



# **GNSS Antennenkalibrierung oder Was Millimeter verursachen**

Martin Schmitz,  
Gerhard Wübbena, Andre Warneke, Gerald Boettcher

Geo++<sup>®</sup> GmbH  
30827 Garbsen  
Germany  
[www.geopp.com](http://www.geopp.com)

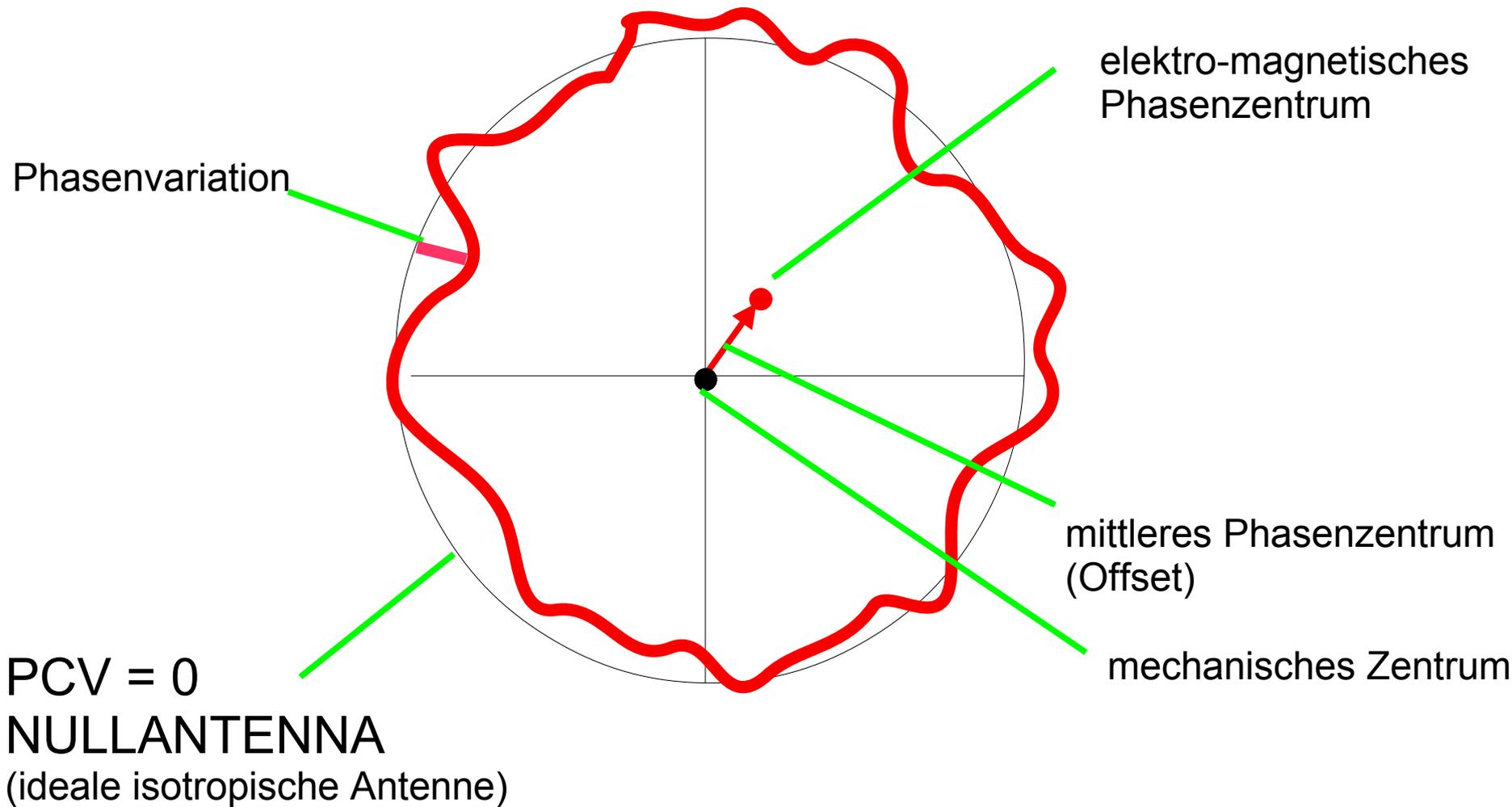
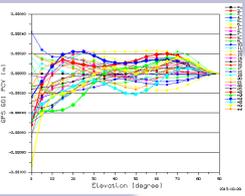


- Antennen Phasenzentrum und Variationen (PCV)
  - Eigenschaften, Größenordnung, Austauschformat
- Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung
  - Motivation, Ziele, Entwicklung, Methode
  - Wiederholbarkeit, GLONASS PCV, Ergebnisse
- Erkenntnisse aus Analysen von
  - Serien von GNSS Antennen Kalibrierungen
  - Radom/Revision von Antennen
  - Nahfeld Mehrweg Einfluss
  - Empfindlichkeit von Antennen auf Regen
- Was verursachen Millimeter?
- Zusammenfassung
- Ausblick



- **Antennen Phasenzentrum und Variationen (PCV)**
  - **Eigenschaften, Größenordnung, Austauschformat**
- Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung
  - Motivation, Ziele, Entwicklung, Methode
  - Wiederholbarkeit, GLONASS PCV, Ergebnisse
- Erkenntnisse aus Analysen von
  - Serien von GNSS Antennen Kalibrierungen
  - Radom/Revision von Antennen
  - Nahfeld Mehrweg Einfluss
  - Empfindlichkeit von Antennen auf Regen
- Was verursachen Millimeter?
- Zusammenfassung
- Ausblick

# Antennen Phasezentrum und Variationen (PCV)





# Antennen Phasezentrum und Variationen (PCV) - Eigenschaften -

- Antennen-Phasezentrum und Variationen (PCV) **abhängig vom Einfallswinkel** (Elevation und Azimut) und Frequenz des GNSS Signals
  - Antennen Phasenvariationen werden bestimmt
  - mittleres Phasezentrum wird abgeleitet
- mittleres Phasezentrum abhängig
  - von Elevationsmaske
  - gilt nur für gleichmäßige Verteilung der Signale
- **vollständiges Modell** besteht aus
  - mittleres Phasezentrum (**Offset**)
  - **elevationsabhängige** Phasenvariationen
  - **und azimutabhängigen Phasenvariationen**
- im Allgemeinen relevant für Anwendung ist
  - ionosphärisch freie Signal L0

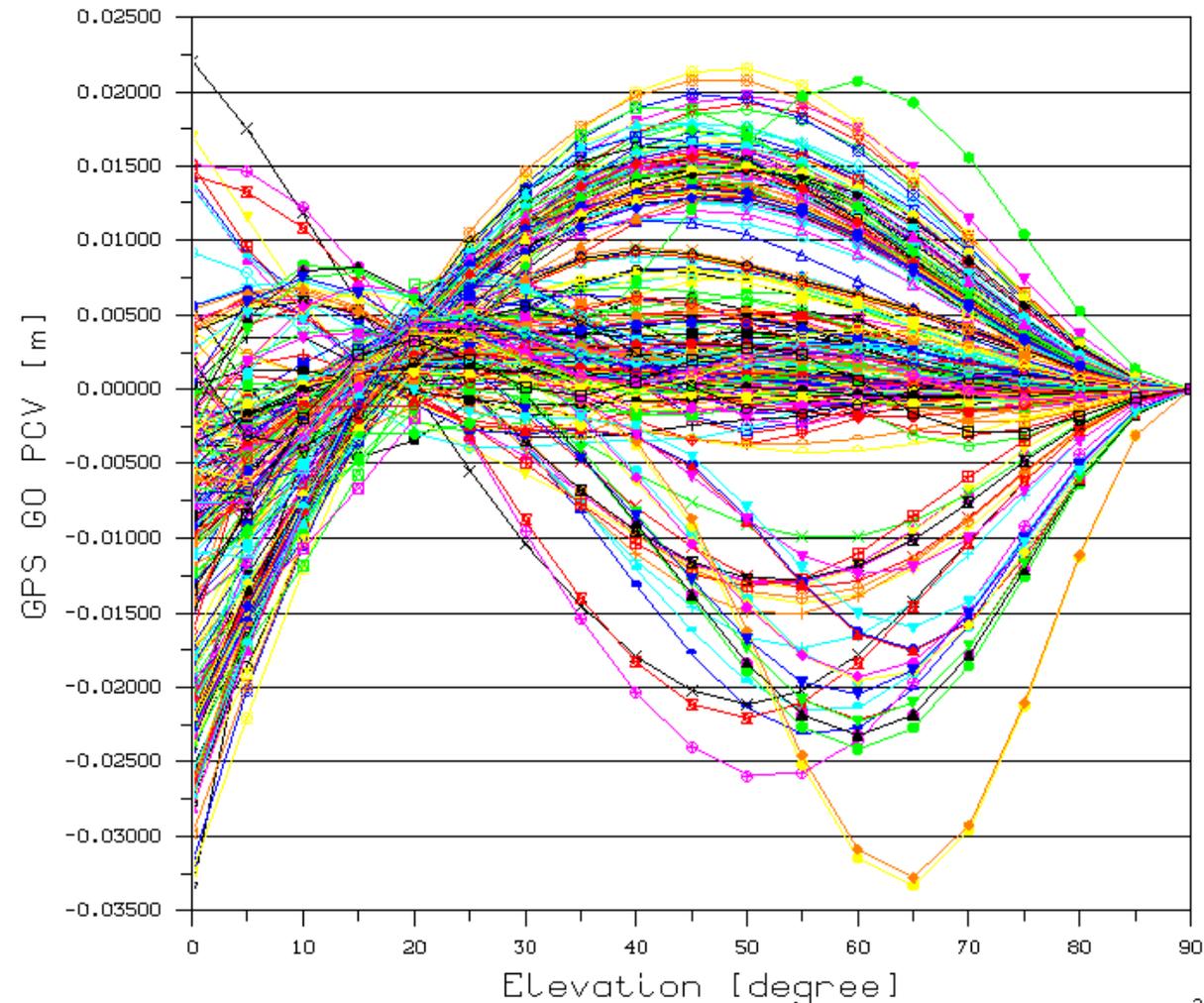
Faustformel:  
L0 Faktor 3 größer als Originalsignale



# Antennen Phasezentrum und Variationen (PCV) - Größenordnung -

- **Phasenvariation**  
(PCV ohne Offset)  
bei unterschiedlichen  
Antennentypen
- **266 Antennentypen**
  - Geo++ **GNPCVDB**  
Datenbank
- **GPS L0 Signal**
- **PCV Differenz zur  
GPPNULLANTENNA**
- **Größenordnung**
  - **bis zu mehreren cm**
  - in hohen Elevationen

Elevation Dependent Difference from Type Mean  
GPPNULLANTENNA\_\_NONE, SN:UNKNOWN  
GPS GO PCV [m]

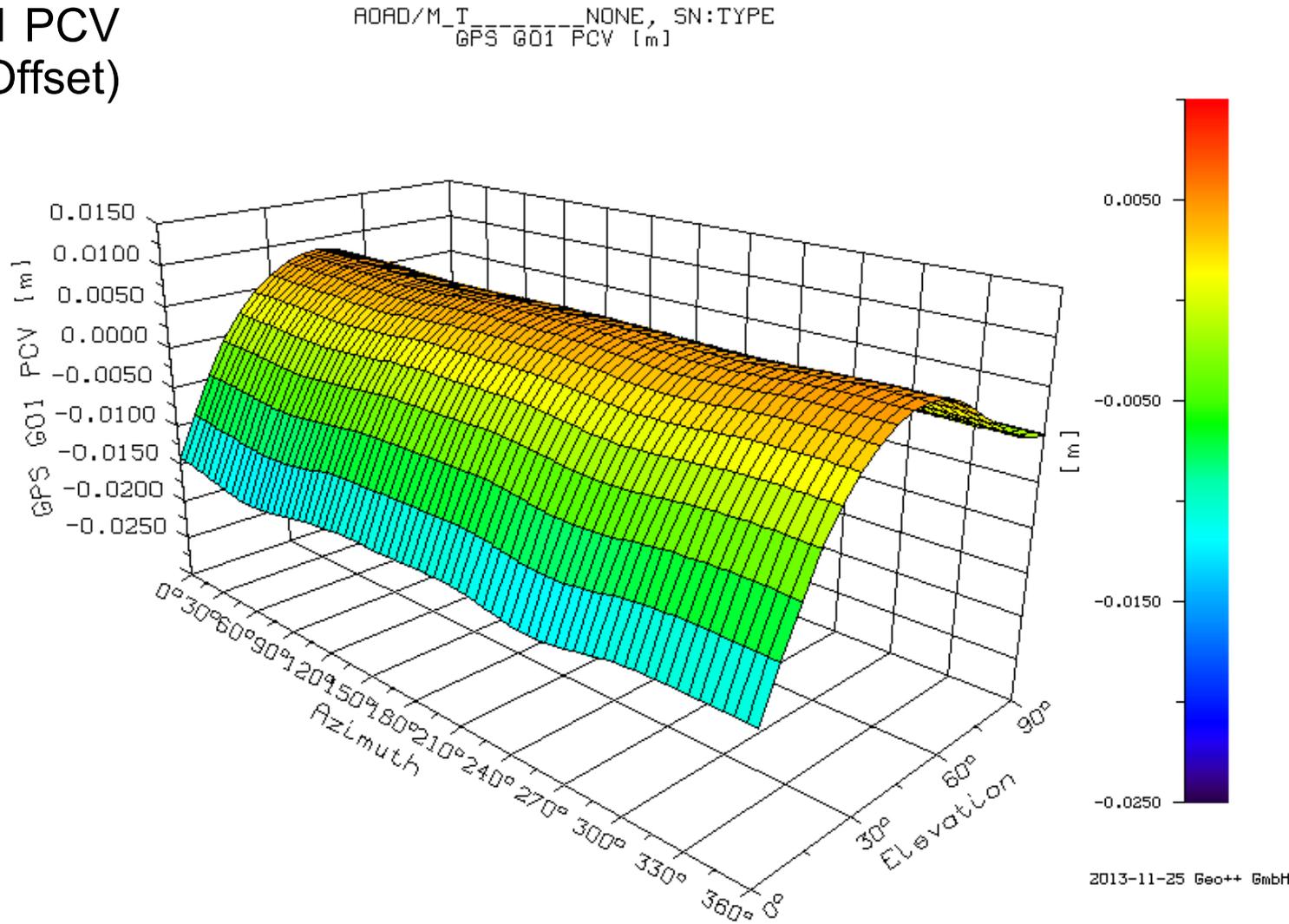


L0 ionosphärisch freie Signal  
Faustformel:  
L0 Faktor 3 größer als Originalsignale

# Antennen Phasezentrum und Variationen (PCV) AOAD/M\_T NONE



GPS L1 PCV  
(ohne Offset)



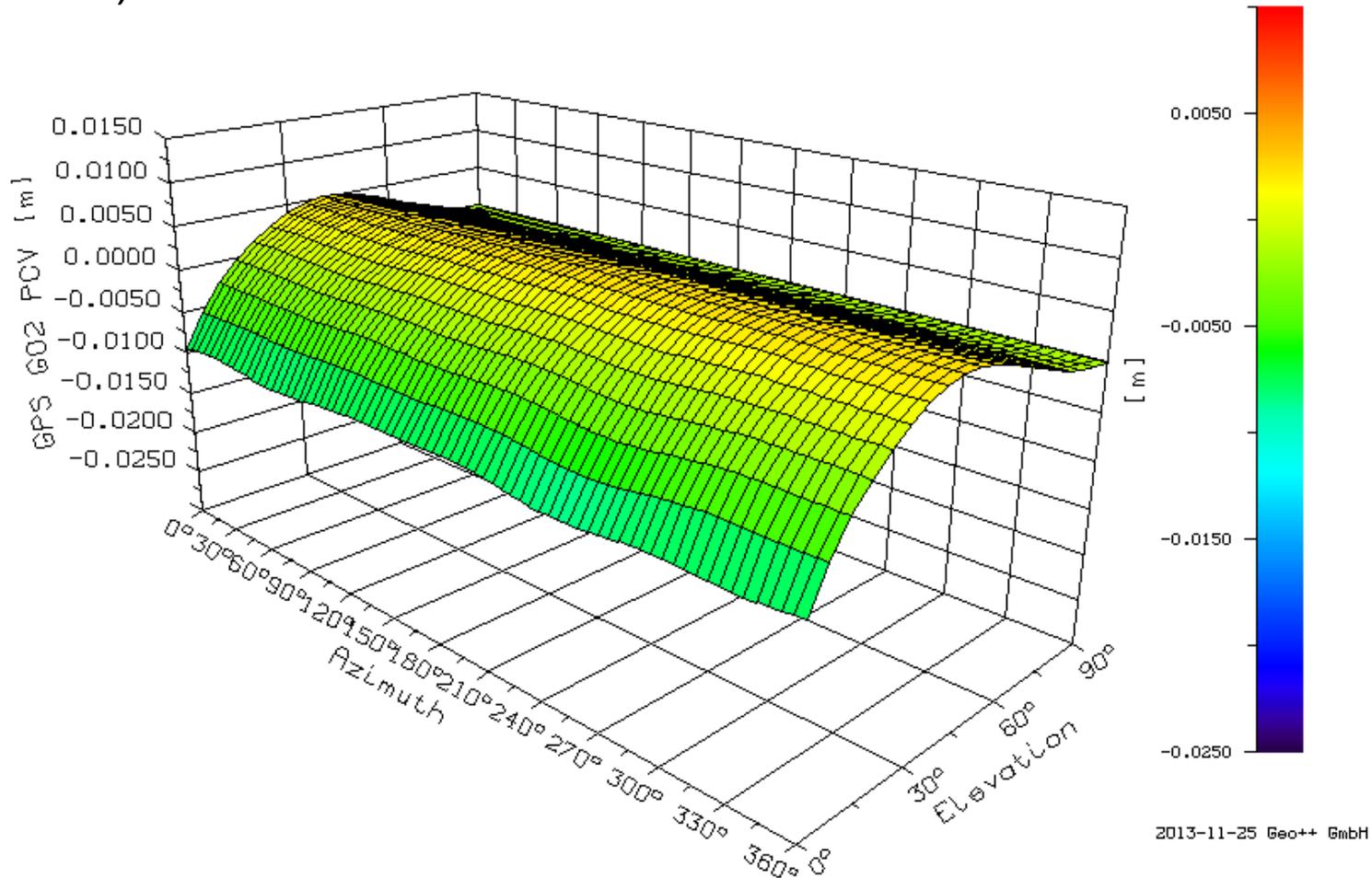
gezeigte PCV Graphiken im Allgemeinen ohne Offset

# Antennen Phasezentrum und Variationen (PCV) AOAD/M\_T NONE



GPS L2 PCV  
(ohne Offset)

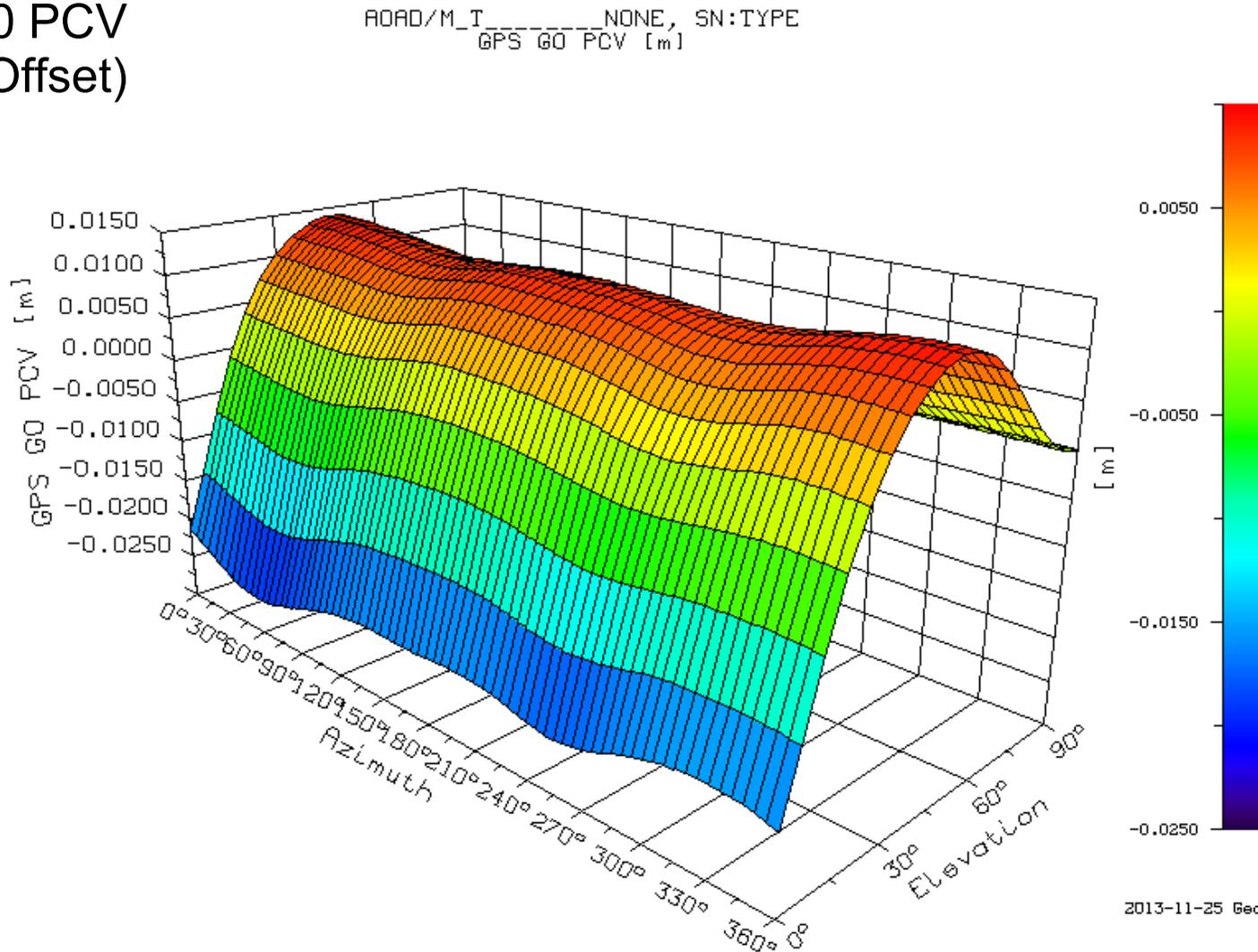
AOAD/M\_T-----NONE, SN:TYPE  
GPS G02 PCV [m]



# Antennen Phasezentrum und Variationen (PCV) AOAD/M\_T NONE



GPS L0 PCV  
(ohne Offset)

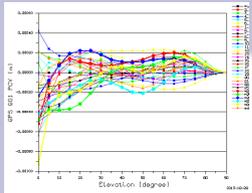


L0 ionosphärisch freie Signal

SAPOS Brandenburg – Anwenderforum 2013  
29. November, 2013, Potsdam

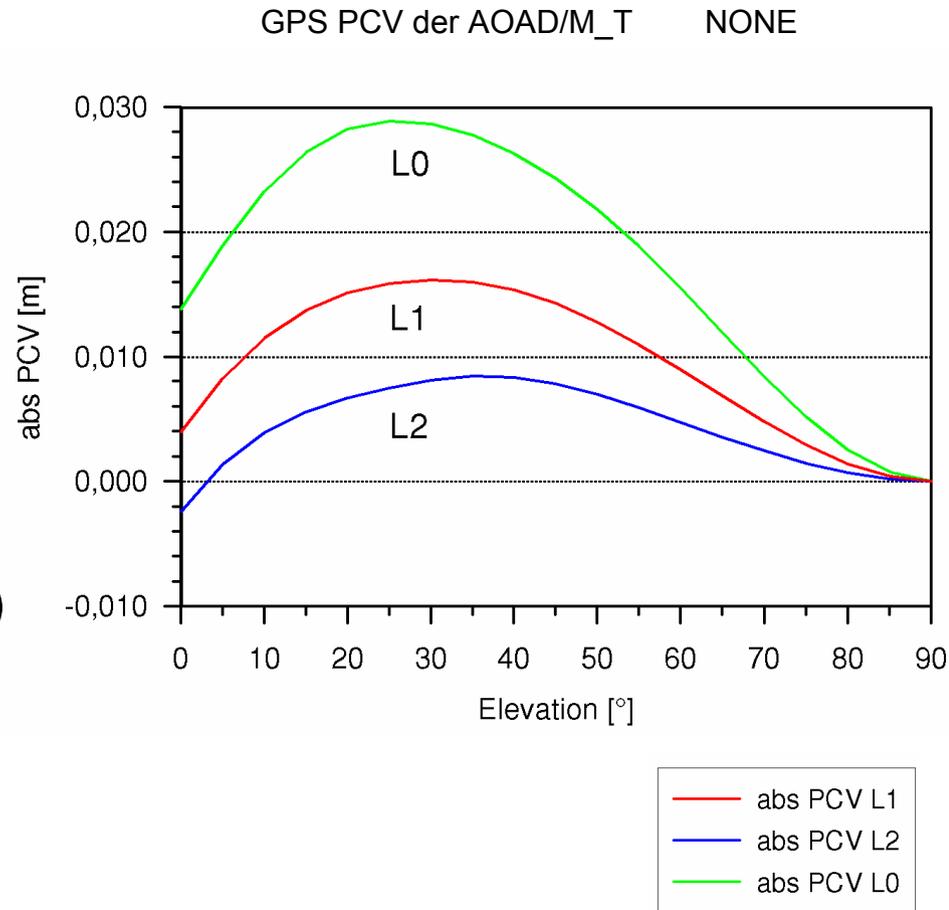


# Antennen Phasezentrum und Variationen (PCV) - Beziehung relative und absolute PCV -



## Absolute\* vs Relative PCV Korrekturen

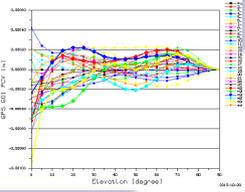
- **relative PCV** Korrekturen
  - Referenzantenne  
AOAD/M\_T NONE
  - Normierung auf die PCV der Referenzantenne
- **potentielle Probleme** relativer PCV
  - wachsen mit Entfernungen
  - in Modellierung (z.B. Troposphäre)
  - für Mehrdeutigkeitsalgorithmen
- **absolute PCV** Korrekturen
  - Stand-der-Technik
  - Verbesserungen in Vielzahl von Anwendungen



\* unabhängig von einer Referenzantenne



# Antennen Phasezentrum und Variationen (PCV) - Austauschformat -



## ANTEX Format als internationales Format

```

1.2          G          ANTEX VERSION / SYST
A          PCV TYPE / REFANT
          END OF HEADER
          START OF ANTENNA
AOAD/M_T      NONE      TYPE / SERIAL NO
ROBOT          Geo++ GmbH      42      2003-11-19 METH / BY / # / DATE
          5.0          DAZI
          0.0  90.0  5.0      ZEN1 / ZEN2 / DZEN
          2          # OF FREQUENCIES
#          COMMENT
# (C) Geo++ GmbH      COMMENT
# www.geopp.de      COMMENT
#          COMMENT
# Antenna Type: AOAD/M_T_____NONE      COMMENT
# Antenna Serial Number: 404      COMMENT
# Antenna Calibration Date: 2000-05-28 03:24:06      COMMENT
#          COMMENT
created by ant2atx      08-JUL-08 10:37:53      COMMENT
G01          START OF FREQUENCY
          0.60          -0.46          91.24      NORTH / EAST / UP
NOAZI  0.00  -0.24  -0.92  -1.97  -3.27  -4.69  -6.05  -7.19  -7.97  -8.30  -8.14  -7
          0.0  0.00  -0.28  -1.01  -2.12  -3.49  -4.95  -6.35  -7.52  -8.32  -8.63  -8.43  -7
          5.0  0.00  -0.28  -1.01  -2.12  -3.48  -4.94  -6.34  -7.50  -8.30  -8.62  -8.42  -7
          10.0  0.00  -0.28  -1.01  -2.11  -3.46  -4.92  -6.32  -7.48  -8.27  -8.59  -8.39  -7
...
G01          END OF FREQUENCY
G02          START OF FREQUENCY
          -0.10          -0.62          120.06      NORTH / EAST / UP
...
G02          END OF FREQUENCY
          END OF ANTENNA

```



- Antennen Phasenzentrum und Variationen (PCV)
  - Eigenschaften, Größenordnung, Austauschformat
- **Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung**
  - **Motivation, Ziele, Entwicklung, Methode**
  - **Wiederholbarkeit, GLONASS PCV, Ergebnisse**
- Erkenntnisse aus Analysen von
  - Serien von GNSS Antennen Kalibrierungen
  - Radom/Revision von Antennen
  - Nahfeld Mehrweg Einfluss
  - Empfindlichkeit von Antennen auf Regen
- Was verursachen Millimeter?
- Zusammenfassung
- Ausblick

# Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung - Geo++ GNPCV System -



- roboter-basierte absoluten GNSS Antennenkalibrierung als Feldverfahren
- Entwicklung durch **Geo++** in Kooperation mit Institut für Erdmessung, **Universität, Hannover**
- **Vermarktung und Weiterentwicklung** seit 2000 durch Geo++
  
- 2000 Geo++, **Garbsen**, Germany
- 2000 ife, **Hannover**, Germany
- 2005 SenB, Berlin, Germany
- 2009 Geo++, **Garbsen**, Germany
- 2012 GSA, Canberra, **Australia**
- 2013 SenB, **Berlin**, Germany
  
- insgesamt sechs Geo++ GNPCV Systeme



drei Roboter-Test, Mai 2012, Geo++ Garbsen

# Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung - Motivation und Ziele -



- Status späte **1990iger** Jahre
  - **Probleme** mit Korrekturen aus existierenden relativen **Feld-Kalibrierungsverfahren**
  - **Probleme** mit Korrekturen aus absoluten **Kammer-Kalibrierungen**
  - **PCV** Korrekturen dringend **notwendig** für Anwendungen mit **gemischte Antennentypen**  
(z.B. RTK Vernetzung, Ingenieur-Aufgaben, ...)
- **Anforderungen** an ein Antennen-Kalibrierungsverfahren
  - **Trennung** von Phasenvariationen (PCV) und **Mehrwege-Effekten** (MP)
  - **absolute PCV** (unabhängig von einer Referenzantenne)
  - **hohe** Auflösung und **Genauigkeit** der ermittelten PCV
  - **unabhängig von Station und Ort** (d.h. MP und geografischer Breite)
  - Feldverfahren

# Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung - Entwicklung Automatisierter Antennenunterbau -



- **Orientierungsänderung** der GNSS Antenne notwendig
- Unterbau für **Drehung und Kippung**
  - mit präzisiertem, festen und stabilem Drehpunkt
  - Möglichkeit zur Automatisierung
  - Ziel ist eine operationelle Prozedur
- letztendlich Nutzung eines **Roboters**
  - schnelle Änderungen
  - Automatisierung über Roboter-Steuerung
  - echtzeitfähig



1996



1998

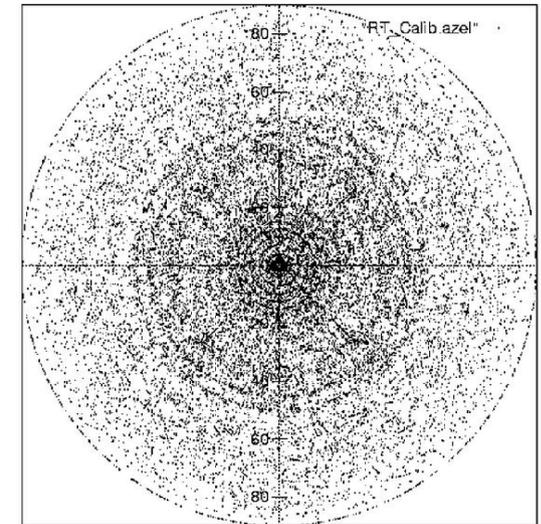


2000

# Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung - Methode -



- nutzt tatsächliche **GNSS Signale**
- **schnelle Orientierungsänderung** durch Roboter
- **gekippte und gedrehte GNSS Antenne**
- atmosphärische und Bahn-Fehler werden eliminiert durch Nutzung nahe Referenzstation
- Einfluss Antenne Referenzstation wird eliminiert durch Prozedur
- **Fernfeld Mehrweg** wird
  - **vermieden** durch hohe Elevationsmaske von  $18^\circ$ , dynamisch angepasst an gekippte Stellungen
  - **eliminiert** durch Modell und Ausnutzen der hohen Korrelation zwischen aufeinanderfolgenden Epochen (1-2 s)
- **homogene Abdeckung** der Hemisphäre
- Beobachtungen mit **negative Elevation**
- Ergebnisse in **Echtzeit**



typische Antennenabdeckung einer roboter-basierten Kalibrierung



# Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung - Eigenschaften -



- wesentliche Aufgabe ist Bestimmung
  - absoluter\*  
**Phasenzentrums- und Variationen (PCV)**
- Roboter ausgezeichnetes Instrument zur Bestimmung weiterer Parameter
  - **Signalstärke** (carrier-to-noise, CN0)
  - Group Delay Variations (GDV)/  
**Code Kalibrierung**
  - **Nahfeld Effekte** auf Antennen
    - Trennung von Mehrweg in Nah- und Fernfeld Effekte
  - absolute **Stationskalibrierung** von Mehrwegen
- Antennenkalibrierung liefert (2013)
  - GPS + GLO L1 and L2 PCV
  - GPS + GLO S1 and S2 CNV
  - GPS + GLO P1 and P2 GDV



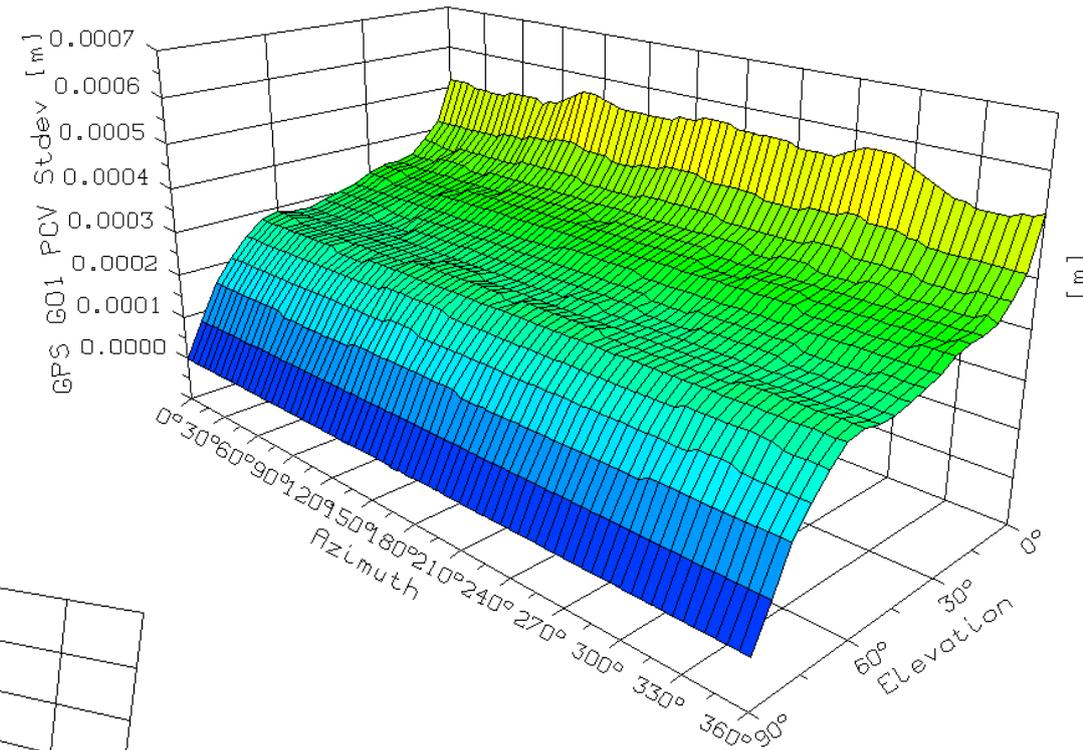
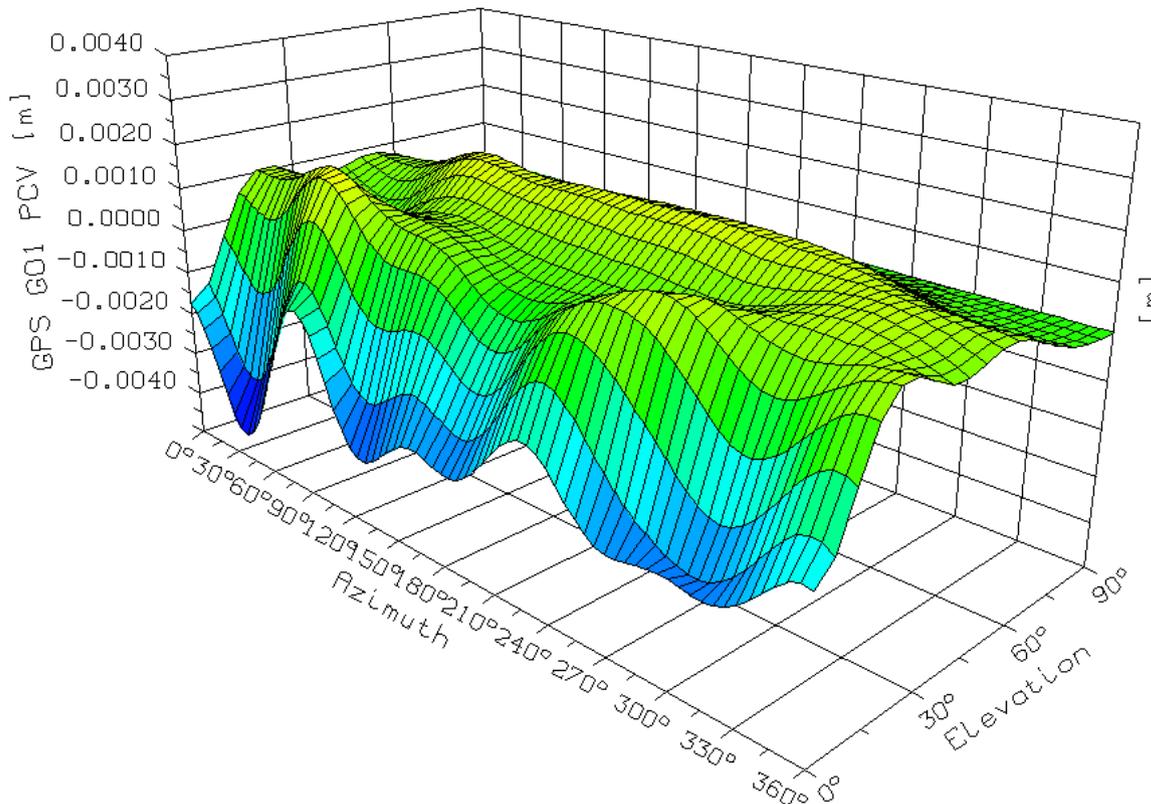
Geo++ Roboter mit TPSPN\_A5 NONE

\* ohne Einfluss einer Referenzantenne

# Absolute GPS L1 PCV und Standardabweichung



- **Roverantenne**
- CHCX91+S NONE
- ohne Offset
- GPS L1 PCV: -4 ... +2 mm
- Stdev: 0.1 ... 0.4 mm

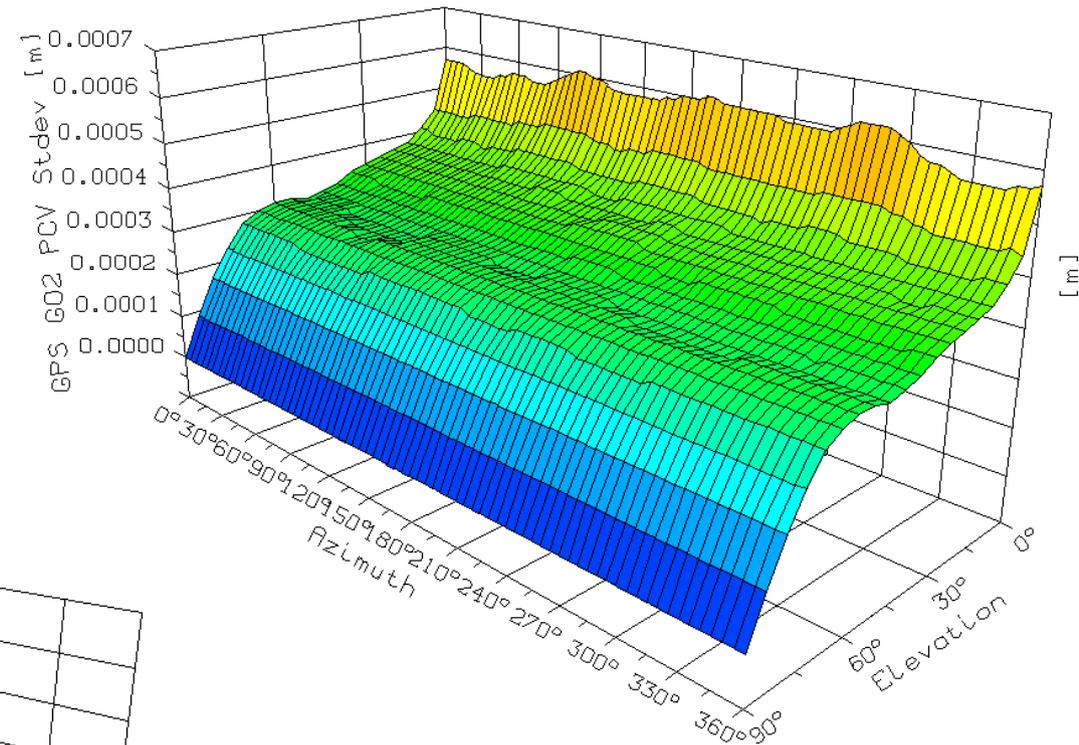
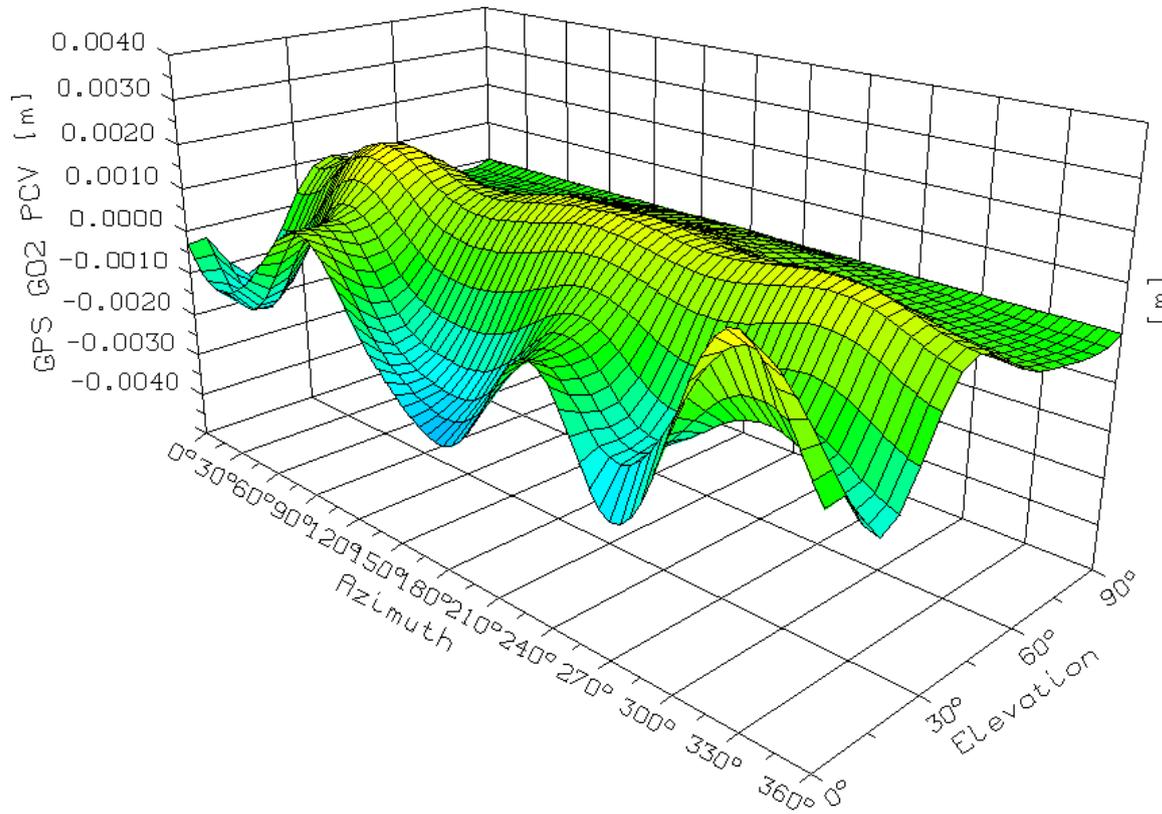


Stdev für geodätische Antennen  
besser

# Absolute GPS L2 PCV und Standardabweichung



- Roverantenne
- CHCX91+S NONE
- ohne Offset
- GPS L2 PCV: -4 ... +2 mm
- Stdev: 0.1 ... 0.4 mm



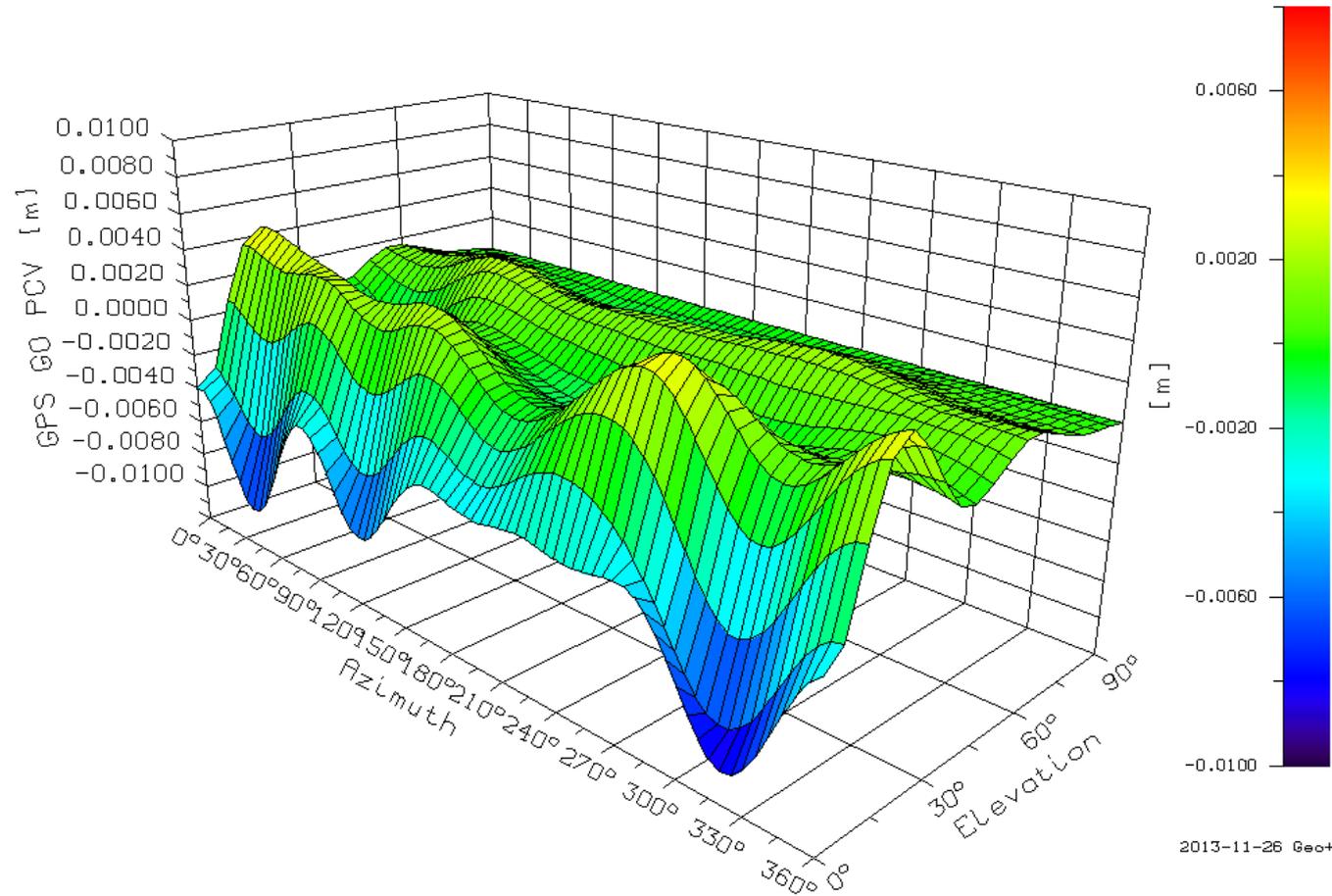
Stdev für geodätische Antennen  
besser



# Absolute GPS L0 PCV



- **Roverantenne**
- CHCX91+S NONE
- ohne Offset
- GPS L0 PCV:  
-10 ... +4 mm



2013-11-26 Geo++ GmbH

# Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung - Wiederholbarkeit Phasenzentrum und Variationen -



## unterschiedliche Roboter/Systeme

- Wiederholbarkeit der absoluten PCV Antennen- Kalibrierung mit Roboter
- drei unterschiedliche GNPCV Roboter

Roboter	betrieben
Geo++	in Garbsen
ife	in Hannover
Berlin	getestet in Garbsen

- individuelle ASH700936D\_M Antenne wurde kalibriert

Roboter	Datum der PCV-Kalibrierung
Geo++	2005-08-08
Berlin	2006-02-15
ife	2006-01-14





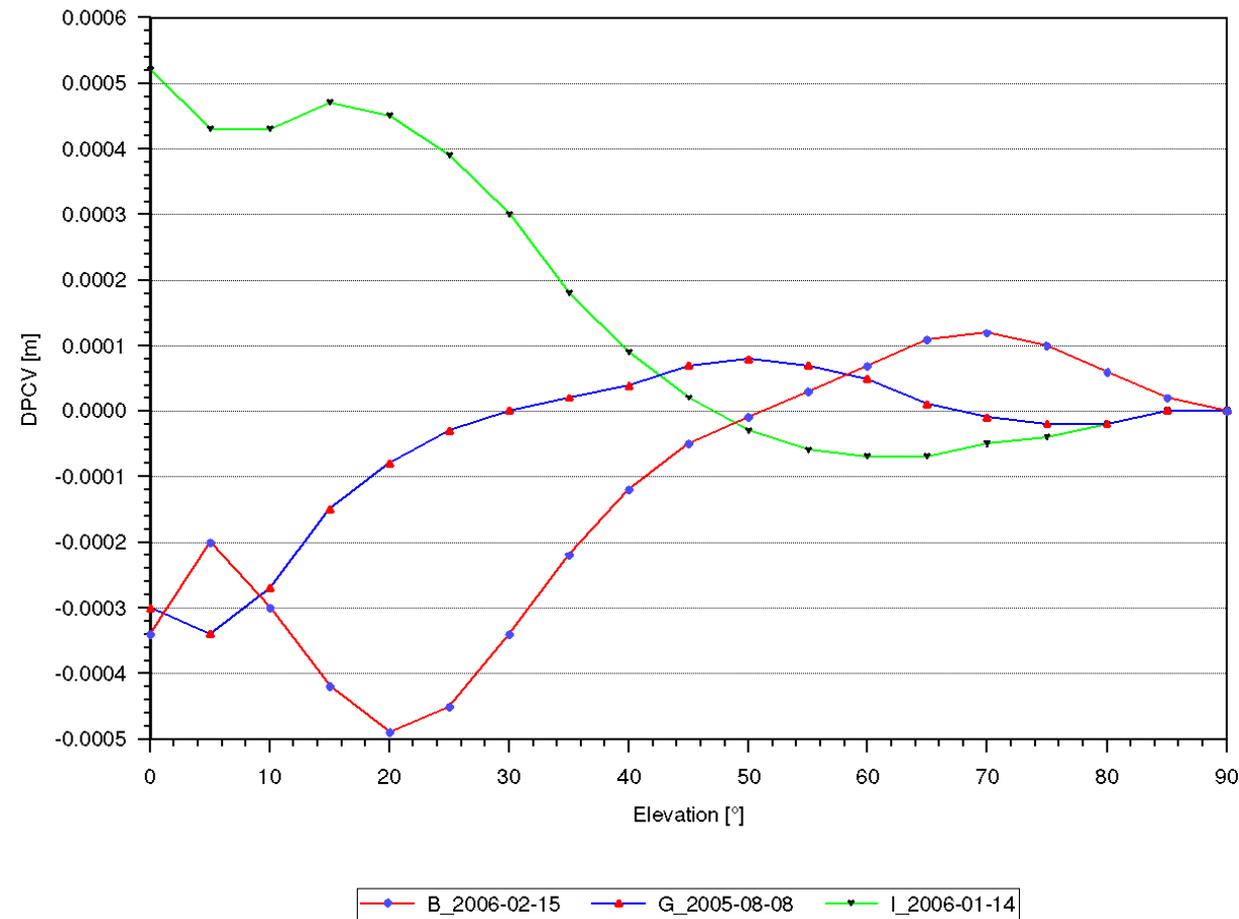
## L1 GPS dPCV

- individuelle ASH700936D\_M Antenne
- drei unterschiedliche Roboter
- GPS L1 Signal
- Größenordnung PCV Differenzen

L1 < 0.5 mm

## Elevation Dependent Difference from Type Mean

ASH700936D\_M#CR14348, L1 PCV





## L2 GPS dPCV

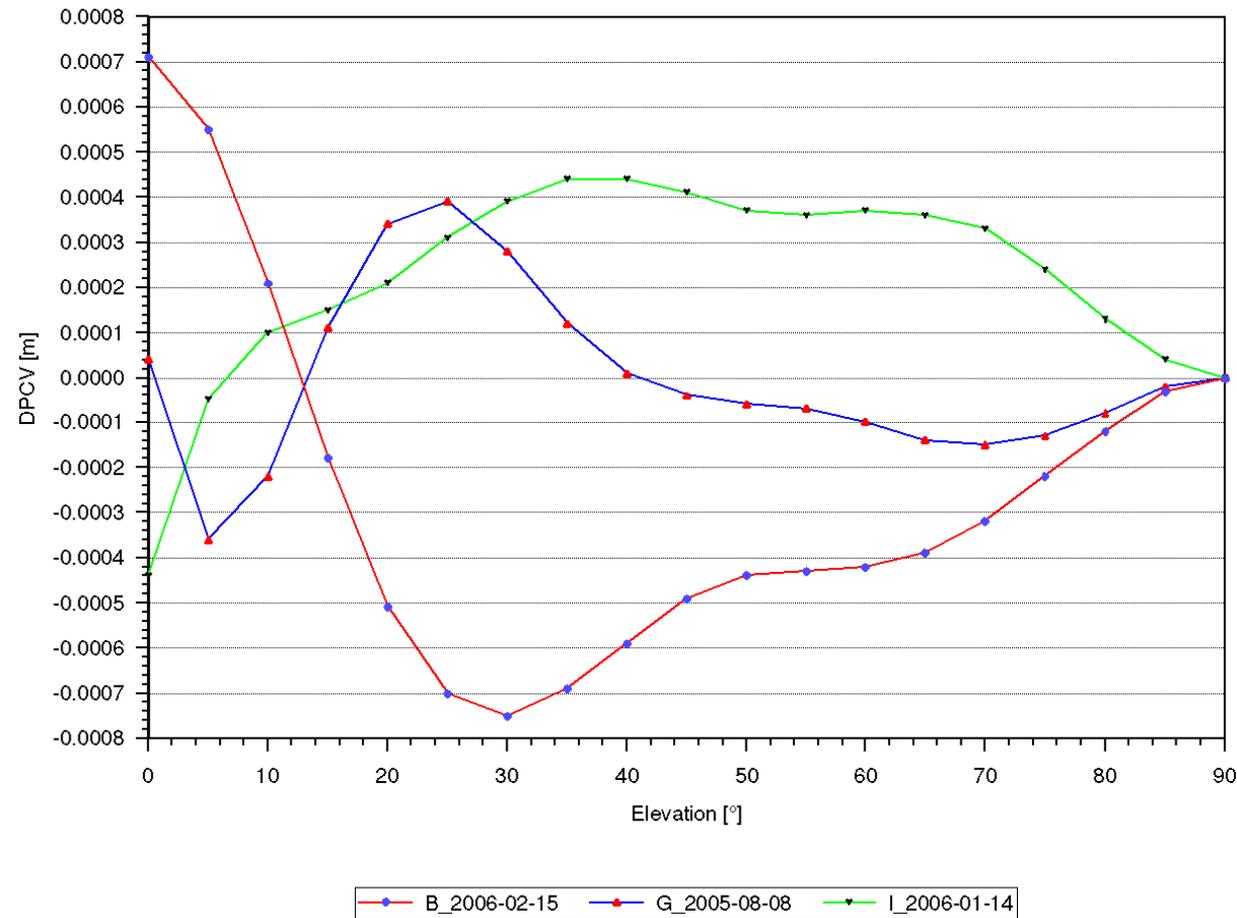
- individuelle ASH700936D\_M Antenne
- drei unterschiedliche Roboter
- GPS L2 Signal
- Größenordnung PCV Differenzen

L2 < 1 mm

- L2 im allgemeinen schlechter aufgrund anderer Signal-Erfassung

## Elevation Dependent Difference from Type Mean

ASH700936D\_M#CR14348, L2 PCV





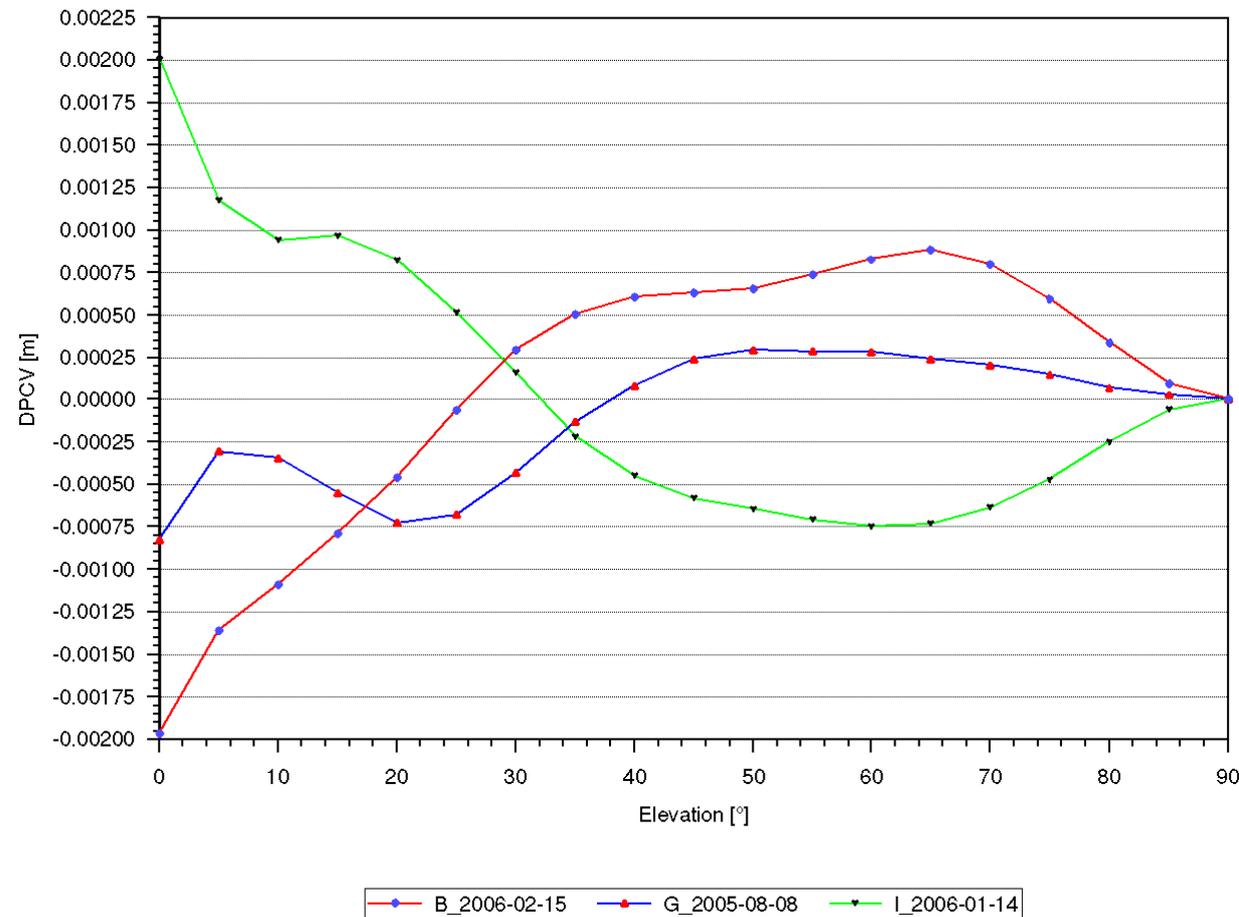
## L0 GPS dPCV

- individuelle ASH700936D\_M Antenne
- drei unterschiedliche Roboter
- ionosphärisch freies Signal
- Größenordnung PCV Differenzen

L0 < 1 mm  
über 10 deg

## Elevation Dependent Difference from Type Mean

ASH700936D\_M#CR14348, L0 PCV



# Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung - Kalibrierung von GLONASS PCV -



- **Unterschiede zu GPS**

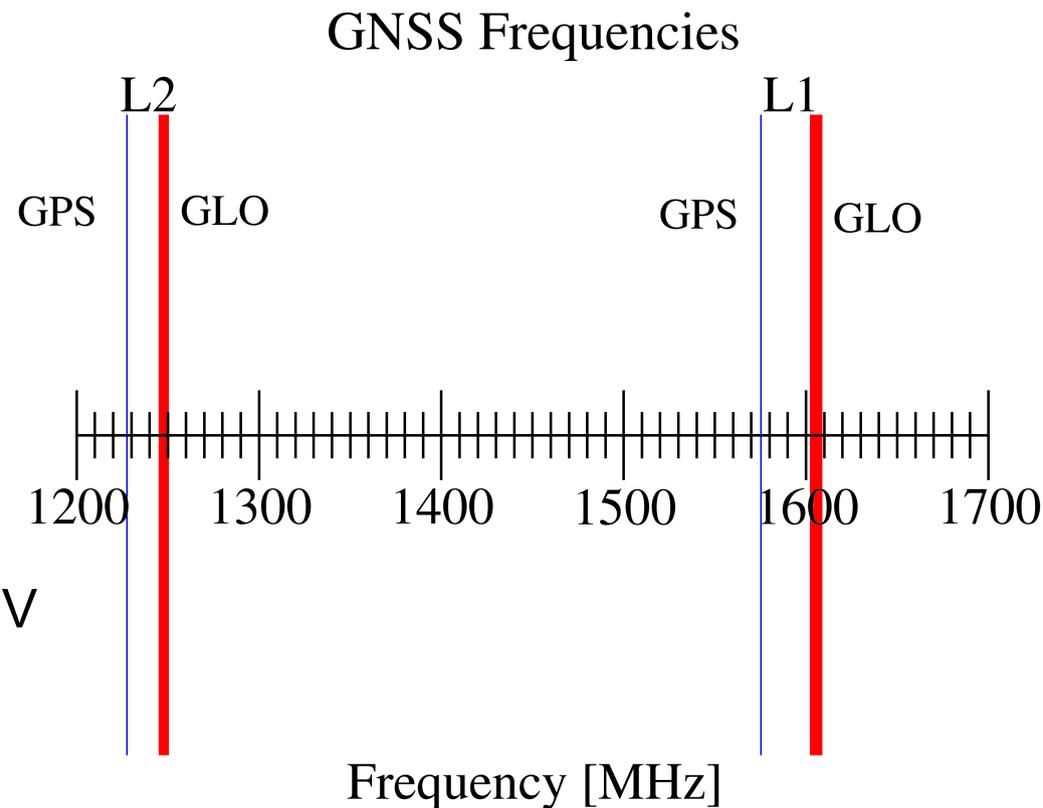
- Frequenzbereiche
- **individuelle Frequenz pro sichtbaren GLONASS Satellit**

- GLONASS PCV Korrekturen

- **Annahme GPS == GLO**
  - GPS PCV werden als GLO PCV benutzt
- frequenzunabhängige GLO PCV
  - **zufällige Mischung der Frequenzen** in einer Feld-Kalibrierung

- frequenzabhängige GLO PCV

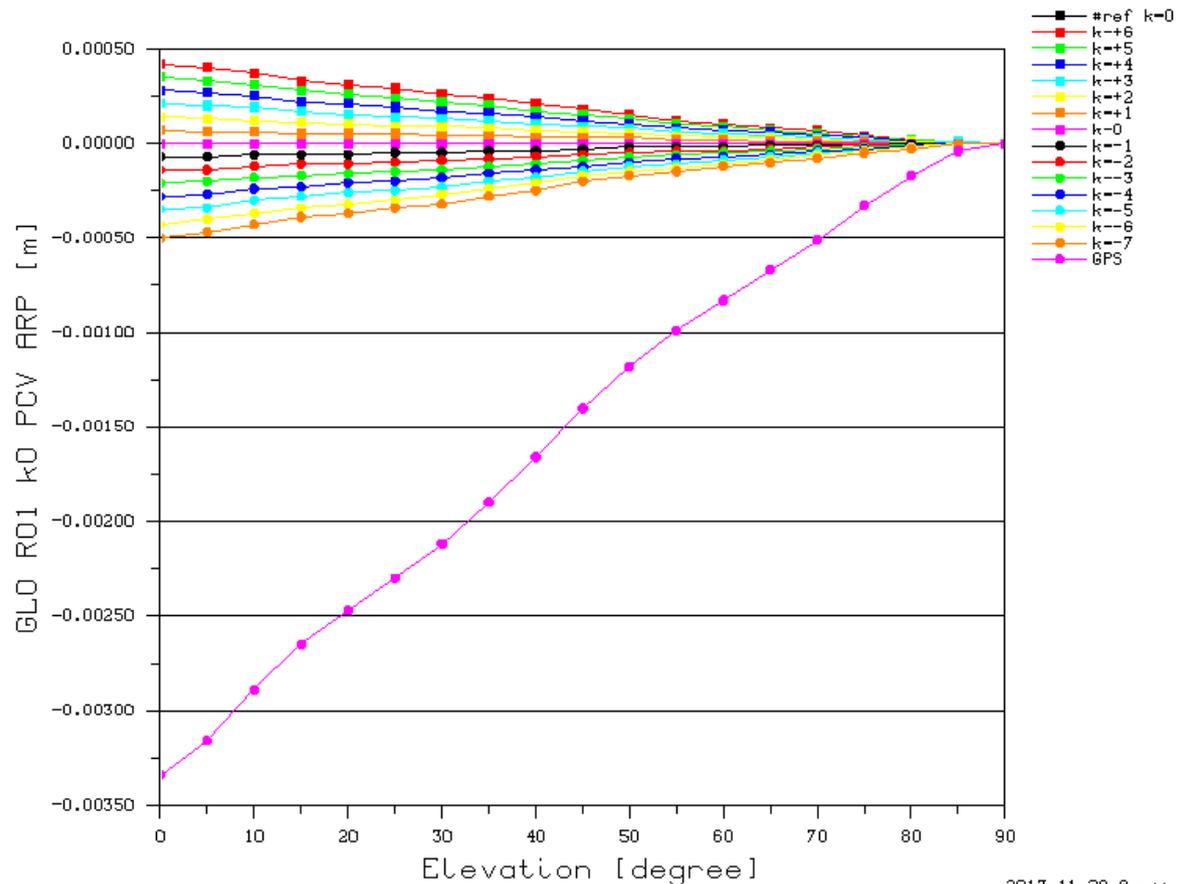
- Bestimmung von DeltaPCV (**Änderung der PCV mit der Frequenz**)
- metrische PCV aus **Kombination von GPS und GLO DeltaPCV**
- **PCV Berechnung für eine Frequenz** (z.B.  $k=0$ ), **extrapolierbar**



# Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung - Kalibrierung von GLONASS PCV -



- **frequenzabhängige GLO PCV**
- umgerechnet auf metrische PCV
- frequency channel  $K=-7 \dots +6$
- dPCV, Referenz ist  $k=0$
- Antenne mit großen DeltaPCV
- Größenordnung **Differenz GLO L1/L2 Frequenzen** ca. 0.5 ... 1.0 mm
- **Differenz zu GPS** bis zu mehreren mm



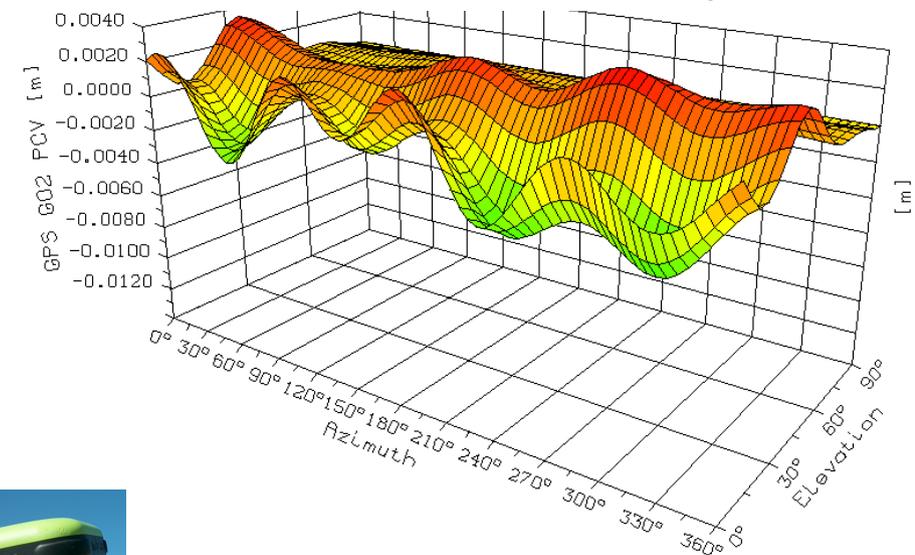
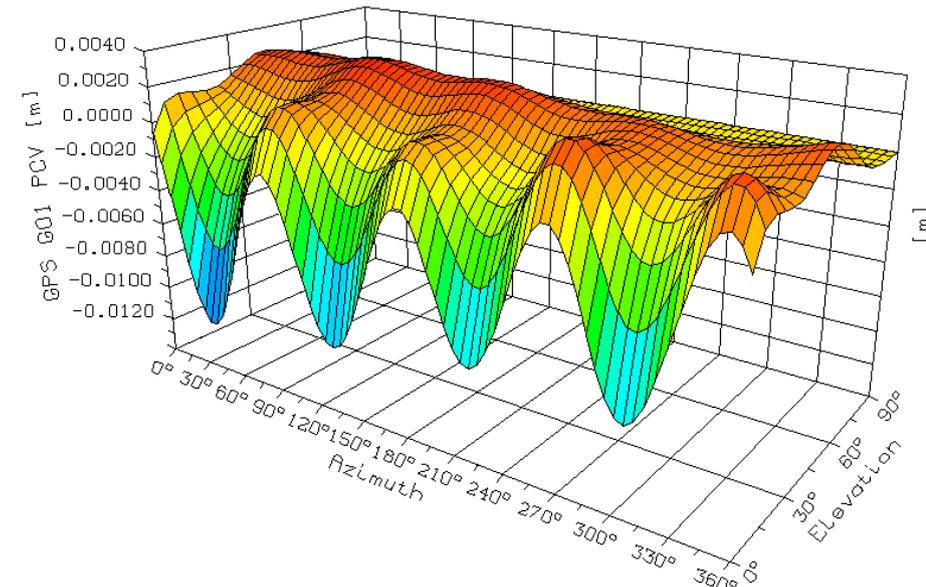
2013-11-28 Geo++ GmbH

Beispiel GLO L1 PCV JAV\_RINGANT\_G3T NONE

# Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung - PCV Ergebnisse -



- **absolute 3D Offset**  
(Größenordnung mm ... cm)
- **absolute Phasenvariationen**  
(Größenordnung mm ... cm)
- PCV von ( $<$ )  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  Elevation
- $0^\circ$  to  $360^\circ$  **azimutale PCV**
- gleichzeitige Bestimmung von L1, L2  
**GPS und GLONASS PCV**
- Standardabweichung  
0.2 ... 0.4 mm (1 sigma)  
für vollständige PCV  
(Offset plus Variation)
- Verifikation der Genauigkeit durch  
Wiederholbarkeit
- **frei von Mehrweg Einfluss**
- **stations- und orts-unabhängig**



GPS L1 and L2 PCV JAV\_TRIUMPH-1 NONE



- Antennen Phasenzentrum und Variationen (PCV)
  - Eigenschaften, Größenordnung, Austauschformat
- Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung
  - Motivation, Ziele, Entwicklung, Methode
  - Wiederholbarkeit, GLONASS PCV, Ergebnisse
- **Erkenntnisse aus Analysen von**
  - **Serien von GNSS Antennen Kalibrierungen**
  - Radom/Revision von Antennen
  - Nahfeld Mehrweg Einfluss
  - Empfindlichkeit von Antennen auf Regen
- Was verursachen Millimeter?
- Zusammenfassung
- Ausblick



# Analyse Serien von GNSS Antennen Kalibrierungen Geo++ GNPCVDB Datenbank



## Absolute PCV Typmittel

- **Typmittel** berechnet aus Roboter kalibrierten Antennen
- strenge Ausgleichung unter Nutzung der vollständigen Varianz-Kovarianz Matrix der individuellen Kalibrierungen
- **November 2013**

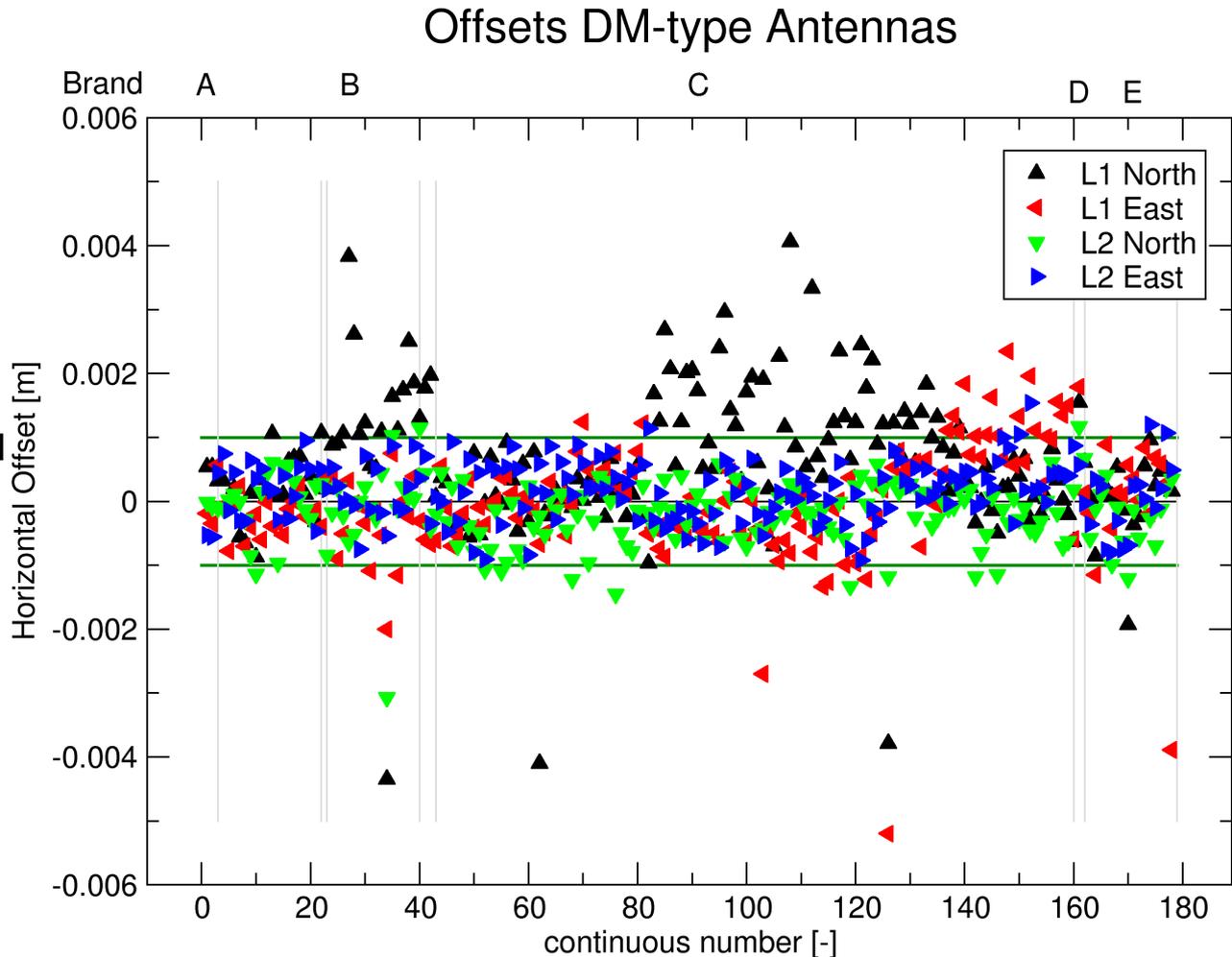
ca.	<b>266</b>	unterschiedliche <b>Antennentypen</b>
	1893	individuell GPS kalibrierte Antennen
	<b>6078</b>	individuelle GPS <b>Kalibrierungen</b>
	740	individuell GPS+GLO kalibrierte Antennen
	2096	individuelle GPS+GLO Kalibrierungen
- **frei zugängliche Information** über PCV Pattern (Graphiken, **ARP**- und **NRP** Definition, etc.)
- bestimmte Typmittel werden IGS/EPN bereitgestellt (z.B. **IGS igs08.atx**)
- Lizenz für Nutzung absoluter PCV (tatsächlicher Zugang zu den numerischen PCV)
- <http://gnpcvdb.geopp.de/>

# Analyse Serien von GNSS Antennen Kalibrierungen - Offset Analyse DM-typ Choke Ring Antennen -



## horizontale Offsets

- 5 unterschiedliche Hersteller (A-E)
- 8 DM-typ Antennen
- mit oder ohne Radom nicht unterschieden
- Offsets nicht geeignet um PCV vollständig zu beschreiben, aber **Offsets sind azimuthale PCV**
- **offensichtlich**
  - **Ausreißer**
  - **signifikante Änderungen in Model-Serie**

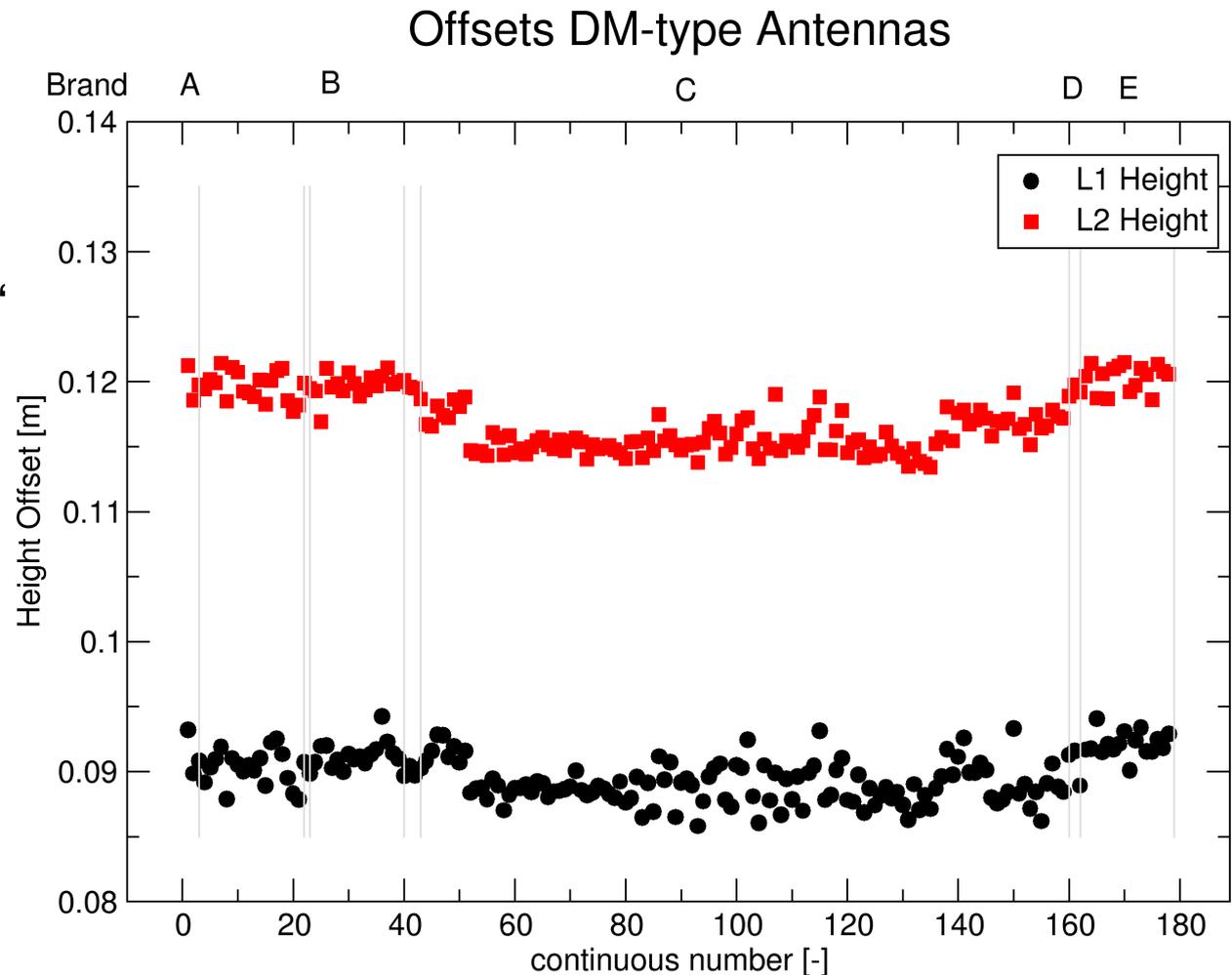


# Analyse Serien von GNSS Antennen Kalibrierungen - Offset Analyse DM-type Choke Ring Antennen -



## Höhen-Offset

- **Abmessungen** der Antennen **weitestgehend identisch**
- Höhen-Offset „weicher“ als horizontale Offsets
- Standardabweichung über alle Antennen ca. 2 mm
- **unterschiedliches Höhen-Niveau** für unterschiedliche Model-Typen





- Antennen Phasenzentrum und Variationen (PCV)
  - Eigenschaften, Größenordnung, Austauschformat
- Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung
  - Motivation, Ziele, Entwicklung, Methode
  - Wiederholbarkeit, GLONASS PCV, Ergebnisse
- **Erkenntnisse aus Analysen von**
  - Serien von GNSS Antennen Kalibrierungen
  - **Radom/Revision von Antennen**
  - Nahfeld Mehrweg Einfluss
  - Empfindlichkeit von Antennen auf Regen
- Was verursachen Millimeter?
- Zusammenfassung
- Ausblick

# Analyse Radom/Revision von Antennen



LEIAR25.R4 LEIT



NOV750.R5 NOVS



LEIAR25.R4 SCIT

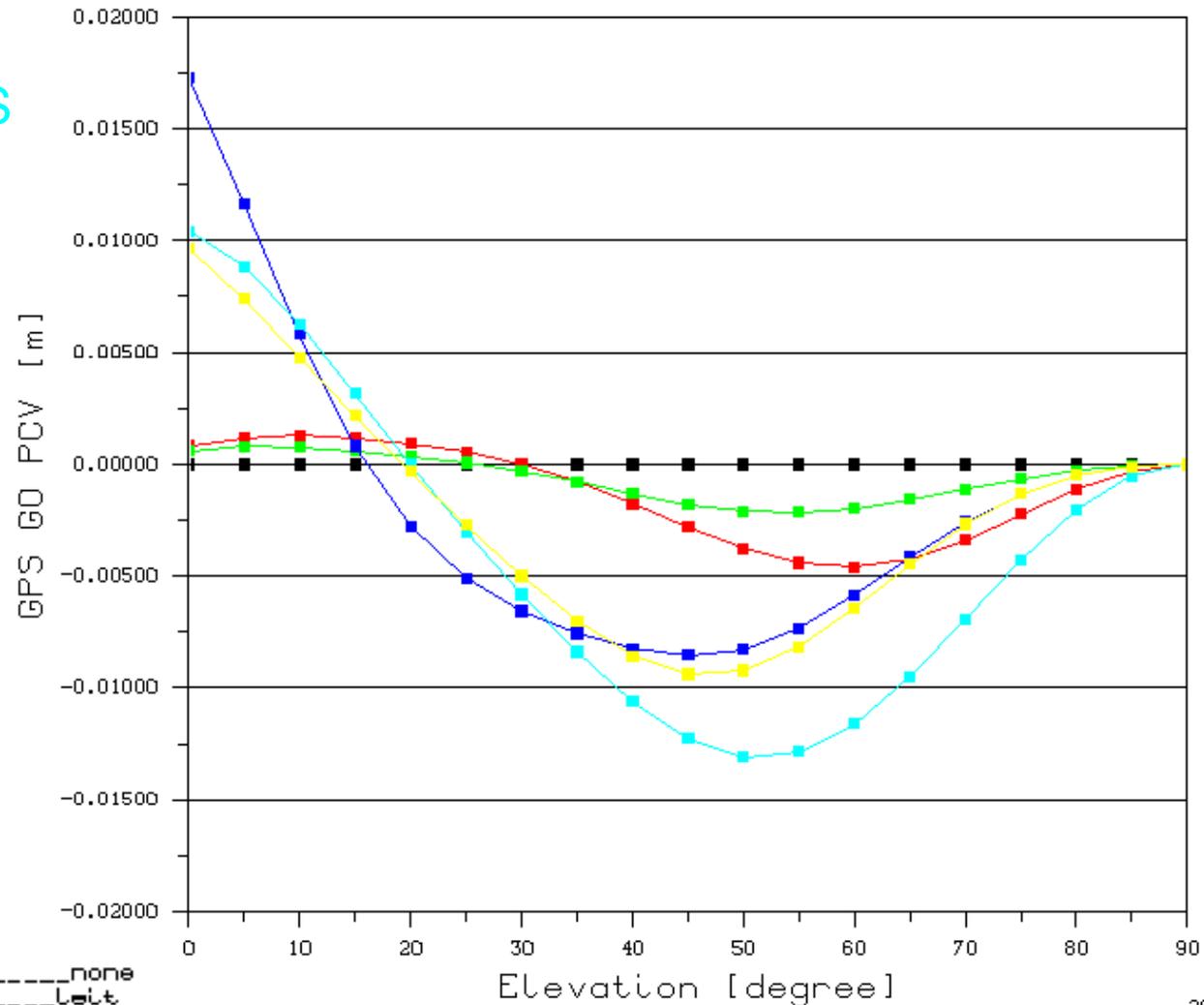
- baugleiche bzw, weitestgehend baugleiche Antenne (LEIAR25.R3, LEIAR25.R4, NOV750.R4, NOV750.R5)
- **sphärischer Radom vs zylindrisch/sphärischer Radom** (LEIT, NOVS)
- unterschiedliches **Material** (LEIT, SCIT) sowie **Grundplatte** (SCIT)

# Analyse Radom/Revision von Antennen



- Differenz zu LEIAR25.R4 NONE
- GPS L0 dPCV
- **Bauform Radom**
  - Radom **LEIT** vs **NOVS** bis zu 12 mm
- **Material/Grundplatte**
  - Radom **LEIT** vs **SCIT** bis zu 8mm
  - bis zu 12...17 mm am Horizont
- **Revision Änderungen**
  - LEIAR25.**R3** vs **R4** bis zu 2 mm
  - NOV750.**R4** vs **R5** bis zu 5 mm

Elevation Dependent Difference from Type Mean  
 LEIAR25.R4-----NONE, SN:UNKNOWN  
 GPS GO PCV [m]



■ #leiar25.r4-----none  
 ■ leiar25.r3-----leit  
 ■ leiar25.r4-----leit  
 ■ leiar25.r4-----scit  
 ■ nov750.r4-----novs  
 ■ nov750.r5-----novs



- Antennen Phasenzentrum und Variationen (PCV)
  - Eigenschaften, Größenordnung, Austauschformat
- Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung
  - Motivation, Ziele, Entwicklung, Methode
  - Wiederholbarkeit, GLONASS PCV, Ergebnisse
- **Erkenntnisse aus Analysen von**
  - Serien von GNSS Antennen Kalibrierungen
  - Radom/Revision von Antennen
  - **Nahfeld Mehrweg Einfluss**
  - Empfindlichkeit von Antennen auf Regen
- Was verursachen Millimeter?
- Zusammenfassung
- Ausblick

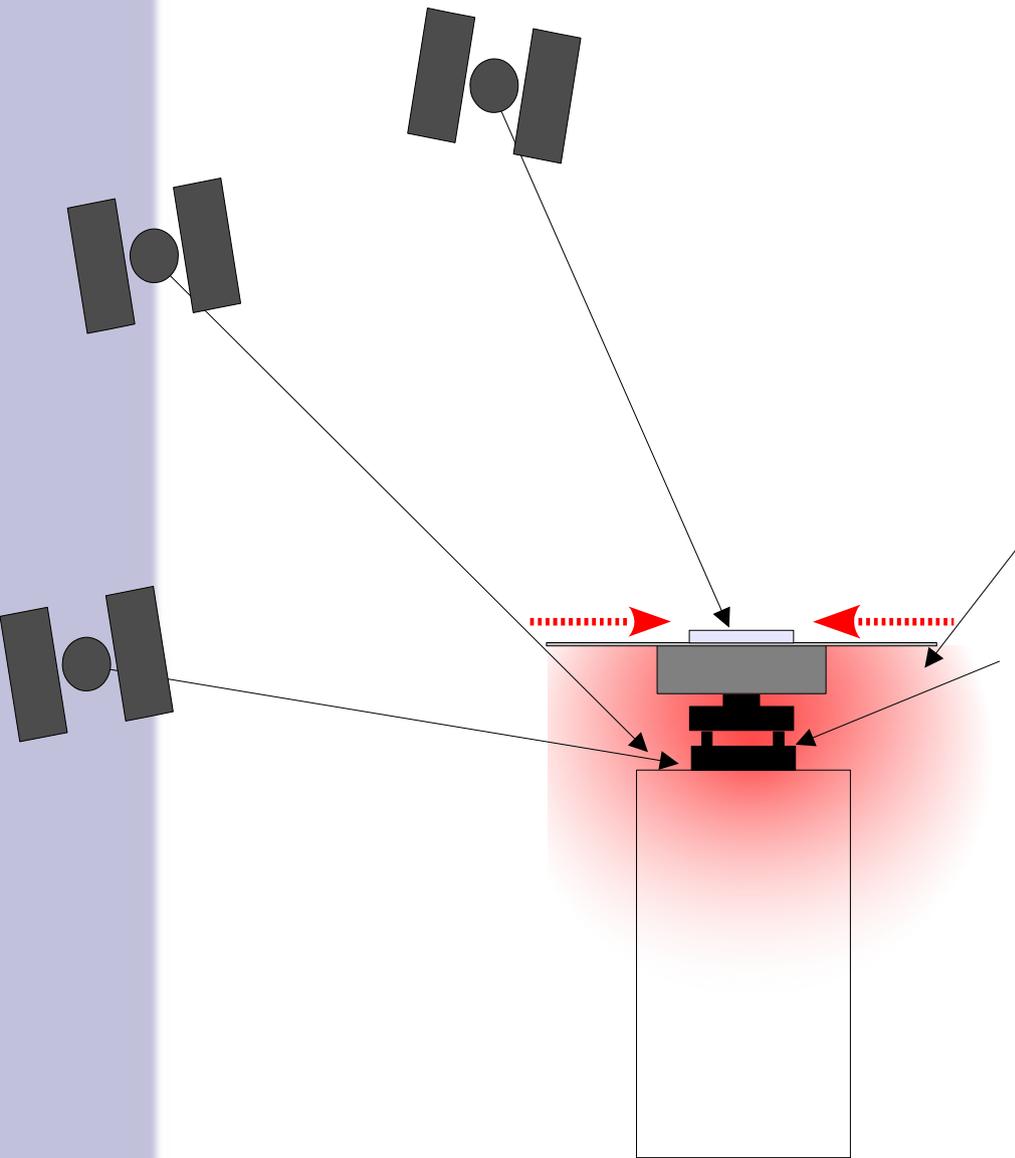
# Analyse Nahfeld Mehrweg Einfluss



- gibt es **Einflüsse durch direkte Umgebung der Antenne?**
- **repräsentative Nahfeld Mehrweg Umgebung während der Kalibrierung** notwendig
- ungenaue Grenze zwischen Nah- und Fernfeld (dm ... m)
- Grenze hängt ab von Wellenlänge und Dimension der Antenne
- **konstante Geometrie zwischen Antenne/Nahfeld trotz Bewegungen der Antenne**
- Kalibrierung liefert PCV inklusive Nahfeld Mehrwege
- Trennung durch Differenz der Kalibrierungen mit und ohne Nahfeld Umgebung



# Analyse Nahfeld Mehrweg Einfluss - Ursachen -

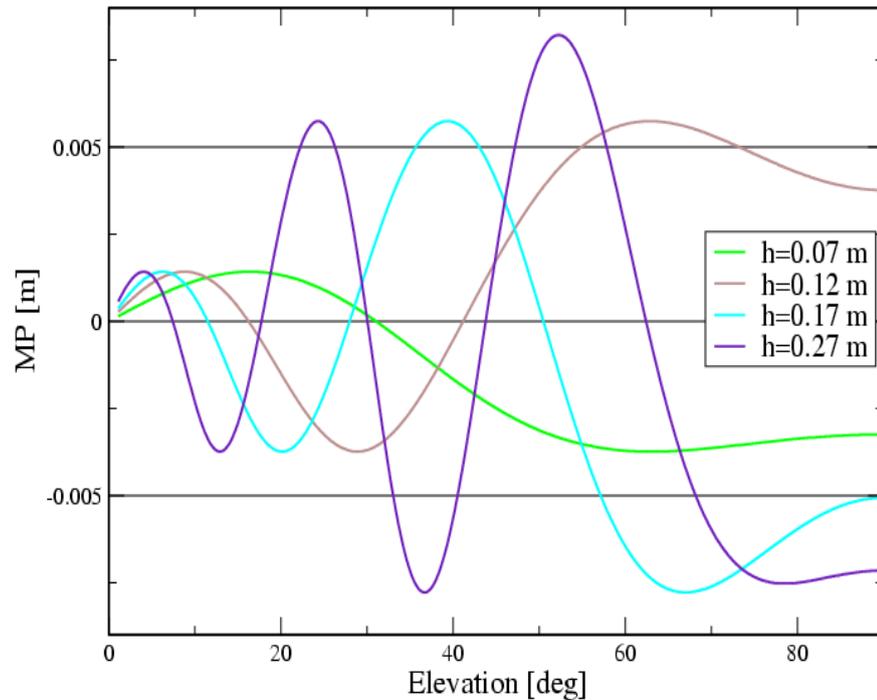


- Antennen **Nahfeld abhängig** von
  - **Antennentyp**  
(plus Radom Konstruktion, ...)
  - **Unterbau / Aufbau**  
(Dreifuß, Stativ, Adaption, ...)
  - **Stationsumgebung**  
(Pfeiler, Dach, Reflektoren, ...)
  - **Witterungsbedingungen**  
(Reflektionskoeffizient, Schnee, ...)
- **Ursache/Einfluss** auf Signale durch
  - **Reflektion**
  - **Beugung**
  - **“Imaging”** /  
electromagnetische Interaktion

# Analyse Nahfeld Mehrweg Einfluss - Theoretischer Einfluß -

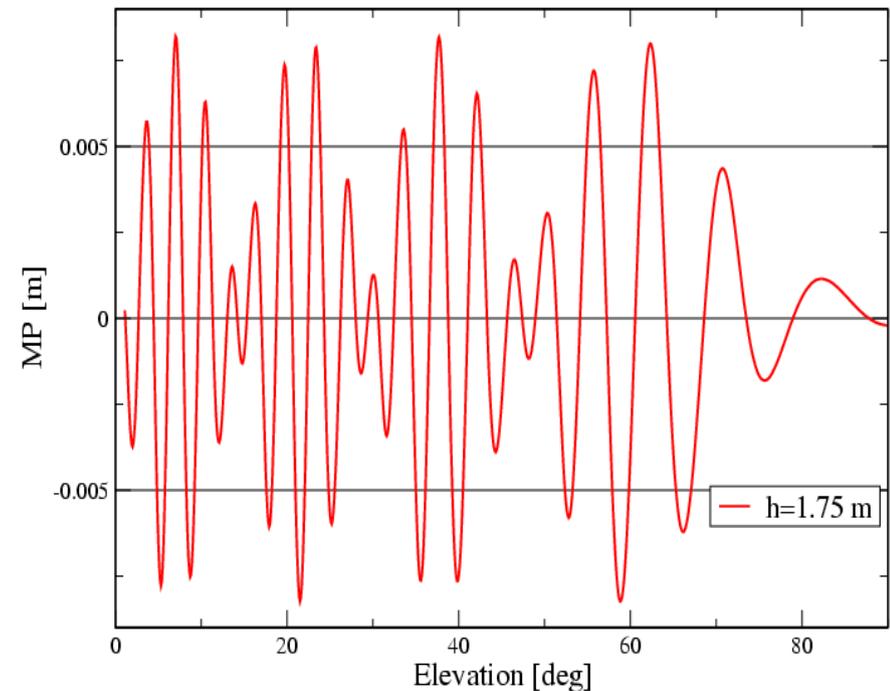


## • Pfeileraufbau



- große Wellenlängen
- Effekte auch in hohen Elevationen
- mittelt sich selbst über lange Beobachtungszeit heraus
- **systematische Koordinatenfehler**

## • Stativaufbau



- kurze Wellenlängen
- Effekte in allen Bereichen
- **mittelt sich über kurze Zeit heraus**

# Analyse Nahfeld Mehrweg Einfluss

## - Dreifuß -



- **LEIAR10 Kalibrierung**

- **Standard**

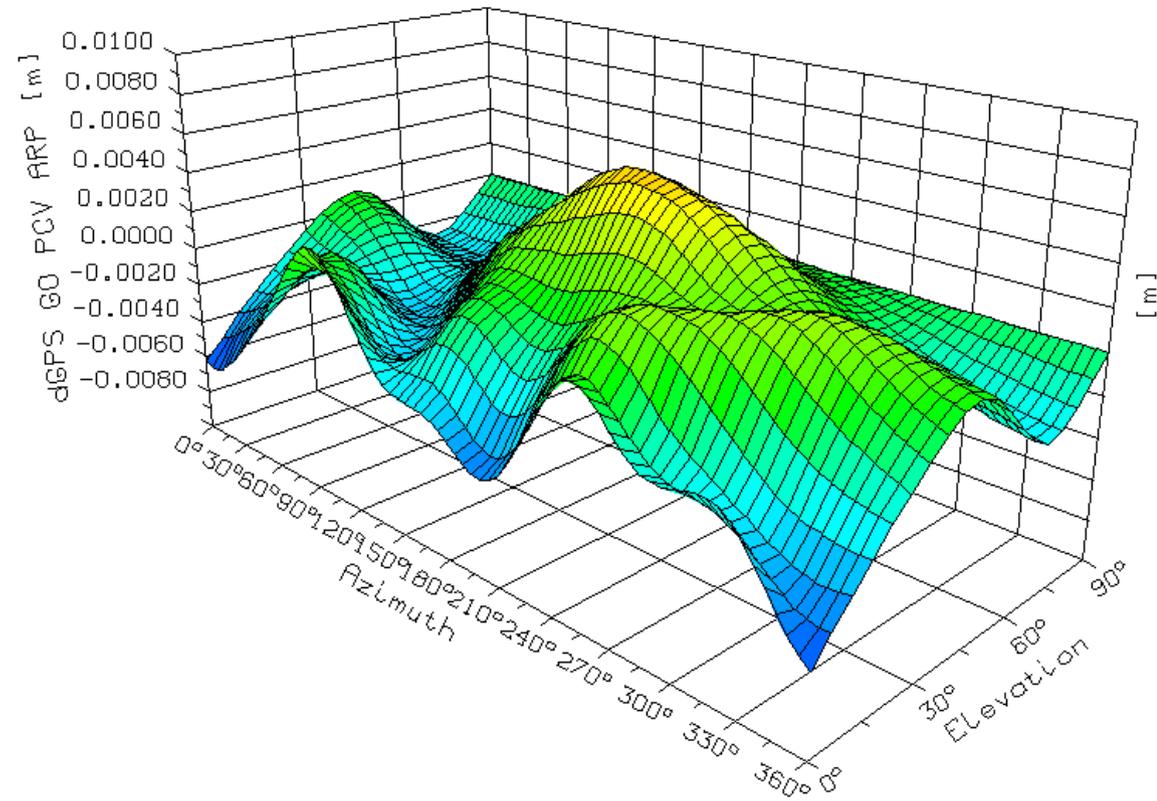
- **+DFB**

- Leica Dreifuß (GDF121),  
Bajonett (GRT144) und  
Klemmadapter

- Differenz zeigt  
Nahfeld Einfluss

- **GPS L0 dPCV:**

-8 ... +4 mm



LEIAR10+DFB

NONE

LEIAR10

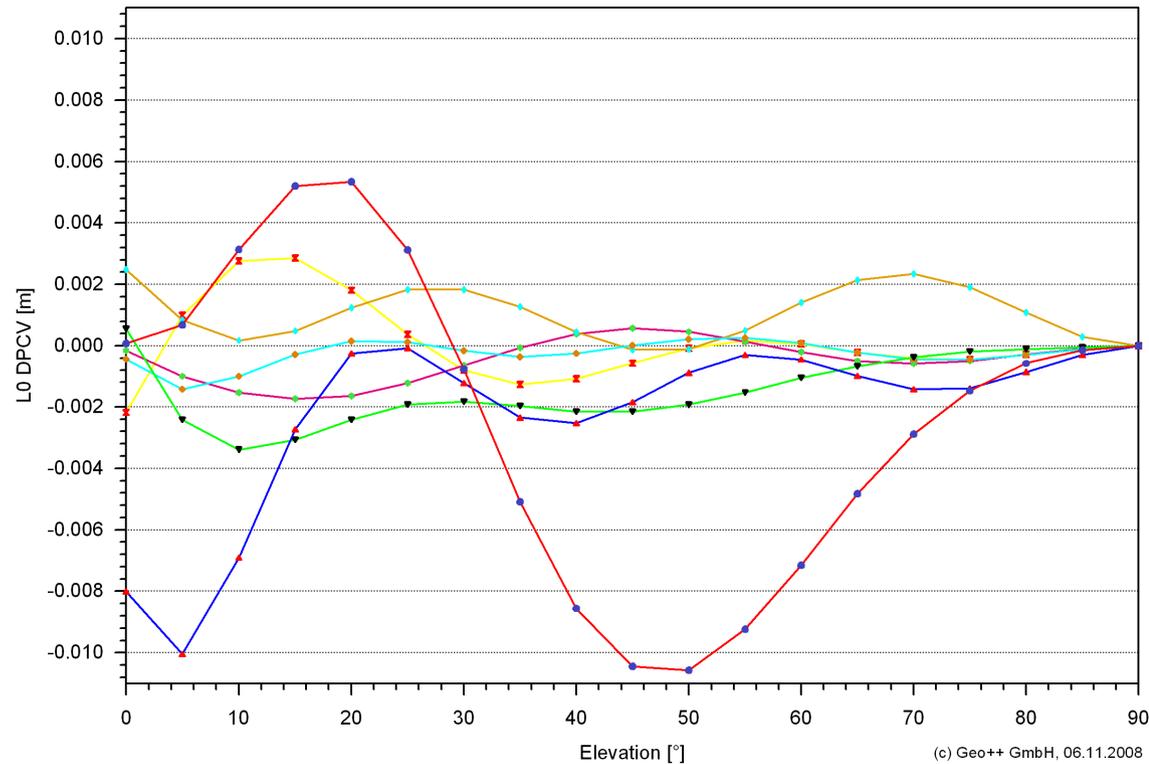
NONE

# Analyse Nahfeld Mehrweg Einfluss

## - Weitere Ergebnisse -



- Nahfeld Mehrweg Effekte verursachen
- **mm ... cm PCV Änderungen**



**Beispiele von geodätischen und Rover-Antennen  
dPCV L0 GPS mit und ohne Nahfeld Umgebung**

1	TPSPG_A1+GP+M	CONE
2	TPSLEGANT2_E+TM	NONE
3	TPSCR3_GGD+OUB	CONE
4	TRM29659.00+PS	TZGD
5	TPSCR3_GGD+ADF	CONE
6	LEIAT504GG+DFB	NONE
7	LEIAT504GG+SFD	NONE





- Antennen Phasenzentrum und Variationen (PCV)
  - Eigenschaften, Größenordnung, Austauschformat
- Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung
  - Motivation, Ziele, Entwicklung, Methode
  - Wiederholbarkeit, GLONASS PCV, Ergebnisse
- **Erkenntnisse aus Analysen von**
  - Serien von GNSS Antennen Kalibrierungen
  - Radom/Revision von Antennen
  - Nahfeld Mehrweg Einfluss
  - **Empfindlichkeit von Antennen auf Regen**
- Was verursachen Millimeter?
- Zusammenfassung
- Ausblick

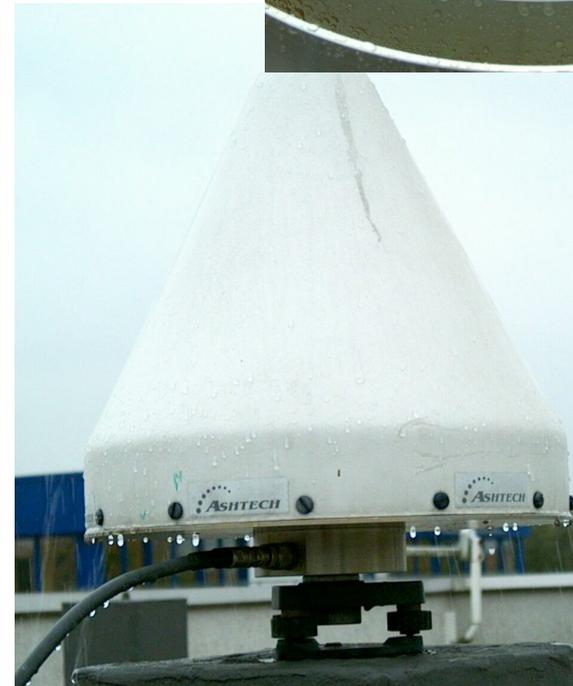
# Analyse Empfindlichkeit von Antennen auf Regen



- Dorne Margolin Typ GNSS Choking Antenne
- beste Wahl für präzise GNSS Anwendungen

## Was ist bei Regen? mit oder ohne Radom?

- NONE
  - **Tropfenbildung**
  - **Wasser** am Boden der Chokeringe
- SNOW Radom
  - trockenes Empfangselement
  - Chokeringe geschützt vor direktem Regen
  - **äußerliche Tropfenbildung**
  - Wasserfilm / **Feuchtigkeitsschicht auf Radom**



# Analyse Empfindlichkeit von Antennen auf Regen - Kontrollierter Regen durch Antennenkalibrierung -



- Antennenkalibrierung bei
  - **trockenen Wetterbedingungen**
  - **feuchten Wetterbedingungen** durch Rasensprenger
- ungefähre **Niederschlagsintensität** 10 ... 20 mm/h während Kalibrierung
- Niederschlagsintensität in Deutschland

moderater Regen	5 mm/h
starker Regen	30 mm/h
kräftiger Regenguss	> 50 mm/h

Wassersprenger während ASH700936D\_M NONE Antennenkalibrierung



Wassersprenger während ASH700936D\_M NONE Antennenkalibrierung

# Analyse Empfindlichkeit von Antennen auf Regen

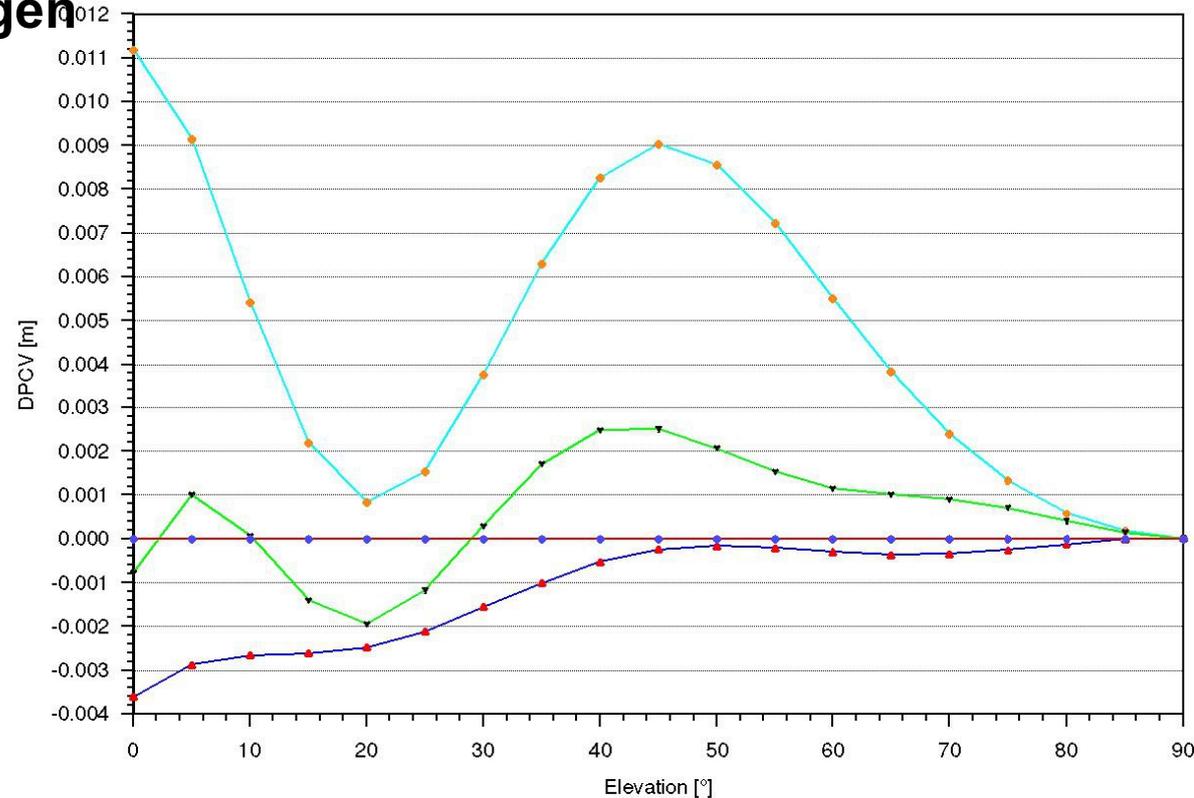
## - Empfindlichkeit von Antennen auf Regen -



- **PCV Änderungen durch Regen**  
für ASH700936D\_M

- NONE GPS L0 < 3 mm
- SNOW GPS L0 > 10 mm

- signifikant im Vergleich zu Wiederholbarkeit einer individuellen Antenne
- Chokering Antenne mit **Radom** ist **stärker beeinflusst**



none\_dry none\_rain snow\_dry snow\_rain



# Analyse Empfindlichkeit von Antennen auf Regen - Erkenntnisse aus Kontrollierter Regen -



- **PCV Änderungen durch Regen**
- systematische Effekte in präziser Höhenbestimmung
- **Koordinatenänderungen** unter wechselnden Wetterbedingungen
- **Empfangscharakteristik** wird überlagert durch **Mehrweg Effekte**
  
- **benötigt weitere Analysen** mit unterschiedlichen Antennentypen und Radomen



Verifikation durch statische, kurze Basislinien Experiment bestätigt Ergebnisse der Antennenkalibrierung;  
3 bis 4 mm Höhenänderung bei starkem Regen für das untersuchte Antennenmodell ASH700936D\_M SNOW



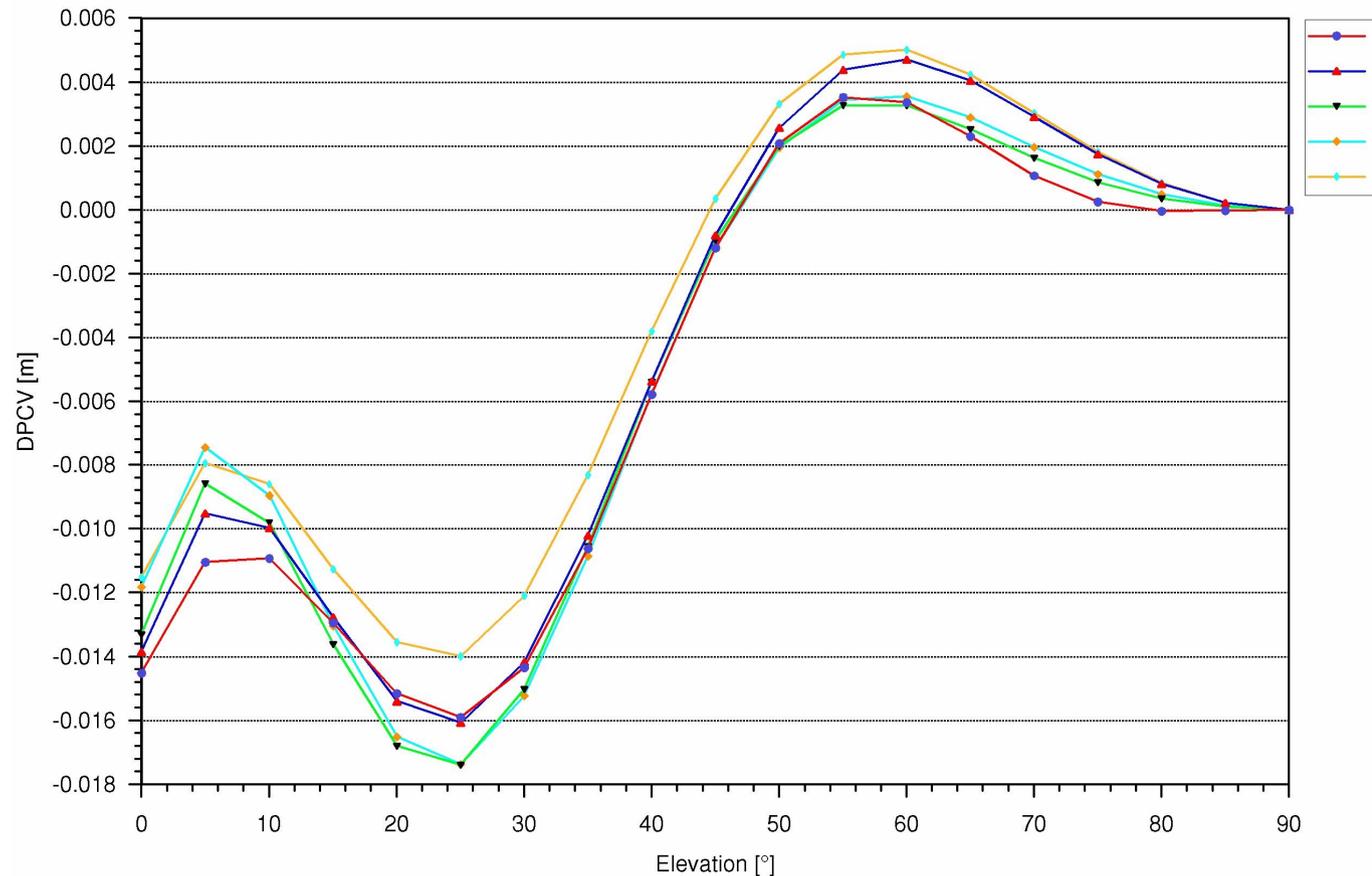
- Antennen Phasenzentrum und Variationen (PCV)
  - Eigenschaften, Größenordnung, Austauschformat
- Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung
  - Motivation, Ziele, Entwicklung, Methode
  - Wiederholbarkeit, GLONASS PCV, Ergebnisse
- Erkenntnisse aus Analysen von
  - Serien von GNSS Antennen Kalibrierungen
  - Radom/Revision von Antennen
  - Nahfeld Mehrweg Einfluss
  - Empfindlichkeit von Antennen auf Regen
- **Was verursachen Millimeter?**
- Zusammenfassung
- Ausblick



# Was verursachen Millimeter? - Beispiel aus RTK Vernetzung -



- GPS L0 dPCV
- **Differenz zur Kalibrierung ohne Nahfeld**
- Wiederholbarkeit  
5 Antennen-Konstruktionen  
ca. 4 mm
  - Nahfeld-Effekt
  - individuelle PCV

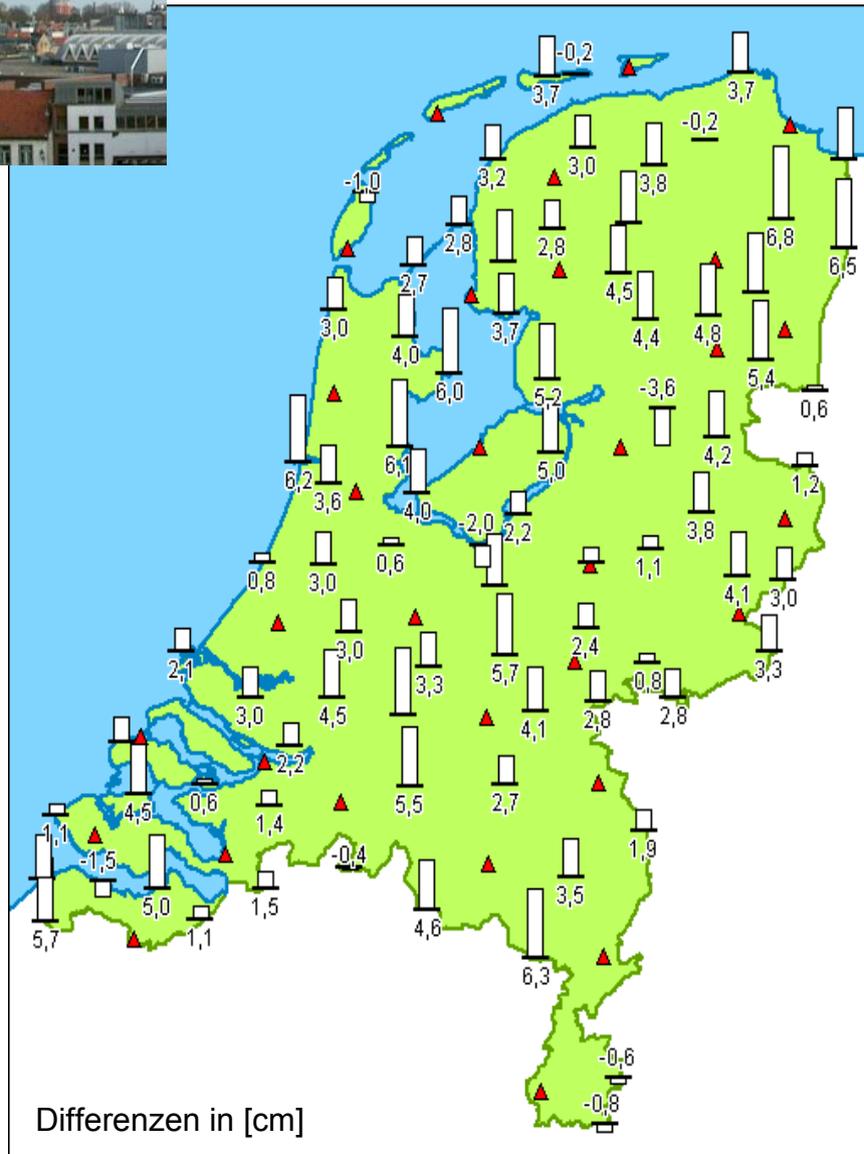


TPSPG\_A1 NONE vs TPSPG\_A1+M NONE

Maximum -18 mm 10-30° Elevation  
Maximum +5 mm 40-70° Elevation

# Was verursachen Millimeter?

## - Beispiel aus RTK Vernetzung -



- Kadaster, The Netherlands
- NETPOS RTK Network (31 Stationen)
- 81 Kontrollpunkte des niederländisches Landesnetz
- **10 RTK Messungen** mit jeweils **10 Initialisierungen**
- **ohne Nahfeld PCV Korrektion**
  - zeit- und ortsabhängige Höhenfehler
  - mittlerer, systematischer Fehler:  
**31 mm** (81Punkte)
- **mit Nahfeld PCV Korrektion**
  - frei von systematischer Fehlern
  - mittlerer Höhenfehler:  
**-2 mm** (49 Punkte)

# Was verursachen Millimeter?



- **nicht vollständig korrigierte PCV** der GNSS Antennen auf Referenzstationen verursachen Fehler beim Nutzer
- Erkenntnisse **generell übertragbar** auf GNSS Antennenwendungen
- **mm PCV können cm im Koordinatenraum verursachen**
- **Ursache** ist zeit- und ortsabhängige **Verstärkung** durch
  - Linearkombination (L0)
  - troposphärische Modellierung
  - Satellitenkonstellation
  - Elevationsmaske
- **Höhenkomponente** am stärksten betroffen
- aber potentielle Auswirkungen auf **Rover-Algorithmus**

# Was verursachen Millimeter?



- Erfahrungen aus umfangreichen Antennenkalibrierungen und Untersuchungen
- feststellbar sind
  - **individuelle Charakteristik** der Antennen
  - **Nahfeld Multipath** Einfluss auf Antennen
- Empfehlung für GNSS Anwendungen
  - sorgfältige **Stationsauswahl**
  - sorgfältige **Aufbau** (Nahfeld und Fernfeld Mehrweg bedenken)
  - **Nordausrichtung** Antenne
  - **absolute PCV** Korrektur
- Empfehlung für präzise GNSS Anwendungen
  - **individuelle Kalibrierung** der Antenne



- GNSS Anwendungen benötigen **absolute PCV** Korrekturen, insbesondere bei
  - **gemischte Antennentypen**
  - RTK-Vernetzungen
  - präzise Ingenieur-Aufgaben
  - globale und wissenschaftliche GNSS Anwendungen
- **Roboter-basierte absolute GNSS Antennenkalibrierung**
- liefert präzise PCV operationell seit 2000
- Funktionalität des Kalibrierstystems wurden seitdem erweitert
- **Standard-Kalibrierung** ermittelt
  - **PCV**, GDV und CN0 Pattern für GPS und GLONASS
- Methode zur fortgeschrittene Analyse von Fragen zu Antennen
  - **Nahfeld Einfluss** auf Antennen
  - Fernfeld Mehrwege-Effekte
- State-of-the-Art GNSS Antennenkalibrierungsverfahren, **Standard im IGS** (International GNSS Service)



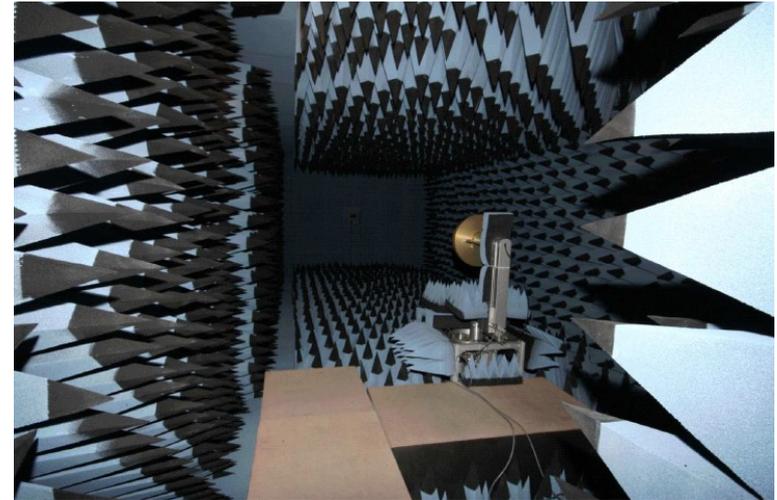
- Antennen Phasenzentrum und Variationen (PCV)
  - Eigenschaften, Größenordnung, Austauschformat
- Absolute Roboter-Basierte GNSS Antennenkalibrierung
  - Motivation, Ziele, Entwicklung, Methode
  - Wiederholbarkeit, GLONASS PCV, Ergebnisse
- Erkenntnisse aus Analysen von
  - Serien von GNSS Antennen Kalibrierungen
  - Radom/Revision von Antennen
  - Nahfeld Mehrweg Einfluss
  - Empfindlichkeit von Antennen auf Regen
- Was verursachen Millimeter?
- Zusammenfassung
- **Ausblick**

# Ausblick

## - Zukünftiges im Bereich GNSS Antennenkalibrierung -



- **allgemein**
  - GDV Kalibrierung
  - CN0 Pattern
  - Stationskalibrierung
- **Geo++ GNPCV Roboter System**
  - weitere Frequenzen (GPS L5, Galileo)
  - GNSS Kalibrierungen mit wenigen Satelliten
- **international**
  - Erweiterungen ANTEX
  - Vergleich absolute Kalibrierverfahren (z.Z. Kammer Bonn, Feldverfahren Geo++)



Antennenkalibrierung in Kammer, Universität Bonn\*



Absolute Antennenkalibrierung NGS\*

\* NGS National Geodetic Survey, USA

\* aus: Bilich, A., M. Schmitz B. Görres, P. Zeimetz, G. Mader, G. Wübbena (2012).  
Three-Method Absolute Antenna Calibration Comparison.

IGS Workshop 2012, University of Warmia and Mazury (UWM), July 23-27, 2012, Olsztyn, Poland.

# GPS Block II/IIA Satellitenantenne auf Roboter



- kooperatives Projekt NGS, Boeing und Geo++ in 2008
- GPS Block II/IIA Antenne (14.4 kg, Ø 1.34 m)

