursache:
  - Reflexion der Satellitensignale an geeigneten Flächen
  - Überlagerung des direkten Signals mit Umwegsignal(en)
- Größe des Messfehlers ist abhängig von
  - Material und Oberflächenbeschaffenheit des Reflektors
  - Frequenz und Sendestärke des Satelliten
  - Einfallswinkel auf den Reflektor
  - Antennendiagramm und Messtechnik des Empfängers
- Auswirkung auf Trägerphasensignale:
  - Periodische Positionsfehler mm...cm
  - Falsche Mehrdeutigkeitsfestsetzungen

---

*„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt*

## Maßnahmen:

*Beobachtungsanordnung*  
(Standortwahl, Antennentyp, Beobachtungsdauer)

*Empfängertechnologie*

*Stationskalibrierung*

Keine Bildung von Differenzen oder Linearkombinationen!

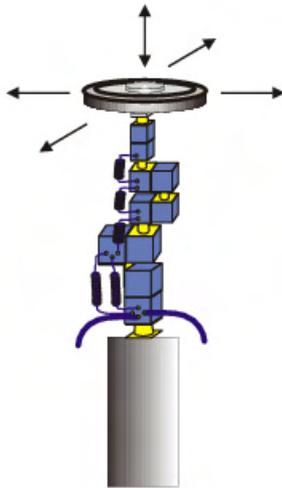
„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

# Hannoversches Verfahren

- Entwicklung durch IfE und Fa. Geo++<sup>®</sup>
- Verfahrensschritte:
  - Errichtung einer GPS-Roboterstation nahe der zu kalibrierenden Station
  - Dekorrelation des Multipath auf Roboterstation durch schnelle, quasi zufällige Bewegungen
  - Bildung von Stationsdifferenzen
  - Modellierung und Anbringung der Korrektur
- Voraussetzung ist Kenntnis der abs. PCV

„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

## Kinematische Roboterstation



## Statische Referenzstation

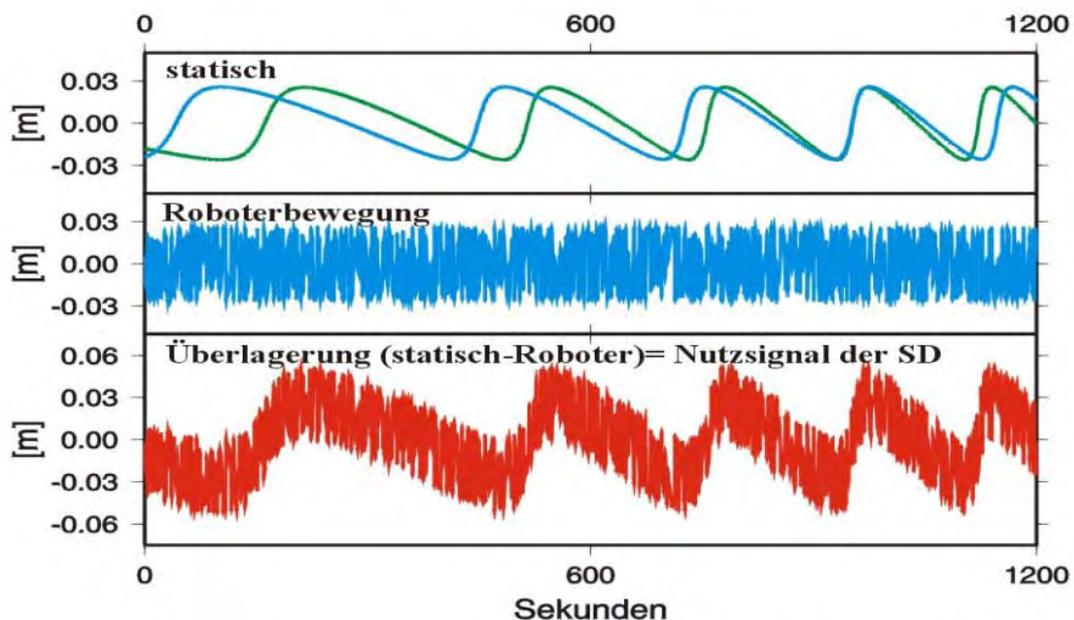


PCV-korrigiert, MP-korreliert

PCV-korrigiert, MP-dekorreliert

„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

## Dekorrelationsprinzip



„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

## GNSS-Beobachtungsgleichung

$$PR = |R| + dC + dS + dD + \lambda N + \varepsilon$$

- $PR$ : Pseudostrecke zwischen Satellit/Empfänger  
 $R$ : Vektor zwischen Phasenzentren Satellit/Empfänger  
 $dC$ : Empfänger- und Satellitenuhrfehler  
 $dS$ : Stationsabhängiger Fehler  
 $dD$ : Distanzabhängiger Fehler  
 $\lambda$ : Wellenlänge  
 $N$ : Mehrdeutigkeit  
 $\varepsilon$ : Zufälliger Messfehler

„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

## Stationsdifferenz (Kurze Basislinie, PCV-korrigiert)

$$SD_{r,k} = (dC_r - dC_k) + (dM_r - dM_k) + (\varepsilon_r - \varepsilon_k)$$

- $dC_r$ : Uhrfehler von Roboterstation  
 $dC_k$ : Uhrfehler von Referenzstation  
 $dM_r$ : Mehrwegeeffekt auf Roboterstation  
 $dM_k$ : Mehrwegeeffekt auf Referenzstation  
 $\varepsilon_r$ : Zufälliger Messfehler von Roboterstation  
 $\varepsilon_k$ : Zufälliger Messfehler von Referenzstation

„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

## Beobachtungsgleichung

$$SD_{r,k} = dC_{r,k} + dM_k + \varepsilon_{r,k}$$

$dC_{r,k}$ : Uhrfehlerdifferenz zwischen beiden Station

$dM_k$ : Mehrwegeeffekt auf Referenzstation

## Erhöhtes Messrauschen

$$\varepsilon_{r,k} = (\varepsilon_r - \varepsilon_k) + dM_r$$

$\varepsilon_r - \varepsilon_k$ : Zufällige Messfehler von beiden Stationen

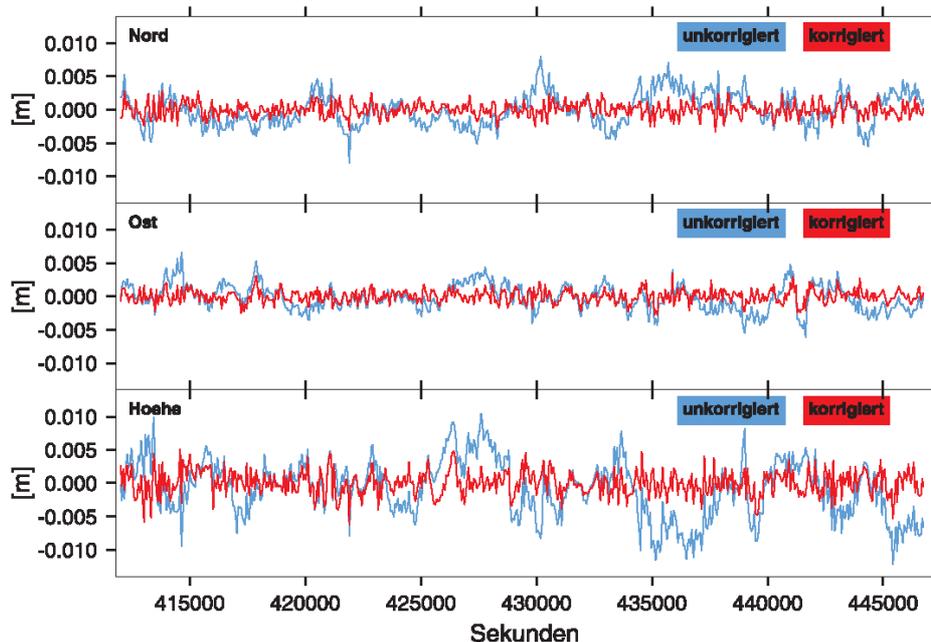
$dM_r$ : Zufälliger Mehrwegeeffekt auf Roboterstation

„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

- Eingangsgrößen: Stationsdifferenzen  $SD_{r,k}$  über mehrerer Tage zu sämtlichen Satelliten
- Ansatz für mathematisches Modell:
  - Gleiche Satellitenkonstellation nach siderischen Tag
  - Gleiche Mehrwegeeffekte in Bahnschnittpunkten
  - Korrelationslängen von Uhr und Mehrwegeeffekten a priori in etwa bekannt
- Parametrisierung des Mehrwegeeffekts  $dM_k$  durch Tschebyscheff-Polynome

„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

# Auswertebeispiel



„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

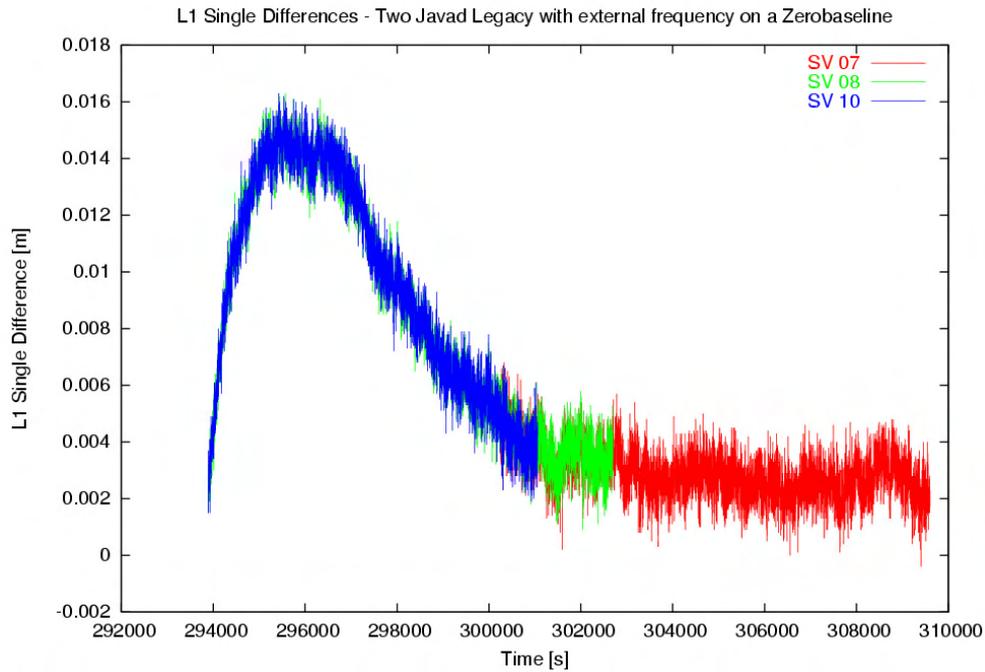
# Uhrmodellierung



- Bisher: Freie Uhrschätzung
- Nachteil: Modell war nur zeitlich begrenzt gültig
- Neu: Uhrfehlermodellierung  $dC_{r,k}$  durch Polynome (Bahnschnittpunkte dienen als Stützstellen)
- Stabiler Uhrverlauf zwischen Stützstellen nötig
  - Empfängerinterne Quarzoszillatoren ungeeignet
  - Nutzung eines gemeinsamen externen Oszillators (hier: Rubidiumfrequenznormal)

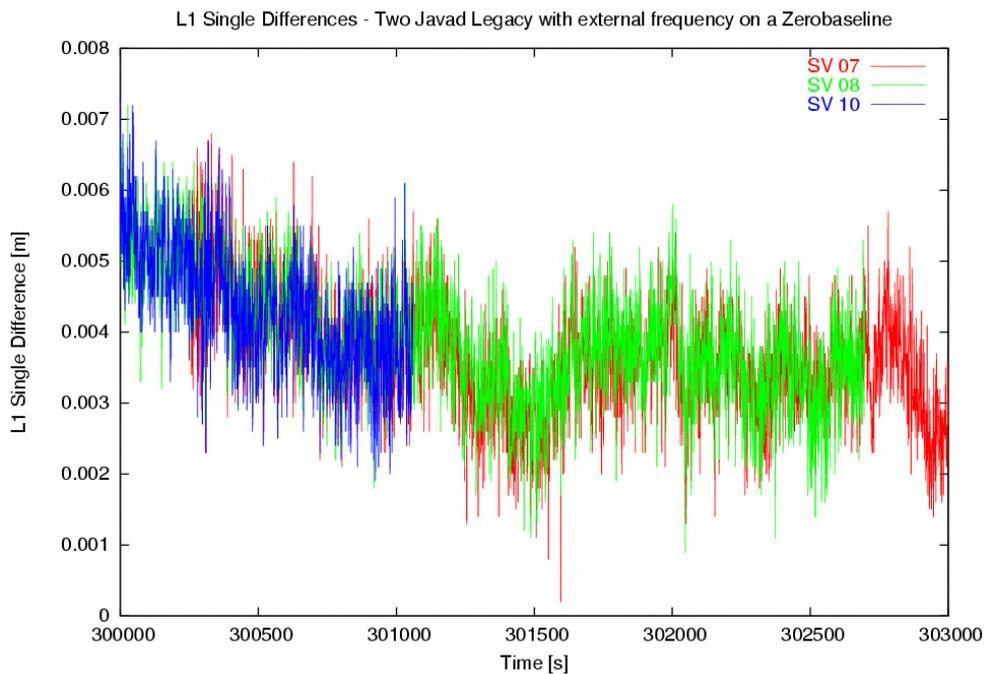
„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

# Uhrdrift



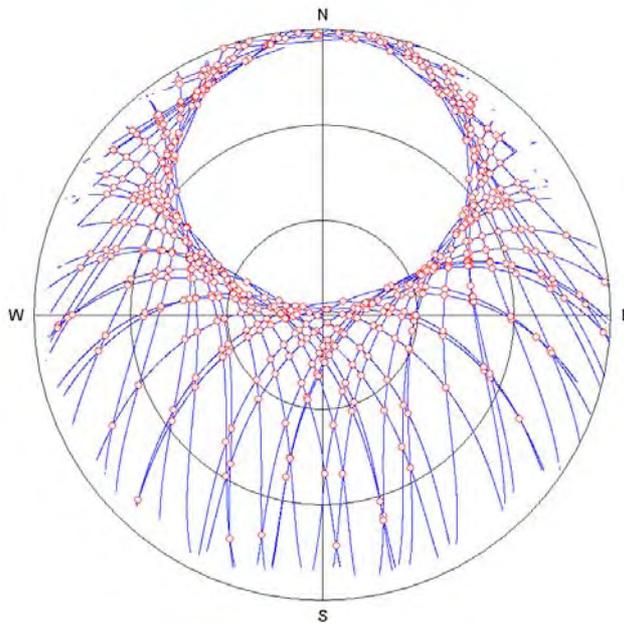
„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

# Uhrdrift



„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

# Bahnschnittpunkte



- Zweck: Ableitung von Uhrinformationen, da Multipath identisch
- Je nach Konstellation und Abschattungen: 500 - 600 Punkte/Tag
- Maximal 400 - 700 s voneinander entfernt
- Verdichtung durch GLONASS denkbar

„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

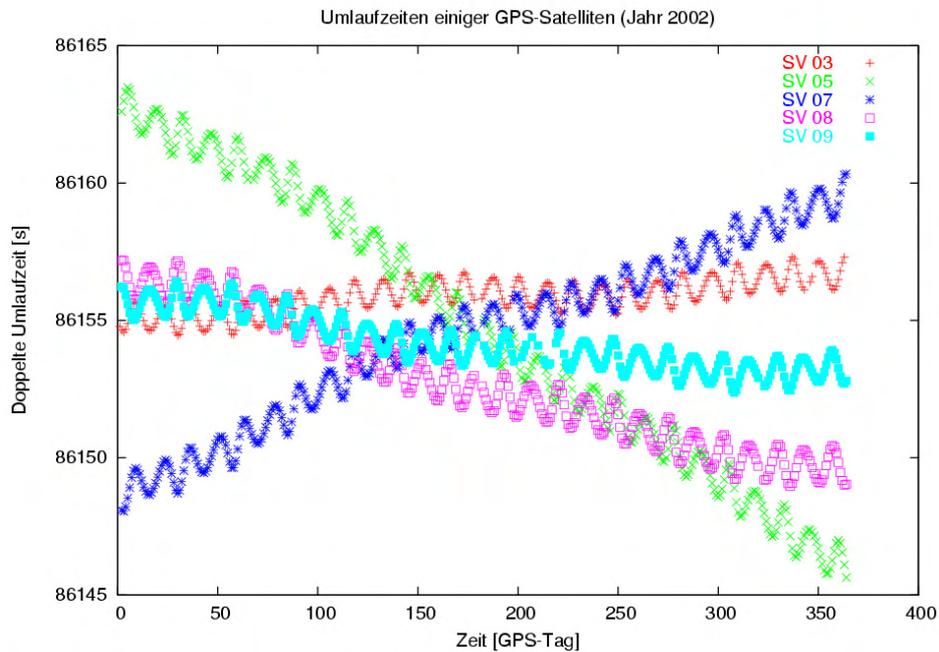
# Restuhrfehler



- Multipathmodell beinhaltet Restuhrfehler (zu einer Epoche  $t_j$  für jeden Satellit gleich)
- Fehler kann theoretisch nach Anbringung der MP-Korrektur mitgeschätzt werden
- Problem: Umlaufzeiten der Satelliten driften auseinander
- Konsequenz: Kein gleicher Restuhrfehler zur Messepoche  $t_j$  mehr!

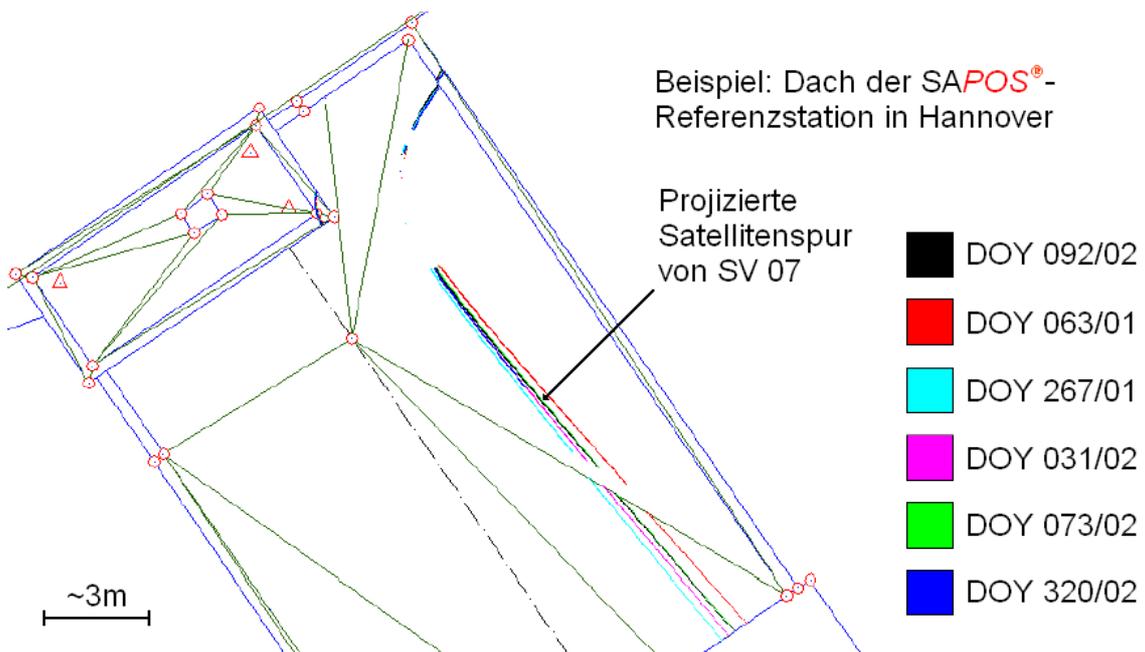
„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

# Bahnumlaufzeiten



„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

# Reflexionspunkte



„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt

- „Hannoversches Verfahren“ liefert gute Resultate für zeitnahe Messungen
- Parameter nicht zeitlich unbegrenzt gültig
- Ursachen:
  - Längsdrift der Satellitenbahnen
  - Querdrift der Satellitenbahnen
- Abhilfe: Andere „Hardware“ (Empfänger, Frequenznormal), Integration GLONASS, flächenhafte Modellierung

*„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt*

## Vielen Dank für's Zuhören!



*„Absolute Stationskalibrierung“ – Antennenworkshop 2003, Frankfurt*

## ISO-Standardreihe 17 123

### Field procedures for testing geodetic and surveying instruments

Part 1: Theory, 2002

Part 2: Levels, 2001

Part 3: Theodolites, 2001

Part 4: EDM instruments, 2001

Part 5: Electronic tacheometers, draft 2002

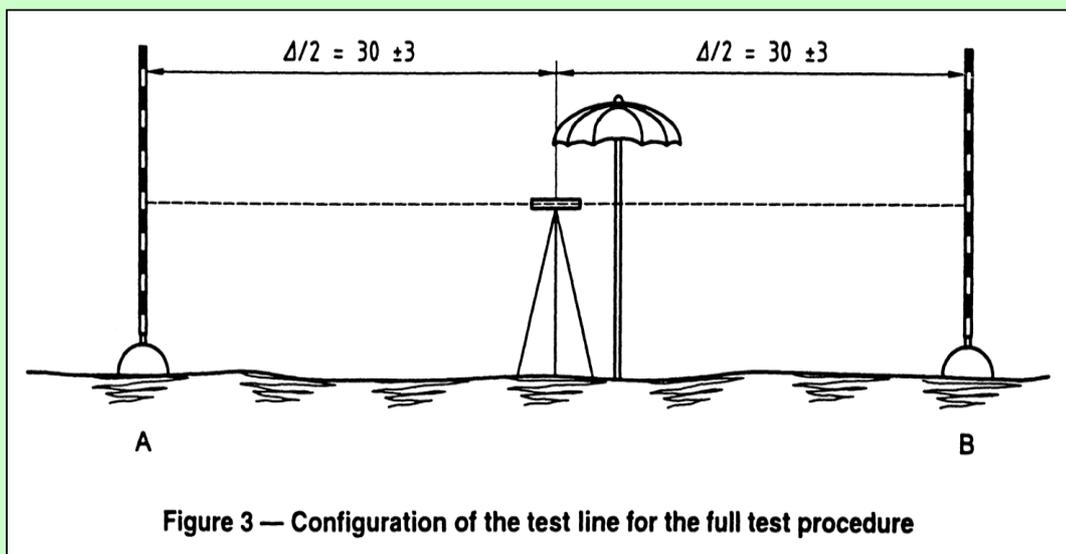
Part 6: Rotating lasers, draft 2002

Part 7: Optical plumbing instruments, draft 2002

Part 8: GPS field measurement systems in real-time, draft 2003



## ISO 17 123, Part 2 Levels



- 2 x 20 Niv-Standpunktwiderrüche  $w_P$ ,  $f = 40 - 2 = 38$
- $\Rightarrow$  Standardabweichung für 1 km Doppelnivellement  $s_{ISO}$
- $\Rightarrow$  Nullpunktfehler des Niv-Lattenpaares
- $\Rightarrow$  Statistische Tests  $s < \sigma$ ,  $s^A = s^B$
- $\Rightarrow$  Aussagen zur System-Funktion



## ISO 17123, Part 5 Electronic tacheometers

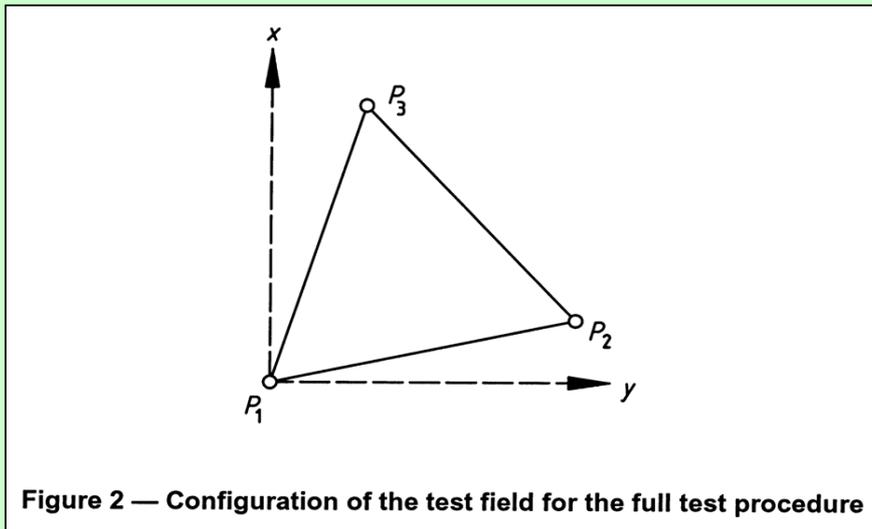


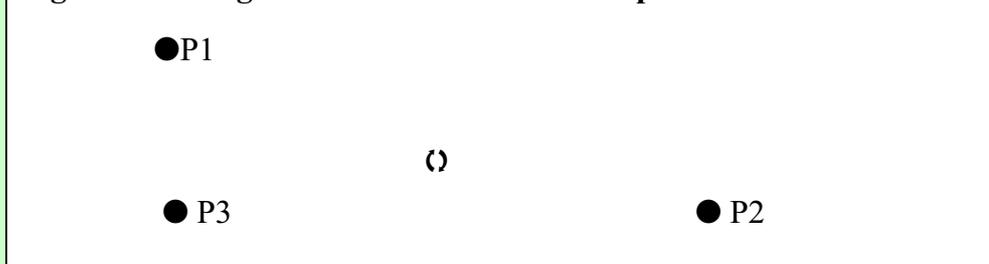
Figure 2 — Configuration of the test field for the full test procedure

- 3 x 3 x 4 Messergebnisse:  $dx, dy, dH, f = 36 - 12 = 24$
- => Durchschnittswerte  $dx, dy$  und  $dH$
- => Standardabweichungen  $s_x, s_y, s_H$  und  $s_{Lage}$
- => Statistische Tests  $s < \sigma, s^A = s^B, d = 0$
- => Aussagen zur System-Funktion



## ISO 17 123, Part 8 GPS field measurement systems in real-time (draft: February 2003)

Figure 1 Configuration of the test field for position measurement



- 3 x 3 x 4 Messergebnisse (Abweichungen zu Sollwerten!):  
 $dX, dY, dZ$  oder  $dE, dN, dh, f = 36$
- => Durchschnittswerte  $dE, dN$  und  $dh$
- => Standardabweichungen  $s_E, s_N, s_h$  und  $s_{Lage}$
- => Statistische Tests  $s < \sigma, s^A = s^B, d = 0$
- => Aussagen zur System-Funktion



## Measurements of the simplified test procedure

Table A.1 contains, in columns 3 to 5, the 27 measured values,  $x_{jp}$ ,  $y_{jp}$ ,  $h_{jp}$  and in columns 6 to 8, the true deviations,  $e_{xjp}$ ,  $e_{yjp}$ ,  $e_{hjp}$ .

1 set j	2 point i	3 $x_{ji}$ (East) m	4 $y_{ji}$ (North) m	5 $h_{ji}$ (Height) m	6 $e_{xji}$ cm	7 $e_{yji}$ cm	8 $e_{hji}$ cm
1	1	32 369 879,997	5 615 364,653	116,662	-0,5	+1,1	-1,3
	2	32 369 877,640	5 615 426,326	114,719	+0,5	+1,0	+1,2
	3	32 369 932,259	5 615 361,064	128,092	-1,6	-0,2	-1,4
2	1	32 369 879,981	5 615 364,656	116,658	+1,1	+0,8	-0,9
	2	32 369 877,637	5 615 426,327	114,738	+0,8	+0,9	-0,7
	3	32 369 932,255	5 615 361,055	128,068	-1,2	+0,7	+1,0
3	1	32 369 879,999	5 615 364,674	116,656	-0,7	-1,0	-0,7
	2	32 369 877,659	5 615 426,341	114,714	-1,4	-0,5	+1,7
	3	32 369 932,237	5 615 361,064	128,096	+0,6	-0,2	-1,8
$S_{e_{ji}}$					-2,4	+2,6	-2,9
$\bar{\delta}$					-0,3	+0,3	-0,3

Case 1: The permitted deviation for all coordinate components is given:  $p = 6$  cm; all deviations,  $e_{xji}$ ,  $e_{yji}$  and  $e_{hji}$ , are  $< p$ .

Case 2: The value  $p$  is not given, all deviations,  $e_{xji}$  and  $e_{yji}$  are  $< 2,5 \times s_{Hz} / \sqrt{2} = 2,5 \times 1,0$  cm = 2,5 cm, and all deviations,  $e_{hji}$ , are  $< 2,5 \times s_v = 2,5 \times 1,3$  cm = 3,3 cm (see Annex B, B.3). In both cases, the PDGPS equipment is suited for the intended measuring task.



## Calculation of the full test procedure, standard deviations

$$S_{\text{ISO-GPS-P}} = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_x^2 + \sum \varepsilon_y^2 + \sum \varepsilon_h^2}{v}} = \sqrt{\frac{38,00 \text{ cm}^2 + 32,75 \text{ cm}^2 + 59,19 \text{ cm}^2}{36}} = 1,9 \text{ cm},$$

$$S_{\text{ISO-GPS-Hz}} = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_x^2 + \sum \varepsilon_y^2}{v}} = \sqrt{\frac{38,00 \text{ cm}^2 + 32,75 \text{ cm}^2}{36}} = 1,4 \text{ cm}$$

$$S_{\text{ISO-GPS-v}} = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon_h^2}{v}} = \sqrt{\frac{59,19 \text{ cm}^2}{36}} = 1,3 \text{ cm}$$



# DIN-Norm 18727

## Kalibrierung von GNSS-Antennen

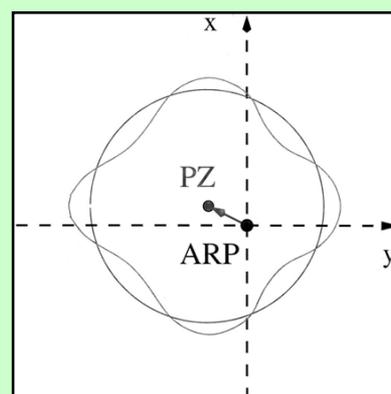
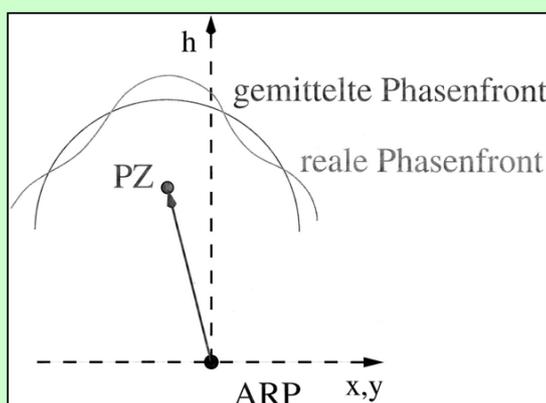
(Stand: Entwurf Februar 2003)

---

- Anwendungsbereich
- Normative Verweisungen
- Begriffe
  - Messung
  - Kalibrierung
  - Qualitätssicherung
- Anforderungen an die Planung und Durchführung von Kalibriermessungen
- Auswertung von Kalibriermessungen
- Darstellung und Dokumentation (Kalibrierzertifikat)
- Anhang (informativ mit Text, Tabellen und Bildern)



## GPS-Antennenmodell (nach Görres 2001)



- Antennen-Offsets (AO):
  - Höhe:  $dh$
  - Lage:  $dx$  ( $d_{Nord}$ ) und  $dy$  ( $d_{ost}$ )
- Antennenphasenvariationen (APV):
  - Elevationskomponenten  $dF$  ( $\beta$ ):  $\beta = 0^\circ$  bis  $90^\circ$
  - Azimutkomponenten  $dF$  ( $a$ ):  $a = 0^\circ$  bis  $360^\circ$



# DIN-Norm 18 727, Antennenmodelle

$$dr(\beta, \alpha) = \underline{P} \cdot \underline{e} + p(\beta, \alpha) + const.$$

mit

- $dr(\beta, \alpha)$  = richtungsabhängiger Korrekturwert an der Phasenmessung,
- $\alpha$  = Azimut,
- $\beta$  = Elevation (Höhenwinkel),
- $\underline{P}$  = konstanter Antennen-Offset ( $P(x, y, h)$ ),
- $\underline{e}$  = Einheitsvektor in Richtung des Satelliten mit  $\alpha$  und  $\beta$ ,
- $p(\beta, \alpha)$  = richtungsabhängiger Korrekturterm, modelliert durch ein Polynom, Polygon oder die Entwicklung einer Kugelflächenfunktion.

Antennenmodell	Antennenparameter
A	$dh, dx, dy, d\Phi(\beta), d\Phi(\alpha)$
B	$dh, dx, dy, d\Phi(\beta)$
C	$dh, dx, dy$
D	$dh$

Bild 1: Antennenmodelle



## IGS-Referenzniveau (bis 2002):

- Antennenreferenzpunkt (ARP),
- Relativkalibrierung, Elevationsterme -> keine Azimut-Terme,
- 10 Grad Elevationsmaske, 5-Grad-Schritte für  $\beta$

VENDOR	MODEL #	DESCRIPTION	(AVE) YR/MO/DY
[north] [east] [up]	[90] [85] [80] [75] [70] [65] [60] [55] [50] [45]	L1 Offset (mm)	
[north] [east] [up]	[40] [35] [30] [25] [20] [15] [10] [5] [0]	L1 Phase at Elevation (mm)	
[north] [east] [up]	[90] [85] [80] [75] [70] [65] [60] [55] [50] [45]	L2 Offset (mm)	
[north] [east] [up]	[40] [35] [30] [25] [20] [15] [10] [5] [0]	L2 Phase at Elevation (mm)	
TURBOROGUE	DORNE MARGOLIN T	OLD NAME	( 0) 96/06/30
0.0	0.0	110.0	
0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
0.0	0.0	128.0	
0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
TR	TRM22020.00+GP	Mod. 22020	( 13) 96/06/30
1.5	-1.2	75.1	
0.0 1.8	4.6 8.1	11.7 14.5	16.1 16.9 16.9 16.2
14.9 13.4	11.9 10.4	9.0 7.9	8.2 0.0 0.0
-1.1	1.7	69.2	
0.0 0.3	0.9 1.8	3.0 4.1	4.9 5.4 5.6 5.6
5.3 4.5	3.6 2.8	2.1 1.2	0.1 0.0 0.0
TR	TR GEOD L1/L2 W/O GP	OLD NAME Mod. 22020 w/o gp	( 4) 96/06/30
3.1	0.9	86.6	
0.0 0.2	0.4 1.2	2.5 3.6	4.5 5.1 5.6 5.8
5.5 5.0	4.2 2.7	0.6 -1.5	-2.6 0.0 0.0
81.7	1.2	-0.1	
0.0 0.0	0.5 1.2	2.0 2.9	3.5 3.9 4.3 4.7
4.9 4.5	3.5 2.2	1.0 -1.1	-4.8 0.0 0.0



## IGS-Referenzniveau (ab 2003):

- Antennenreferenzpunkt (ARP),
- Absolutkalibrierung, Elevations- und Azimut-Terme
- Nullhorizont, 5-Grad-Schritte für  $\beta$ , 30-Grad-Schritte für  $a$
- Format ANTEX (Quelle: Prof. Rothacher)

A	1.0	G								ANTEX VERSION / SYST		
										PCV TYPE / REFANT		
										COMMENT		
										COMMENT		
										END OF HEADER		
										START OF ANTENNA		
										TYPE / SERIAL NO		
TRM33429-20+GP		1220226043								3	03-APR-02	METH / BY / # / DATE
FIELD		FESG										DAZI
30.0												ZEN1 / ZEN2 / DZEN
0.0	90.0	5.0										# OF FREQUENCIES
2												VALID FROM
1998	1	1	0	0	0.0000000							VALID UNTIL
2010	12	31	23	59	59.0000000							COMMENT
												COMMENT
G01												START OF FREQUENCY
0.20	-0.75	72.86										NORTH / EAST / UP
NOAZI	-6.19	-1.03	2.02	3.25	3.31	2.76	1.90	0.74	-0.80	-2.72		
-4.78	-6.55	-7.56	-7.48	-6.30	-4.35	-2.23	-0.61	0.00				
0.0	-6.19	-1.03	2.02	3.25	3.31	2.76	1.90	0.74	-0.80	-2.72		
-4.78	-6.55	-7.56	-7.48	-6.30	-4.35	-2.23	-0.61	0.00				
30.0	-6.19	-1.03	2.02	3.25	3.31	2.76	1.90	0.74	-0.80	-2.72		
-4.78	-6.55	-7.56	-7.48	-6.30	-4.35	-2.23	-0.61	0.00				
60.0	-6.19	-1.03	2.02	3.25	3.31	2.76	1.90	0.74	-0.80	-2.72		
-4.78	-6.55	-7.56	-7.48	-6.30	-4.35	-2.23	-0.61	0.00				
90.0	-6.19	-1.03	2.02	3.25	3.31	2.76	1.90	0.74	-0.80	-2.72		
-4.78	-6.55	-7.56	-7.48	-6.30	-4.35	-2.23	-0.61	0.00				
120.0	-6.19	-1.03	2.02	3.25	3.31	2.76	1.90	0.74	-0.80	-2.72		
-4.78	-6.55	-7.56	-7.48	-6.30	-4.35	-2.23	-0.61	0.00				
150.0	-6.19	-1.03	2.02	3.25	3.31	2.76	1.90	0.74	-0.80	-2.72		
-4.78	-6.55	-7.56	-7.48	-6.30	-4.35	-2.23	-0.61	0.00				



## Anforderungen zur Messunsicherheit der Antennenparameter

Antennenparameter	Typischer Wertebereich der Antennenparameter mm	Erreichbare Messunsicherheit pro Parameter	
		Relativ mm	Absolut mm
$dh$	200	2	1
$dx$	5	<1	<1
$dy$	5	<1	<1
$dF(\beta)$	20	1 bis 2	1
$dF(a)$	10	1 bis 2	1





# Zur Notwendigkeit der Kalibrierung moderner GPS Antennen

---

Herbert Landau, *Trimble Terrasat GmbH*

Antennenworkshop, Frankfurt 3. November 2003



## Geodetische Antenne Zephyr

---



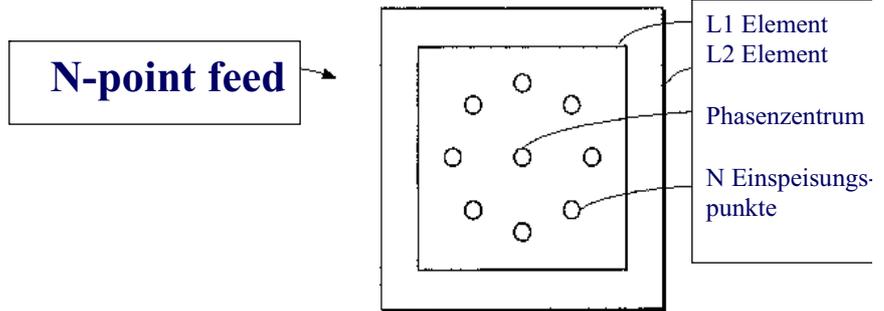
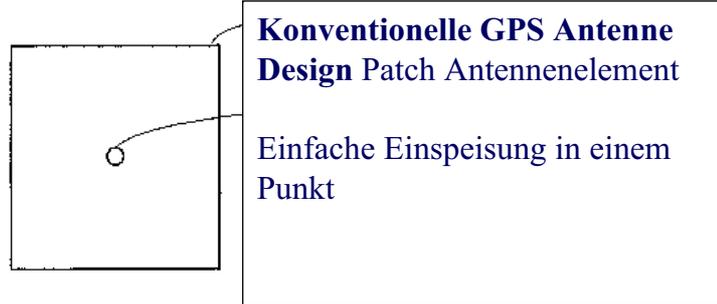
- ◆ Symmetrische n-fache Einspeisung
- ◆ PCVs und Wiederholbarkeit
- ◆ Stealth Ground Plane Material
- ◆ Testergebnisse von Vergleichen mit der Dorne Margolin Choke Ring Antenne



# N-fache Einspeisung



- ◆ Symmetrische mehrfache Einspeisung
- ◆ Verbesserte Phasenzentrumsstabilität und Wiederholbarkeit
- ◆ Verbessertes Tracking

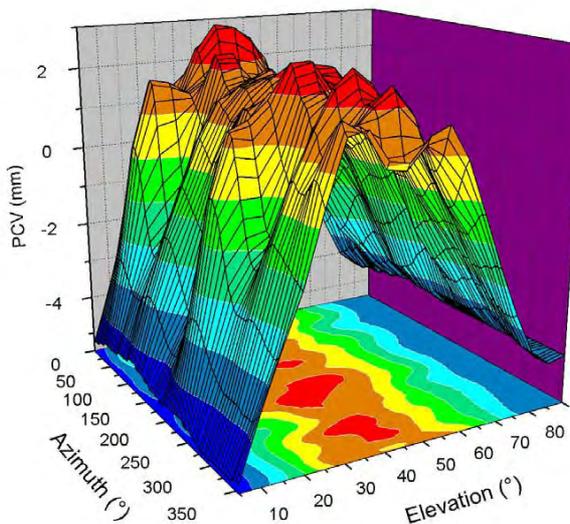


Antennenworkshop, Frankfurt, 3. November 2003 - 3

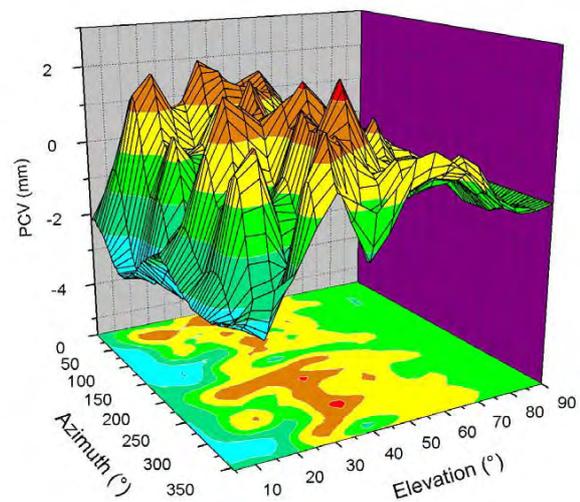
# PCV - Zephyr Geodetic



**L1 PCV [mm]**



**L2 PCV [mm]**

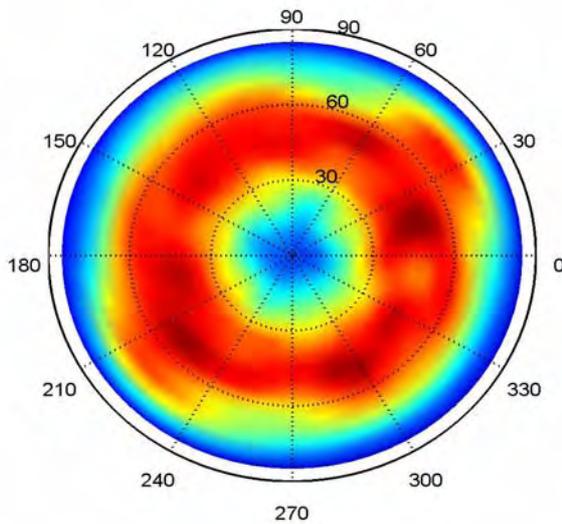


Antennenworkshop, Frankfurt, 3. November 2003 - 4

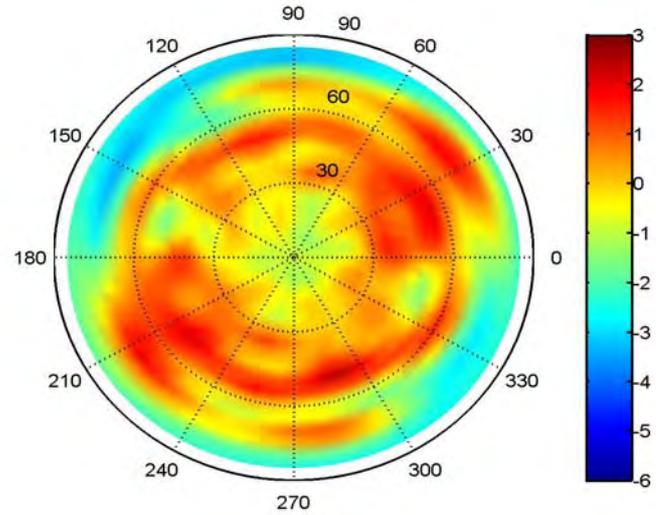
# Rotationssymmetrie



## L1 PCV [mm]



## L2 PCV [mm]



Mittl. Abweichung von Symmetrie < 1mm

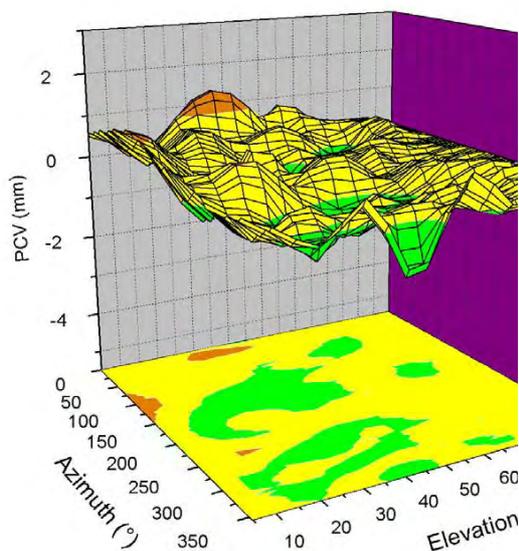


Antennenworkshop, Frankfurt, 3. November 2003 - 5

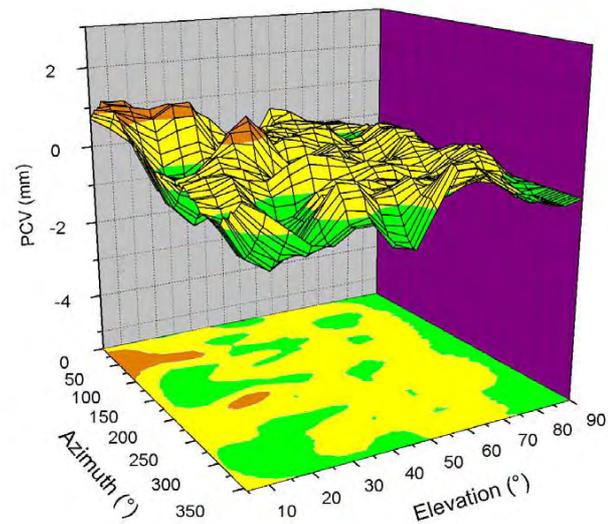
# Differenzen - 2 Zephyr-Antennen



## L1 [mm]



## L2 [mm]



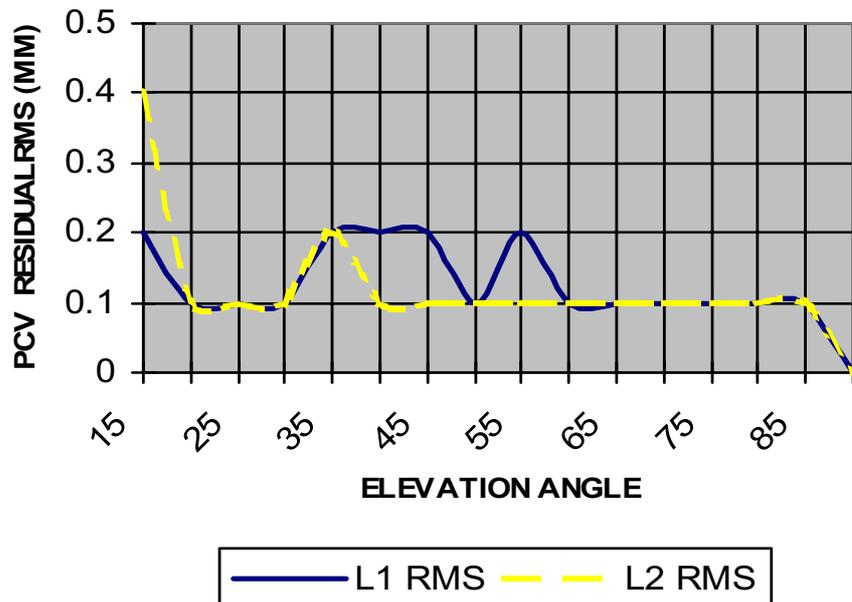
Antennenworkshop, Frankfurt, 3. November 2003 - 6

# Wiederholbarkeit der PCV



- ◆ 10 Antennen aus Produktion
- ◆ RMS <0.2mm L1
- ◆ RMS <0.4mm L2

L1 AND L2 PCV RESIDUAL RMS



Antennenworkshop, Frankfurt, 3. November 2003 - 7

# Trimble Stealth™ Ground Plane



- ◆ Benutzt R-Card Material, entwickelt während der Stealth Bomber Entwicklungsphase
- ◆ Reduziert Multipath

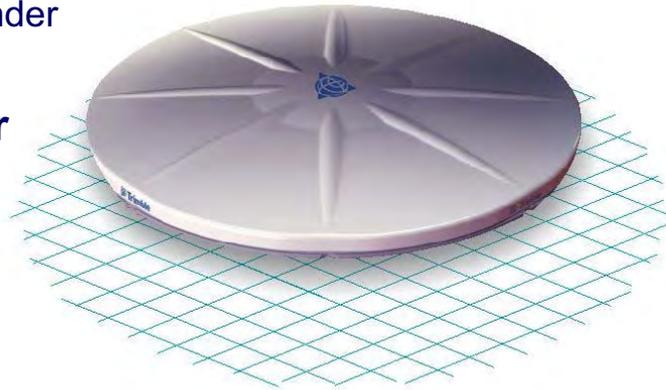


Antennenworkshop, Frankfurt, 3. November 2003 - 8

# Zephyr vs. Choke Ring



- ◆ Zephyr Geodetic Antenne
- ◆ Die Dorne Marglin Choke Ring Antenne hat schlechte Verstärkung für Signale mit niedriger Elevation (schlechteres Tracking und mehr Cycle Slips)
- ◆ Aufbau von Choke Ring und Zephyr über 24 h (1Hz)
  - ◆ Aufstellung nahe beieinander
  - ◆ Gleicher Empfängertyp
- ◆ Test von unabhängiger Organisation

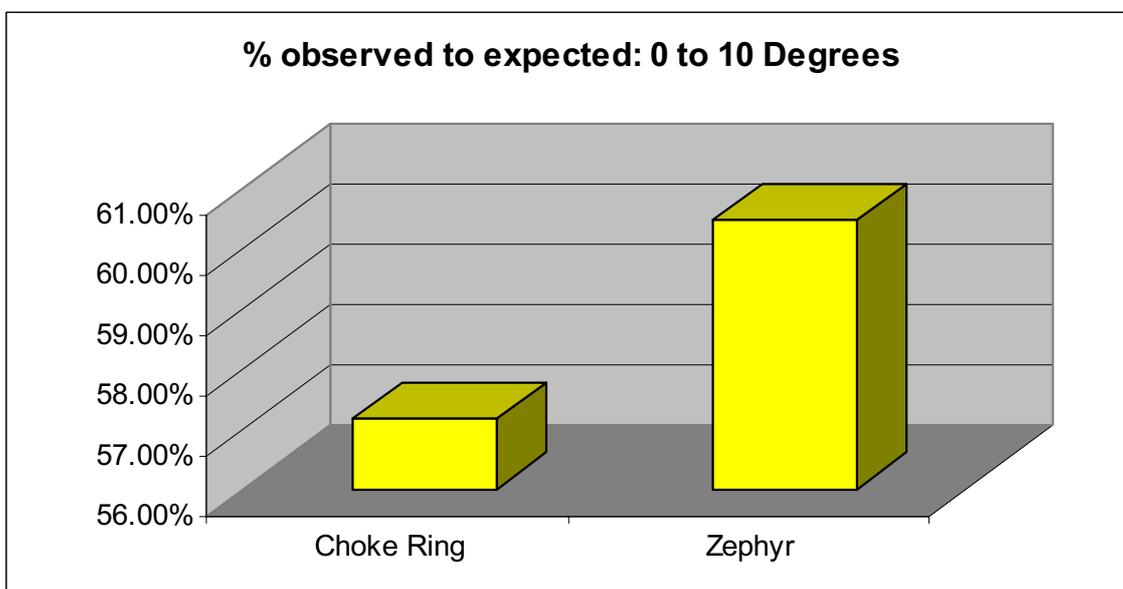


Antennenworkshop, Frankfurt, 3. November 2003 - 9

## Low Elevation Tracking



- ◆ Beobachtete vs. Erwartete Daten

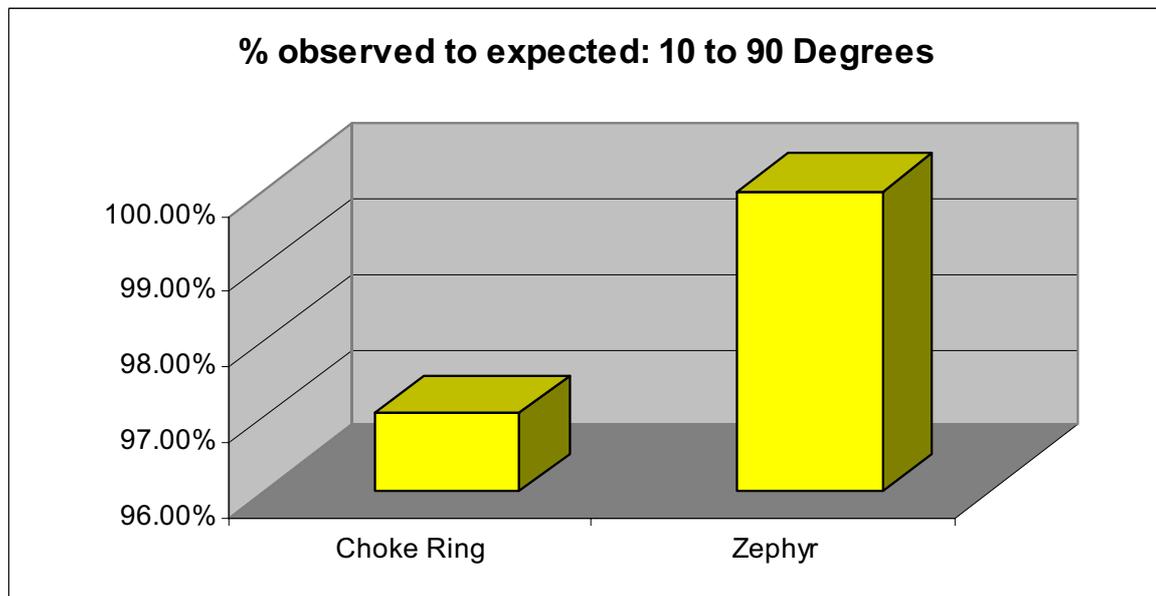


Antennenworkshop, Frankfurt, 3. November 2003 - 10

# High Elevation Tracking



- ◆ Bei der Dorne Margolin fehlen 2575 Messungen bei der Zephyr 35 (das 73-fache)

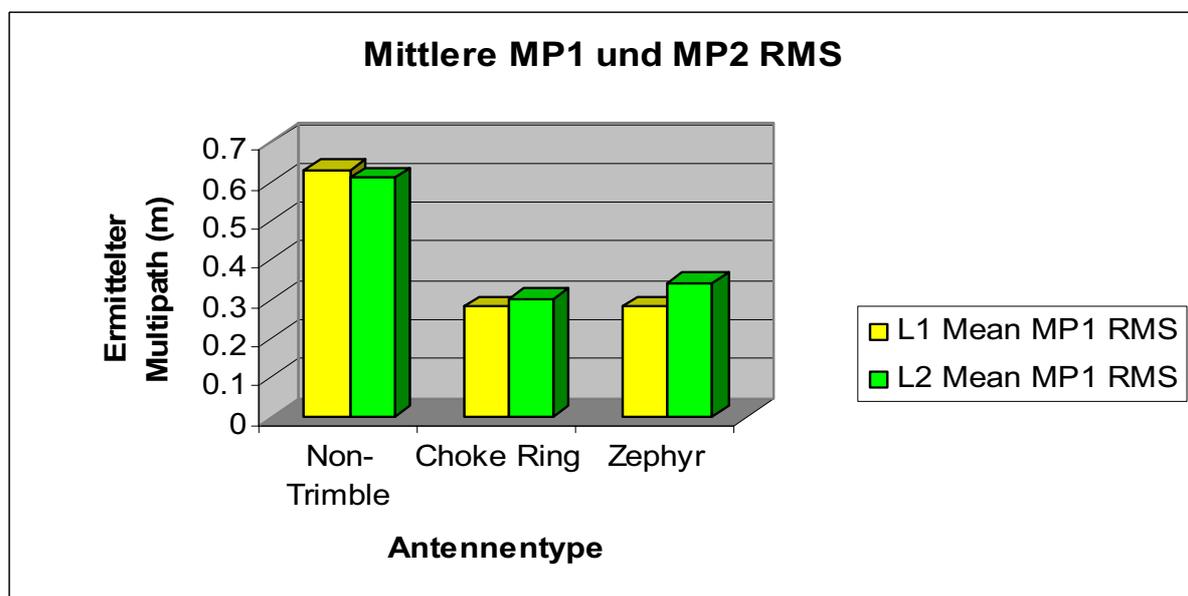


Antennenworkshop, Frankfurt, 3. November 2003 - 11

# Code Multipath Rejection



- ◆ MP1 and MP2 Statistiken



Antennenworkshop, Frankfurt, 3. November 2003 - 12

# Zusammenfassung

---



- ◆ Phasenzentrumswiederholbarkeit konsistent mit dem PCV Modell mit +/- 0.2mm (Typkalibrierung ausreichend)
- ◆ Rotationssymmetrie besser als 1 mm
- ◆ Trimble Stealth Ground Plane: vergleichbare Mehrwegeunterdrückung wie bei der Choke Ring mit Ground Plane
- ◆ Besseres Tracking bei niedrigen und hohen Satelliten als bei der Choke Ring Antenne
- ◆ Signifikant kompakter und leichter als andere Antennen mit vergleichbarer Performance



# Antennen-Monitoring: Wettzell GPS Antenna Array

**Markus Rothacher, Veit Lechner**

Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, TU München (FESG)

**Wolfgang Schlüter**

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt (BKG)

## 5. GPS-Antennen-Workshop 2003

**3. November 2003**

**Frankfurt am Main**

Inhalt:

- **Wettzell GPS Antenna Array**
- **Monitoring von Antennenwechseln**
- **Qualität der GPS-Resultate auf extrem kurzen Basislinien**

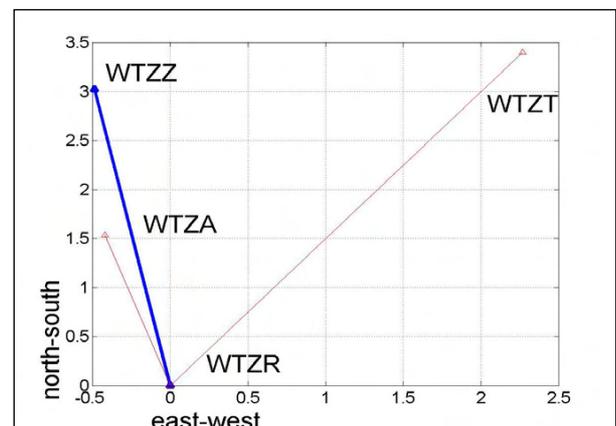


5. GPS-Antennen-Workshop in Frankfurt/Main, 3. November 2003



## GPS-Antennen auf dem Dach in Wettzell

4 GPS-Antennen auf dem Dach



**WTZZ Antennen/Empfänger-Wechsel am 9. Juni 2003:**

**Empfänger: ASHTECH Z18 → JPS LEGACY**

**Antenne: ASH 701073.1 → TPSCR3\_GGD**

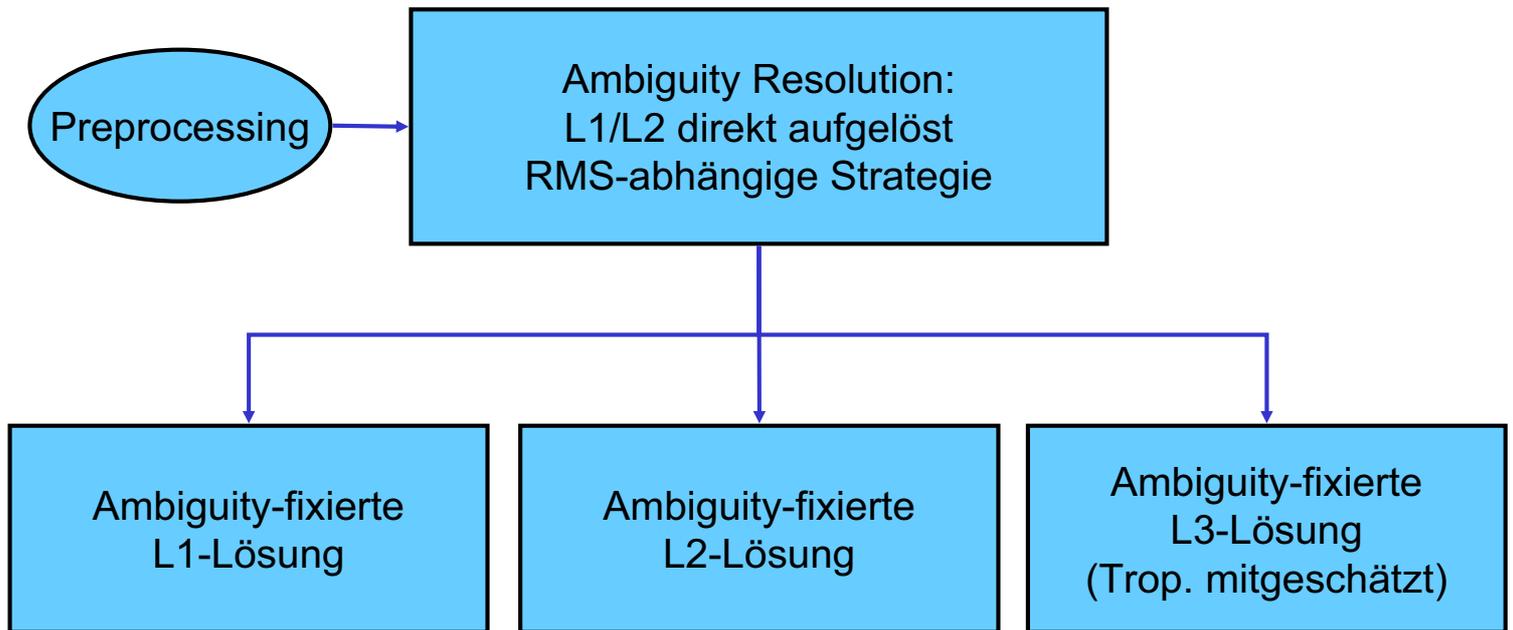


5. GPS-Antennen-Workshop in Frankfurt/Main, 3. November 2003

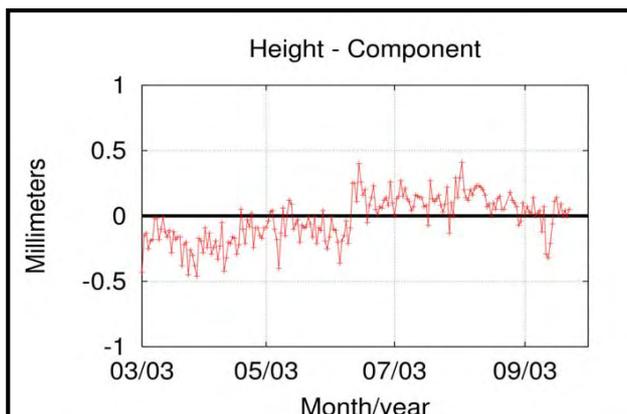
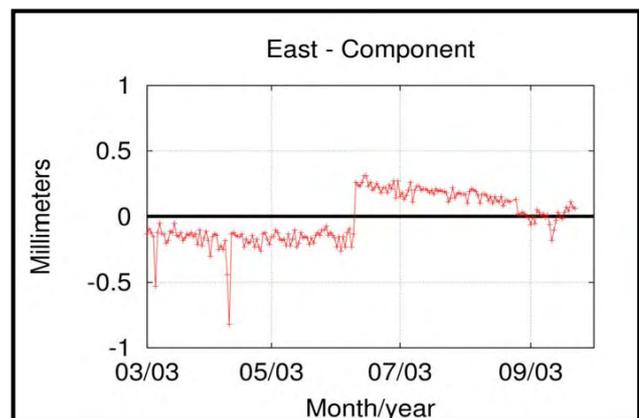
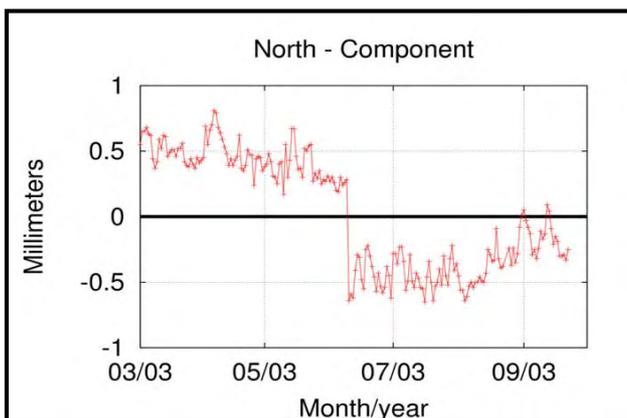


# Verarbeitungsstrategie - Lösungen

Basislinie WTZZ - WTZR: 1.6 m

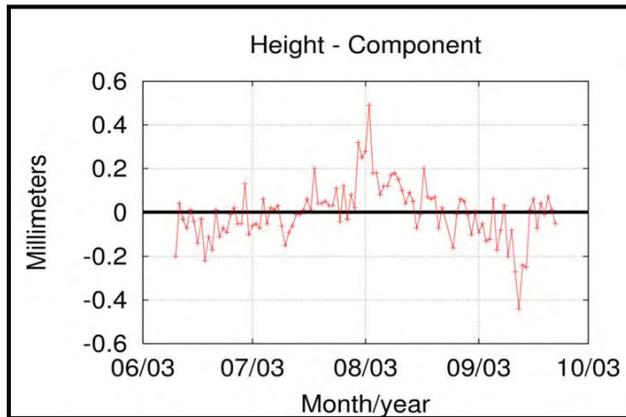
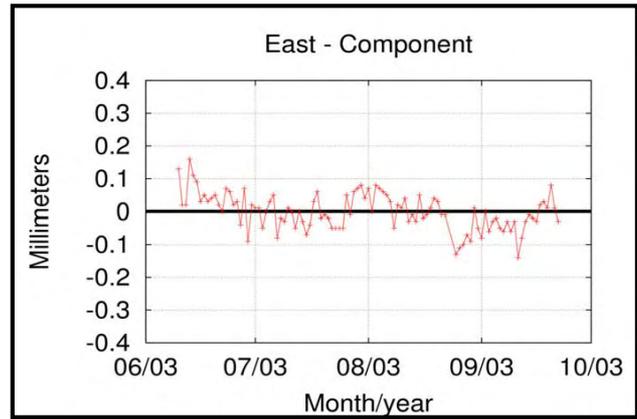
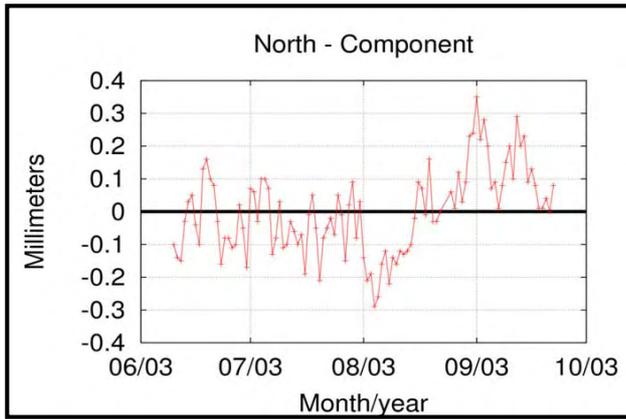


## Wiederholbarkeit für WTZZ: L1-Lösung



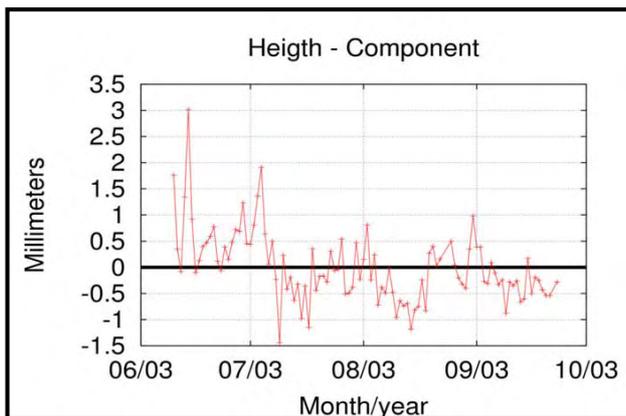
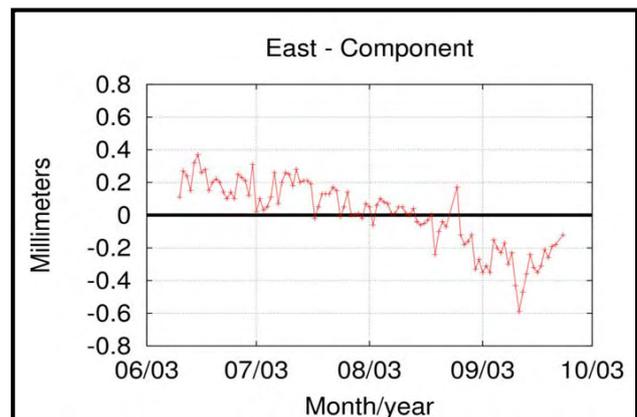
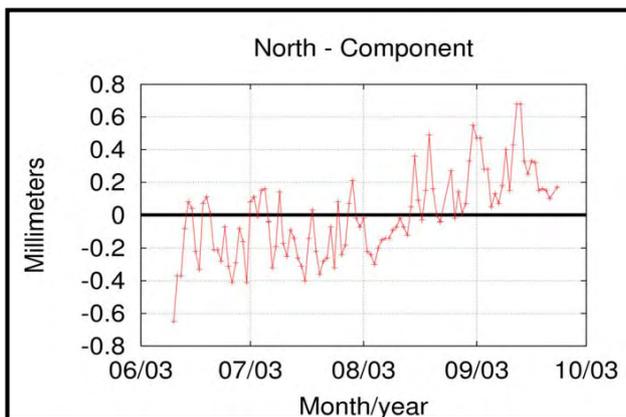
RMS	Ashtech Z	JPS LEGACY
Nord	<sup>18</sup> 0.14 mm	0.17 mm
Ost	0.09 mm	0.10 mm
Höhe	0.12 mm	0.12 mm
< 9. Juni		> 9. Juni

## Wiederholbarkeit für WTZZ: L2-Lösung



RMS	JPS LEGACY
Nord	0.13 mm
Ost	0.05 mm
Höhe	0.13 mm

## Wiederholbarkeit für WTZZ: L3-Lösung mit Trop.



RMS	JPS LEGACY
Nord	0.25 mm
Ost	0.20 mm
Höhe	0.68 mm

---

## Schlussfolgerungen

---

### **GPS-Antennenwechsel können mit einem Antennen-Array überwacht werden:**

- Extrem kurze Basislinien (z.B. 1.6 m)
- Wiederholbarkeit im Bereich von **0.1 - 0.2 mm** (L1- und L2-Lösungen)
- Ionosphären-freie LK (L3) mit Bestimmung von Troposphärenverzögerungen: **0.7 mm vertikal** (Streuung, die bei einer globalen Strategie zu erwarten ist)

### **Empfehlungen für GPS-Fundamentalstationen (neue Strategie):**

- Mehr als einen GPS-Empfänger pro Fundamentalstation verwenden, um die **Qualität von Antennen und Empfängern zu überwachen**
- GPS-Antennen auf **unterschiedlichen Positionen** aufstellen (Basislinien von ein paar Metern)
- Routine-Verarbeitung des lokalen GPS-Netzes

**Eine GPS-Ausrüstung kann ausgetauscht werden, ohne dass die lokale Genauigkeit zwischen den Antennen verlorenght.**