Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen

28. April 1999

Herausgeber: J. Campbell und B. Görres

Geodätisches Institut
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
J. Campbell & B. Witte

Mittwoch, 28. April 1999
Hörsaal 16 des Geodätischen Instituts

9.00 Begrüßung

Wissenschaftliche Vorträge (9.15 - 12.30, je 30 min incl. Diskussion)

- Campbell, J., B. Görres (GIUB): Definition von Antennenphasenzentren und Signifikanz der Ergebnisse aus Kammer- und Feldverfahren
- Kaniuth, K. (DGFI): Kalibrierung von GPS-Antennen am DGFI
- Rothacher, M. (Universität Bern): Bestimmung von Variationen der Antennenphasenzentren mit GPS-Beobachtungen: Vergleiche und Kombination
- Brockmann, E. (Schweizerische Landestopographie): Antennenkalibrierung am Bundesamt für Landestopographie (Schweiz): Stabilität der Kalibrierung über längere Zeiträume

Kaffeepause

- Wanninger, L., J. Böhme (TU Dresden): GPS-Antennenkalibrierung am Geodätischen Institut der TU Dresden
- Wübbena, G., M. Schmitz (Geo++ GmbH Garbsen), V. Böder, F. Menge (IfE Universität Hannover): Bestimmung und Nutzung absoluter Antennenphasenzentrumsvariationen (PCV)

Mittagspause

Forum für Kurzbeiträge (14.00 - 15.30, max. 15 min)

- Bäumker, M. (FH Bochum): Elimination von Mehrwegeeffekten und Antennenfehlern bei Langzeitbeobachtungen
- Wohlleben, R. (MPIfR Bonn): Das Phasenzentrum der kegelförmigen logarithmischen Spiralantenne
- Landau, H. (Spectra Precision Terrasat):
- Pesec, P., G. Stangl (Institut für Weltraumforschung Graz): Vergleich von GPS-Antennen für Kampagnen und Permanentstationen am OLG (Observatorium Lustbuehel Graz)

Kaffeepause

Abschlußdiskussion

Vorwort

Im Hinblick auf den verstärkten Einsatz von GPS in vielen Sektoren des Vermessungswesens, insbesondere auch in der präzisen Höhenmessung, haben wir in Kooperation mit dem Landesvermessungsamt NRW kurzfristig beschlossen, ein Workshop zur Darstellung des aktuellen Kenntnisstandes über Definition und Festlegung von Phasenzentren bei GPS-Antennen abzuhalten. Zu diesem Themenkreis wurden in den letzten Jahren allein im deutschsprachigen Raum eine ganze Reihe von bedeutenden Forschungsarbeiten durchgeführt und ermutigende Ergebnisse veröffentlicht. Nun ist es an der Zeit, ein erstes Fazit aus diesen Arbeiten zu ziehen und zu einigen für die Praxis hilfreichen Empfehlungen zu kommen.

Im ersten Teil des Workshops werden zunächst Referate zur Darstellung der wissenschaftlichen Grundlagen und der verschiedenen Antennenkalibrierverfahren einschließlich neuerer Ergebnisse vorgestellt, während im zweiten Teil Kurzbeiträge zu den Anforderungen aus der Praxis und zu spezielleren Fragen angesiedelt sind. In der Abschlußdiskussion wird versucht, ein Fazit aus den Darbietungen und Diskussionsbeiträgen zu ziehen, wobei die mit der geplanten Einführung des SAPOS-Dienstes verbundenen Aspekte besondere Berücksichtigung fanden.

An dieser Stelle geht unser Dank an die erfreulicherweise recht zahlreich erschienenen Teilnehmer und insbesondere auch an die Vortragenden für die interessanten und gehaltvollen Beiträge.

Definition von Antennenphasenzentren und Signifikanz der Ergebnisse aus Kammer- und Feldverfahren

James Campbell,[1] Barbara Görres,[1]
Holger Kotthoff,[1] Rudolf Wohlleben [2]

Teil I: Definitionen und Laborverfahren

Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
[1] Geodätisches Institut
28. April 1999

[2] MPIfR

Definitionen

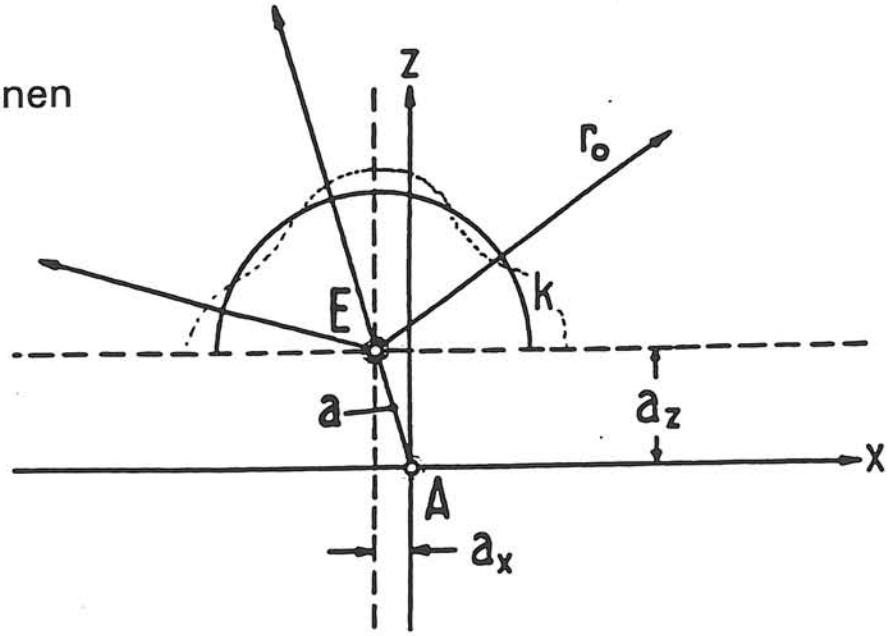


Abb. 1: Lage des elektrischen Phasenzentrums (E) einer rundstrahlenden Antenne (Aufriß). A = geodätisches (mechanisches) Antennenzentrum, a = konstanter Antennenoffset, k = Halbkugel (Phasenfront bei rundstrahlender Sendeantenne)

SPN 2/1995 : *B. Breuer et al.*
Kalibrierung von GPS-Antennen für hochgenaue geodätische Anwendungen . S. 49-59, 1995
Zeitschr. f. Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation

Geometrische Definition :

E als Schnittpunkt der fehlerfreien Phasen-Strecken von n gleichzeitig sichtbaren Satelliten

Die elektromagnetischen Eigenschaften der Bauteile der Antenne führen zu mehr oder weniger großen Abweichungen der Phasenfronten von der idealen Kugelform. Dies führt zu richtungsabhängigen Phasenfehlern $d\phi(\alpha,\beta)$

Auswirkung des Ofsetts a und der Phasenfehler auf die gemessene Phasenstrecke dr (m) :

$$dr(\alpha,\beta) = \underbrace{\vec{a} \cdot \vec{r}_o}_{\text{Projektion von a auf die Meßrichtung}} + \lambda \cdot d\phi(\alpha,\beta)$$

Mittleres Phasenzentrum, wenn $\Sigma\, d\phi(\alpha,\beta) = 0$

Microwave Antenna Measurements
Ed. J.S. Hollis, T.J. Lyon, L. Clayton
Scientific Atlanta Inc., July 1970

The phase deviation of the measured phase front from constant phase is given by $2\pi\,\delta/\lambda$ radians. It is evident from (9.25) that the resolution in determination of Δ is dependent on the width of the angular sector of ϕ over which the measurements are made.

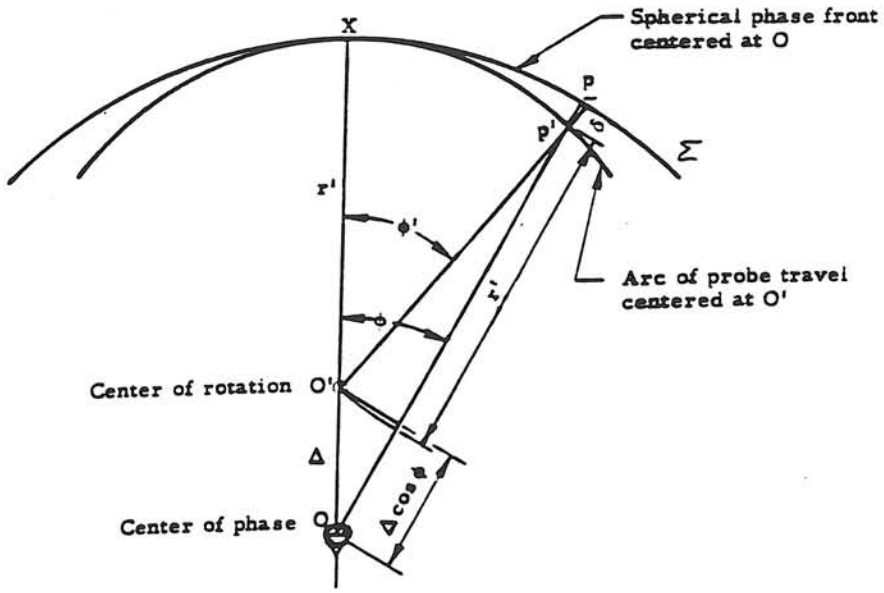


FIGURE 9.9 Geometry illustrating deviation of phase measured by probe from constant phase front of spherical wave. When Δ is small, $\phi' \to \phi$.

Elektrische bzw. feldtheoretische Definition:

O als Mittelpunkt der Schmiegungskugel an die Phasenfront im Raumwinkel Σ

(Antenne als Sendeantenne betrachtet)

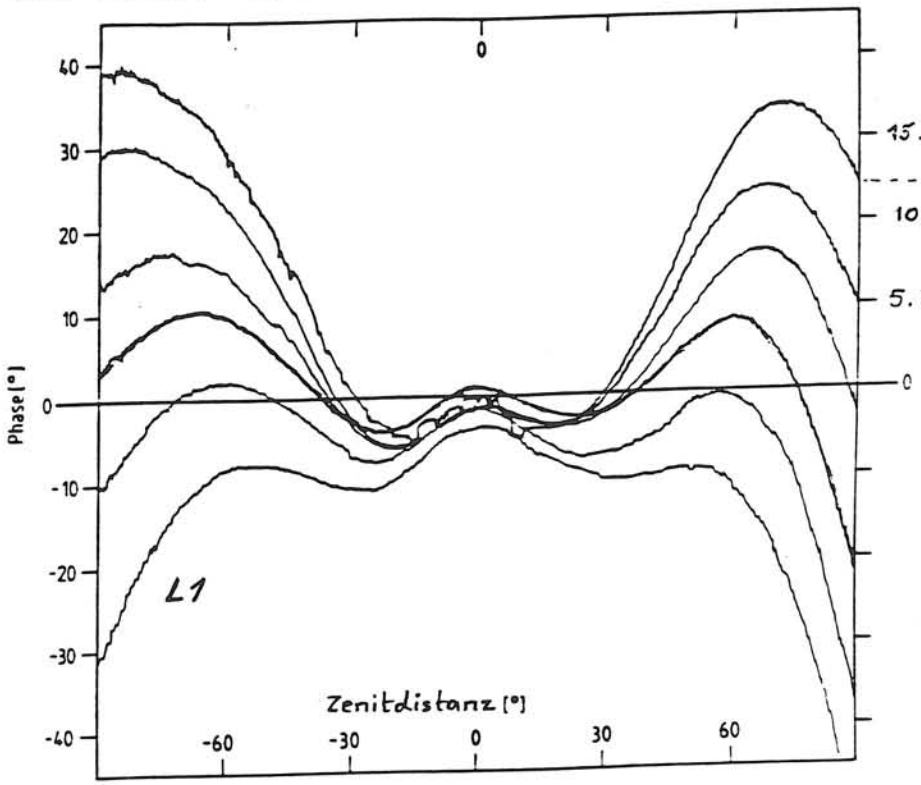
Mittleres Phasenzentrum: Mittelung der Abweichungen über Raumwinkel Σ

$\Rightarrow$ Einfluß des Elevations-Cutoff !

Laborverfahren

Absolute Kalibrierung im Mikrowellenraum

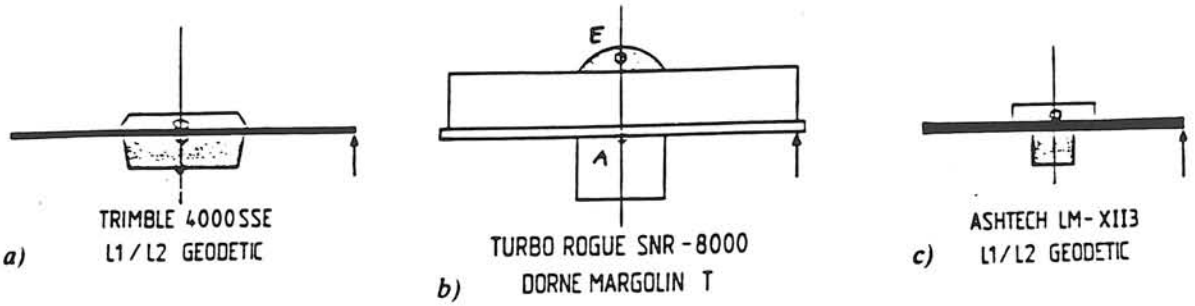
Festlegung des elektr. Phasenzentrums durch Einstellung der "flachesten" Kurve ($\Sigma\, d\phi = 0$ über gesamten Elev.-Bere



Zu jedem d-Wert gehört eine entsprechende Phasenkurve!

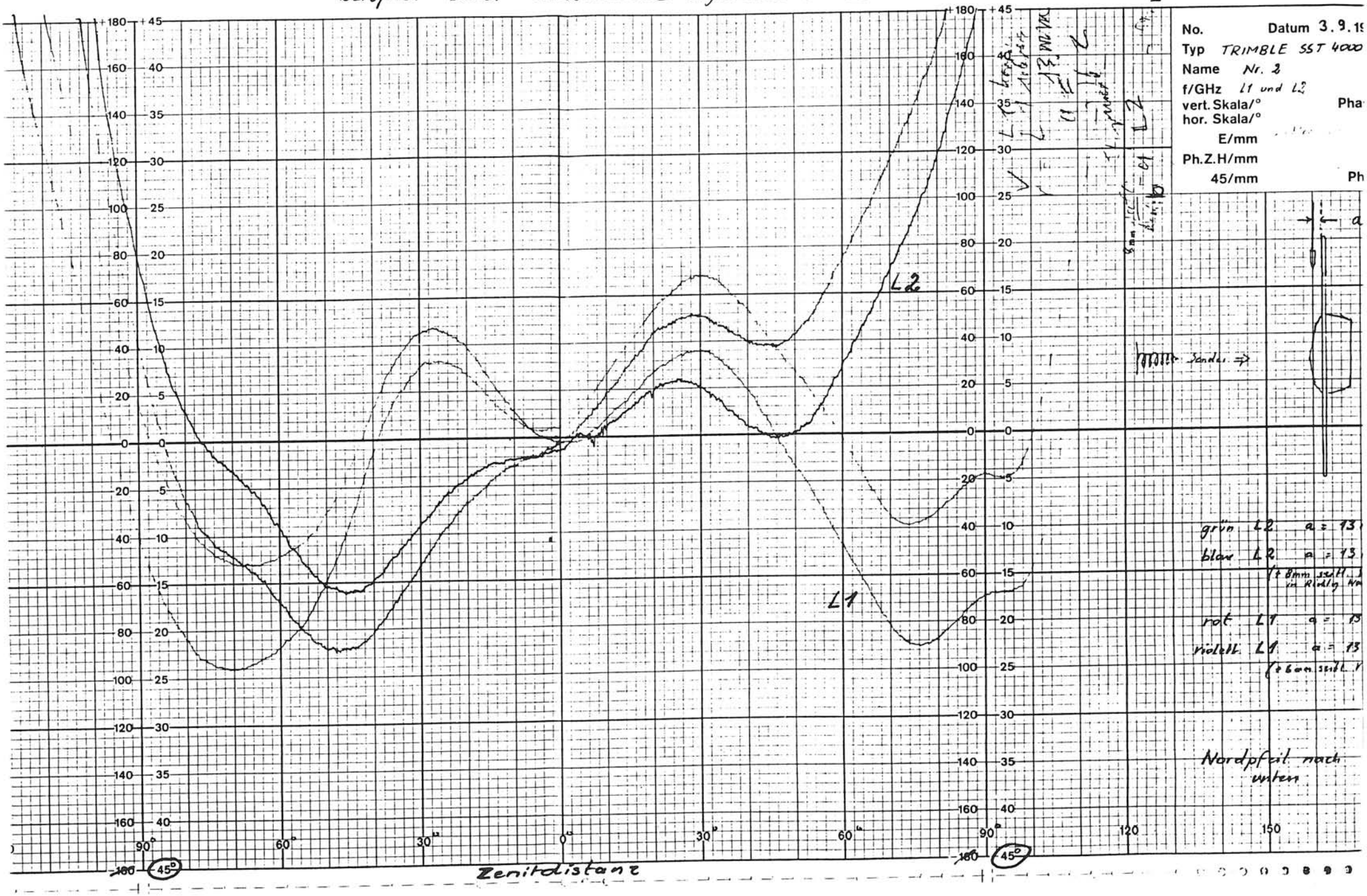
L1: 0.53 mm / [°]

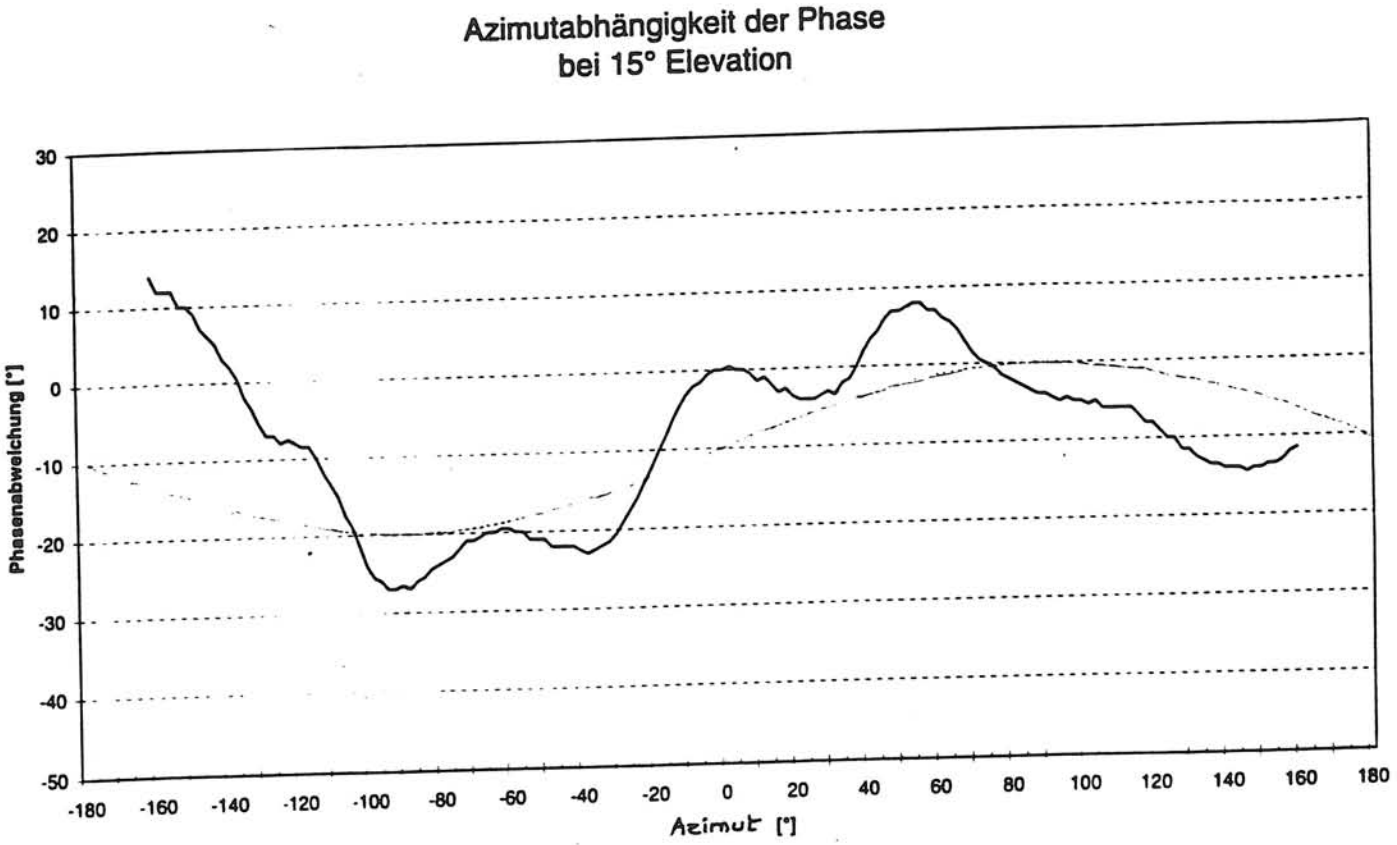
Abb. 2: Beispiel von im Antennenlabor bei unterschiedlichen Antennenpositionen erhaltenen Phasenkurven für eine Trimble-Antenne (Verschiebungen in Schritten von 8 mm in Richtung auf den Sender)



Festlegung des mechanischen Referenzpunktes A bei verschiedenen GPS-Antennen

Beispiel einer Phasenkurve registriert in der Mikrowellenkammer des MPIFR, Bonn

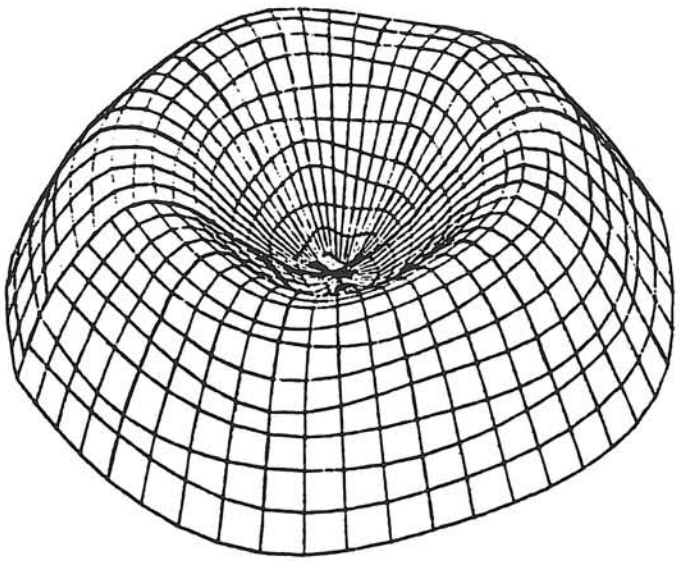




Ziel:

Räumliche Darstellung von richtungsabhängigen Phasenfehlern

(Schupler, Allshouse NASA GSFC)



Definition von Antennenphasenzentren und Signifikanz der Ergebnisse aus Kammer- und Feldverfahren

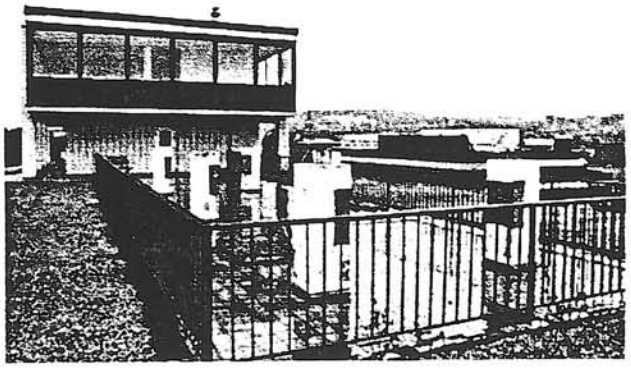
Teil II: Feldverfahren

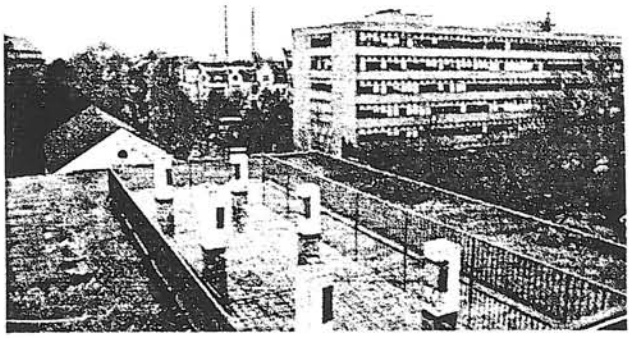
Barbara Görres, James Campbell

Geodätisches Institut
der Universität Bonn

Feldverfahren
zur Kalibrierung von GPS-Antennenmessung

Meßdach
des
Geodätischen
Instituts





Vorteile:
- Kalibrierung in Gebrauchslage
- Messung jederzeit möglich

Nachteile:
- Relativbestimmung (Referenzantenne nötig)
- Abhängigkeit von der Satellitenkonstellation (keine gleichmäßige Verteilung der Meßwerte)

GIUB-Antennenkalibrierung (BNCAL92 bis 98)

Typ	P/N	#
Trimble 4000 ST/SSE L1/L2 Geodetic	14532-00	6 **K**
Trimble Compact L1/L2 w G/P	22020-00	9 **K**
Trimble micro centered	33429-00	3
Trimble Choke Ring Antenna (Radom)	29659-00	1 **(K)**
LEICA SR299		3
TurboRogue Antenna	?	2
Ashtech L1/L2, Rev. B	700228 D	3
Ashtech Choke Ring Antenna (Radom)	700936 (C/D)	2
Ashtech Precise Geodetic Antenna	701008-01 (A)	1
Sensor Systems Airborne L1/L2	S67-1575-96	2
Spectra Physics/Choke Ring (Radom)	5711908273	1

Referenzantenne

Trimble 4000 ST/SSE L1/L2 Geodetic: P/N: 14532-00
S/N: 3235A63966

Bezugspunkt an der Antenne: Unterkante Abschirmplatte

		N	E	UP
mittleres PCs [mm]:	L1	0.0000	0.0000	0.0070
	L2	0.0000	0.0000	0.0070

richtungsabhängige Korrekturen: keine

Bestimmung von mittleren Phasenzentren und richtungsabhängigen Korrekturen

Ergebnis der Auswertung einer Feldmessung:

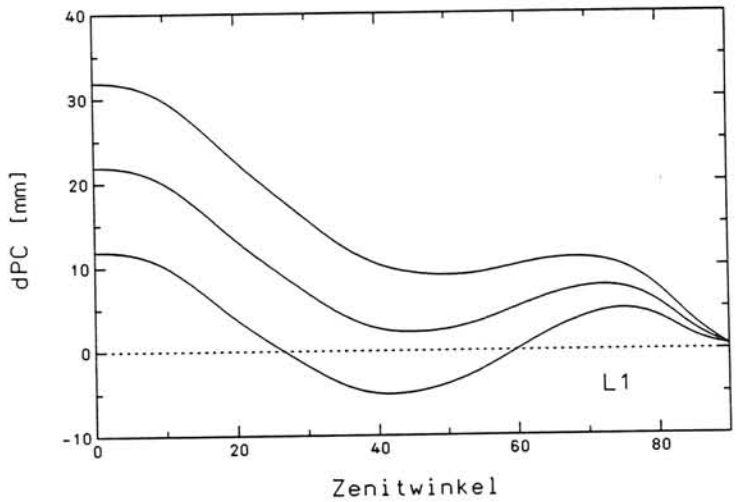
$$\Delta\Phi = \Phi_N - \Phi_R$$
$$= (\cos z \cdot h_N + p_N(z,\alpha)) - (\cos z \cdot h_R + p_R(z,\alpha))$$

jeweils für die beiden Trägerfrequenzen L_1 und L_2
Soll-Koordinatendifferenzen bekannt

- Unterschiede in mittleren Phasenzentren
  => Mittelwert über ein bestimmtes Raumsegment
  (Funktion der Elevationsmaske, meist 15°)

- Unterschiede der richtungsabhängigen Phasenfehler
  => richtungsabhängige Variationen als Verbesserung an den gewählten Mittelwert (Elevation/Azimut)

Auswahl eines geeigneten Ansatzes:
- Polynom
- Polygon
- Kugelfunktionen



!! Konsistenz !!

Genauigkeit der erhaltenen Konstanten

Tagesmittel: Meßrauschen
Jahresmittel: + Satellitenkonstellation
Typenmittel: + fertigungsbedingte Unterschiede
IGS-Vergleich: + Mehrwegeeffekte (Aufbau, Umgebung)
+ unterschiedliche Rechenansätze

Lage/Höhe [mm]	Tages-mittel		Jahres-mittel		Typen-mittel	
Trimble 4000 ST/SSE L1/L2 Geodetic					0.7	0.6
Trimble Compact L1/L2 w G/P	0.3	0.2	0.5	0.9	0.7	1.1
Trimble micro centered					0.6	0.5
Trimble Choke Ring Antenna (Radom)						
LEICA SR299					0.4	2.0
TurboRogue Antenna					1.4	0.5
Ashtech L1/L2, Rev. B					0.8	0.8
Ashtech Choke Ring Antenna (Radom)	0.4	0.7			0.5	0.2
Ashtech Precise Geodetic Antenna						
Sensor Systems Airborne L1/L2					0.4	0.2
Spectra Physics/Choke Ring (Radom)						
Mittel	0.3	0.4			0.7	0.8

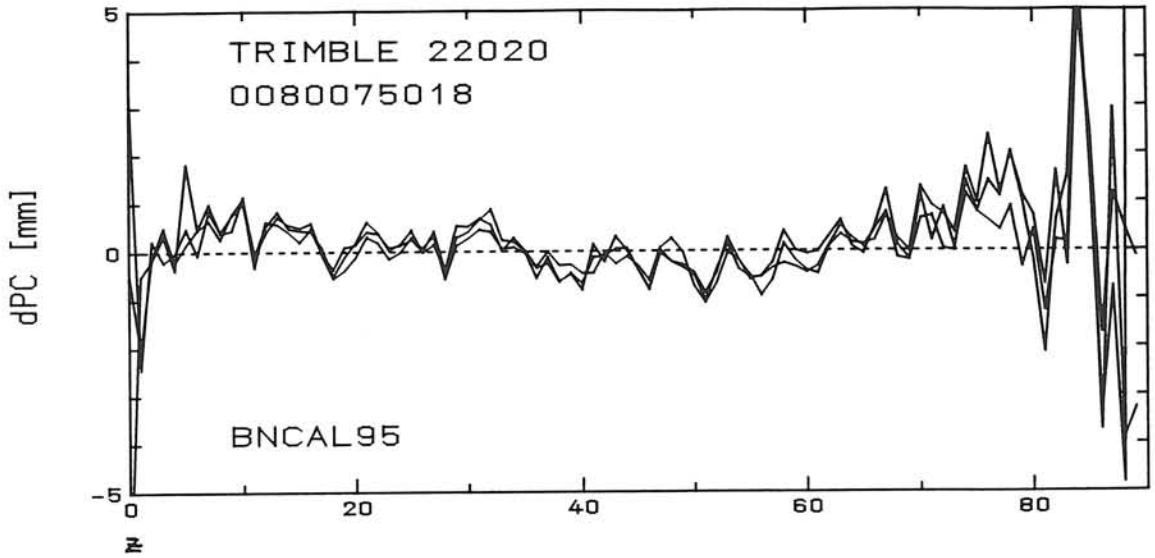
=> typenspezifische Mittelwerte

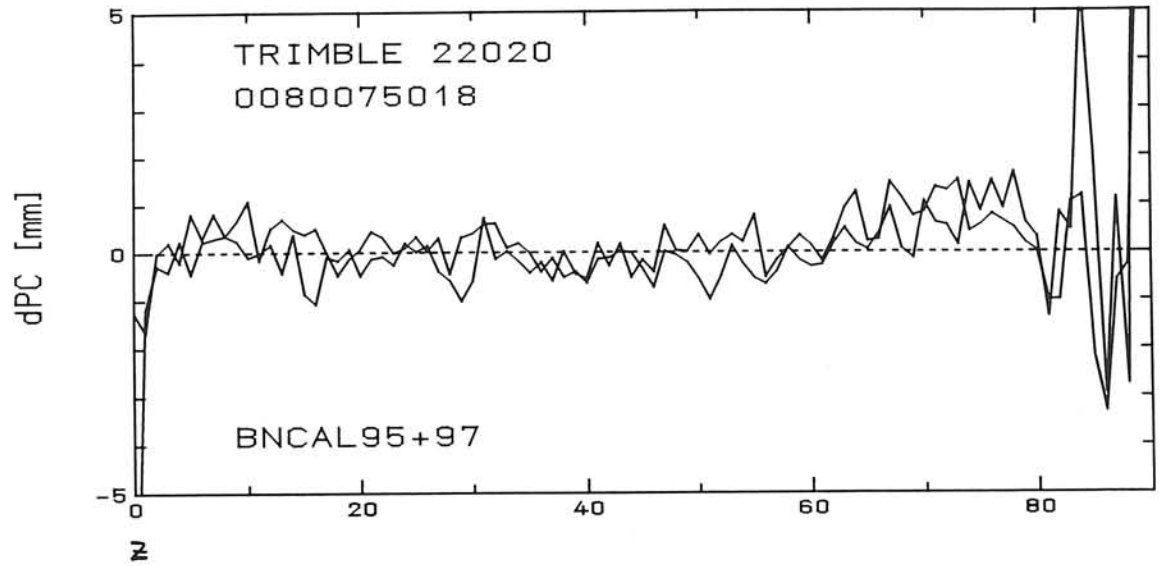
Vergleich von GIUB- und IGS-Werten

Elevationsmaske: 15°

	GIUB L1: N E UP L2: N E UP	GIUB - IGS L1: N E UP L2: N E UP
Trimble 4000 ST/SSE L1/L2 Geodetic	0.0 0.0 0.7 0.0 0.0 0.7	
Trimble Compact L1/L2 w G/P	1.7 3.5 7.6 2.4 3.5 4.9	0.2 1.7 -1.9 0.4 0.5 -2.3
Trimble micro centered	0.4 6.2 8.3 4.5 3.2 5.7	-0.1 2.8 -2.4 2.0 2.0 -2.5
Trimble Choke Ring Antenna (Radom)	-1.4 4.0 104.8 3.4 2.7 119.9	-3.2 1.3 4.4 0.3 1.8 0.1
LEICA SR299	-0.8 4.2 62.1 4.0 2.7 84.0	-0.9 1.5 2.5 0.4 0.3 -4.4
TurboRogue Antenna	2.2 4.3 103.8 4.8 -1.9 104.7	-0.8 1.2 -1.3 0.9 1.4 -1.0
Ashtech L1/L2, Rev. B	-1.8 2.2 9.9 -0.6 2.6 7.3	-1.6 0.2 2.3 0.6 -2.5 -4.4
Ashtech Choke Ring Antenna (Radom)	-0.6 5.6 64.0 3.8 3.0 81.4	-0.6 2.6 0.6 0.7 -1.7 -3.6
Ashtech Precise Geodetic Antenna	-2.7 5.1 71.7 2.2 1.4 53.4	
Sensor Systems Airborne L1/L2	-1.0 4.4 -4.7 3.8 3.2 -6.4	
Spectra Physics/Choke Ring (Radom)	3.3 1.2 162.2 8.1 -4.5 173.6	
Mittel		1.2 mm (Lage) 2.4 mm (Höhe)

Genauigkeit der Bestimmung der elevationsabhängigen PCVs





Reproduzierbarkeit r:

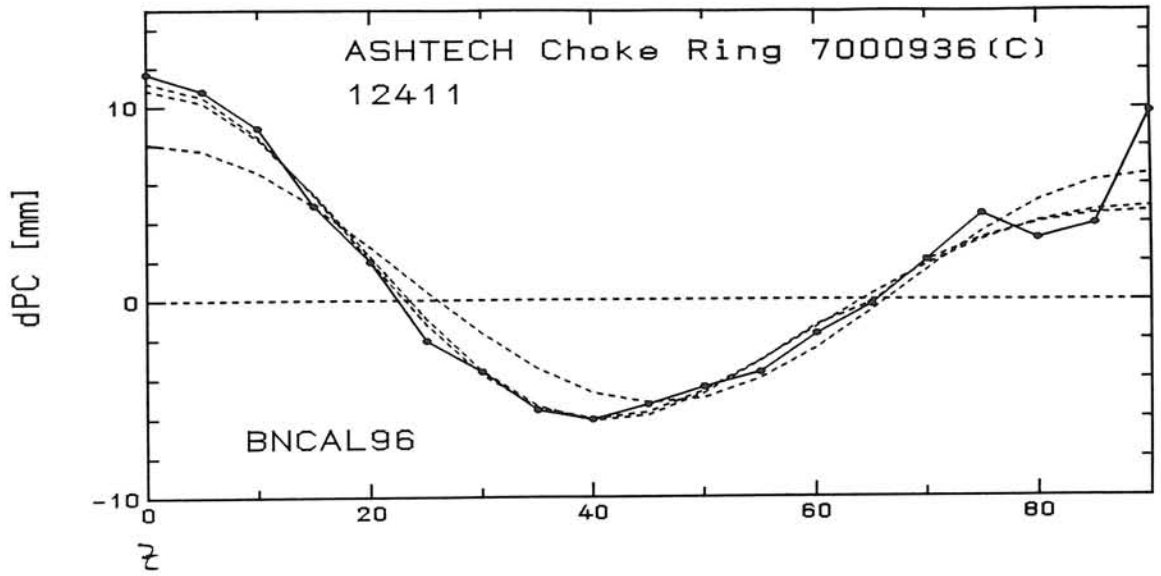
aus drei aufeinanderfolgenden Tagen: ≈ 0.15 mm

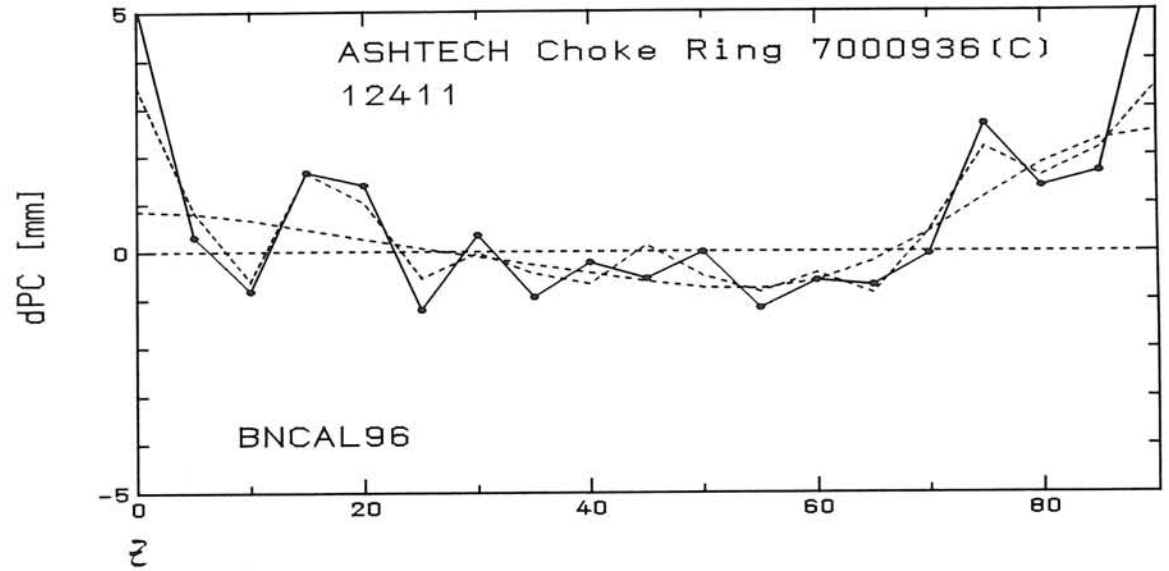
aus zwei unabhängigen Messungen (95/97): ≈ 0.3 mm

Abhängigkeit von der Satellitenkonstellation?

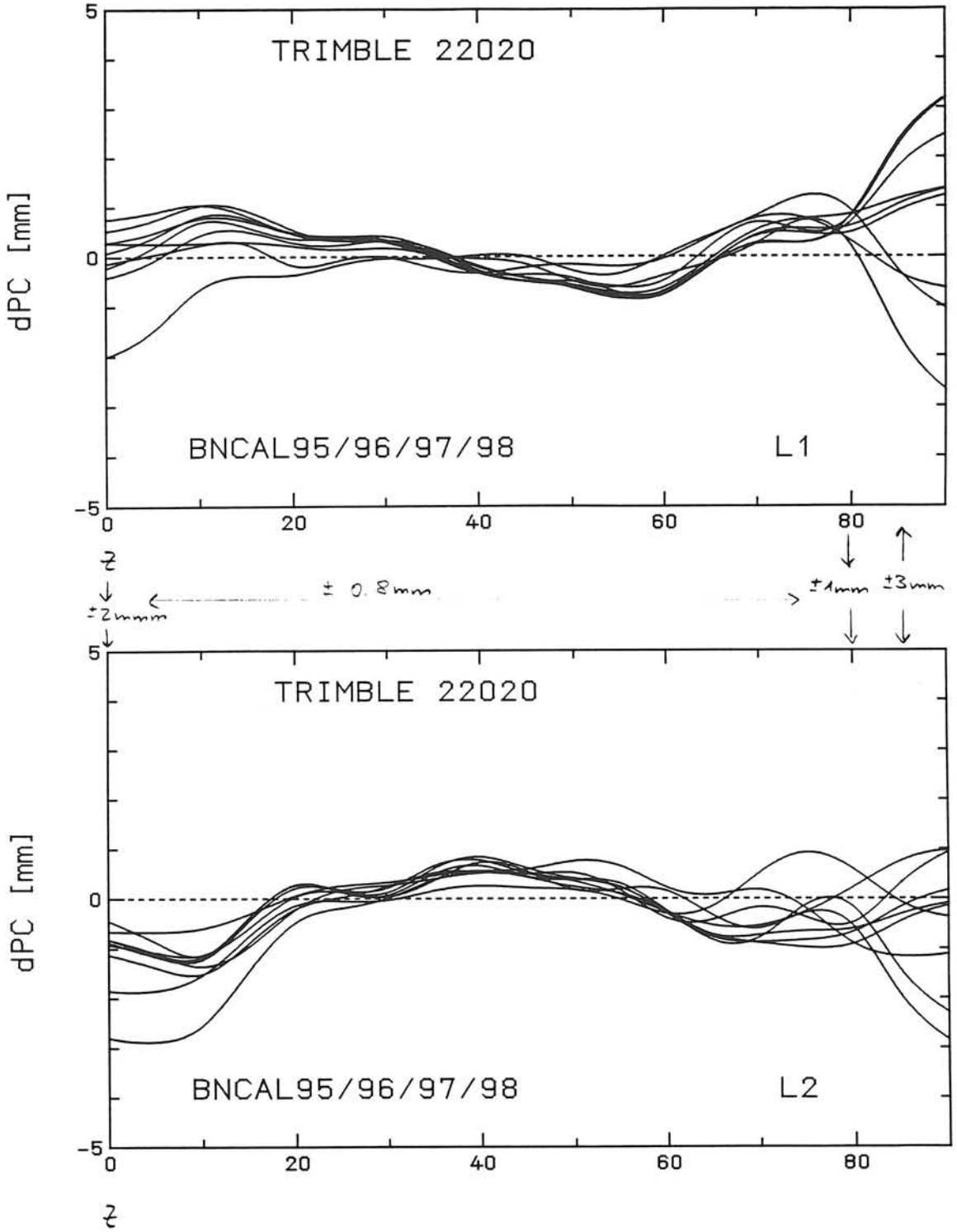
=> Verbesserung des Meßaufbaus durch Drehen der Antenne

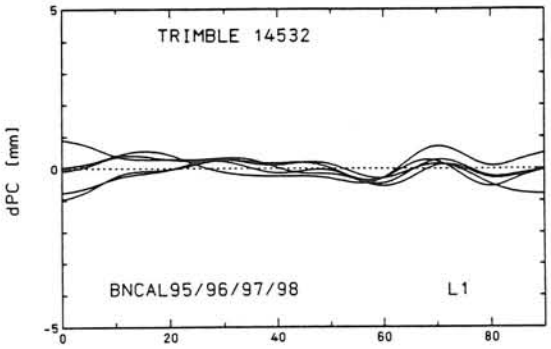
Auswahl einer geeigneten Kugelfunktion

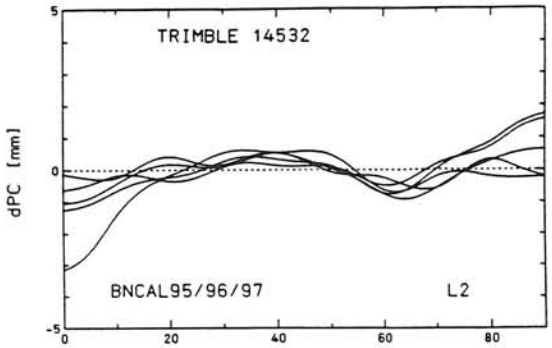


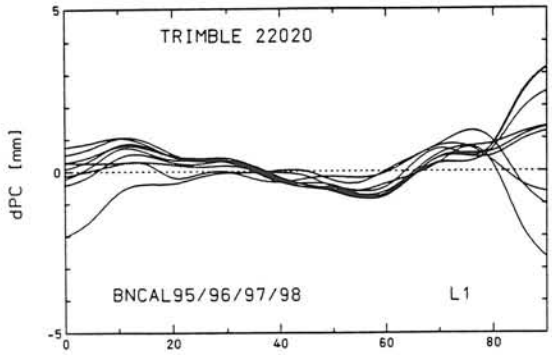


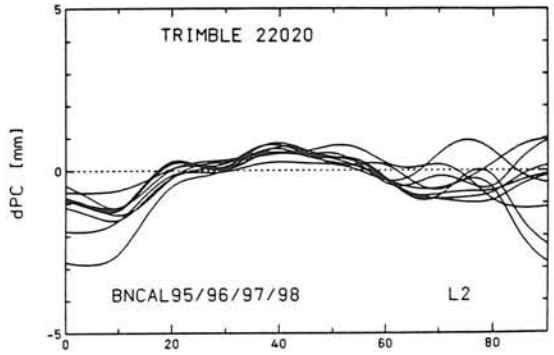
Grad	$r(L_1)$	$r(L_2)$	
2	0.82 mm	0.61 mm	
3	0.32	0.50	
4	0.29 *	0.49	
6		0.43	
8		0.44	
10		0.41	
12		0.28 *	=> Klärung durch Kammermessung

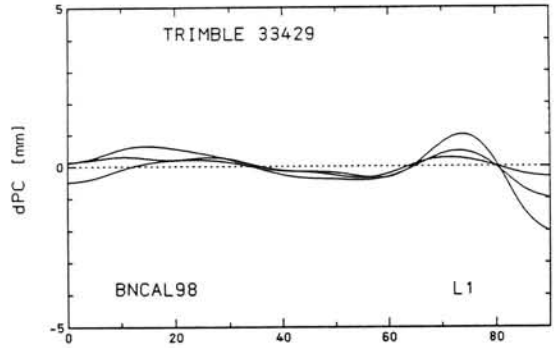

TRIMBLE 22020
dPC [mm]
BNCAL95/96/97/98
L1
5
0
-5
0
20
40
60
80
z
±2mm
± 0.8mm
±1mm
±3mm
TRIMBLE 22020
dPC [mm]
BNCAL95/96/97/98
L2
5
0
-5
0
20
40
60
80
z

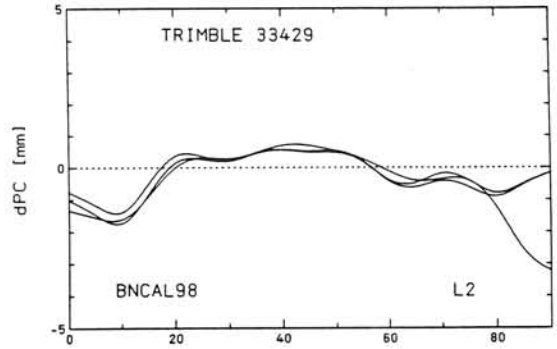

TRIMBLE 14532
BNCAL95/96/97/98
L1
dPC [mm]

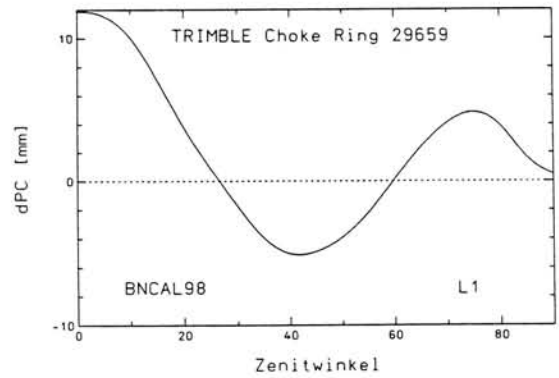

TRIMBLE 14532
BNCAL95/96/97
L2
dPC [mm]

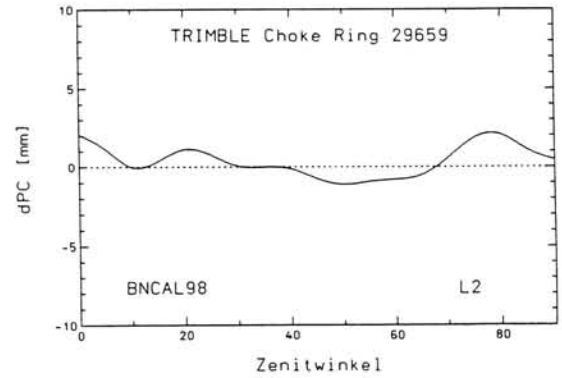

TRIMBLE 22020
BNCAL95/96/97/98
L1
dPC [mm]

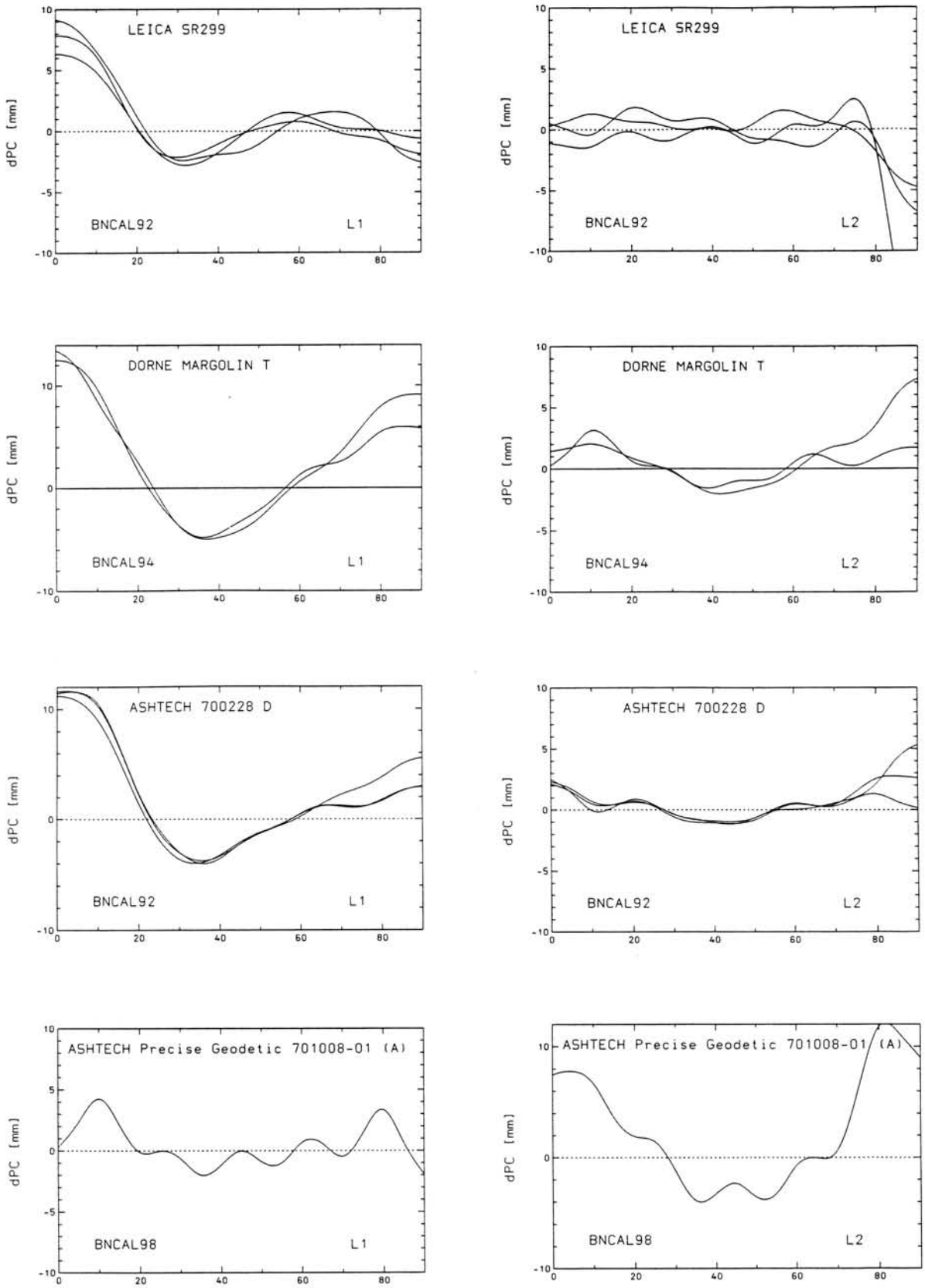

TRIMBLE 22020
BNCAL95/96/97/98
L2
dPC [mm]

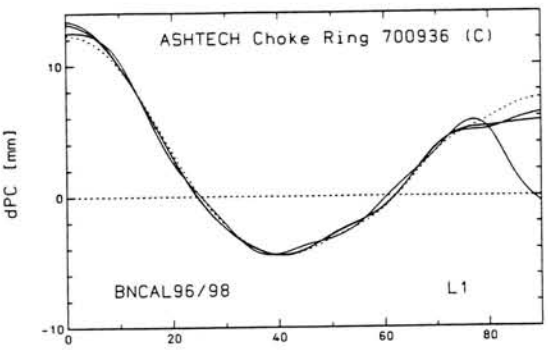

TRIMBLE 33429
BNCAL98
L1
dPC [mm]

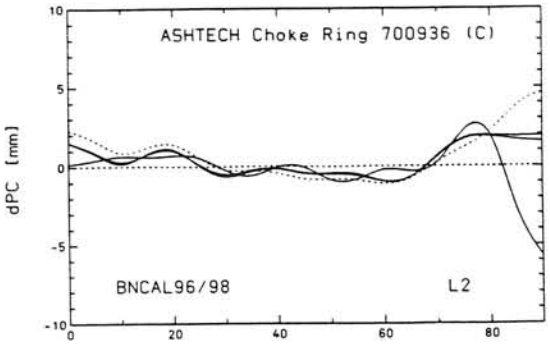

TRIMBLE 33429
BNCAL98
L2
dPC [mm]

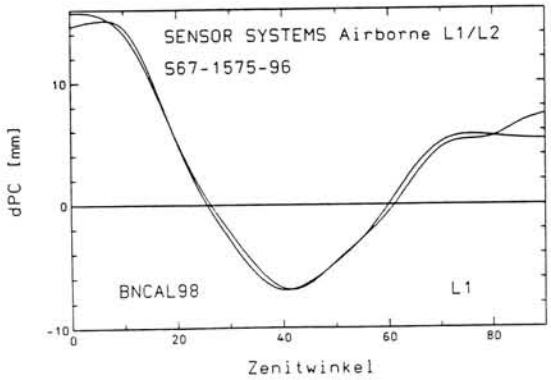

TRIMBLE Choke Ring 29659
BNCAL98
L1
dPC [mm]
Zenitwinkel

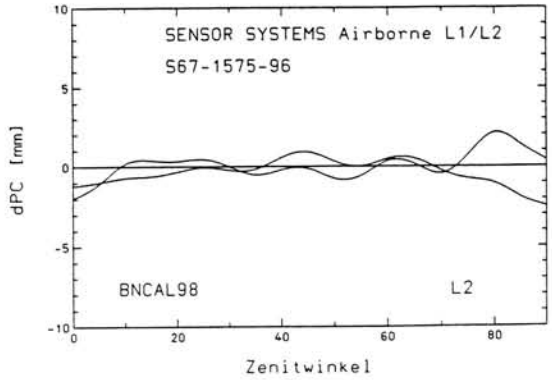

TRIMBLE Choke Ring 29659
BNCAL98
L2
dPC [mm]
Zenitwinkel

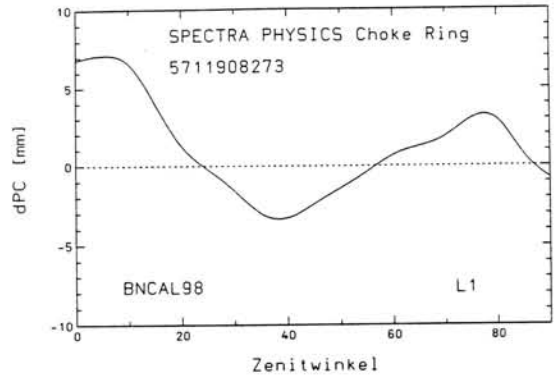

LEICA SR299
BNCAL92
L1
LEICA SR299
BNCAL92
L2
DORNE MARGOLIN T
BNCAL94
L1
DORNE MARGOLIN T
BNCAL94
L2
ASHTECH 700228 D
BNCAL92
L1
ASHTECH 700228 D
BNCAL92
L2
ASHTECH Precise Geodetic 701008-01 (A)
BNCAL98
L1
ASHTECH Precise Geodetic 701008-01 (A)
BNCAL98
L2
dPC [mm]

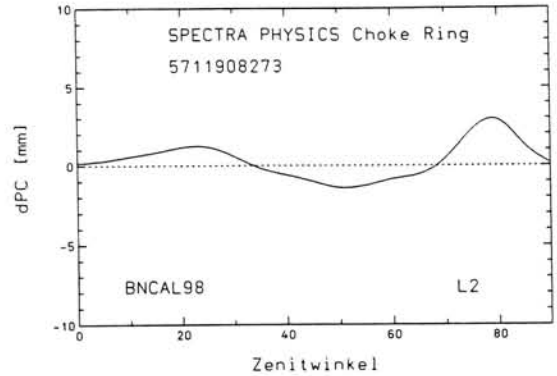

ASHTECH Choke Ring 700936 (C)
dPC [mm]
BNCAL96/98
L1


ASHTECH Choke Ring 700936 (C)
dPC [mm]
BNCAL96/98
L2


SENSOR SYSTEMS Airborne L1/L2
S67-1575-96
dPC [mm]
BNCAL98
L1
Zenitwinkel


SENSOR SYSTEMS Airborne L1/L2
S67-1575-96
dPC [mm]
BNCAL98
L2
Zenitwinkel


SPECTRA PHYSICS Choke Ring
5711908273
dPC [mm]
BNCAL98
L1
Zenitwinkel

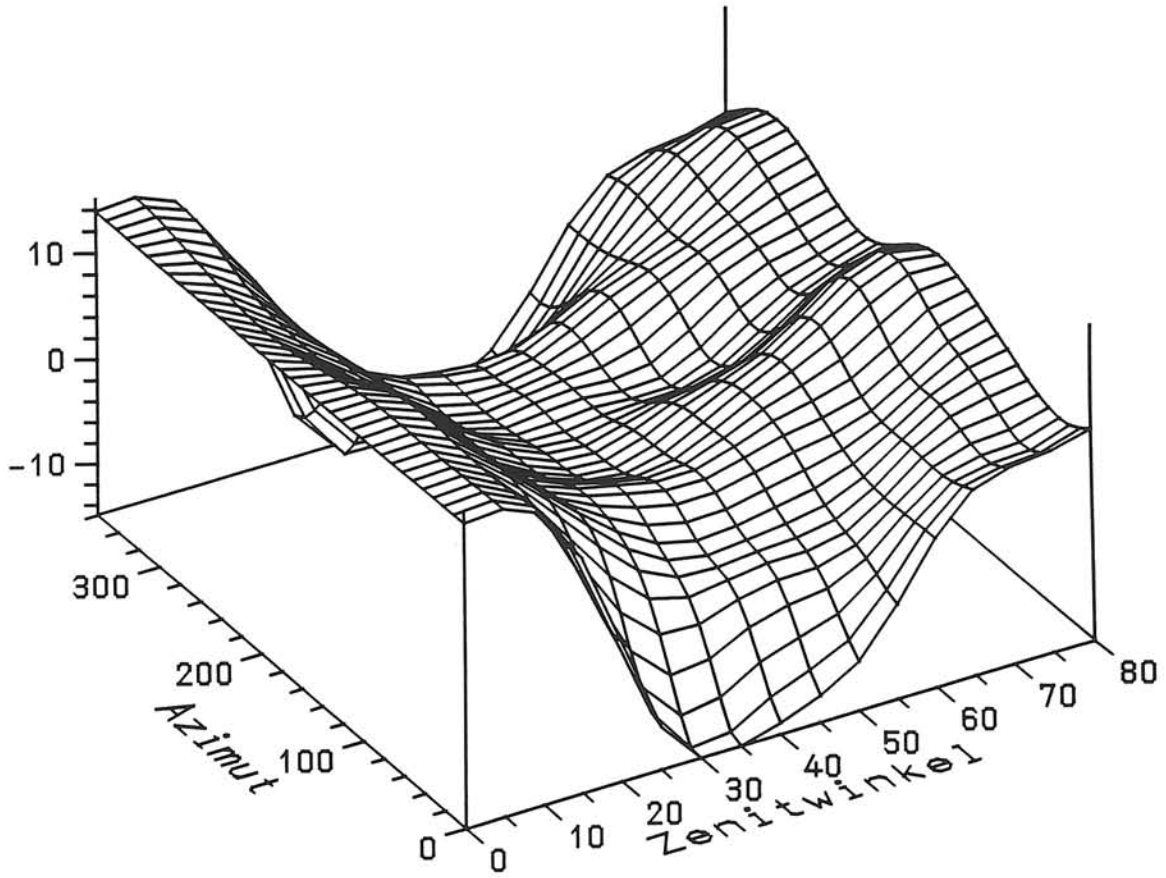

SPECTRA PHYSICS Choke Ring
5711908273
dPC [mm]
BNCAL98
L2
Zenitwinkel

Genauigkeit der GIUB-"Phasenkurven"

	20° bis 80° Elevation		
	Tages-mittel	Jahres-mittel	Typen-mittel
Trimble 4000 ST/SSE L1/L2 Geodetic			0.45 0.57
Trimble Compact L1/L2 w G/P	0.16 0.16	0.25 0.22	0.79 0.84
Trimble micro centered			0.23 0.15
Trimble Choke Ring Antenna (Radom)			
LEICA SR299			0.91 1.31
TurboRogue Antenna			0.45 0.41
Ashtech L1/L2, Rev. B			0.54 0.22
Ashtech Choke Ring Antenna (Radom)	0.25 0.31		0.17 0.28
Ashtech Precise Geodetic Antenna			
Sensor Systems Airborne L1/L2			0.27 0.44
Spectra Physics/Choke Ring (Radom)			
Mittel (0° bis 80° Elevation)	0.20 0.24		0.47 0.52
Mittel Zenit	0.54 0.65		1.02 1.06
Mittel 10° Elevation	0.34 0.30		1.01 0.76
Mittel 5° Elevation	1.77 2.05		1.80 2.31

=> typspezifische Werte für konstante Offsets und elevationsabhängige Korrekturwerte

Ausblick



- Azimutabhängigkeit
- Ergebnisvergleich z.B. mit IGS
- Absoluteichung durch Kombination von Labormessung und Feldmessung

Kalibrierung von GPS-Antennen am DGFI *

KLAUS KANIUTH

Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI)
Marstallplatz 8, 80539 München

Tel.: 089/23031-114
Fax: 089/23031-240
Email: kaniuth@dgfi.badw.de

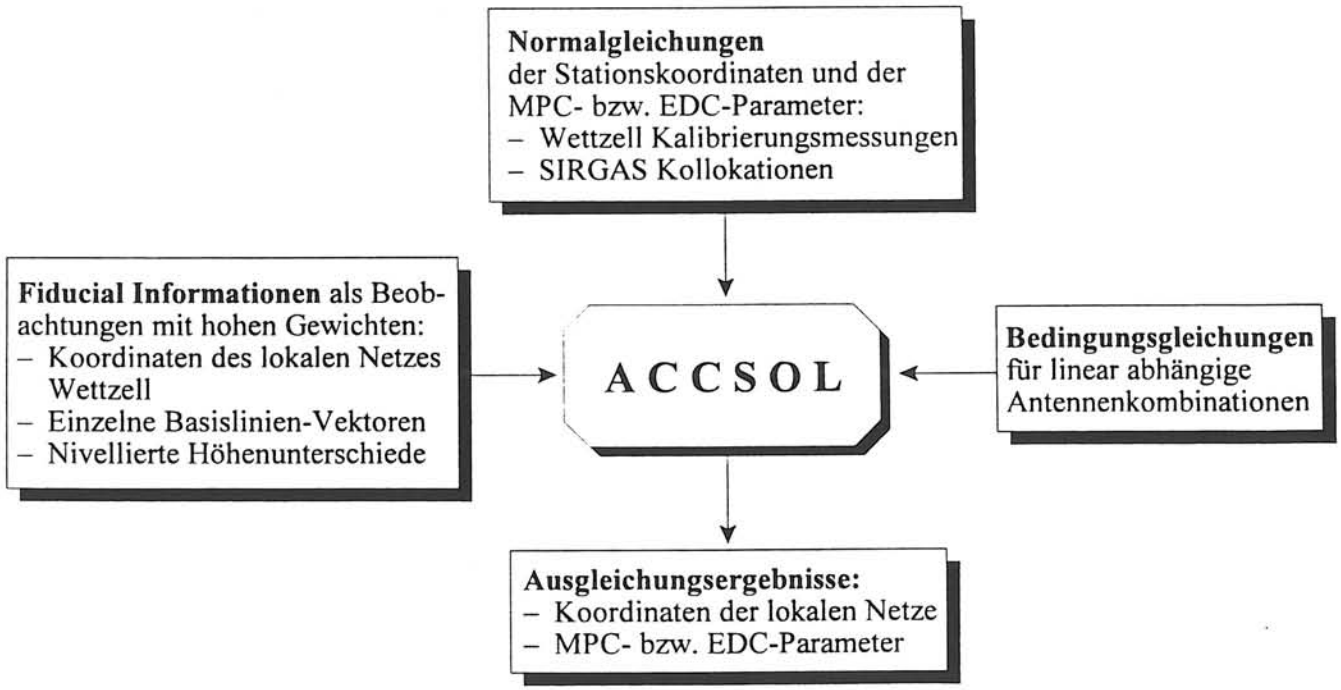
* in Zusammenarbeit mit der Fundamentalstation Wettzell des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG)

Überblick

- Bisherige Feldkalibrierung des DGFI, Verfahren und Stand der Auswertungen
- Demonstration der Auswirkung vernachlässigter Phasenzentrumsvariationen
- Vergleich existierender Modelle, Auswirkung der Modellunterschiede auf Koordinatenlösungen
- Zusammenfassung, weitere Absichten und Empfehlungen

Antennenkalibrierungen des DGFI

- Motivation: Messung und Auswertung regionaler Geodynamik-Netze (CASA, WHAT A CAT), nationaler GPS-Grundnetze und eines kontinentalen Referenznetzes (SIRGAS) mit diversen Empfänger/Antennen-Systemen von Ashtech, Leica, Rogue und Trimble.
- Durchführung von Kollokationen unterschiedlicher Antennen anläßlich der SIRGAS-Kampagne sowie mehrere Feldexperimente auf der Fundamentalstation Wettzell zur Ableitung relativer Phansenzentrumsoffsets und elevationsabhängiger Variationen.
- Modifikation der Berner Software: Definition des mittleren vertikalen Phasenzentrumsoffsets relativ zum ARP derart, dass im Höhenwinkelbereich 10°-90° beste Approximation um Sinne der kleinsten Quadrate erzielt wird → Elevationsabhängige Korrektionen im Zenit **nicht** 0.
- Ausgleichung aller Messungen in einem Guß mit DGFI's Programm ACCSOL unter Einbeziehung von Bedingungsgleichungen und Einführung aller verfügbaren Fiducial-Informationen.



In bisherige Kalibrierungen einbezogene GPS-Kampagnen

Auswertung abgeschlossen (ZfV 10/98)				Auswertung noch nicht abgeschlossen			
2	**Ashtech**	Geodetic I	(700228 A)	1	**Ashtech**	Geodetic I	(700228 A)
2		Geodetic II	(700228 B)	1		Geodetic II	(700228 B)
1		Geodetic III	(700718)	1		Geodetic III	(700718)
2		Dorne Margolin Ash		3		Dorne Margolin Ash	
4	**Leica**	Internal		2		Marine (700700 B)	
3		AT 303		1	**Leica**	AT 302	
1	**Rogue**	Dorne Margolin B		2		AT 303	
4		Dorne Margolin T		1	**Rogue**	Dorne Margolin T	
3	**Trimble**	4000 ST L1/L2 GEOD		4	**Trimble**	TR GEOD L1/L2 GP	
4		TR GEOD L1/L2 GP					

Bonn, 28. April 1999

DGFI

Anwendungsbeispiel

der vom DGFI berechneten Modelle Elevation-abhängiger Phasenzentrumsvariationen

Höhenunterschiede [mm] lokaler Basislinien aus IGS- bzw. DGFI-Modellen:

Antennen Lima: Trimble 4000 ST L1/L2 GEOD – Leica Internal
Matera: Leica Internal – Rogue Dorne Margolin T

ΔH_S = Soll-Höhenunterschied
MPC = nur mittlerer vertikaler Offset berücksichtigt
EDC = volles Modell (MPC + EDC)

Basislinie	ΔH_S	Freq.	Beob.	IGS		DGFI	
				MPC	EDC	MPC	EDC
Lima I	**1.5**	L1	62119	**-3.1**	**0.9**	**0.9**	**1.2**
Lima II	**9.2**	L1	71567	**4.5**	**8.5**	**8.5**	**8.8**
Matera	**3.**	L1	26103	**1.1**	**1.1**	**2.0**	**1.2**
	3.	L2	26062	**0.6**	**-1.7**	**0.4**	**1.9**

April 1999

DGFI

Verfügbare PZV-Modelle geodätischer GPS-Antennen

(Stand April 1999)

- Kombination aller bis Frühsommer 1996 zugänglichen Ergebnisse zu einem möglichst einheitlichen Satz von PZV-Modellen durch den International GPS Service (**IGS**): IGS_01.pcv
  http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/igs_01.pcv

- Serien von Feldkalibrierungen nahezu aller bis Frühjahr 1999 auf dem Markt befindlicher Antennen durch den National Geodetic Survey (**NGS**) der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) der USA.
  http://www.grld.noaa.gov/GRD/GPS/Projects/ANTCAL/Files/ant_info.002

Genauigkeit von Phasenzentrumsmodellen

Mittlerer Offset relativ zum ARP [mm]

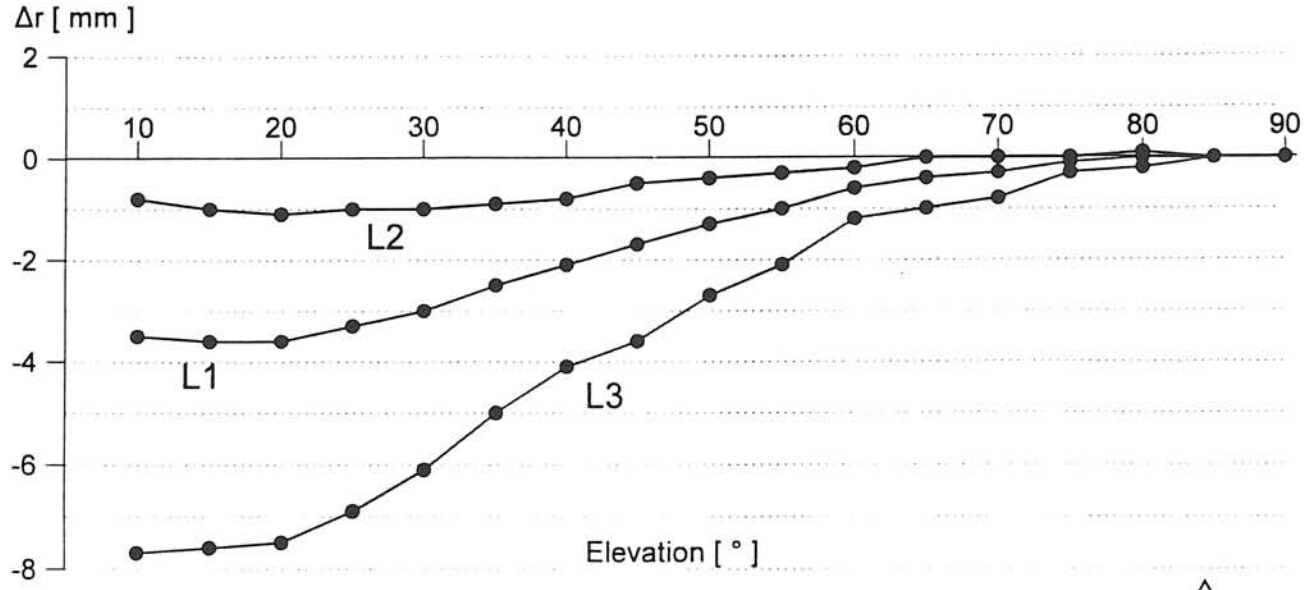
Antenne: Ashtech Geodetic III (700718) Modelle: IGS (1996), NGS (1999)

Freq.	IGS			NGS			IGS - NGS		
	N	E	H	N	E	H	N	E	H
L1	3.4	1.0	87.3	-0.6	0.2	83.9	4.0	0.8	3.4
L2	3.1	-1.3	63.4	1.1	-1.6	62.3	2.0	0.3	1.1
L3	3.9	4.6	124.2	-3.2	3.0	117.3	7.1	1.6	7.0

Genauigkeit von PZV-Modellen

– Elevationsabhängige Korrektionen –

Antenne: Ashtech Geodetic III (IGS - NGS)



April 1999

DGFI

Genauigkeit von Phasenzentrumsmodellen

Mittlerer Offset und elevationsabhängige Variationen (IGS-NGS)

⇒ 26 km Basislinie Bahia Blanca (Leica AT 303) – Belgrano (Ashtech Geodetic III), 4 Tage je 24 Stunden [mm]

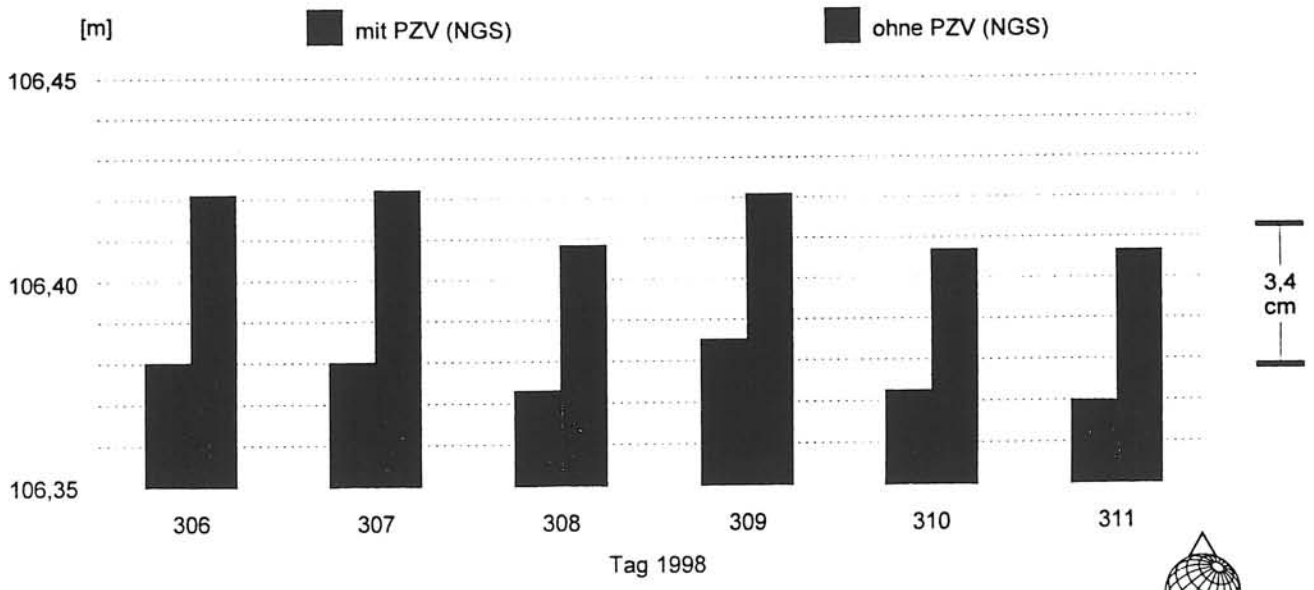
Cutoff	# Obs	ΔN	ΔE	ΔH	ΔL
10°	111794	7.1	1.7	7.0	5.0
12°	107501	7.2	1.6	7.1	5.0
14°	102586	7.1	1.6	6.9	5.0
16°	97843	7.1	1.6	6.7	5.0
18°	92987	7.1	1.5	6.1	5.1
20°	87501	7.1	1.6	5.7	5.0
		7.1	1.6		5.0

April 1999

DGFI

Vernachlässigung elevationabhängiger Phasenzentrumsvariationen (PZV)

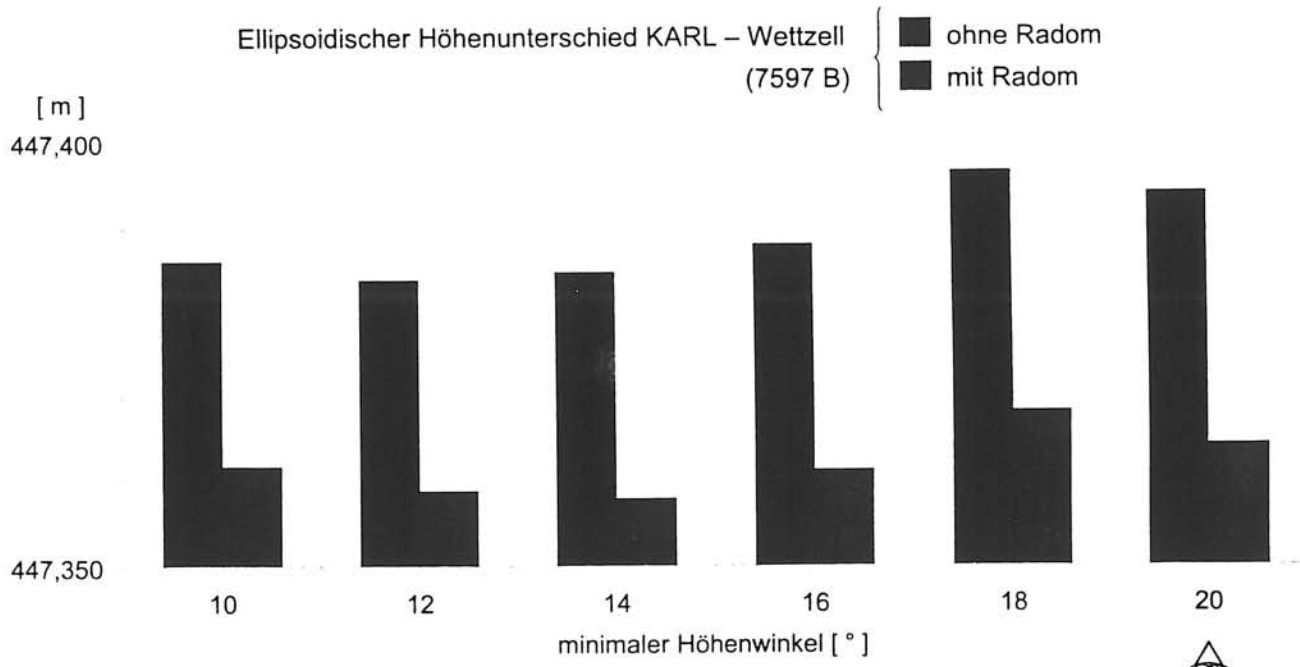
Beispiel: Ellipsoidischer Höhenunterschied einer 615 km Basislinie (HERS-KARL)
Ashtech Z XII Margolin T – Trimble SSI TR GEOD L1/L2 GP (Radom)
– Troposphärenparameter geschätzt / L3 –



April 1999

DGFI

Radom - Effekt (Beispiel)



April 1999

DGFI

Zusammenfassung (1)

- Die bisher fertiggestellten Antennenkalibrierungen des DGFI beschränkten sich auf die Bestimmung relativer mittlerer vertikaler Offsets und elevationsabhängiger Variationen; die noch in Auswertung befindlichen Experimente erlauben auch die Ableitung azimutaler Effekte.

- Wir haben bisher kaum Mehrfachkalibrierungen ein- und derselben Antenne zu verschiedenen Epochen durchgeführt, und wir können auch nur eingeschränkt Aussagen zur Übereinstimmung von Antennen desselben Typs machen; die größte bisher aufgetretene Abweichung einer Antenne gegenüber allen anderen betrug 8 mm im vertikalen L2-Offset.

- Die derzeit verfügbaren Modelle aus Kalibrierungen verschiedener Institutionen, gezeigt am Beispiel IGS-NGS, differieren durchaus noch um einige mm in den konstanten Offsets und bis zu fast 10 mm in den elevationsabhängigen Variationen (L1, L2, → L3).

Zusammenfassung (2)

- Kombiniert man in **lokalen** Netzen Antennen unterschiedlichen Typs, so dürften die Fehler wegen Unsicherheit der PZV-Modelle < 2 mm in der Lage und < 8 mm in der Höhe betragen; die Höhenergebnisse hängen merklich vom minimalen Höhenwinkel der Auswertung ab.

- In **regionalen** Netzen, in denen Troposphärenparameter geschätzt werden müssen, können wegen der hohen Korrelationen zwischen den elevationsabhängigen Parametern (Höhe, Troposphäre, PZV) noch größere Höhenfehler entstehen. Dieser Effekt kann durch Radome weiter verstärkt werden (SAPOS).

- Antennen von Referenzstationen sollten nach einheitlichen Kriterien möglichst am Aufstellort, jedenfalls jedoch in der endgültigen Konfiguration (Radom?) kalibriert werden: es müßte Kompatibilität zu der Konfiguration, die der Bestimmung der Referenzkoordinaten zugrunde lag, gewährleistet werden.

Bestimmung von Variationen der Antennenphasenzentren mit GPS-Beobachtungen: Vergleiche und Kombination

M. Rothacher

Astronomisches Institut
Universität Bern

Workshop
Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen

Bonn, 28. April 1999

Inhalt:

- Einführung
- Elevations- und azimutabhängige Variationen
- Kombination von Kalibrierungsresultaten
- Absolute Kalibrierung: globale Aspekte
- Ausblick

EINFÜHRUNG

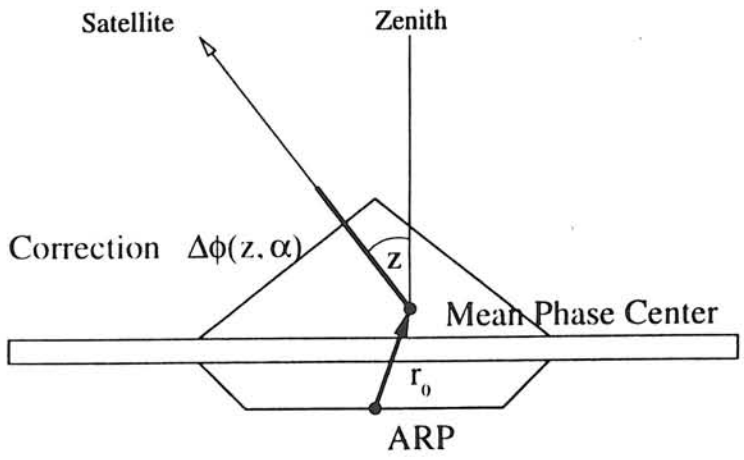
- **Zwei Arten von Fehlereinflüssen:**
  - Kombination von **verschiedenen** Antennentypen: Haupteffekt in der **Höhe** (bis zu 10 cm)
    Relative Kalibrierung einer Antenne (gegenüber einer Referenz) mit GPS-Daten von kurzen, bekannten Basislinien.
  - Bei langen Basislinien treten auch mit **denselben** Antennentypen Fehler auf: Haupteffekt in der **Länge** der Basislinien (bis zu 16 ppb).
    Absolute Kalibrierung nur möglich durch Kammermessungen oder durch Verkippen der Antennen bei GPS-Kampagnen.
- **Probleme:**
  - Verdichtung des IGS-Netzes mit verschiedenen Empfänger/Antennentypen
  - Antennenwechsel auf den Permanentstationen
  - Systematische Fehler in den Resultaten beim Ändern der Elevationsmaske

DARSTELLUNG VON PHASENZENTRUMSVARIATIONEN

Ein Satz von Korrekturen für das Antennenphasenzentrum ist gegeben durch:

(1) einen **mittleren Offset** $\boldsymbol{r}_0$ des Phasenzentrums: der Vektor von einem physikalischen Punkt der Antenne (antenna reference point ARP) zur Position des mittleren Phasenzentrums (gemittelt über einen bestimmten Elevationsbereich).

(2) **Elevation- (und azimut-)abhängige** Phasenzentrumskorrekturen $\boldsymbol{\Delta\phi(z,\alpha)}$ gegenüber dem mittleren Phasenzentrum $\boldsymbol{r}_0$.



ÄQUIVALENTE SÄTZE VON PHASENZENTRUMSKORREKTUREN (1)

Ein Satz von Antennenkorrekturen $(\boldsymbol{r}_0, \Delta\phi(z,\alpha))$ kann in einen **vollständig äquivalenten** Satz $(\boldsymbol{r'}_0, \Delta\phi'(z,\alpha))$ transformiert werden mit:

$$\boldsymbol{r'}_0 = \boldsymbol{r}_0 + \boldsymbol{\Delta r}$$

$$\Delta\phi'(z,\alpha) = \Delta\phi(z,\alpha) - \boldsymbol{\Delta r} \cdot \boldsymbol{e} + \Delta\phi_0$$

$\Delta\phi_0$ und der Offset $\boldsymbol{\Delta r}$ sind dabei frei wählbar. $\boldsymbol{e}$ bezeichnet den Einheitsvektor in der Richtung Antenne-Satellit, gegeben durch Zenitdistanz z und Azimut α.

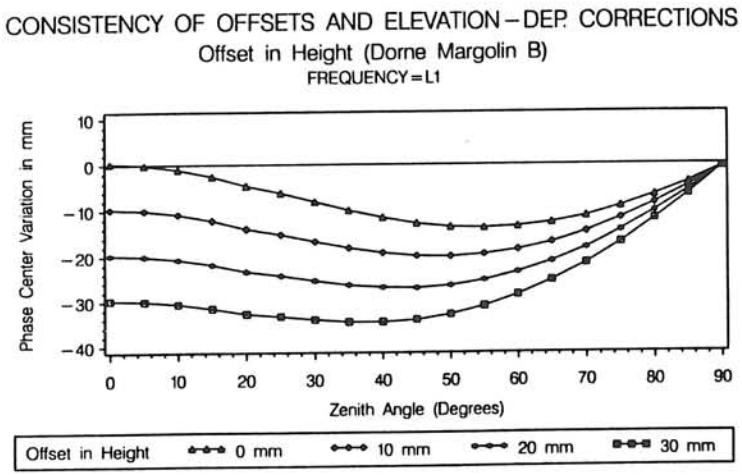
$\Delta\phi_0$ ist eine Konstante über alle Elevations- und Azimutwinkel und entspricht einem Empfängeruhrfehler. Beim Formen der Doppeldifferenzen wird dieser Term völlig eliminiert.

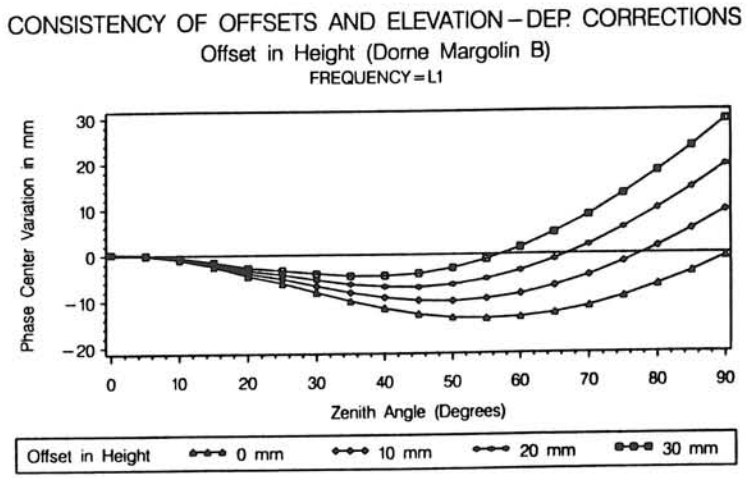
Änderung in der Höhe des mittleren Phasenzentrums:

$$h' = h + \Delta h$$

$$\Delta\phi'(z) = \Delta\phi(z) - \Delta h \cdot \cos z$$

BEISPIEL: ÄQUIVALENTE ANTENNENKORREKTURSÄTZE





ÄQUIVALENTE SÄTZE VON PHASENZENTRUMSKORREKTUREN (2)

Änderung des **vertikalen** Offsets: andere **Elevationsabängigkeit**
Änderung des **horizontalen** Offsets: andere **Azimutabhängigkeit**.

$\Delta\phi_0$ kann **eindeutig** definiert werden durch

$$\Delta\phi(0, \alpha) = 0$$

oder auch durch

$$\int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{z=0}^{\pi/2} \Delta\phi(\alpha, z) \sin z \, dz \, d\alpha = 0$$

Das **"mittlere" Phasenzentrum** $\boldsymbol{r_0}$ wird gewöhnlich so gewählt, dass über ein Zenitintervall $[0, z_0]$ (Elevationsmaske) gilt:

$$\int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{z=0}^{z_0} \Delta\phi^2(\alpha, z) \sin z \, dz \, d\alpha = \min.$$

Die Elevationsmaske ist typischerweise 15 Grad ($z_0 = 75$).

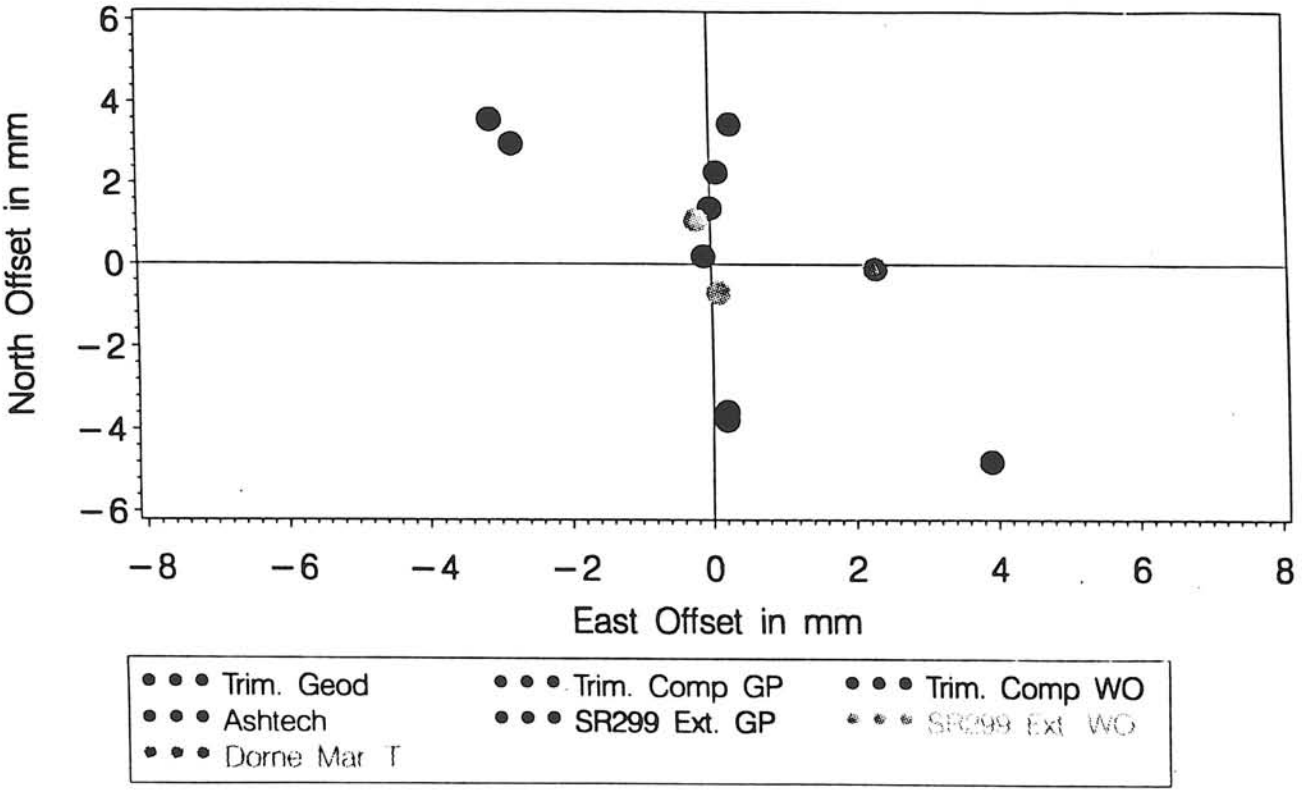
SCHÄTZEN VON PHASENZENTRUMSVARIATIONEN

- **Berner GPS Software:**
  - Bestimmen von **Antennenoffsets** (N,E,U)
  - Bestimmen von **elevations- und azimutabhängigen** Variationen
  - Berücksichtigung verschiedener **Orientierungen** der Antennen
- **Bestimmen mittlerer Antennenoffsets:**
  - Offsets hängen von der Elevationsmaske ab.
  - Punktkoordinaten müssen auf bekannte Werte fixiert werden.
  - Falls die Antennen gedreht werden, können horizontale Offsets und horizontale Punktkoordinaten gleichzeitig bestimmt werden.
- **Elevations- und azimutabhängige Variationen:**
  - Zwei Modelle: **Polygonzüge** oder **Kugelfunktionskoeffizienten**
  - Fixieren der **Höhen** beim Bestimmen von elevationsabhängigen Korrekturen.
  - Fixieren der **Lagekoordinaten** beim Bestimmen von azimutabhängigen Korrekturen (oder Drehen der Antennen).

"MEAN" HORIZONTAL ANTENNA PHASE CENTER OFFSETS

Thun GPS Campaign 1994

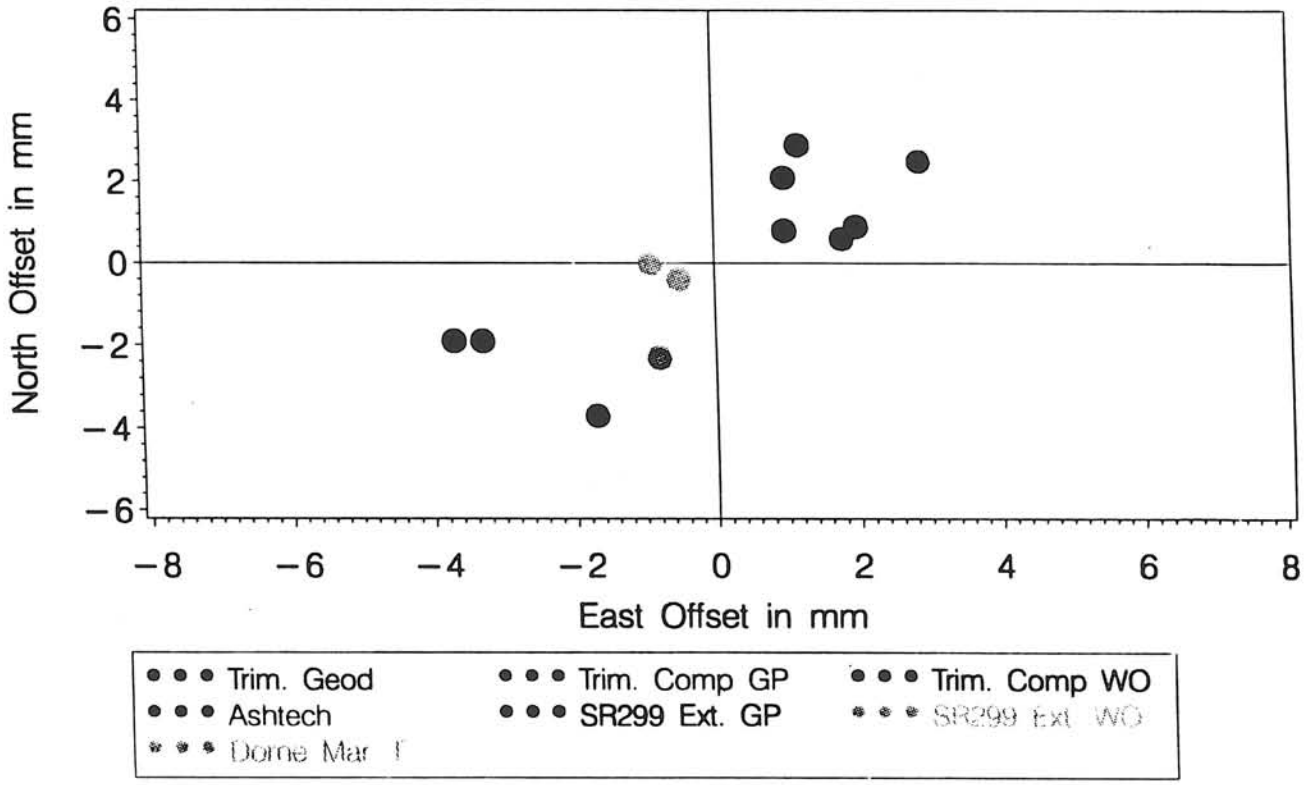
FREQ=2

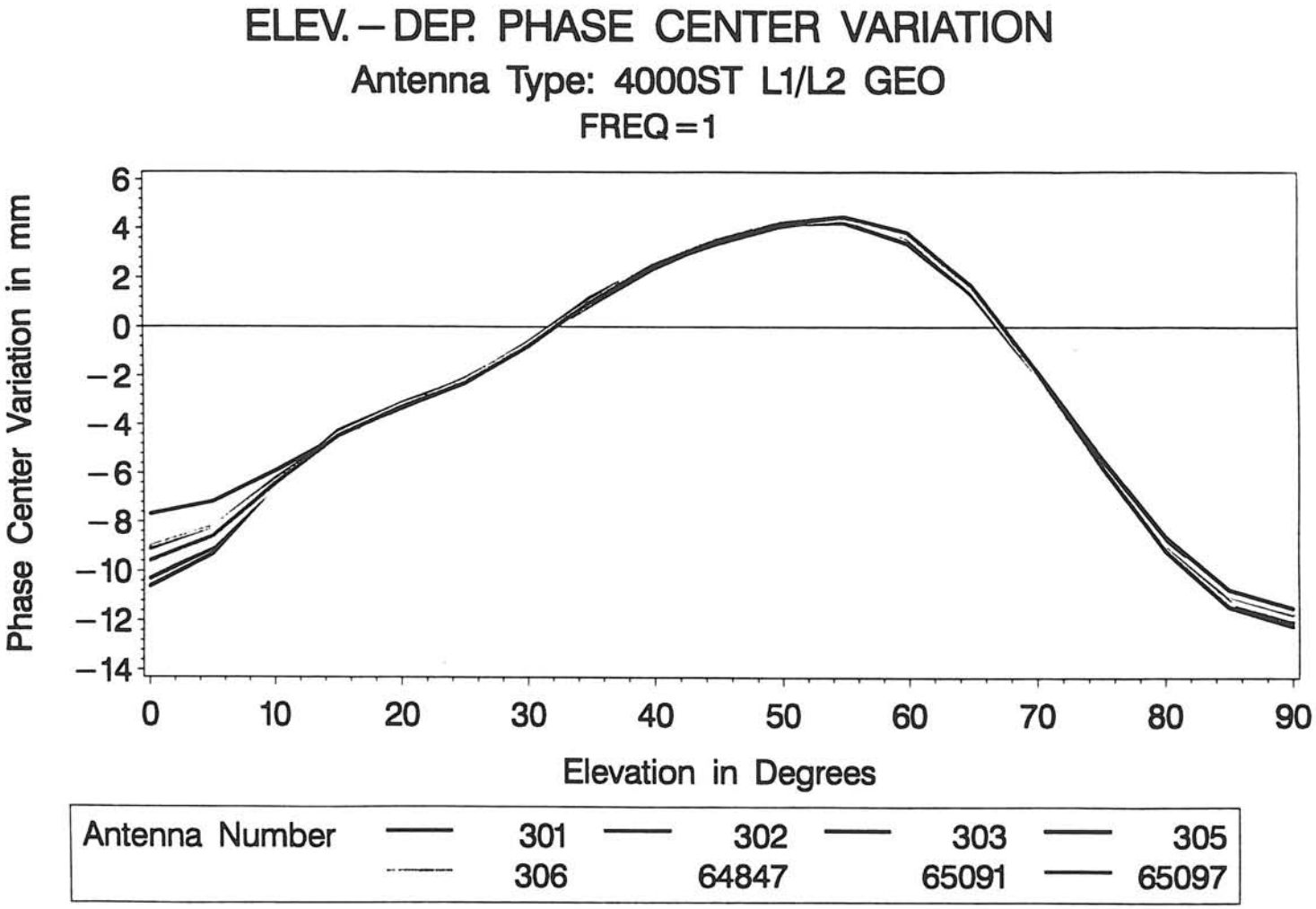


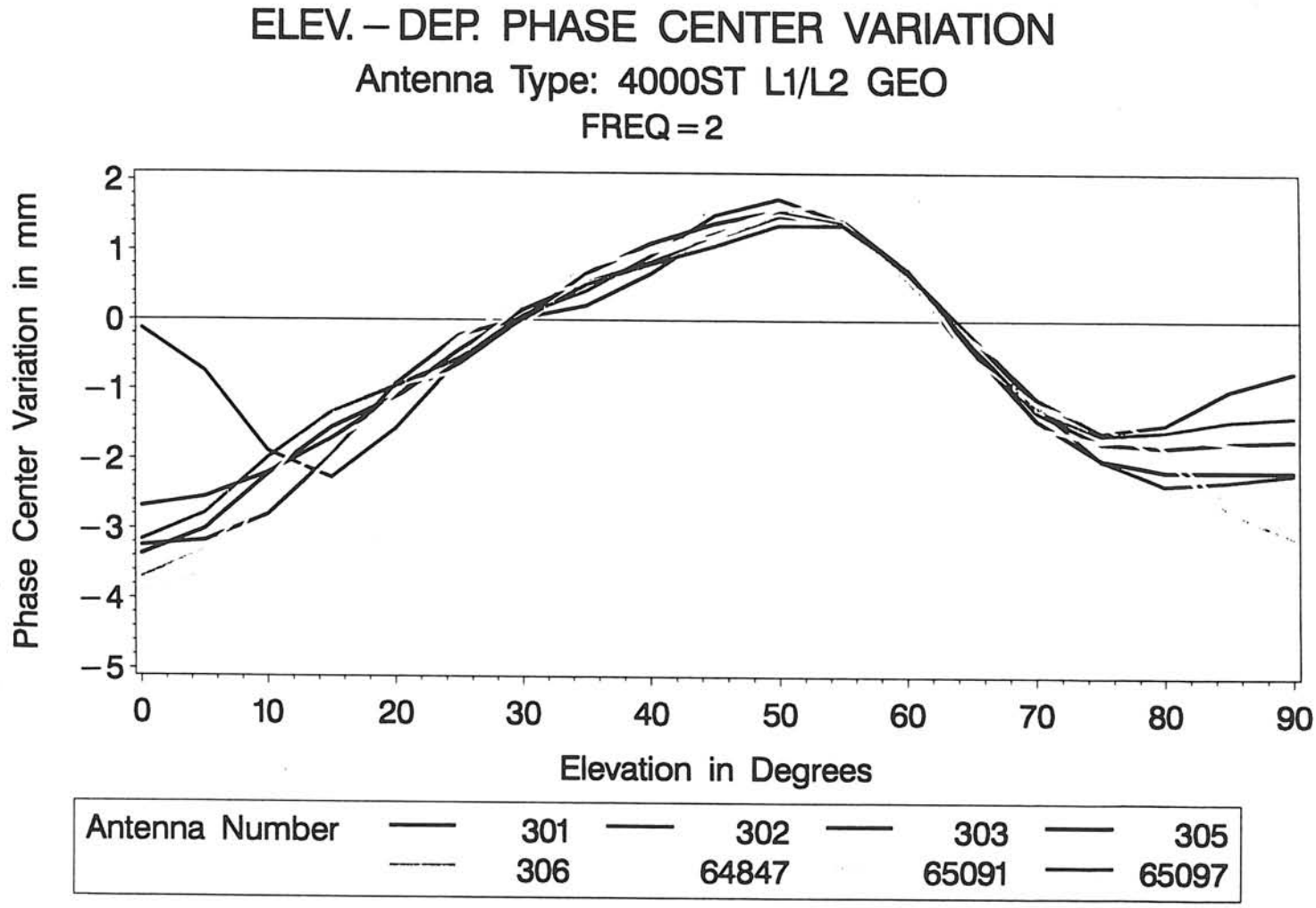
"MEAN" HORIZONTAL ANTENNA PHASE CENTER OFFSETS

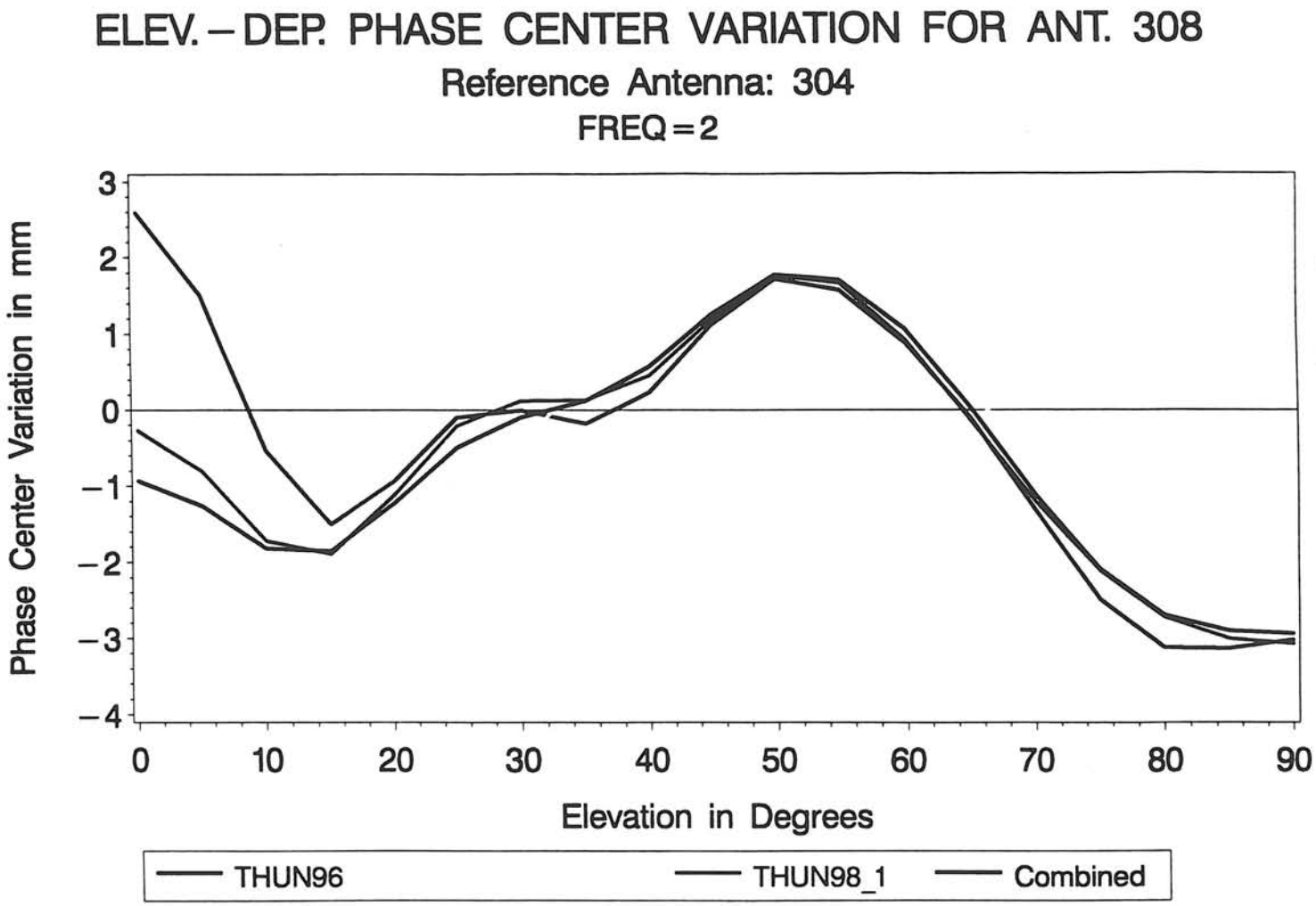
Thun GPS Campaign 1994

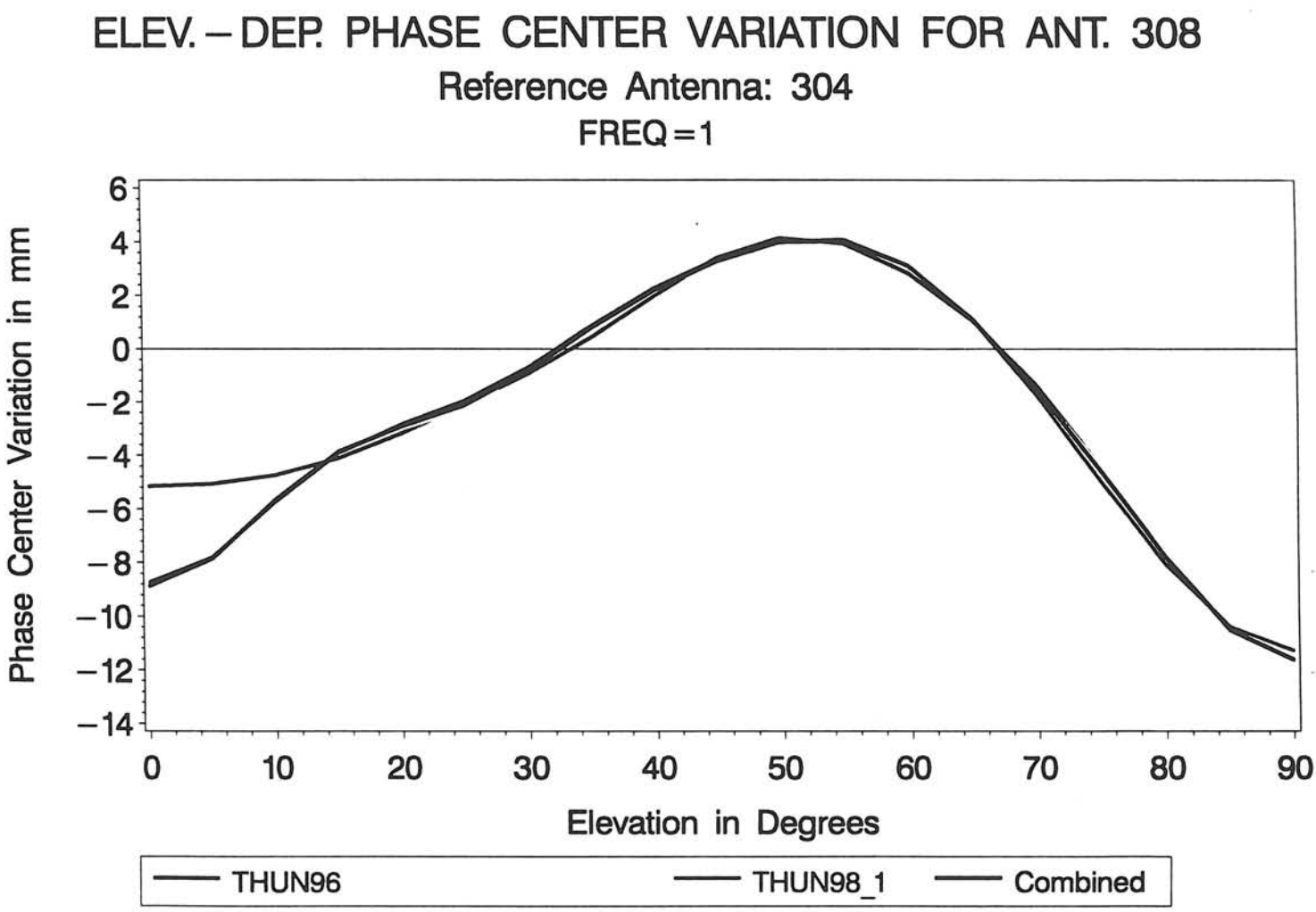
FREQ=1



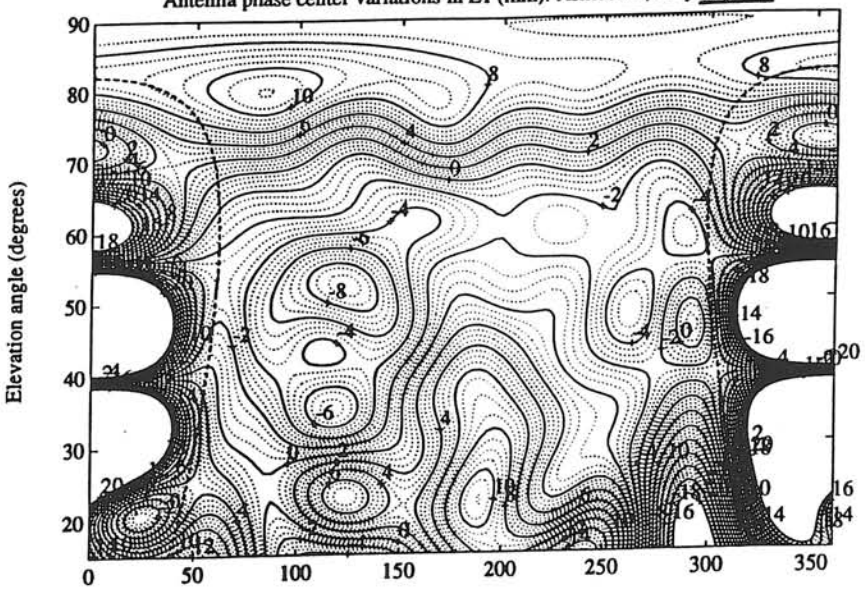

ELEV. – DEP. PHASE CENTER VARIATION
Antenna Type: 4000ST L1/L2 GEO
FREQ = 1
Phase Center Variation in mm
6
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−10
−12
−14
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Elevation in Degrees
Antenna Number
301
302
303
305
306
64847
65091
65097


ELEV. – DEP. PHASE CENTER VARIATION
Antenna Type: 4000ST L1/L2 GEO
FREQ = 2
Phase Center Variation in mm
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Elevation in Degrees
Antenna Number
301
302
303
305
306
64847
65091
65097


ELEV. – DEP. PHASE CENTER VARIATION FOR ANT. 308
Reference Antenna: 304
FREQ = 2
Phase Center Variation in mm
3
2
1
0
−1
−2
−3
−4
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Elevation in Degrees
THUN96
THUN98_1
Combined

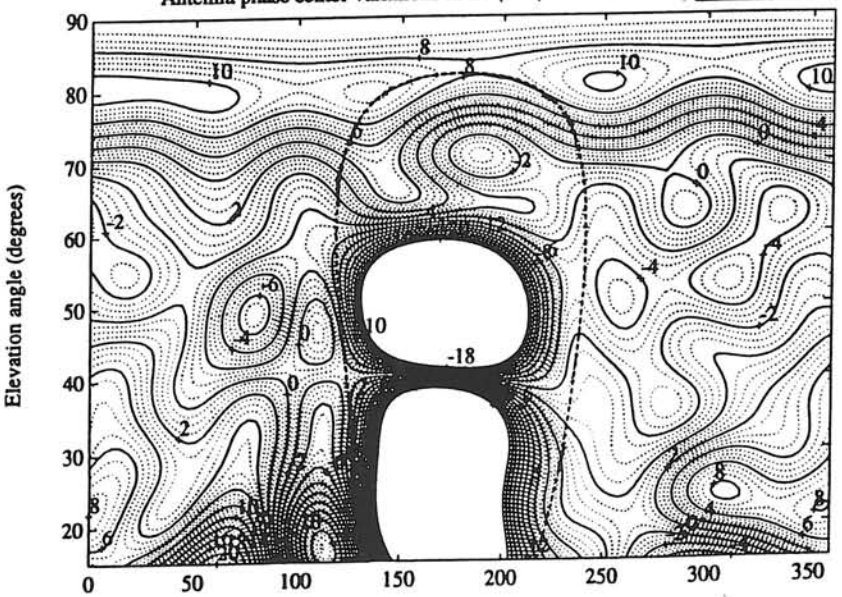

ELEV. – DEP. PHASE CENTER VARIATION FOR ANT. 308
Reference Antenna: 304
FREQ = 1
Phase Center Variation in mm
6
4
2
0
−2
−4
−6
−8
−10
−12
−14
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Elevation in Degrees
THUN96
THUN98_1
Combined

Antenna phase center variations in L1 (mm): Ashtech 1, only day 079



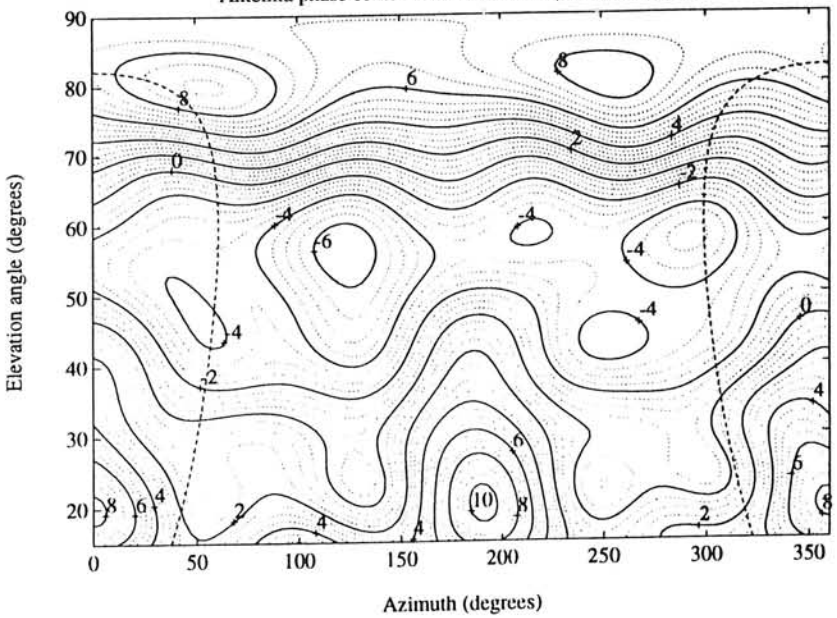
ANTENNA POINTING NORTH

Antenna phase center variations in L1 (mm): Ashtech 1, only day 080

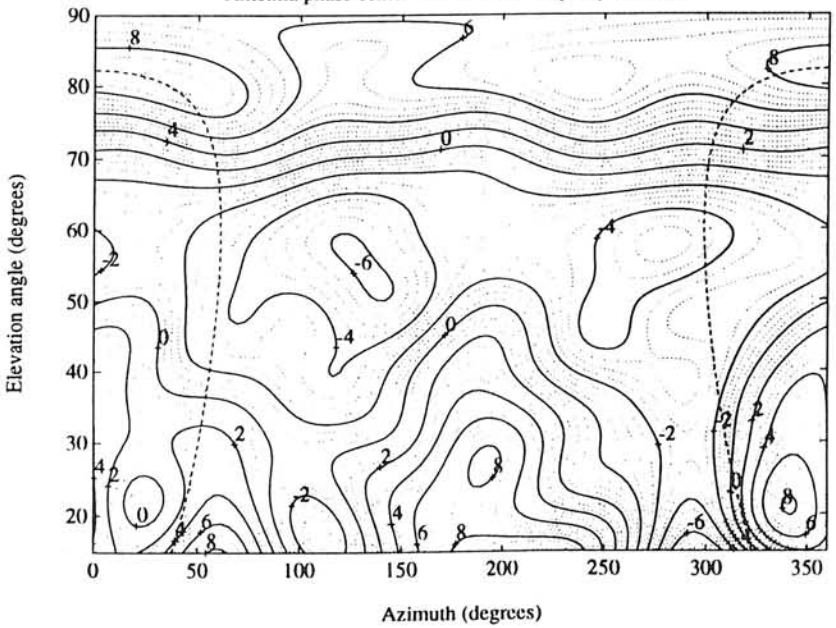


ANTENNA POINTING SOUTH

Antenna phase center variations in L1 (mm): Ashtech 2



Antenna phase center variations in L1 (mm): Ashtech 1



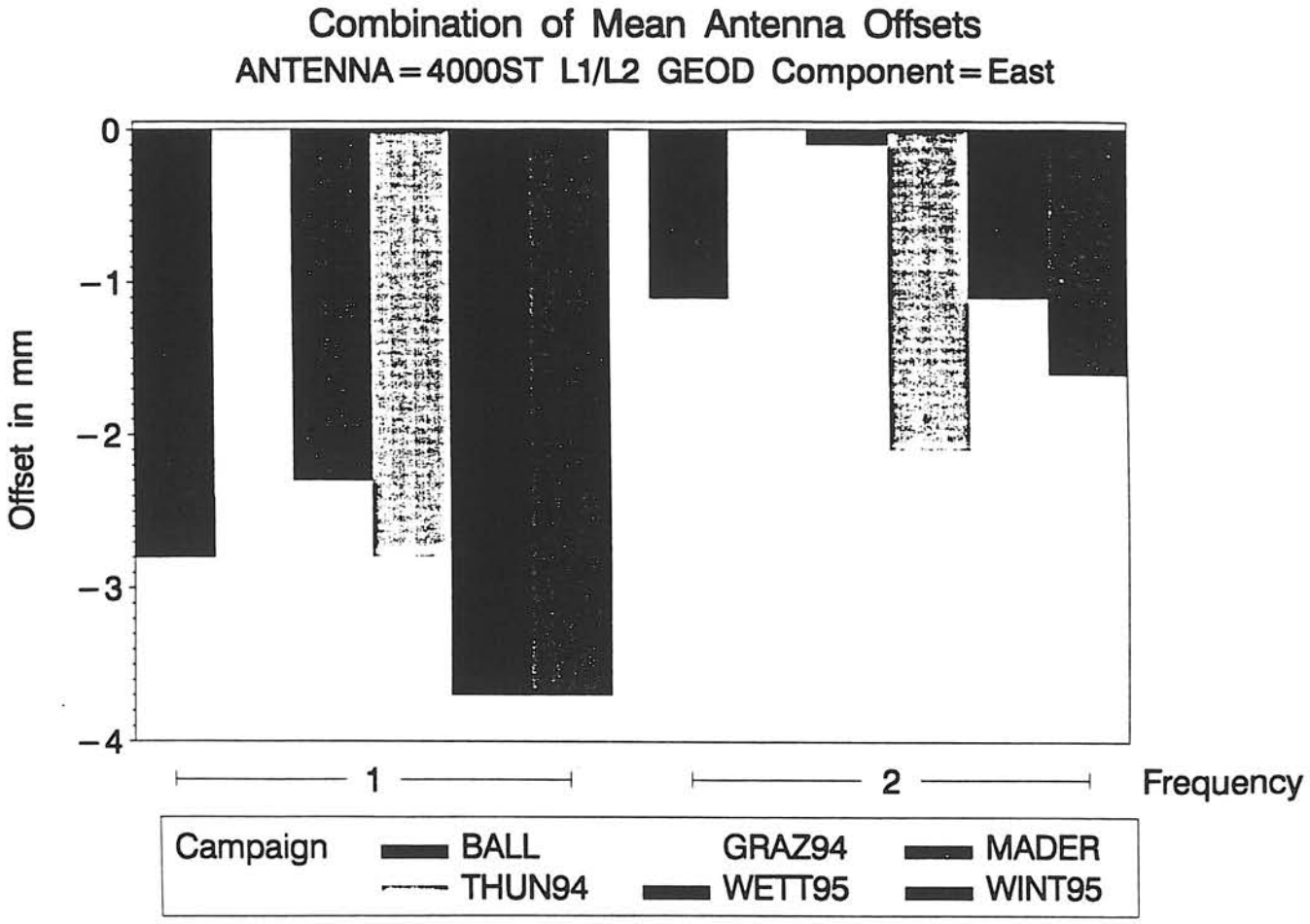
VERWENDETE ANTENNENSÄTZE

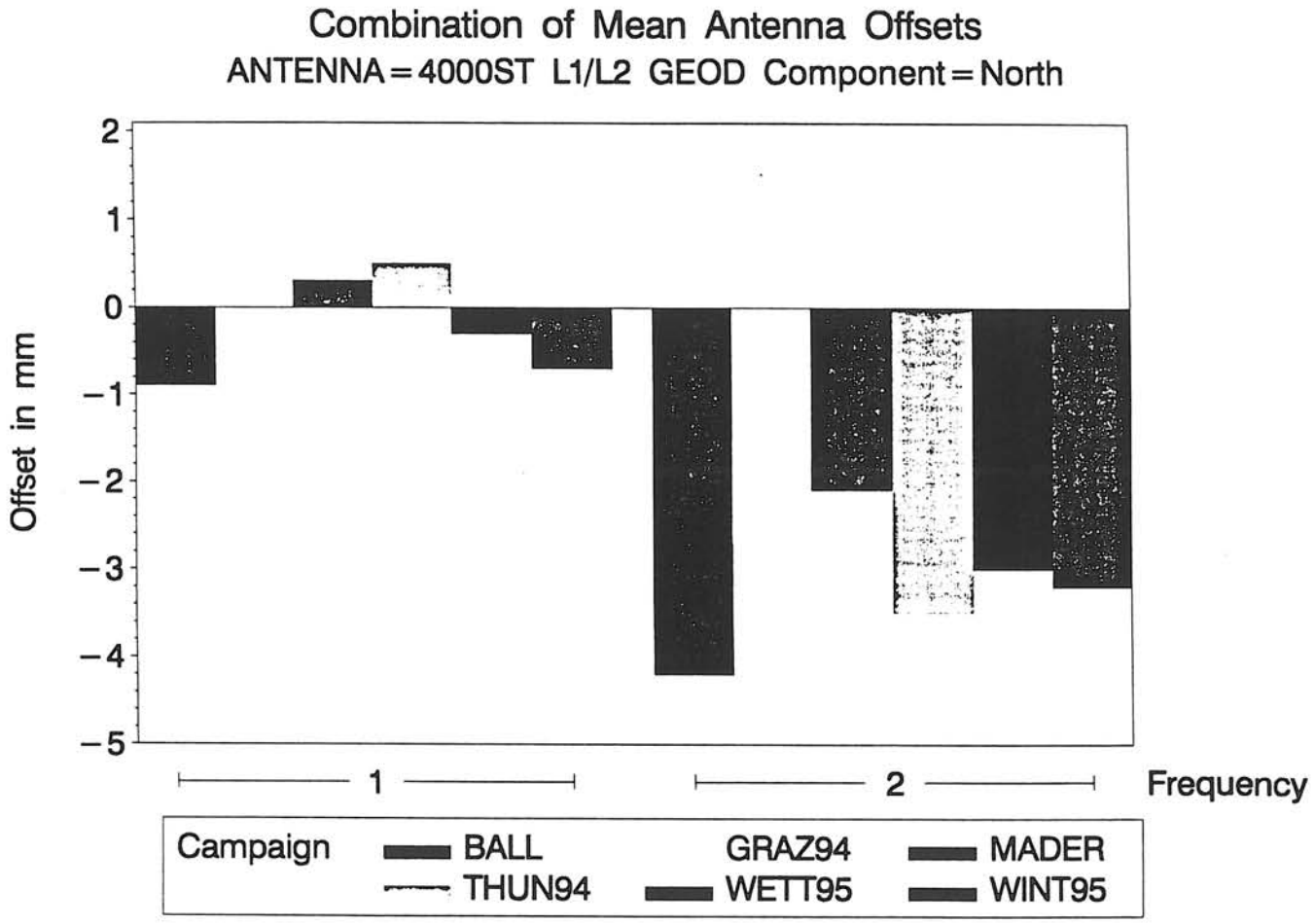
Für die Kombination verwendet:

- **Ball Kammermessungen**, organisiert von UNAVCO
- Satz von **NGS** (Gerry Mader) vom 11. Juni 1996, berechnet aus GPS-Messungen
- Am **AIUB** verarbeitete GPS-Antennenkalibrierkampagnen:
  - **THUN94**: Thun, Schweiz, Landestopographie, 11 Antennen, 8 Typen.
  - **GRAZ94**: Graz, Österreich, Institut für Raumforschung, 3 Antennen, 3 Typen.
  - **HEER94**: Heerbrugg, Schweiz, Leica, 2 Antennen, 2 Typen.
  - **WETT95**: Wettzell, Deutschland, BKG, 12 Antennen, 6 Typen.
  - **WINT95**: Wettzell, Deutschland, BKG, 10 Antennen, 6 Typen.
  - **WIEN96**: Wien, Österreich, Institut für Theoretische Geodäsie, 5 Antennen, 4 Typen.
  - **EBRE96**: Ebre, Spanien, Institut Cartografic de Catalunya, 2 Antennen, 2 Typen

KOMBINATION DER MITTLEREN PHASENZENTREN (OFFSETS)

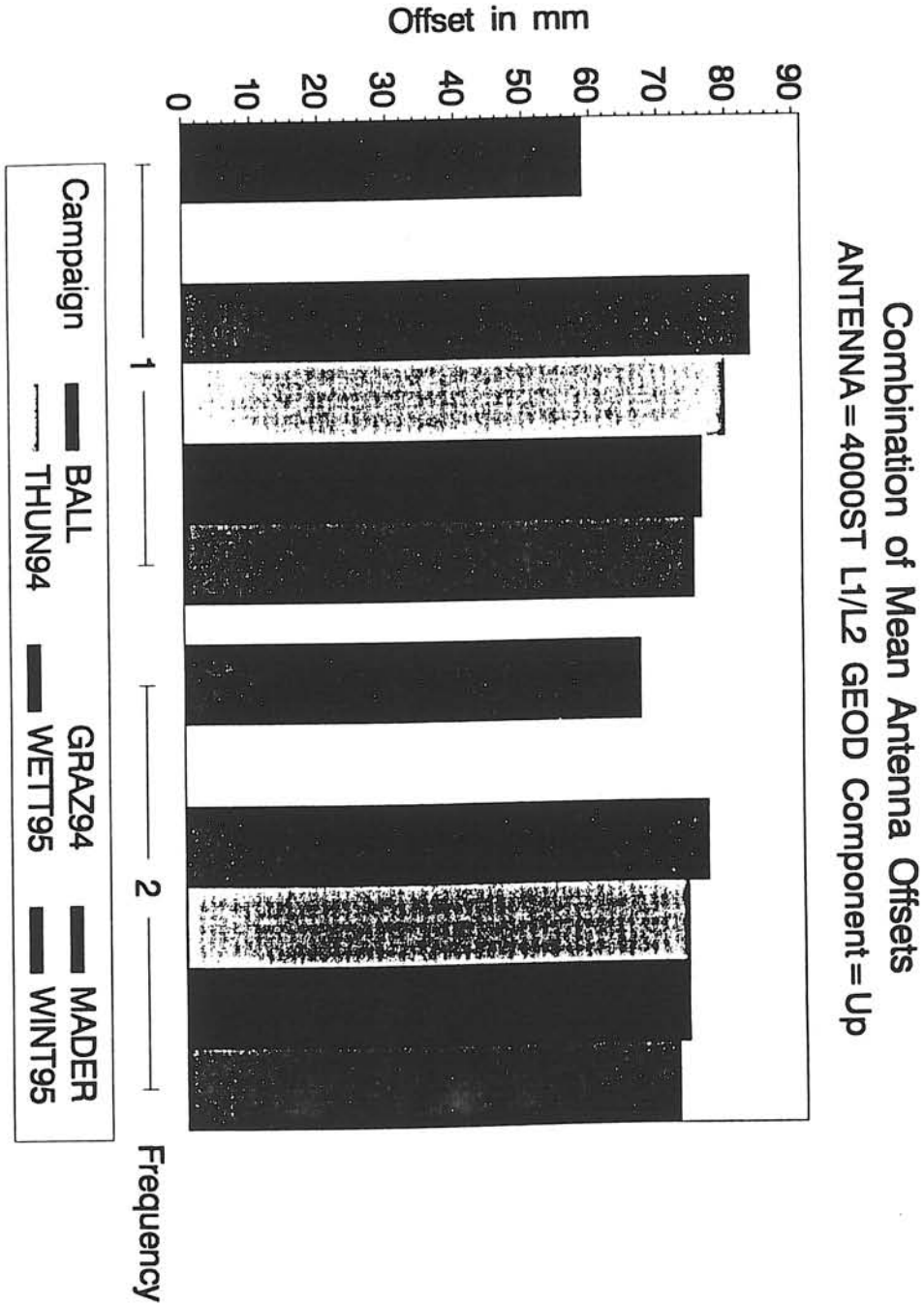
- Die mittleren Offsets **(Nord, Ost, Höhe)** für einen bestimmten Antennentyp wurden als gewichtetes Mittel der individuellen Offsets berechnet.
- Das Gewicht der einzelnen Sätze wurde aus der **Anzahl Antennen** desselben Typs bestimmt, die bei der entsprechenden Kampagne beigetragen haben.
- Die Ball Kammermessungen beziehen sich nicht auf eine Elevationsmaske von 15 Grad und wurden daher nur bei der Kombination der **horizontalen**, nicht aber der **vertikalen Offsets** verwendet. Alle andern Sätze stammen aus 15-Grad Lösungen.
- Alle Offsets wurden **relativ zur Dorne Margolin T Antenne** bestimmt (L_1: 0.110 m, L_2: 0.128 m).
- Die kombinierten, mittleren Offsets wurden dann als **Referenzwerte** für die elevationsabhängigen Korrekturen verwendet.

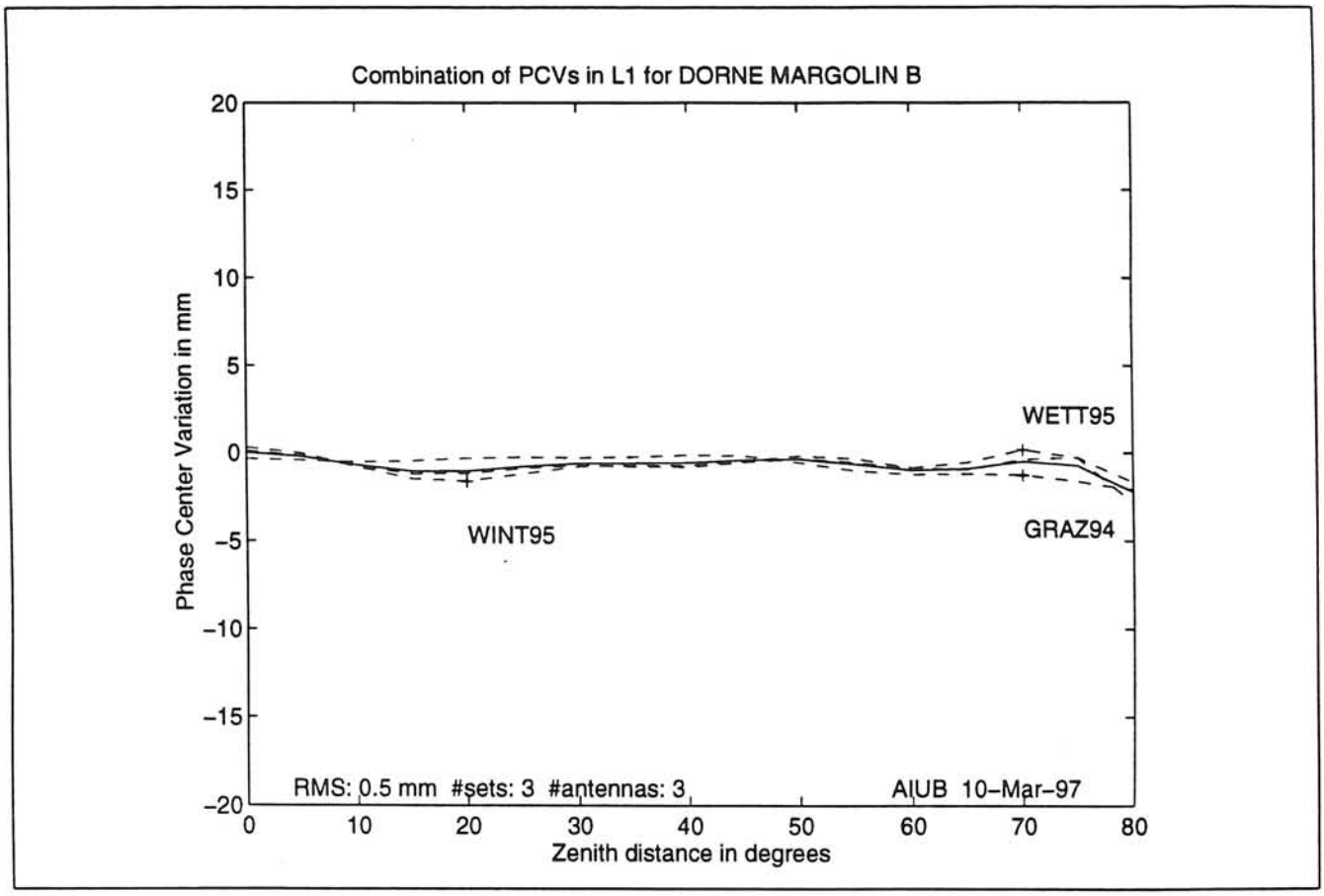

Combination of Mean Antenna Offsets
ANTENNA=4000ST L1/L2 GEOD Component=East
Offset in mm
0
−1
−2
−3
−4
1
2
Frequency
Campaign
BALL
GRAZ94
MADER
THUN94
WETT95
WINT95


Combination of Mean Antenna Offsets
ANTENNA=4000ST L1/L2 GEOD Component=North
Offset in mm
2
1
0
−1
−2
−3
−4
−5
1
2
Frequency
Campaign
BALL
GRAZ94
MADER
THUN94
WETT95
WINT95

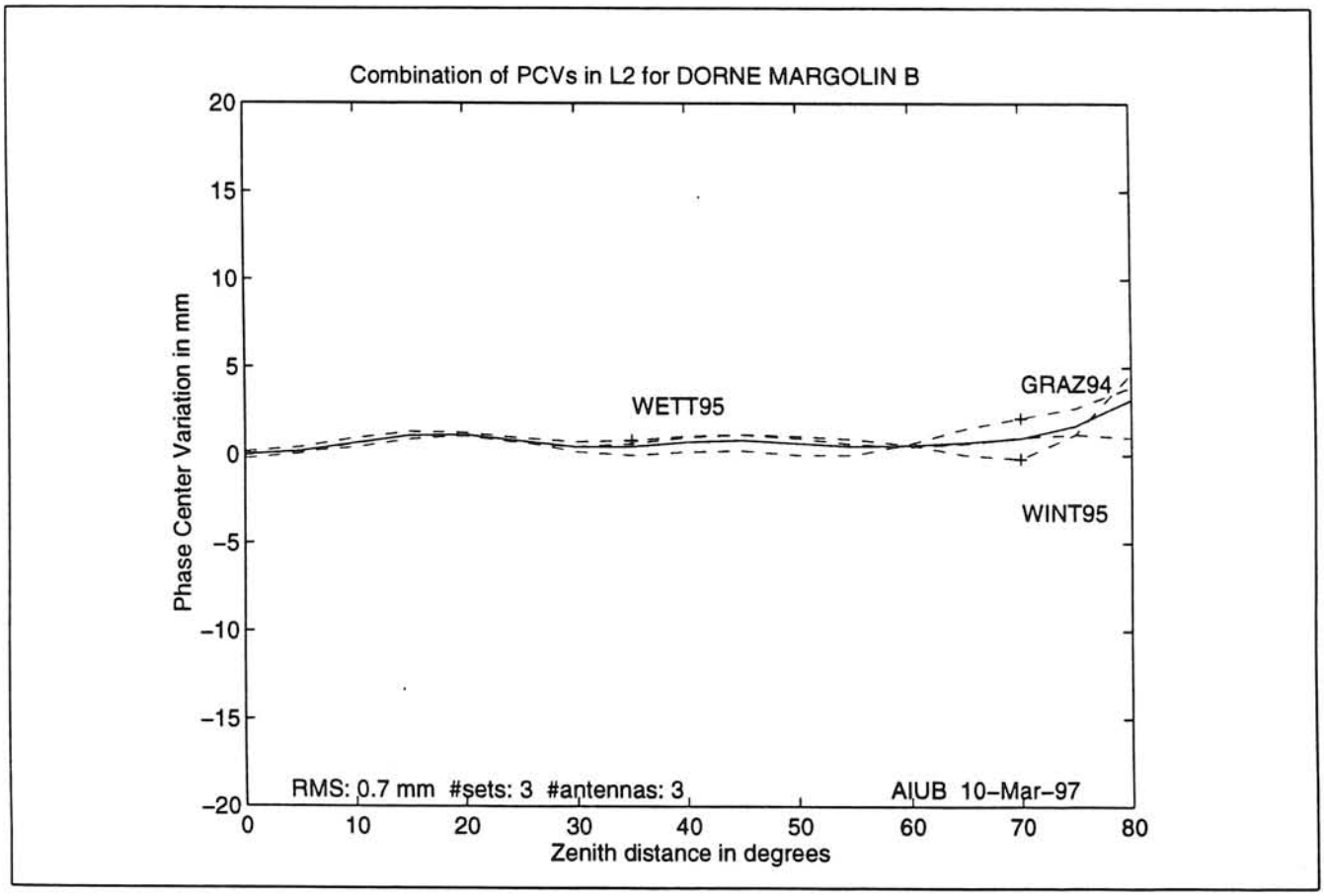
KOMBINATION DER ELEVATIONSABHÄNGIGEN KORREKTUREN

- Input: N Sätze von elevationsabhängigen Korrekturen **relativ zur Dorne Margolin T Antenne** (auf Null gesetzt) in 5-Grad Intervallen (bis auf 10 Grad Elevation hinunter) zusammen mit den dazugehörigen vertikalen Offsets.
- Zuerst wurden alle Sätze auf den **gleichen vertikalen Offset (Resultate der Offsetkombination)** umgerechnet.
- Geschätzte Parameter:
  - die **5-Grad Werte** der kombinierten Phasenzentrumskorrekturen
  - einen beliebigen, **konstanten Phasenoffset** für jeden Satz (konstant über alle Elevationswinkel
  - Bei Problemen zusätzlich einen Antennenhöhenoffset (Kosinusterm)
- Sätze mit grossen Abweichungen (sogar nach dem Schätzen eines Höhenoffsets) wurden von der Kombination ausgeschlossen.

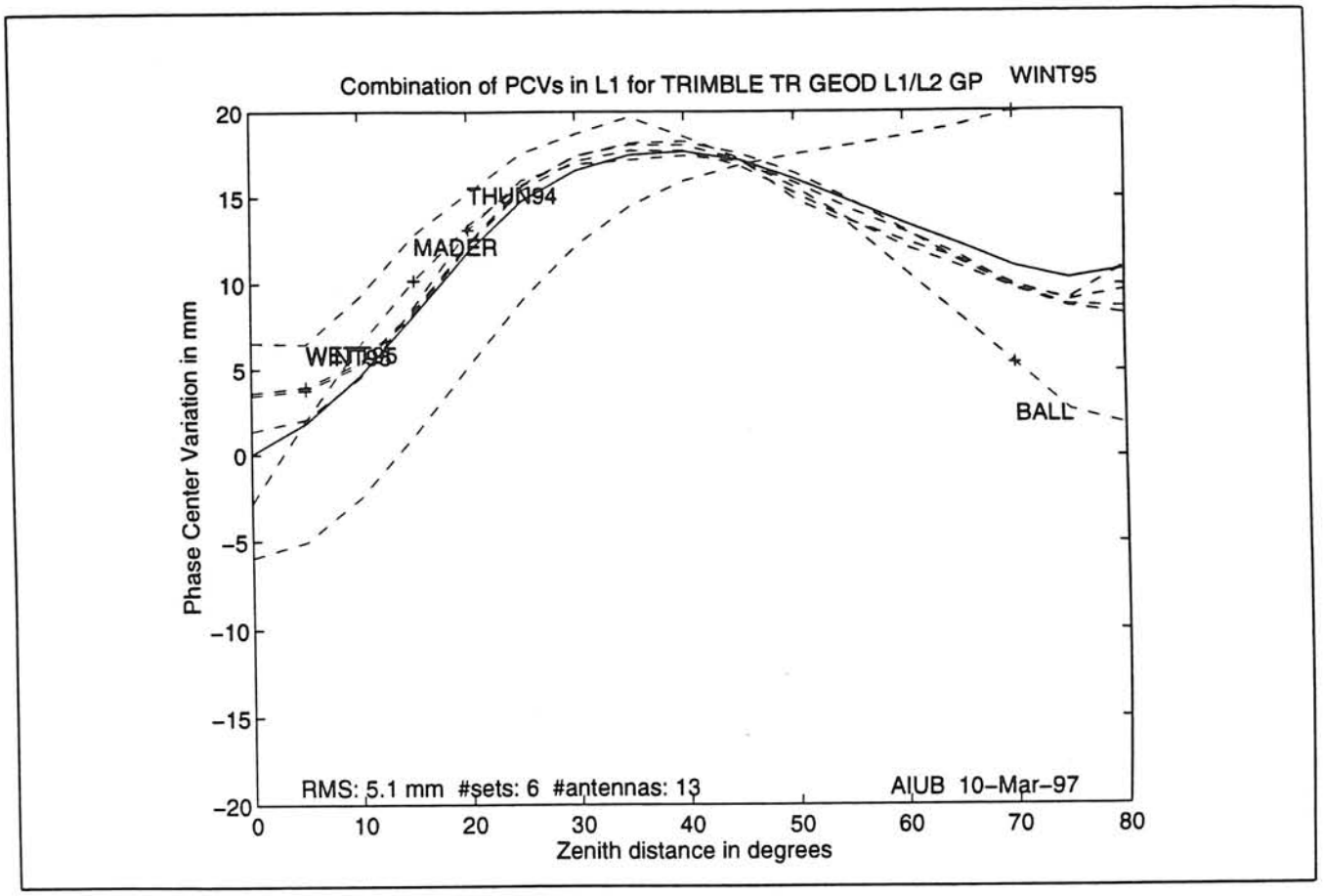




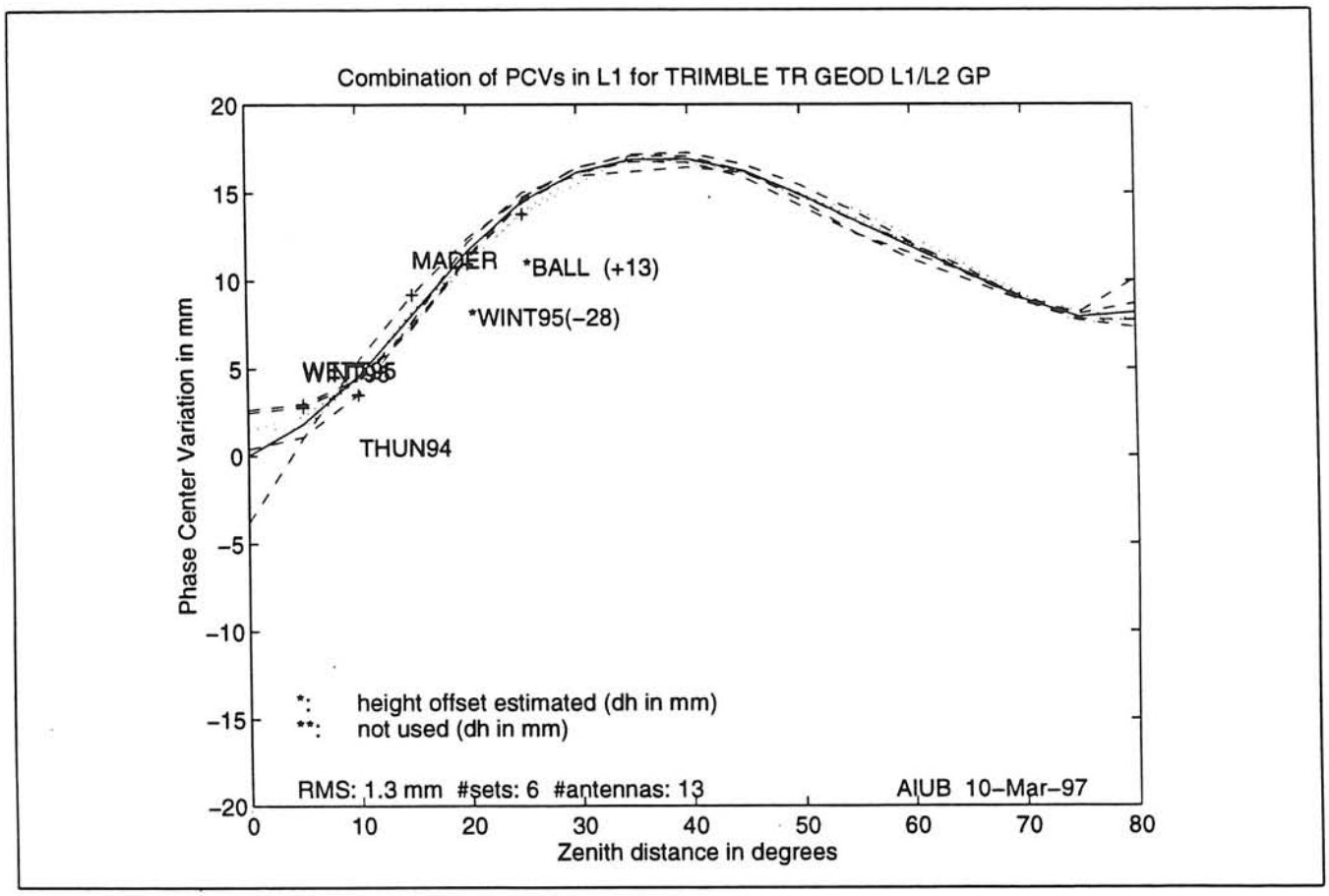
Astronomical Institute University of Berne



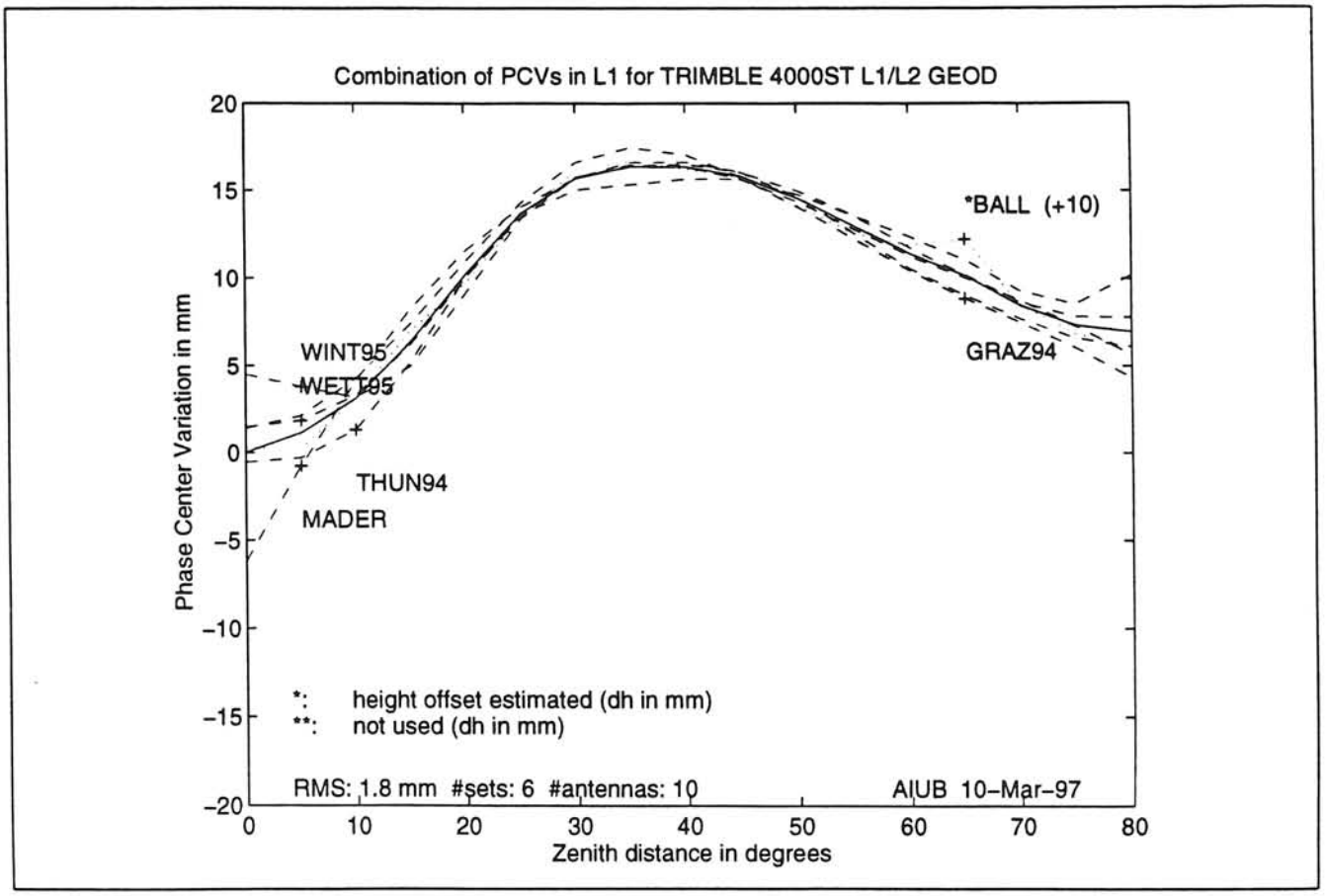
Astronomical Institute University of Berne



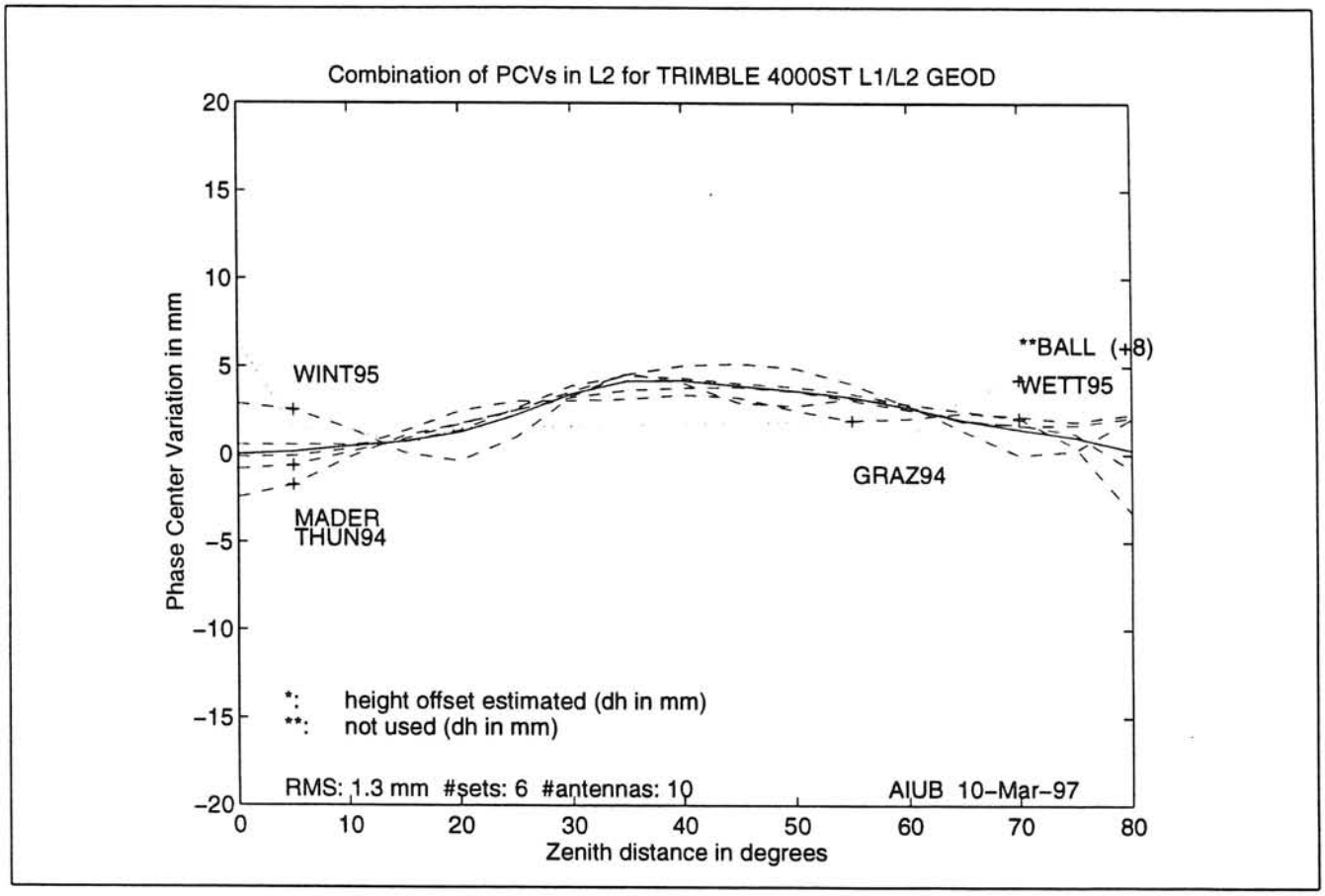
Astronomical Institute University of Berne



Astronomical Institute University of Berne



Astronomical Institute University of Berne

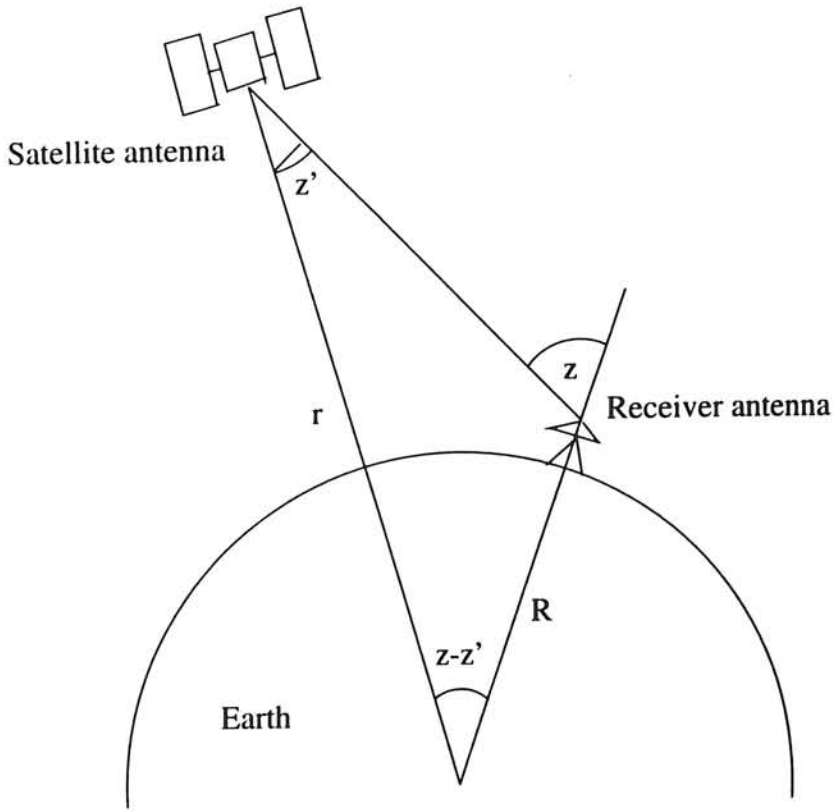


Astronomical Institute University of Berne

ABSOLUTE KALIBRIERUNG: GLOBALE ASPEKTE

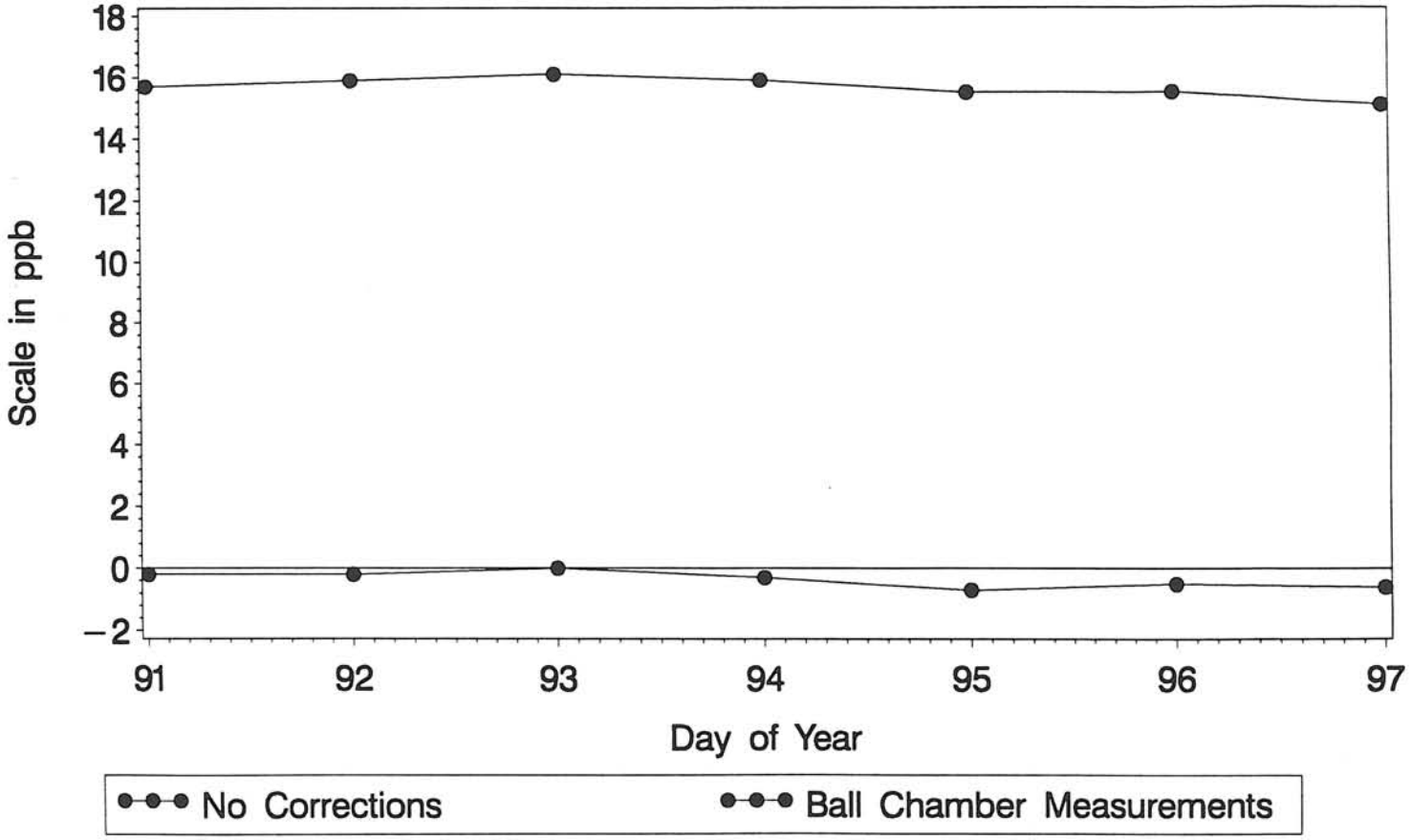
- Einführen der Kammermessungen in globale Auswertungen (oder lange Basislinien) führt zu einem Skalenfaktor von ca. **15 ppb** (Änderung der globalen Höhen um **10 cm**).
- **Bermuda-Viereck**: Korrelationen zwischen Empfängerphasenzentrum, Satellitenantennen-offsets, Troposphärenparametern, Stationskoordinaten.
- Kann das Problem des Skalenfaktors durch Änderung der Satellitenoffsets behoben werden?

ANTENNENPHASENZENTRUM DES SATELLITEN

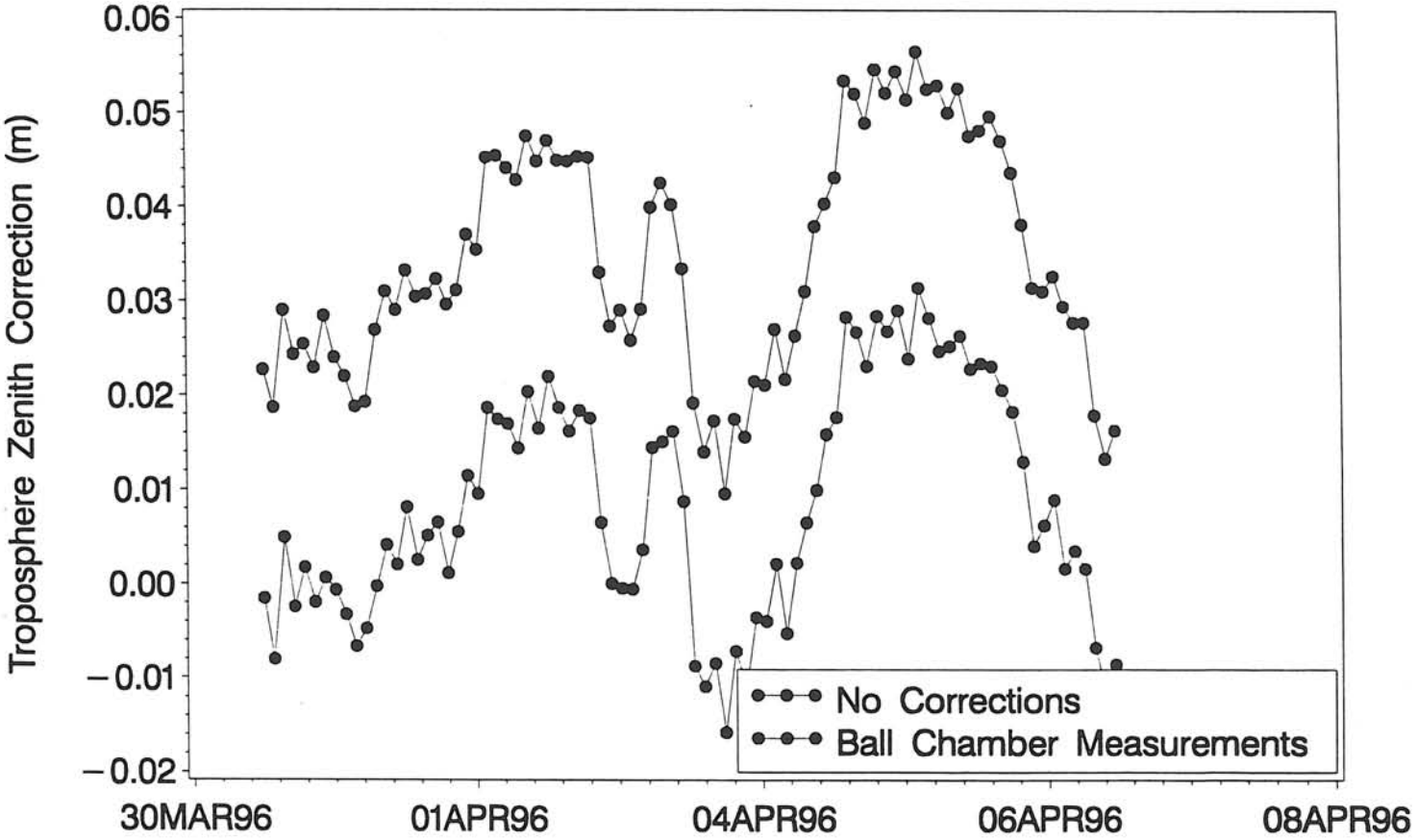


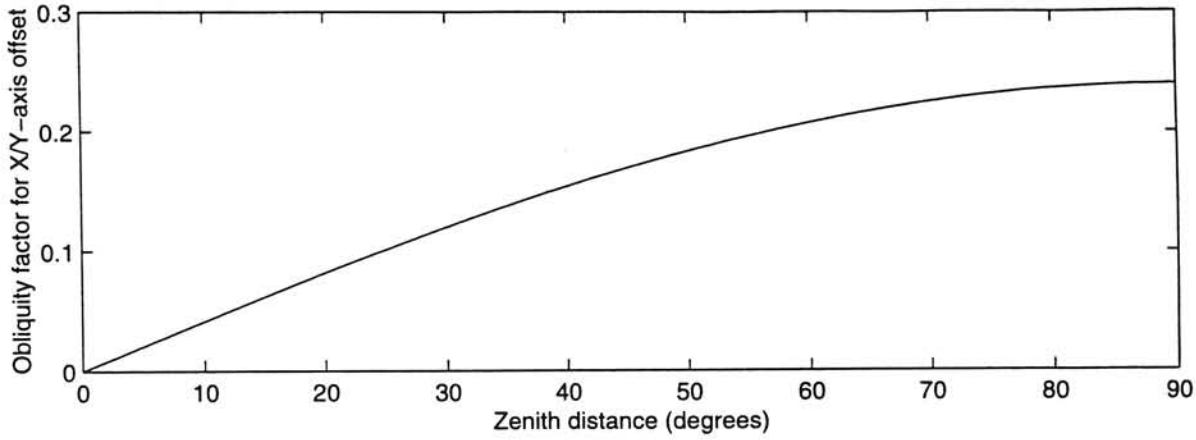
$$\sin z' = \frac{R}{r} \sin z$$

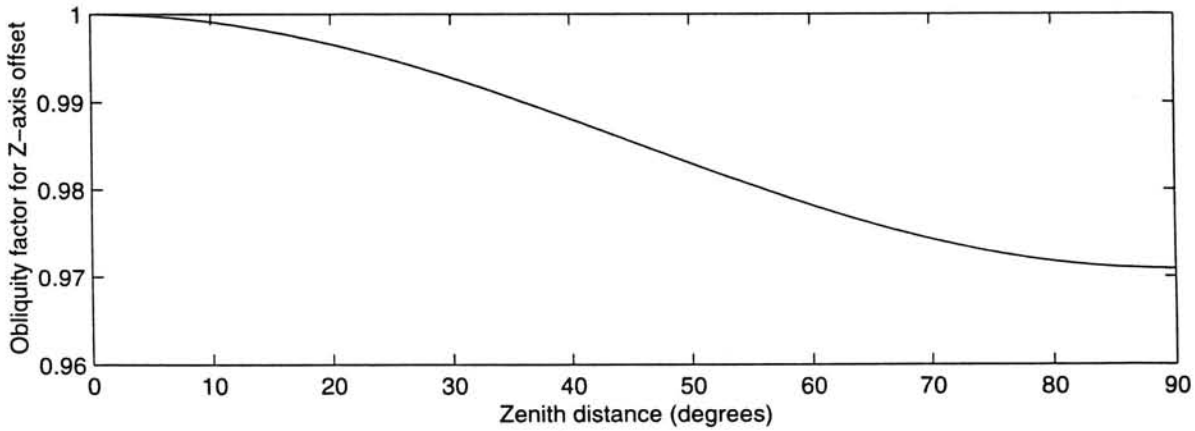
Global Scale with Respect to ITRF96 With/Without Elev.–Dependent Corrections
1 Week of Free Global Network Solutions

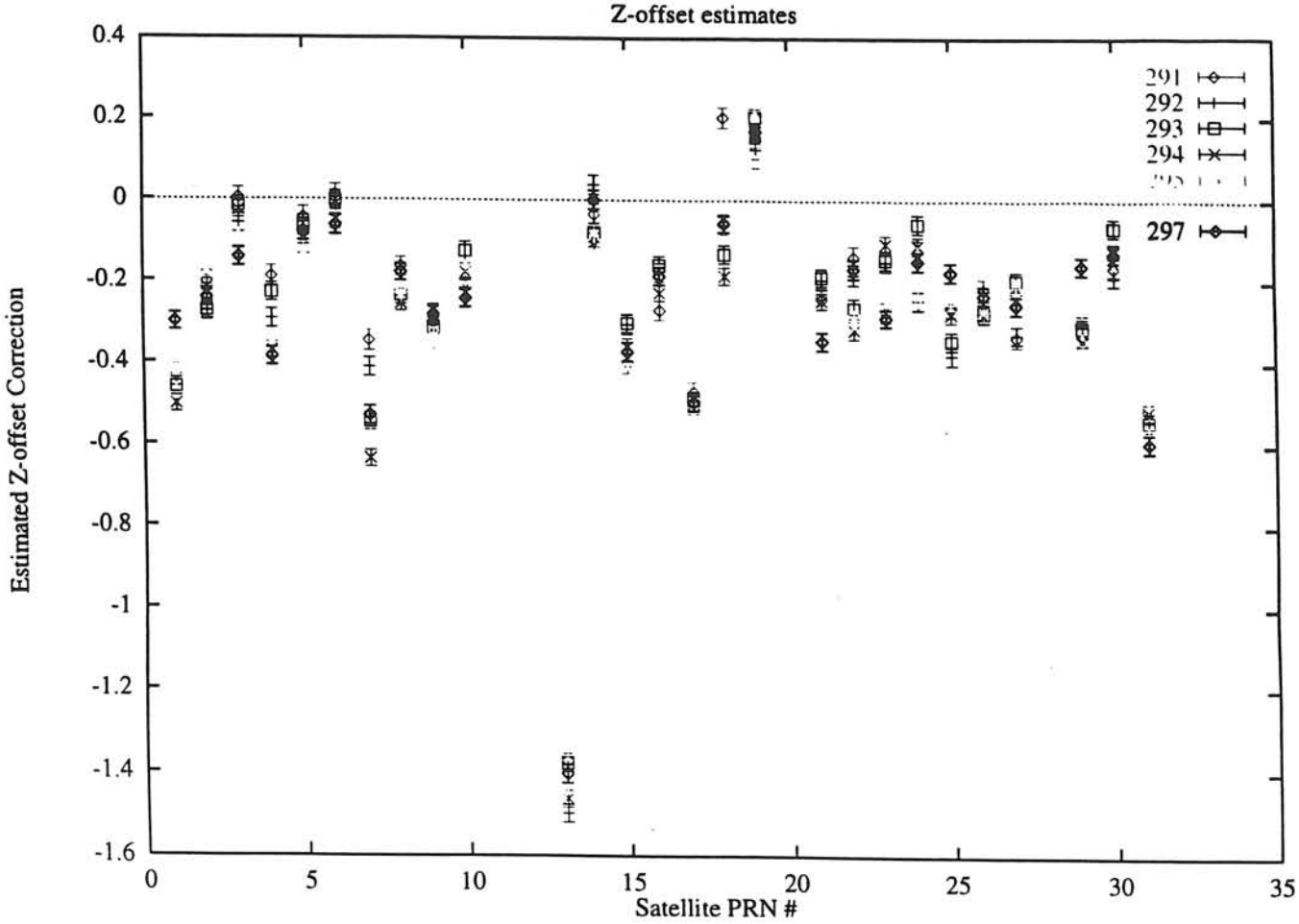


Troposphere Zenith Delays With/Without Elev.–Dependent Corrections
STATION = Pie Town




Obliquity factor for X/Y-axis offset
0.3
0.2
0.1
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Zenith distance (degrees)


Obliquity factor for Z-axis offset
1
0.99
0.98
0.97
0.96
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Zenith distance (degrees)



EMPFÄNGER- UND SATELLITENPHASENZENTRUM GLOBAL 3-TAGESLÖSUNGEN

Skalier. ppb	Tropos. mm	Sat. Z-Off. m	Lösungstyp
-0.1	0	–	Stationen fixiert
-1.5	1	-0.2	Stationen fixiert, Sat. Z-Offset geschätzt
-13.2	7	-1.6	Stationen 3-Rot., Sat. Z-Offset geschätzt
-8.5	10	–	Abs. Phasenzentren, Stationen fixiert
-14.3	18	–	Abs. Phasenzentren, Stationen 3-Rot.
1.4	9	2.1	Abs. Phasenzentren, Stationen fixiert, Sat. Z-Offset geschätzt
29.7	-9	5.5	Abs. Phasenzentren, Stationen 3-Rot., Sat. Z-Offset geschätzt

Referenzlösung: Stationen mit 3-Rotationsbedingungen

AUSBLICK

- Fehlende oder fehlerhafte Phasenzentrumskorrekturen für die GPS-Antennen bilden heute eine der wichtigsten Fehlerquellen.

- Mit GPS-Daten von kurzen Basislinien können Antennenoffsets und elevations- (und azimut-) abhängige Korrekturen geschätzt werden.

- Kalibrierungsresultate von verschiedenen Kampagnen und verschiedenen Auswertegruppen stimmen im 1-1.5 mm Bereich überein.

- Ungelöst ist weiterhin das Problem der (absoluten) Kammermessungen: sie bewirken einen Skalenfaktor im globalen Netz von ca. 15 ppb.

- Korrelation zwischen Stationshöhen, Troposphärenparametern, Phasenzentrumsvariationen und Satellitenantennenoffsets erschweren die Situation.

Antennenkalibrierung am Bundesamt für Landestopographie (Schweiz): Stabilitiät der Kalibrierung über längere Zeiträume

E. Brockmann

28. April 1999

Antennenworkshop in Bonn

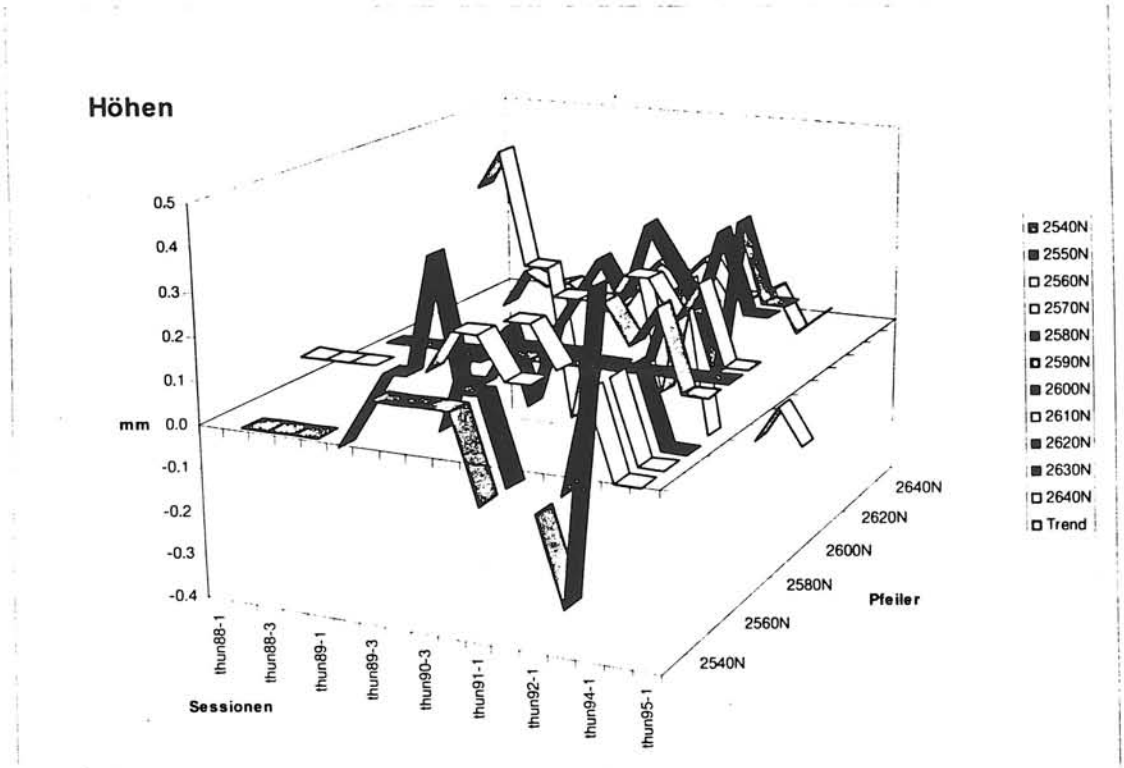
Motivation

- GPS Auswertungen höchster Genauigkeit
  - Präzisionsnetze, Staumauerüberwachungen
  - Grundlage Landesvermessung
  - grosse Höhenunterschiede
- Kontrolle der verwendeten Antennen (nach Reparaturen, Stürzen, Langzeitstabilität)

Testnetz Thun

- 12 Pfeiler (Abstand 10 m)
- Optimale GPS Bedingungen (Flugplatz)
- Hochgenaue „Ground Truth“ (< 0.2 mm)
- Gute Erreichbarkeit und Abschirmung des Geländes

„Ground Truth“



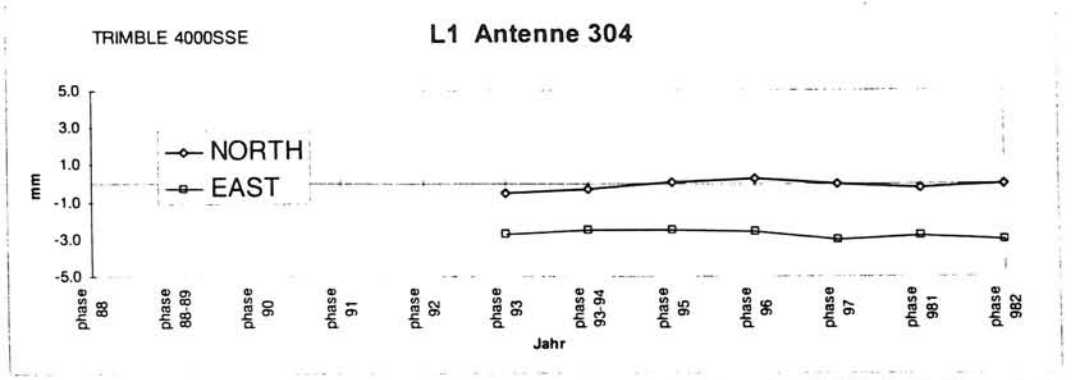
Messkampangen

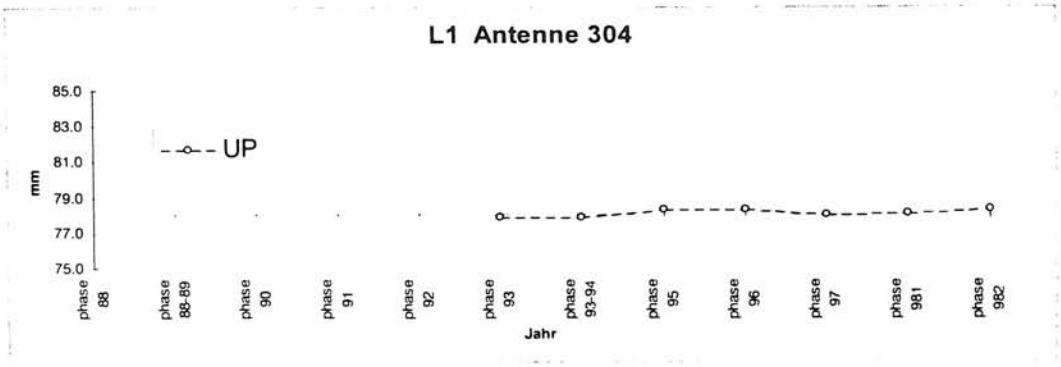
- Seit 1988 23 Kalibrationskampangen
- insgesamt 100 verschiedene Antennen, 27 verschiedene Antennentypen
- Schwerpunkt Trimble (2 SD, 10 SLD, 2 ST, 3 STD, 7 SST, 10 SSE, 5 Compact, 5 Choke Ring)

Auswerteprozedur

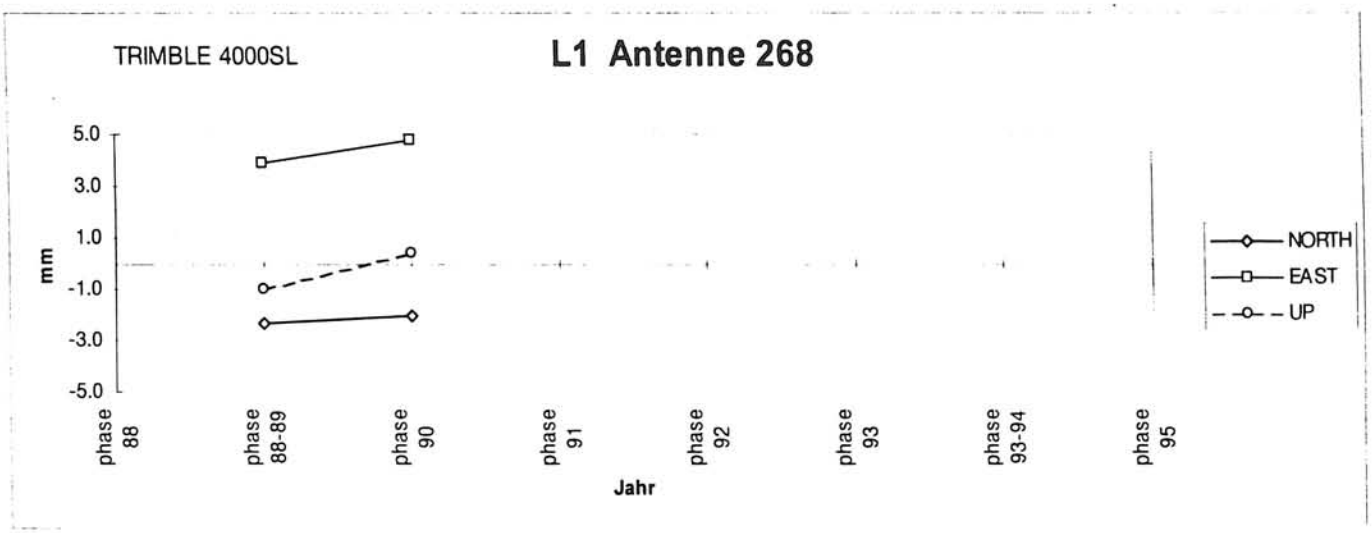
- Auswertung der Daten mit Berner Software
- Phasenzentrumsbestimmung:
  - 1988-1994: Konstante Offsets (Nord, East, Up) aus GPS Sessionen zusammen mit gemeinsamer Drehung geschätzt
  - seit 1994: Konstante Offsets und elevationsabh. Koeffizienten mittels Bernese Software

Wiederholbarkeit: Beispiel 1





Wiederholbarkeit: Beispiel 2



Wiederholbarkeit: Offsets

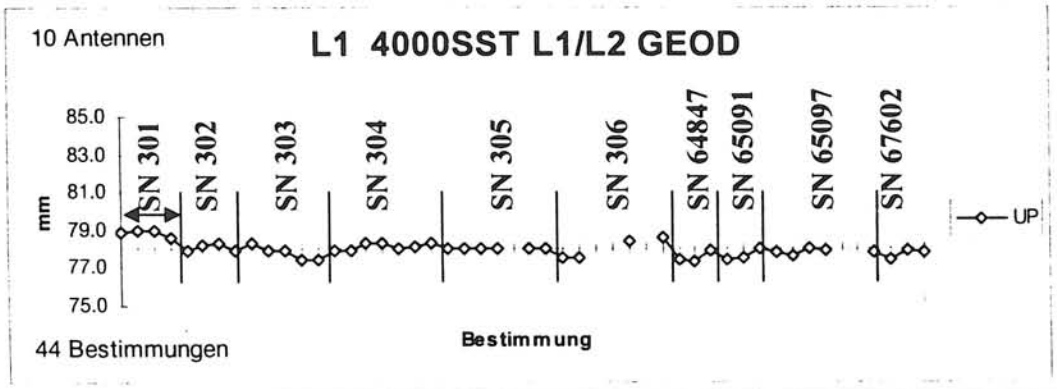
Rms [mm]	L1	L2
Nord	0.5	0.8
Ost	0.9	0.3
Höhe	0.7	0.8

Alle 29 Antennen, 100 Bestimmungen

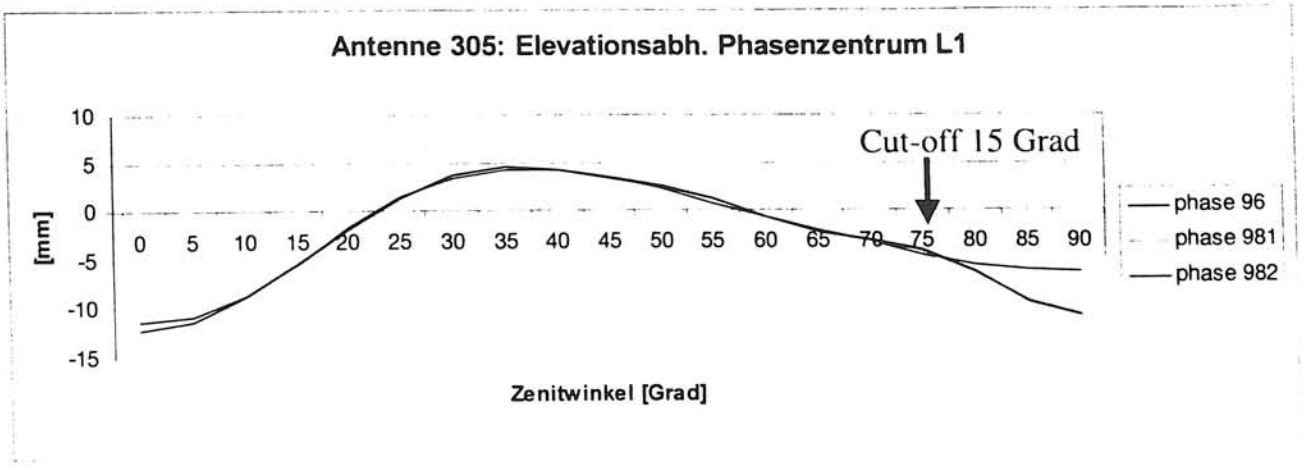
Wiederholbarkeit gleichen Typs

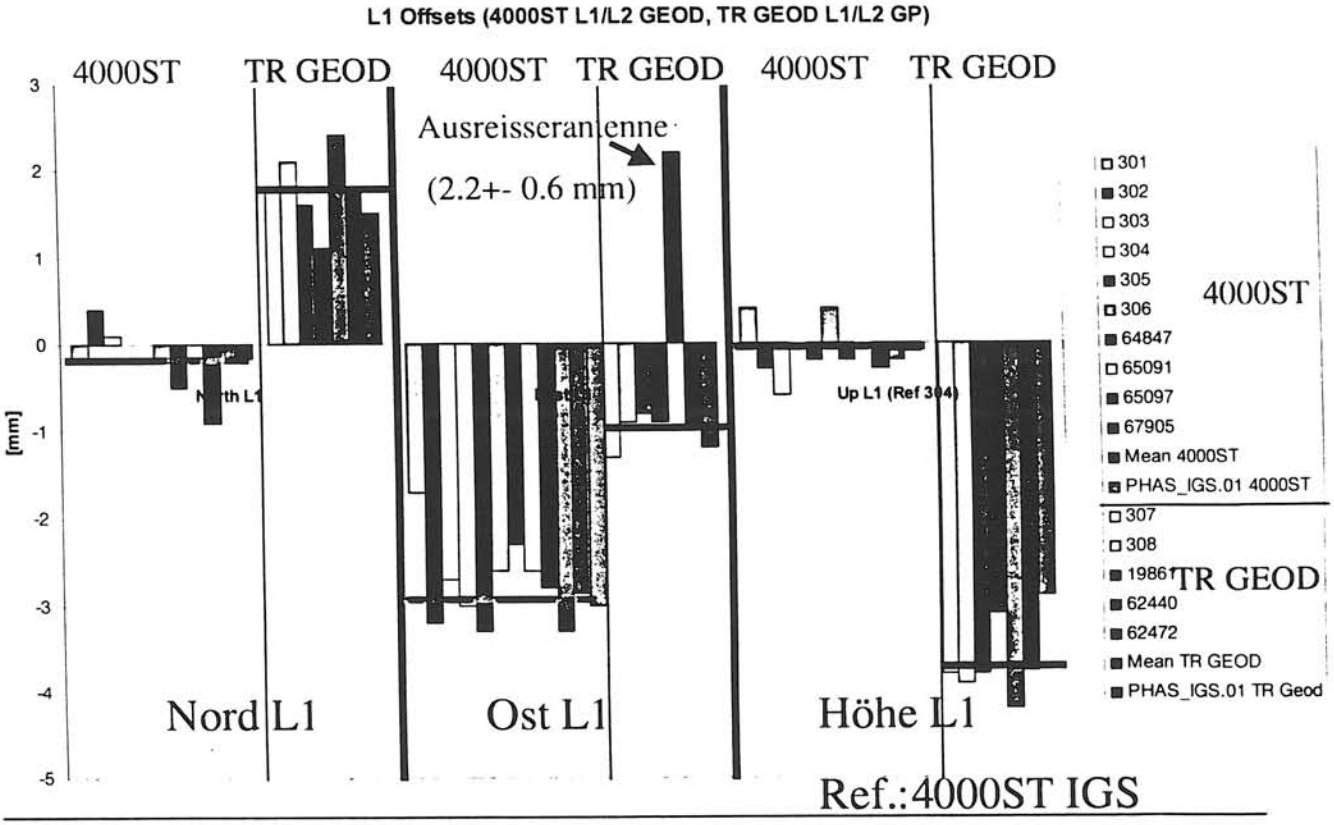
RMS [mm]		1993	1993-94	1995	1996	1997	1998/1	1998/2
L1	Nord	0.4	0.5	0.5	0.5	0.1	0.1	0.4
	Ost	0.4	0.4	0.6	0.6	0.3	0.1	0.3
	Höhe	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.1	0.4
L2	Nord	0.6	0.5	0.6	0.6	0.9	0.0	0.3
	Ost	0.4	0.5	0.8	0.8	0.3	0.1	0.2
	Höhe	0.6	0.4	0.5	0.9	0.7	0.1	0.5

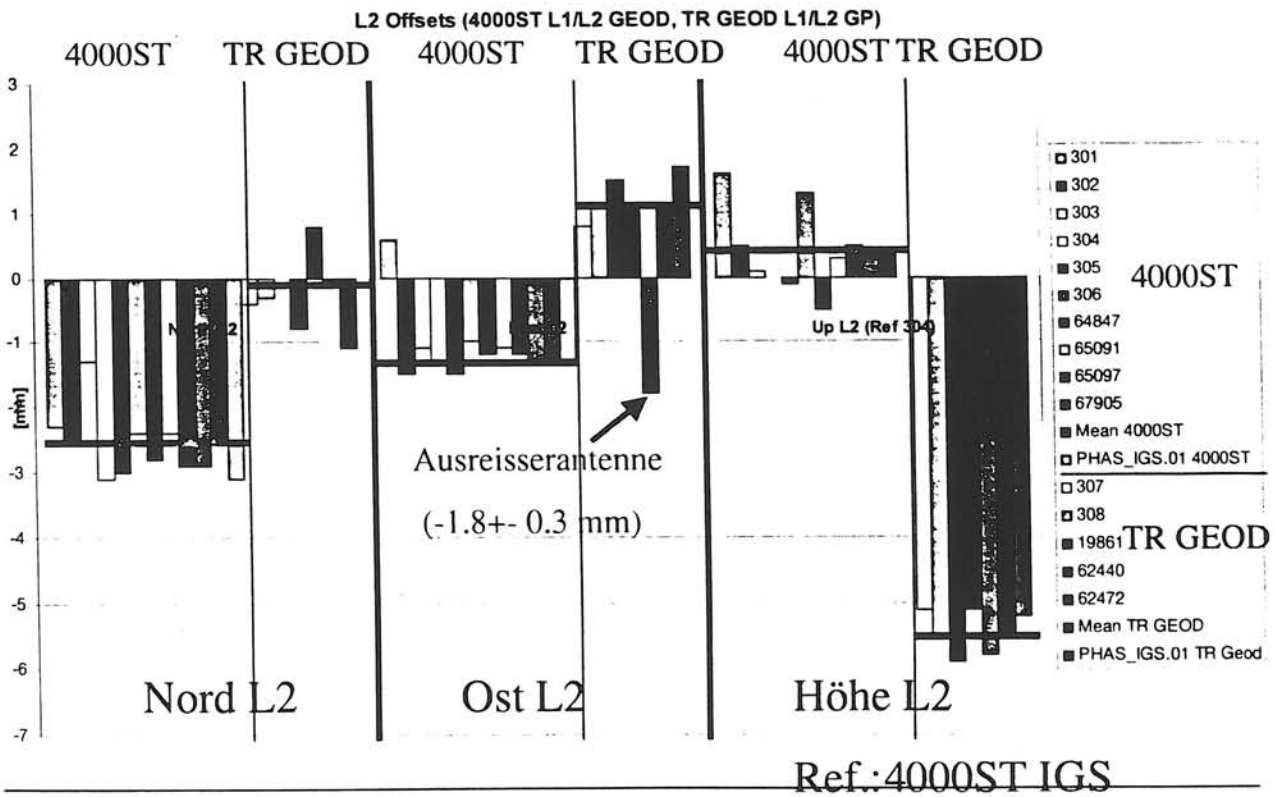
10 Seriennummern 4000SSE Antennen, 44 Bestimmungen



Wiederholbarkeit: Beispiel 3

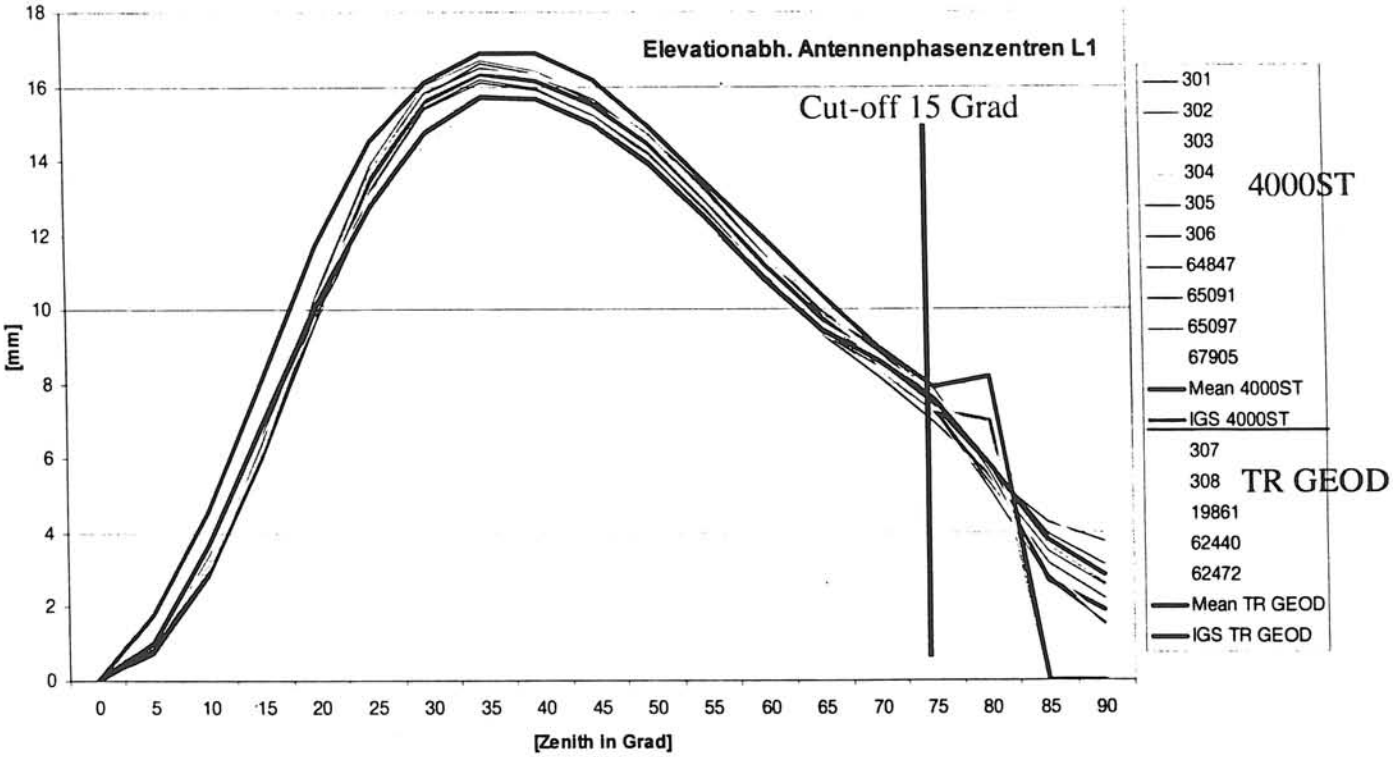






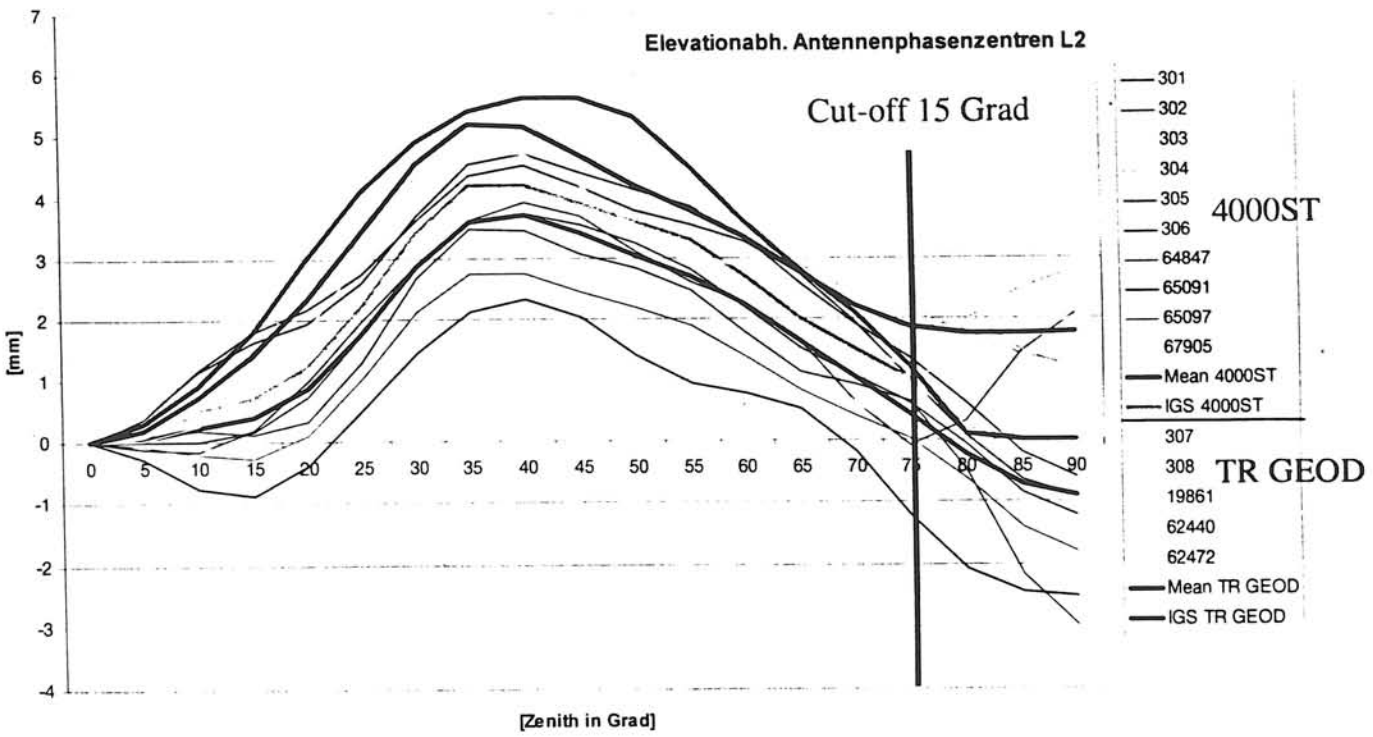
Bundesamt für Landestopographie
Office fédéral de topographie
Ufficio federale di topografia
Uffizi federal da topografia

E. Brockmann



Bundesamt für Landestopographie
Office fédéral de topographie
Ufficio federale di topografia
Uffizi federal da topografia

E. Brockmann

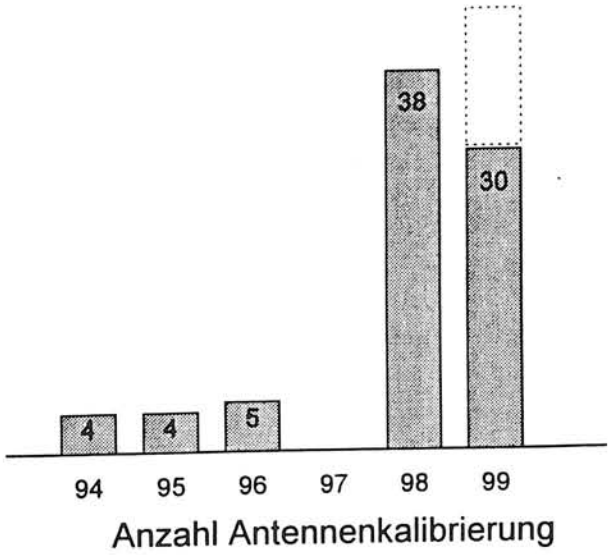


Zusammenfassung

- Phasencenter-Offsets:
  - kalibrierbar und stabil im Bereich < 1mm über Zeiträume von bis zu 5 Jahren
  - Unterschiede gleichen Antennentyps < 1-2 mm (1 Antenne mit 3 mm ± 0.5 mm Abweichung)
  - Übereinstimmung mit IGS Werten < 1mm
- Elevationsabhängige Korrektionen:
  - kalibrierbar und stabil im Bereich < 1-2 mm
  - Unterschiede gleichen Antennentyps < 1-2 mm
  - Übereinstimmung mit IGS Werten < 1-2 mm

GPS-Antennenkalibrierungen am Geodätischen Institut der TU Dresden

Lambert Wanninger, Jens Böhme



GPS-Antennenworkshop, Bonn, 28.04.1999

Kalibriermessungen

min. 2, max. 4 Ausrichtungen
bis zu 4 x 24 Stunden
Präzisionsnivellement

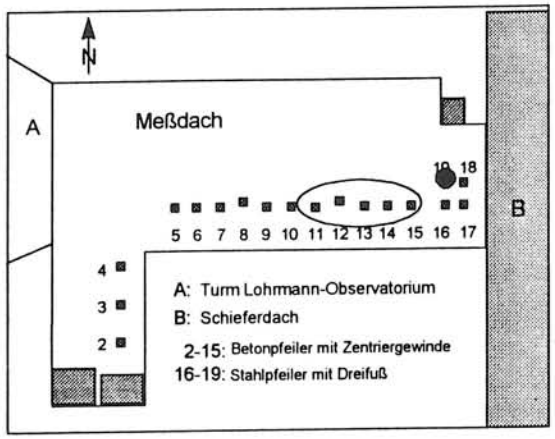
absolutes mittleres Lage-APZ
relatives mittleres Höhen-APZ
relatives elevationsabhg. APZ

Ref. Ant. — kal. Ant.

min. 3, max. 4 Ausrichtungen
bis zu 4 x 24 Stunden

relatives azimut- und elevations-abhängiges APZ

Beyerbau / TU Dresden



Kalibriernetz

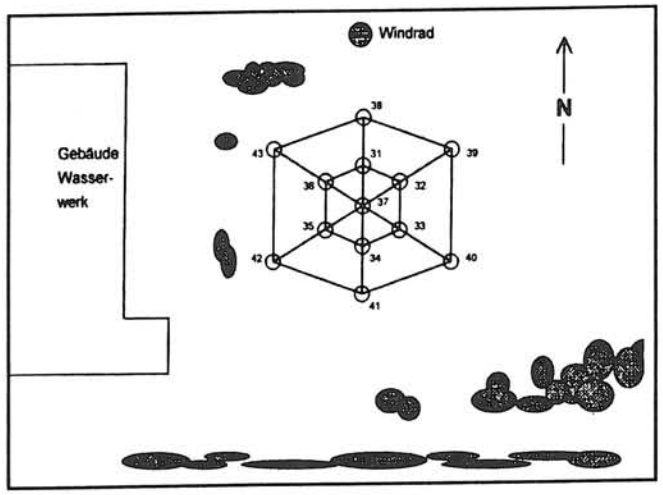
Anforderungen:

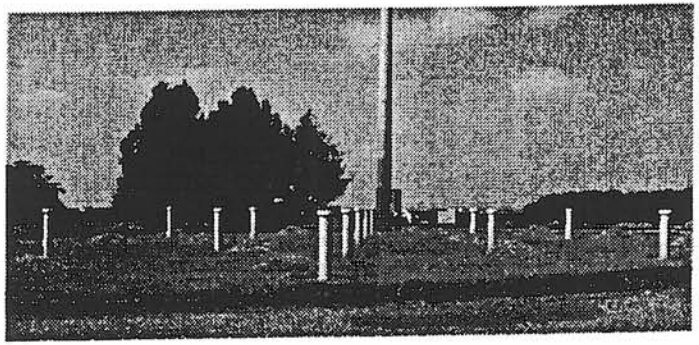
5 - 10 Pfeiler,
Horizontfreiheit,
geringer Mehrwegeeinfluß, ← **Widerspruch**

↓

Langzeitmessungen ohne Bewachung möglich,
Stromanschluß,
Unterstellmöglichkeit für Empfänger/Rechner.

Testnetz Velber / Hannover





(Falko Menge, 1994)

Datenauswertung

Wa-Soft:

- Mehrdeutigkeitslösung
- Datenbereinigung
- Weiterverarbeitung der Beobachtungsresiduen:
  Koordinatenschätzung: mittlere APZ
  APZ-Modelle: ele., azi. + ele.
  (Kugelfunktionsmodelle: Grad 10, Ord. 0
  Grad 10, Ord. 5)

Bezug der Relativwerte auf IGS-Niveau

igs_01.pcv

- Mittelwert von 5 Trimble Compact-Antennen
- Differenz zu IGS-Werten für Compact-Antennen

$$DIF_{GI\text{-}IGS} = GI_C - IGS_C$$

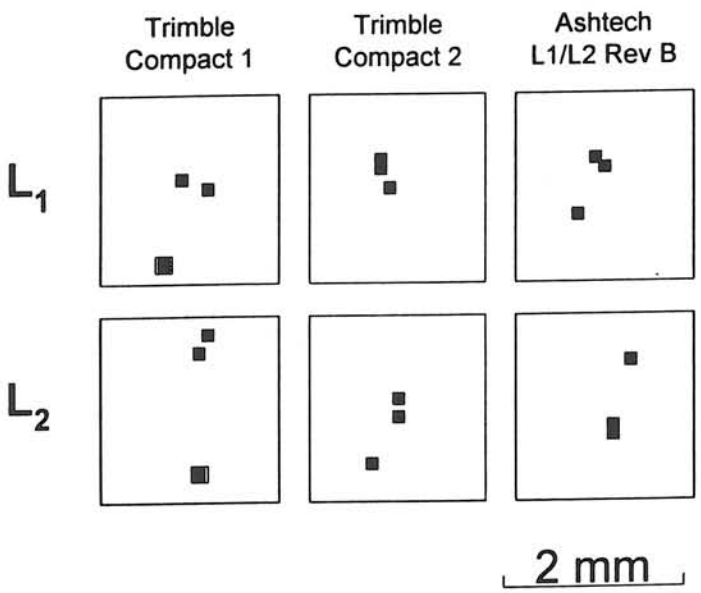
- Korrektur der relativen APZ für kalibrierte Antennen:

$$IGS_K = GI_K + DIF_{GI\text{-}IGS}$$

d.h.:absolute mittlere Lage-APZ,
relative mittlere Höhen-APZ und ele. APZ auf IGS-Niveau.

Mittlere APZ: Wiederholungsgenauigkeit

drei unabhängige Kalibrierungen:
innerhalb von 4 Monaten,
unterschiedliche Meßpunkte

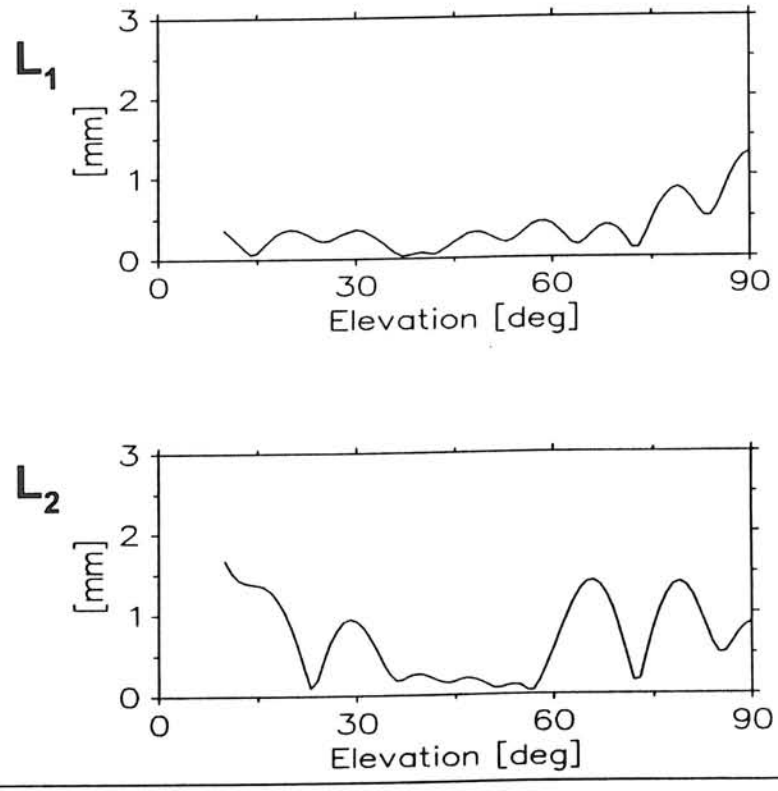


Genauigkeiten deutlich besser als 1 mm, maximale Differenzen bis 1,3 mm

ele. APZ: Wiederholungsgenauigkeit

drei unabhängige Kalibrierungen:
innerhalb von 4 Monaten,
unterschiedliche Meßpunkte

Trimble Compact wGP - Ashtech L1/L2 Rev. B
220040046 700228D2245

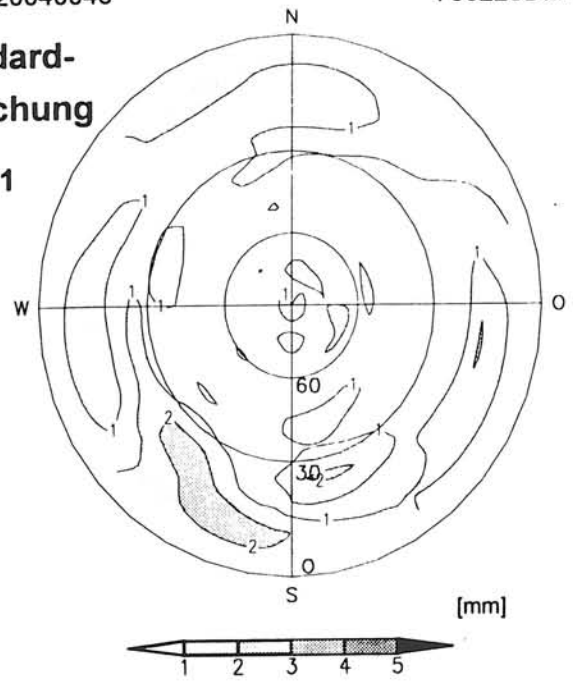


azi. + ele. APZ: Wiederholungsgenauigkeit

drei unabhängige Kalibrierungen
innerhalb von 4 Monaten
unterschiedliche Meßpunkte

Trimble Compact wGP - Ashtech L1/L2 Rev. B
220040046 700228D2245

Standard-abweichung L_1

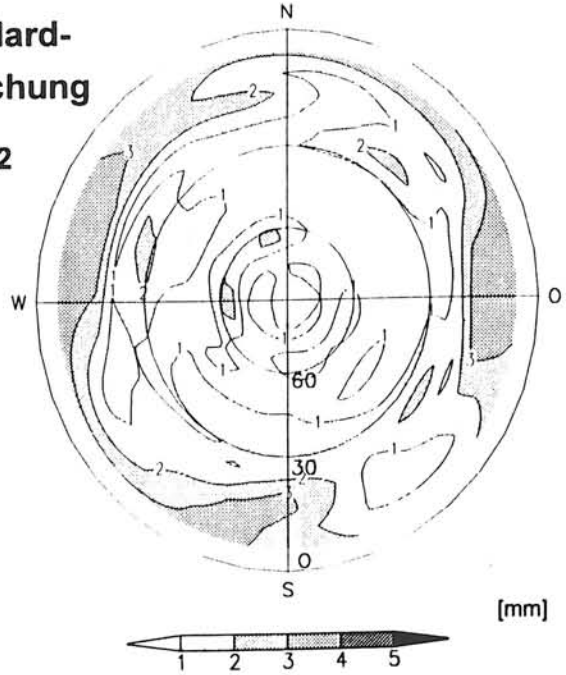


azi. + ele. APZ: Wiederholungsgenauigkeit

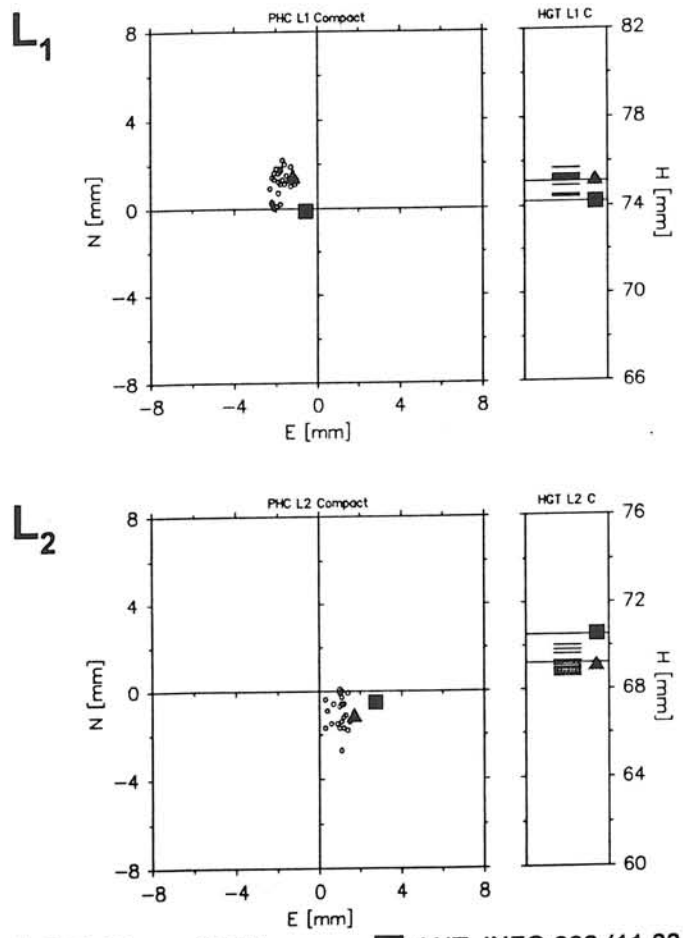
drei unabhängige Kalibrierungen
innerhalb von 4 Monaten
unterschiedliche Meßpunkte

Trimble Compact wGP - Ashtech L1/L2 Rev. B
220040046 700228D2245

Standard-abweichung L_2

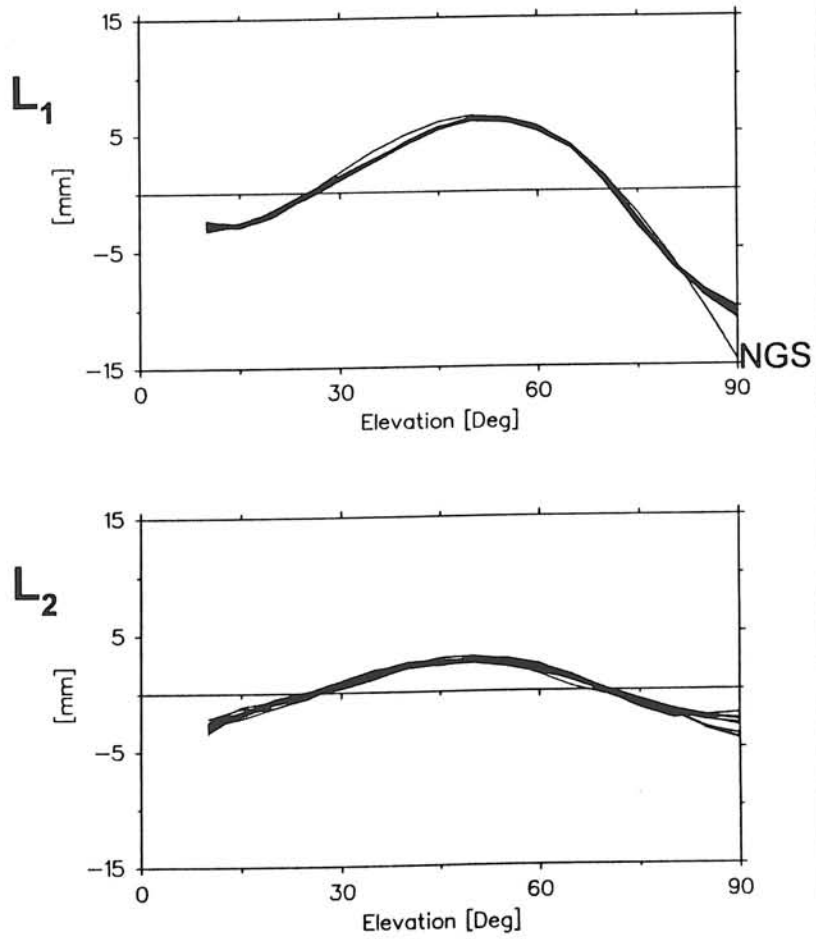


Mittlere APZ: Trimble Compact mit GP

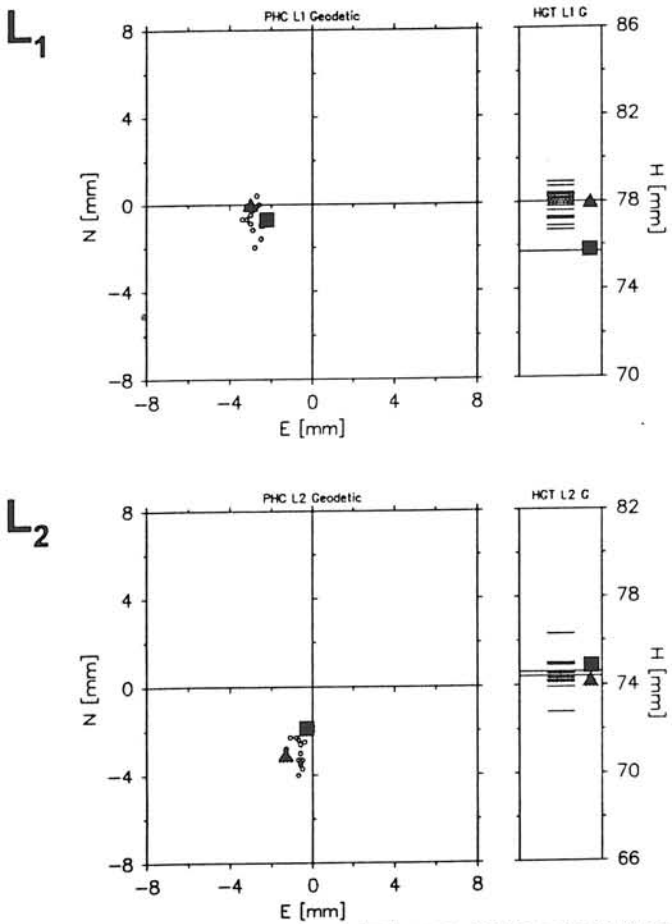


▲ IGS_01.pcv (1996) ■ ANT_INFO.002 (11.03.1999)

ele. APZ: Trimble Compact mit GP

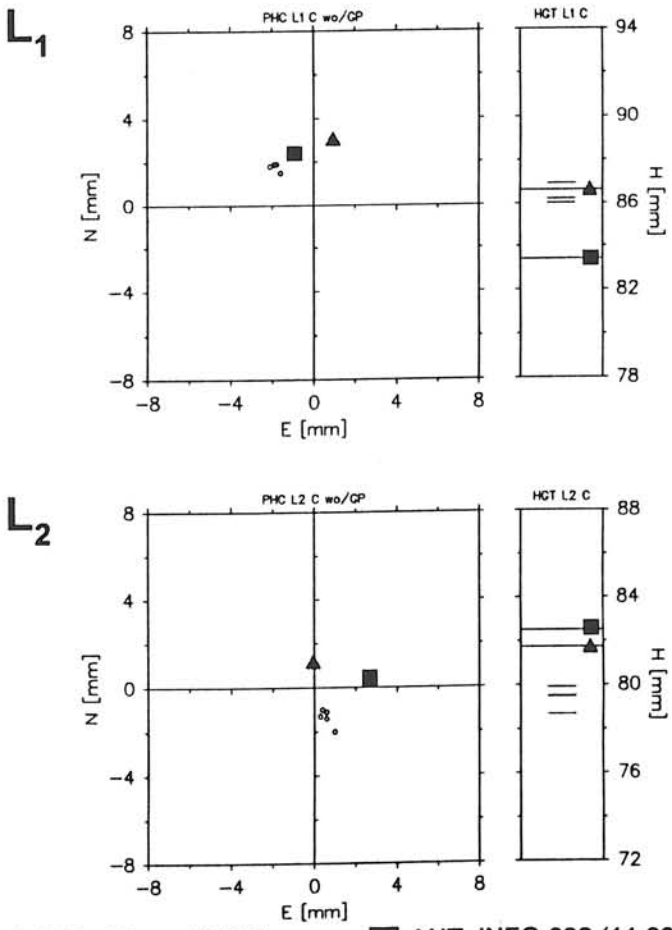


Mittlere APZ: Trimble Geodetic



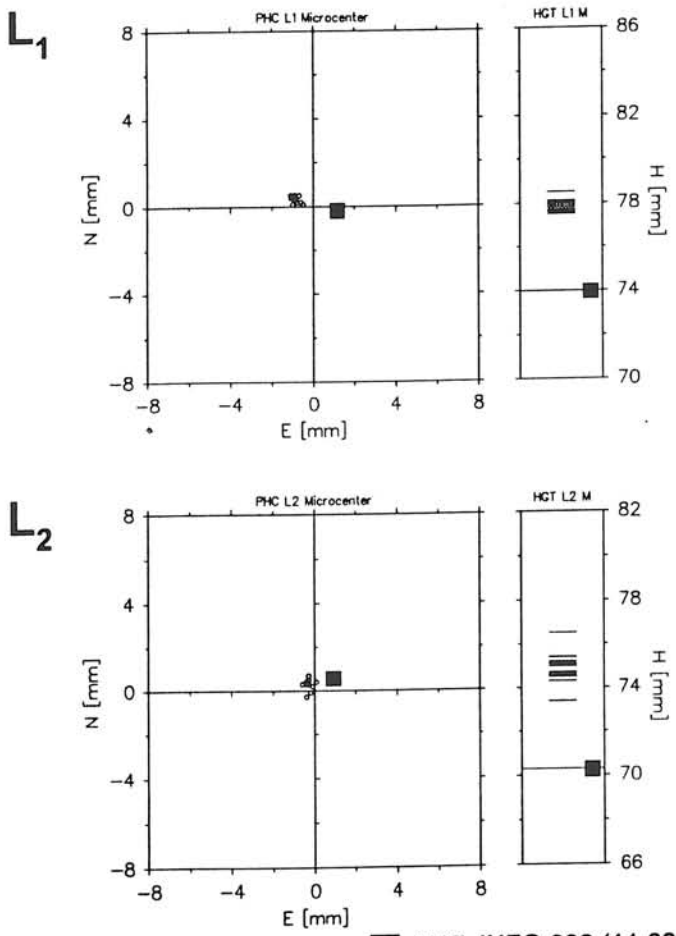
▲ IGS_01.pcv (1996) ■ ANT_INFO.002 (11.03.1999)

Mittlere APZ: Trimble Compact ohne GP



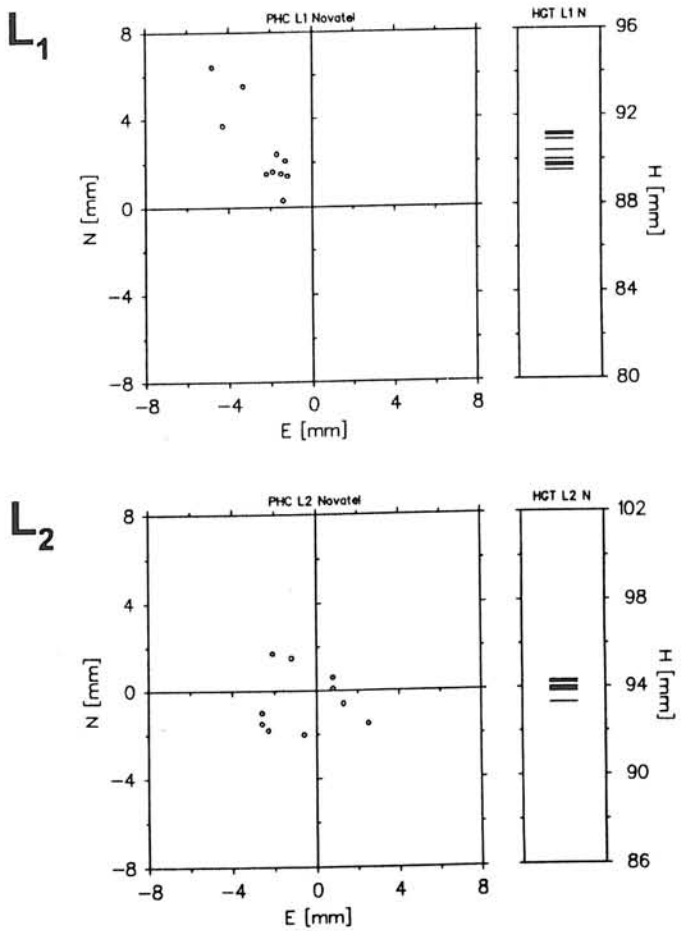
▲ IGS_01.pcv (1996) ■ ANT_INFO.002 (11.03.1999)

Mittlere APZ: Trimble Micro Centered



■ ANT_INFO.002 (11.03.1999)

Mittlere APZ: Novatel Model 503 (CR/Dome)



Ergebnisse

Kalibrierung auf Hausdächern (Mehrwegeeffekte !!), bis zu 4 x 24 Stunden

	Größe	Genauigkeit
mittlere APZ:	0...7 mm	< 1 mm
ele. APZ:	0 ... 15 mm	< 2 mm
azi.+ele. APZ:	0 ... 15 mm	< 4 mm

in Arbeit: Verringerung der Meßdauer auf 1 x 24 h.

maximale Differenzen der mittleren APZ zwischen baugleichen Antennen in N/E/H [mm]:

3 / 2 / 3 - Trimble Geodetic + Compact
1 / 1 / 2 - Trimble Micro-Centered
6 / 6 / 2 - Novatel 503 CR/Dome

Zukunft

1.) Vergleich vorhandener Kalibrierverfahren

Meßverfahren, Auswertealgorithmen, Auswerte-programme

2.) Festlegung eines APZ-Datums

...

3.) Aufbau von Kalibriernetzen:

fest installierte Referenzantenne / -Empfänger,

5 - 10 stabile Punkte.

4.) Kalibrierung für jedermann:

festgelegte Meßverfahren,

automatisierte Auswertung: Wa-Soft/Kalib.

Zukunft

A

APZ-Datum:

definiert über Antennengruppe, (absolut ?)

jährliche Kalibrierung zur Kontrolle der Masterantennen

B

Kalibrierungen:

relativ zu einzelnen Masterantennen

Bestimmung und Nutzung absoluter Antennenphasenzentrumsvariationen (PCV)

Gerhard Wübbena
Martin Schmitz

Geo++
Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH
Garbsen

Volker Böder
Falko Menge

Institut für Erdmessung
Universität Hannover

® 1999 Geo++ Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH

Bestimmung und Nutzung von Absoluten Phasenzentrumsvariationen (PCV)

Gerhard Wübbena, Martin Schmitz, Geo++®, Steinriede 8, 30827 Garbsen
Volker Böder, Falko Menge, Institut für Erdmessung (IfE), Schneiderberg 50, 30167 Hannover

Der Aufbau von Referenzstationen und -netzen und die Nutzung dieser Dienste führt verstärkt zu Kombinationen von unterschiedlichen Antennen. Bereits seit lagem sind Phasenzentrumsvariationen (PCV), deren grundsätzliche Charakteristik und deren Größenordnung bekannt, wie frühe Veröffentlichungen belegen (Sims, 1985) (vgl. auch Abb. Absoluter PCV).

Hochpräzise GNSS Messungen machen die genaue Kenntnis der Empfangseigenschaften der eingesetzten GNSS Antennen notwendig. Grundsätzlich wird zwischen Antennen-Offset und Phasenzentrumsvariationen (PCV) unterschieden, wobei der Antennen-Offset im allgemeinen den mittleren Einfluß der Phasenzentrumsvariation beschreibt. Die Abtrennung von Lage- und Höhen-Offsets stellen einfach zu berücksichtigende Korrekturen niedriger Genauigkeit dar. Somit stellen Kalibrierungsverfahren, die zusätzlich zum Antennen-Offset Phasenzentrumsvariationen bestimmen, die Möglichkeit zur vollständigen Modellierung der Empfangscharakteristik der Antenne dar. Eine korrekte Beschreibung der PCV ist nur durch einen homogenen Satz von PCV und Offset möglich. Vor allem die Bestimmung der Offsets ist von der Auswertungstrategie der Kalibrierung abgängig (z.B. Elevationsmaske, absolute/relative Kalibrierung, etc.), so daß Offsets und PCV nicht gemischt werden dürfen und nur eingeschränkt vergleichbar sind. Homogene PCV Datensätze (Offset und PCV) können streng auf einen gemeinsamen Bezugspunkt umgerechnet werden. Hierbei ist jedoch der Unterschied zwischen relativen und absoluten PCV zu berücksichtigen.

Im allgemeinen sind für den gemeinsamen Einsatz von GNSS Antennen unterschiedlicher Hersteller und/oder unterschiedlicher Antennentypen sowohl Antennen-Offset als auch elevationsabhängige PCV-Korrekturen notwendig. Azimutale Variationen sind ebenfalls vorhanden und können in Abhängigkeit vom Antennentyp notwendig sein (vgl. Abb. Azimutabhängigkeit).

Antennenkalibrierungen können mit speziellen Labormessungen in reflexionsfreien Räumen (anechoic chamber) oder durch GNSS Feldmessungen durchgeführt werden. Labormessungen sind sehr aufwendig bzw. die entsprechenden Einrichtungen sind schwer zugänglich. Als Signal werden keine tatsächlichen GNSS Signale, sondern eine Signalquelle innerhalb des Labors verwendet. Zu unterscheiden sind weiterhin relative Antennenkalibrierungen, die sich auf eine Referenzantenne bzw. Antennentyp beziehen, und absolute Antennenkalibrierungen, die völlig unabhängig von einer zweiten Antenne sind.

In einfachen Antennenkalibrierungen wird der Offset der Lagekomponente absolut bestimmt, die Höhenkomponente relativ zu der Referenzantenne. Elevations- und azimutabhängige Phasenzentrumsvariationen werden bislang in GNSS Feldmessungen vorwiegend relativ zu einem Referenzantennentyp bestimmt. Der Einfluß von Multipath muß über die Wahl der Stationen bestmöglichst reduziert werden, kann jedoch nicht vollständig kontrolliert werden, so daß die Antennenkalibrierung durch Multipath verfälscht wird (vgl. Abb. Einfluß Multipath und PCV). Ebenfalls können Restfehler der Referenzantenne enthalten sein.

Geo++® hat in Zusammenarbeit mit dem IfE ein Verfahren zur absoluten Bestimmung von Antennen-Offsets sowie elevations- und azimutabhängiger Phasenzentrumsvariationen aus GPS Feldmessungen entwickelt. Der Einfluß von Multipath wird eliminiert bzw. weitestgehend reduziert (vgl. Abb. Doppelte Differenzen), und die Kalibrierung ist vollständig unabhängig von einer Referenzan-

tenne. Dazu ist eine Vorrichtung zur Durchführung eines Beobachtungsprogrammes für die Testantenne notwendig. Gegenwärtig wird die Automatisierung des Beobachtungsprogrammes durch einen Roboterarm umgesetzt. Durch das spezielle Meßverfahren wird das Meßrauschen in der GNSS Auswertung deutlich verbessert. Das Verfahren zur Reduktion kann auch für die ausschließliche Bestimmung von Antennen-Offsets verwendet werden, so daß abgestufte Antennenkalibrierungsverfahren möglich sind.

Die absolute Antennenkalibrierung im Felde geht von Multipath und Phasenzentrumsvariationen, also einer Trennung der Fehlerkomponenten aus. Die Kalibrierung bestimmt Antennen-Offset und elevations- und azimutabhängige Phasenzentrumsvariation bei Reduktion des Multipath. Die Kalibrierung liefert absolute Ergebnisse, die vollständig unabhängig von der verwendeten Referenzantenne sind. Die Messungen werden als 24 h GPS Messungen redundant durchgeführt. Multipath wird durch ein spezielles Meßverfahren (siderische Differenzen, vgl. Abb.) eliminiert, wodurch das Meßrauschen für die Antennenkalibrierung deutlich verbessert wird. Für den Einsatz von unterschiedlichen GPS Antennentypen werden elevationsabhängige Phasenzentrumsvariationen für die beiden Trägerphasen ermittelt. Gleichzeitig ist durch die Analyse von elevations- und azimutabhängigen Phasenzentrumsvariation eine Aussage über die grundsätzliche Qualität und die Empfangseigenschaften der Antenne möglich. Gegebenenfalls können zusätzliche azimutabhängige Korrektionen bestimmt werden.

Die Nutzung von PCV ist über unterschiedliche Modelle (Polygon, Polynom, Kugelfunktionsmodell) möglich und muß von den GNSS Hard- und Software Herstellern sowohl im Post-Prozessing als auch in Echtzeit-Produkten berücksichtigt werden. Eine Übernahme der bestehenden IGS (International GPS Service) Konvention mit tabulierten 5°-Schritten ist denkbar und unabhängig von absoluten oder relativen PCV.

Absolute und relative PCV können jeweils ineinander umgerechnet werden, jedoch nicht gemeinsam verwendet werden. Hierdurch ist die Wahl zwischen absoluten und relativen PCV nötig. Relative PCV gehen von einer gleichen Orientierung der Antennen aus. Diese Grundvoraussetzung ist in globalen Netzen (IGS) nicht gegeben und führt zu systematischen Fehlern in den Koordinatenbestimmungen (vgl. Abb.). Eine gleiche Orientierung ist jedoch auch für Ingenieuranwendungen mit geneigten Antennen nicht gegeben, was zu vergleichbaren Fehlern über kurze Basislinien führt. Absolute PCV sind frei von diesen Effekten, die durch die Verwendung einer Referenzantenne entstehen.

Für präzise Anwendungen ist besonderes Augenmerk auf den Austausch der PCV-Korrekturen und bestehende internationale Formate zu legen. Für statische Anwendungen kann das RINEX-Format erweitert werden. Für Echtzeit-Anwendungen bestehen jedoch Vorteile bei der Nutzung von absoluten PCV, die keine zusätzliche bzw. nur geringe Übertragung von zusätzlichen Daten im RTCM benötigen und die Reduktion der Fehleranteile auf individuellen Stationen erlaubt. Der Nutzer der GNSS-Korrekturdaten muß über eine weitere Korrektur der mobilen Station entscheiden, kann jedoch voraussetzen, daß alle bestimmbaren Fehleranteile der Referenzstation korrigiert worden sind.

PROCEEDINGS

First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System

POSITIONING WITH GPS—1985

Volume I

Phase Center Variation

in the

Geodetic TI4100 GPS Receiver System's

Conical Spiral Antenna

Michael L. Sims

U.S. Naval Surface Weapons Center

Dahlgren, Virginia 22448

ABSTRACT

The phase center tests were performed on two antennas. One antenna was a production unit, the other was a preproduction model. The preproduction model was built using the same fabrication techniques as the production antenna. Both antennas had the preamplifiers removed. The phase measurements were made on both antennas for L1 (1575.42 mHz) and L2 (1227.6 mHz). The results show repeatable phase centers with acceptable variation over the 360° azimuth with measurements taken at least 10° above the horizon.

DISCUSSION

SN103 L1

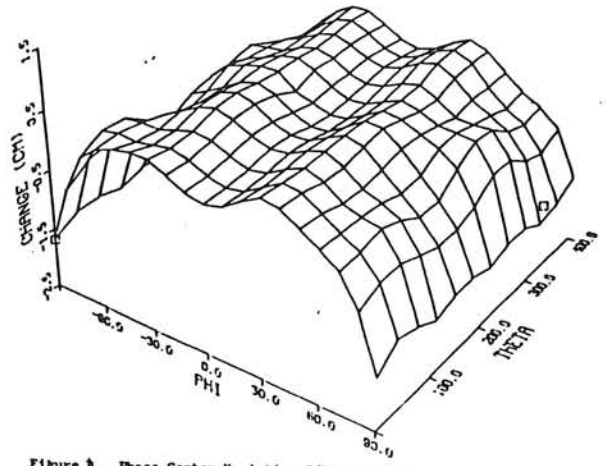


Figure 4. Phase Center Variation S/N103 at L_1.

SN103 L2

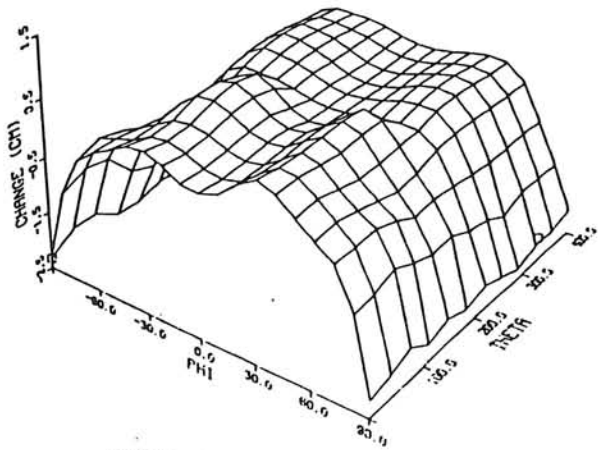


Figure 5. Phase Center Variations S/N103 at L_2.

Antennenphasenzentren

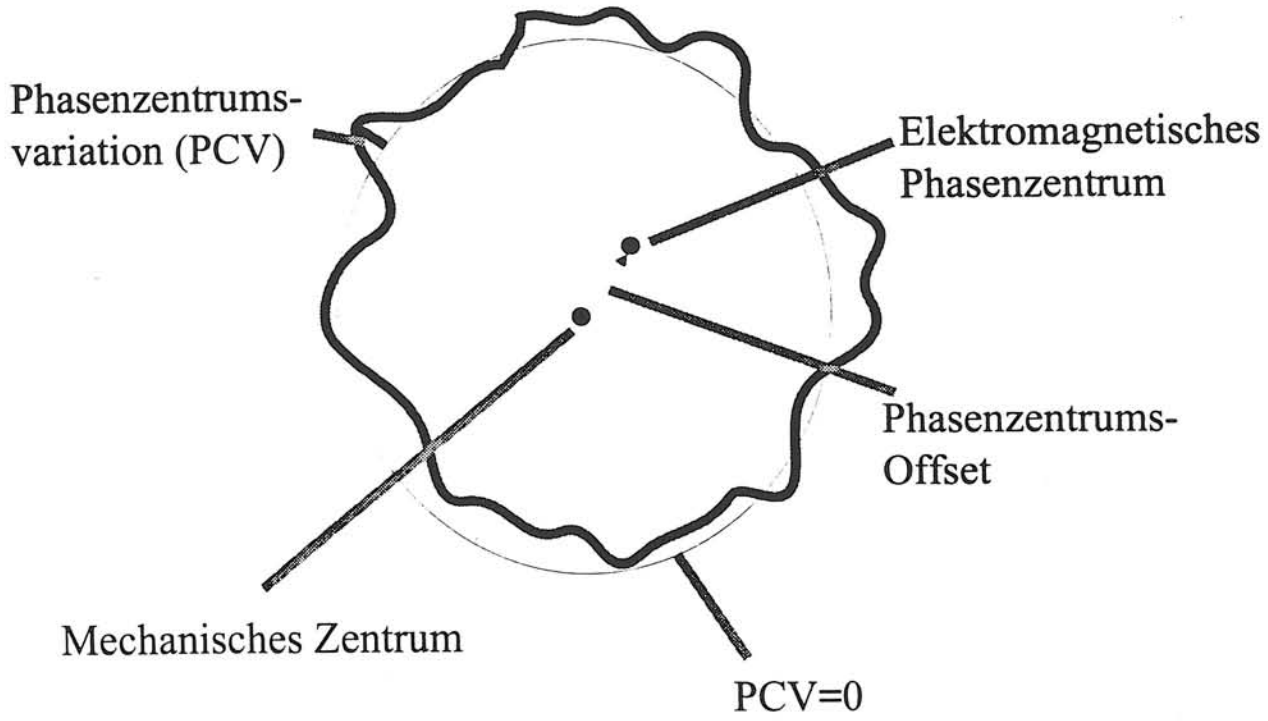
- Antennenphasenzentrum:
  - Elektromagnetisches Phasenzentrum
    - Punkt der Antenne, für den die Quadratsumme (Summe der Beträge) der Phasenzentrumsvariationen (PCV) zum Minimum wird
  - Mechanisches Zentrum
    - Punkt der Antenne, der durch die Zentriereinrichtung (5/8" Bohrung) und einen markierten Höhenbezug definiert ist.
  - Phasenzentrums-Offset
    - Differenz zwischen mechanischem und elektromagnetischem Phasenzentrum (L1, L2, GPS, GLONASS unterschiedlich)
- Phasenzentrumsvariationen (PCV)
  - durch nicht punktförmiges Antennenverhalten hervorgerufene Phasenfehler in Abhängigkeit von der Einfallsrichtung des Satellitensignals

Geo++ - Entwicklungen zur Antennenkalibierung

- siderische Tagesdifferenzen 1992
- erste Kalibrierungen 1992-1993
- Zusammenarbeit mit IfE seit 1995
- Erweiterung GEONAP um Kugelfunktionsmodell (Geo++ - 1995)
- Entwicklung Kalibrierungsunterbau (IfE - 1996)
- Kalibrierungen und Detailuntersuchungen (1995-1999 - Geo++, IfE)
- Automatisierung mit Roboter (1998-1999, IfE, Geo++, gefördert durch BMBF/DLR)

® 1999 Geo++ Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH

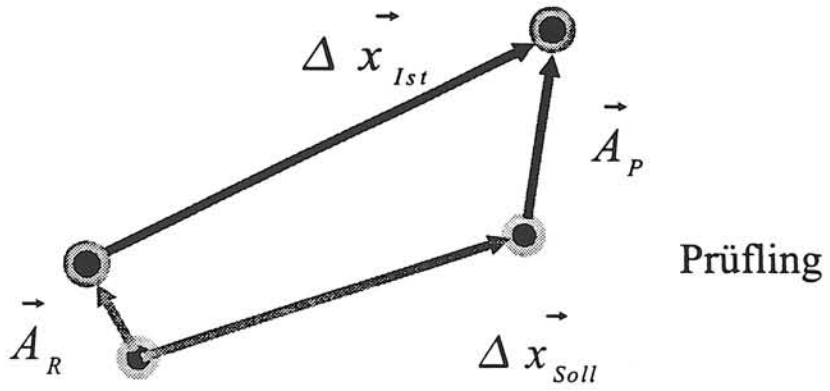
Antennenphasenzentren



Antennen-Kalibrierungsverfahren

- Offset- und PCV-Bestimmung
  - relativ
    - auf Eichstrecken
    - durch Antennentausch (Antenna-Swap)
  - absolut
    - in Eichkammern (Anechoing Chamber)
    - durch Antennenrotation

Offsetbestimmung auf Eichbasis

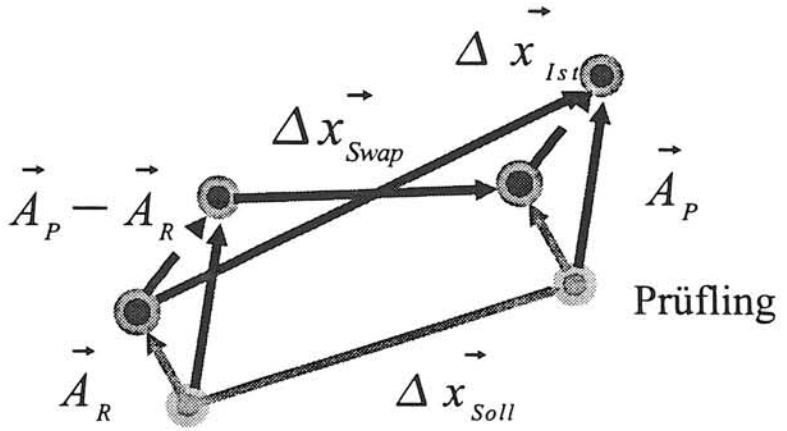


Referenzantenne

Relativer 3D-Offset:

$$\vec{A}_P - \vec{A}_R = \Delta \vec{x}_{Ist} - \Delta \vec{x}_{Soll}$$

Offsetbestimmung durch Antennentausch

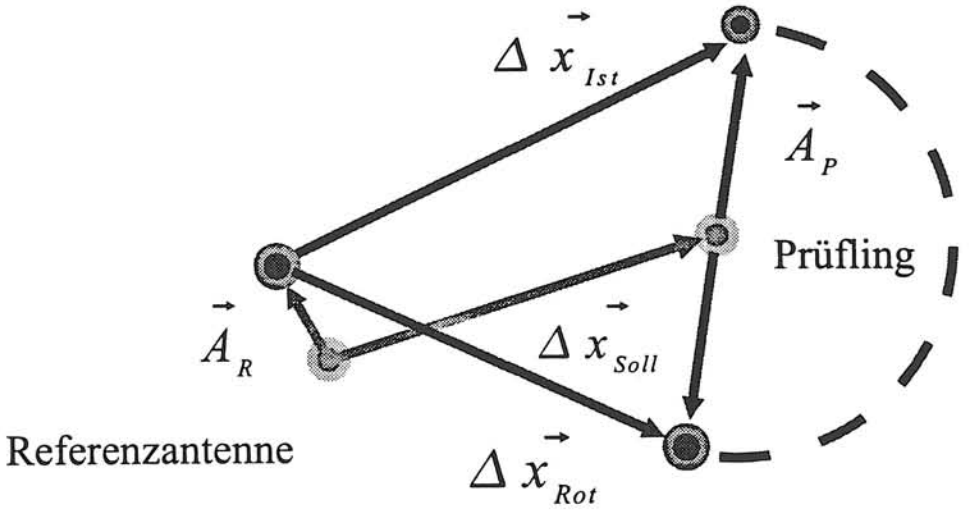


Referenzantenne

Relativer 3D Offset:

$$2*(\vec{A}_P - \vec{A}_R) = \Delta\vec{x}_{Ist} - \Delta\vec{x}_{Swap}$$

Offsetbestimmung durch Antennenrotation



Absoluter (horizontaler) 2D-Offset:

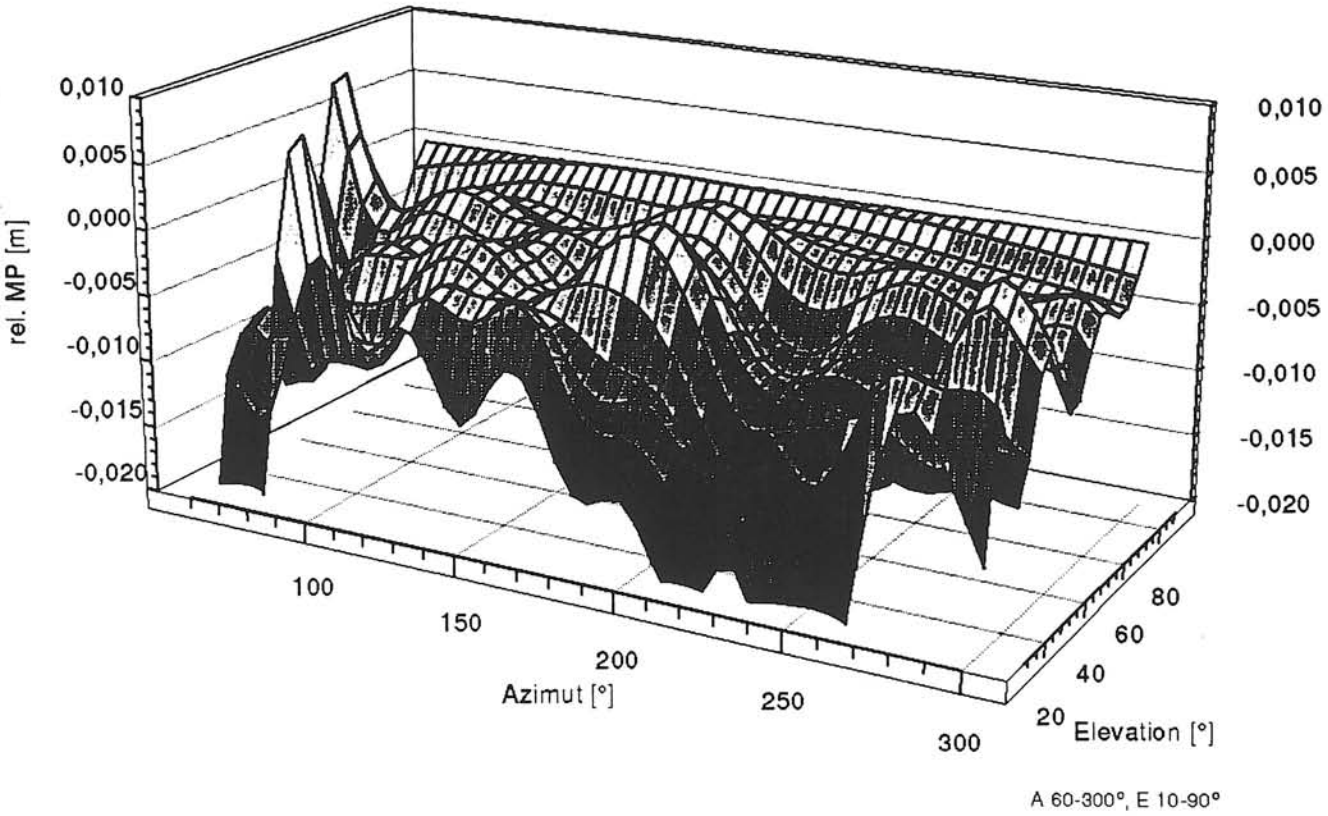
$$2 * \vec{A}_P = \Delta \vec{x}_{Ist} - \Delta \vec{x}_{Rot}$$

Probleme der Offsetbestimmung

- 3D-Offsets nur relativ
  - ➔ bekannte Referenzantenne erforderlich
- Mehrwegeeffekte nicht eliminiert
  - ➔ Kalibrierung ortsabhängig
- Phasenzentrumsvariationen (PCV) nicht berücksichtigt
  - ➔ Kalibrierungsergebnis abhängig von Elevationsmaske

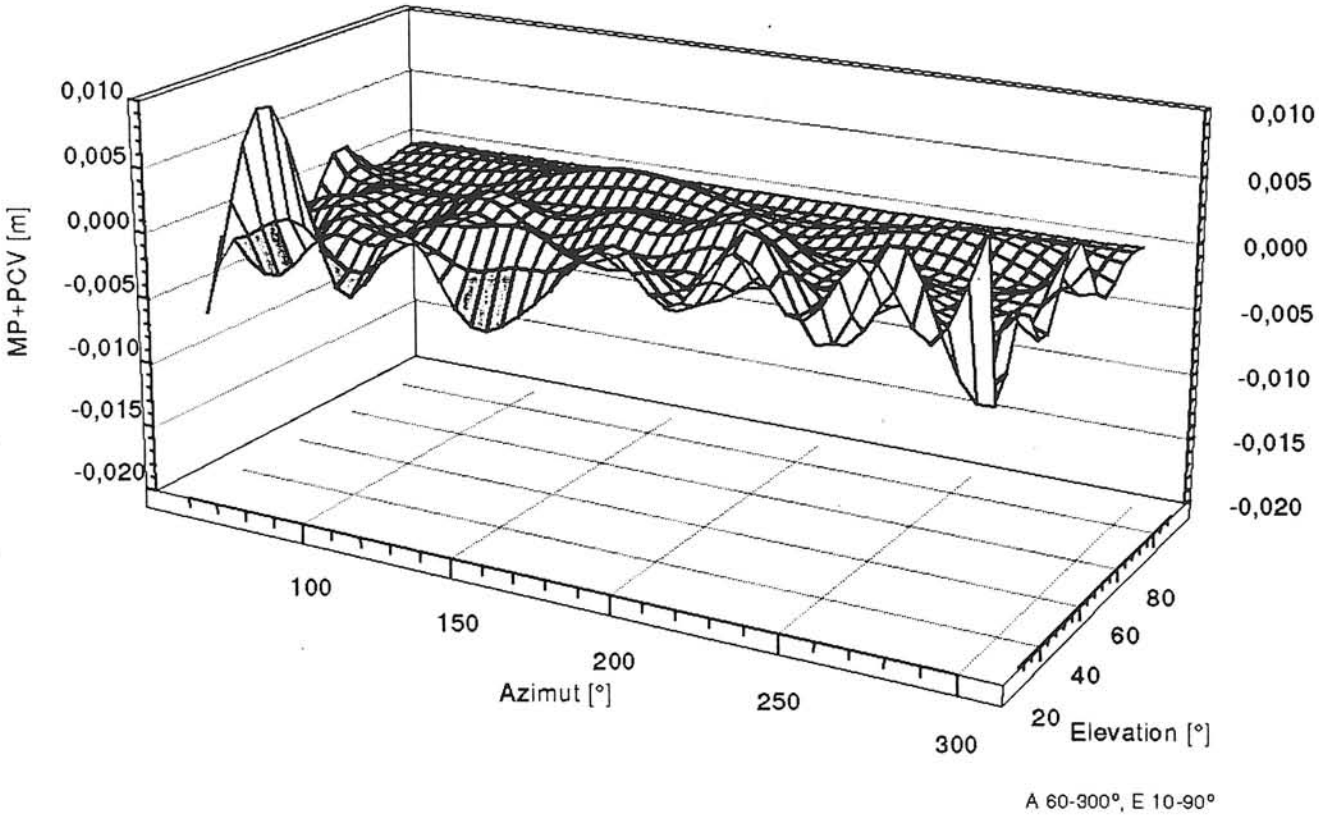
Einfluß Relativer Multipath

L1 Geo++-L1-Antenne



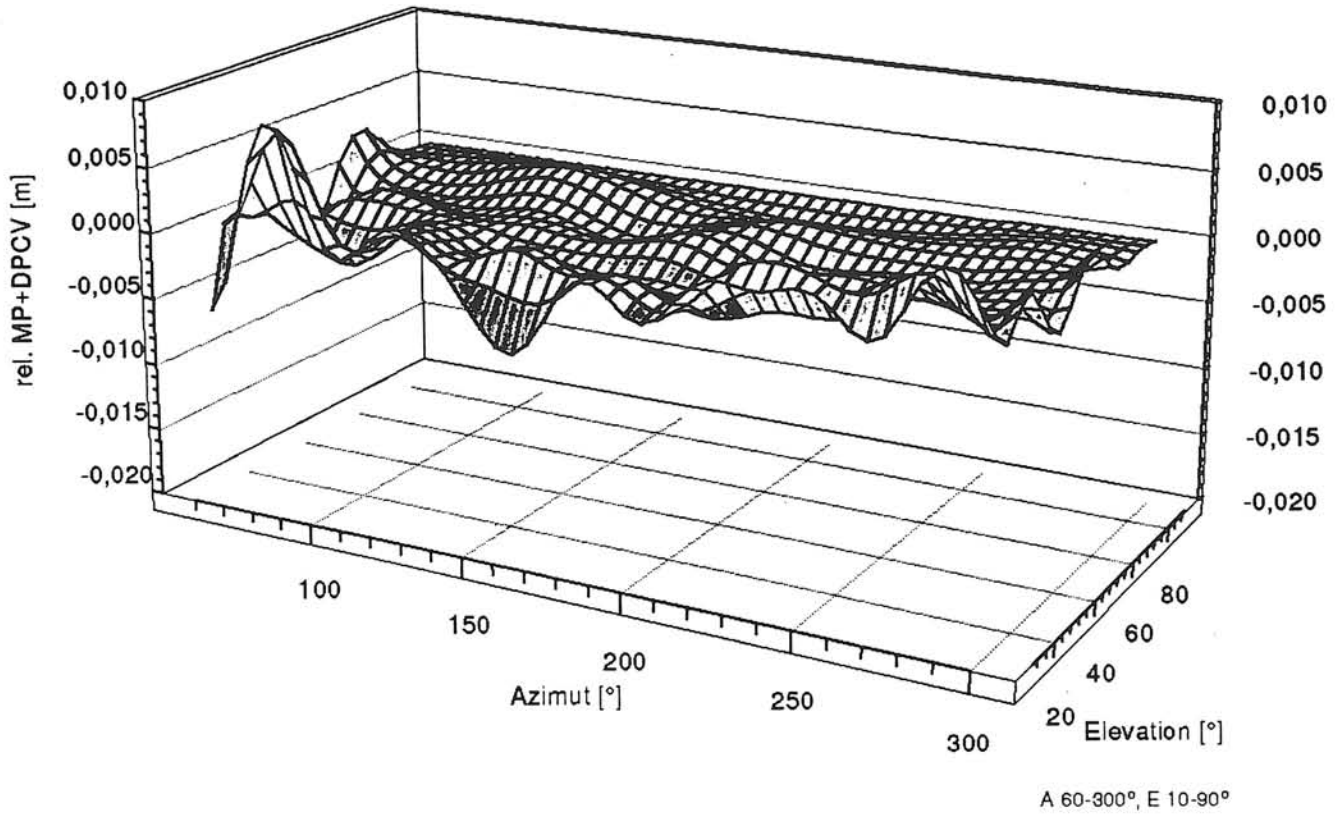
Einfluß Multipath & PCV

L1 Ashtech Choke Ring



Einfluß Relativer Multipath & DPCV

L1 Trimble Choke Ring



Absolute Feldkalibrierung von GPS-Antennen

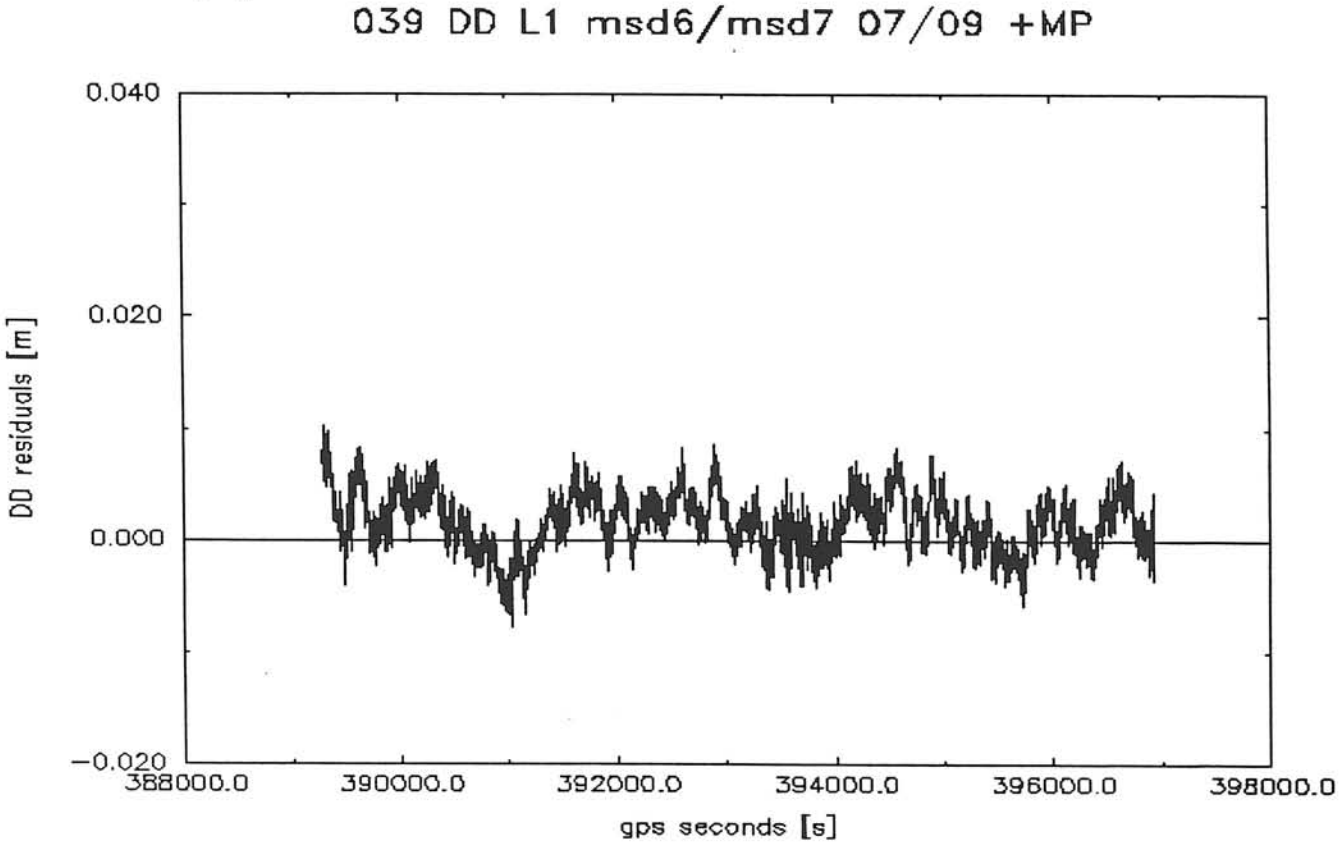
- Beobachtung an aufeinanderfolgenden Tagen
- Rotation der zu untersuchenden Antenne nach bestimmtem Scenario an 1 Tag
- Bildung der siderischen Differenzen
- Schätzung der PCV
  - ➔ Geo++®-GEONAP: Kugelfunktionsmodell
- Problem: Rotation und Antennenkippung um mechanisches Zentrum erforderlich
  - ➔ spezieller Unterbau

Multipath Elimination

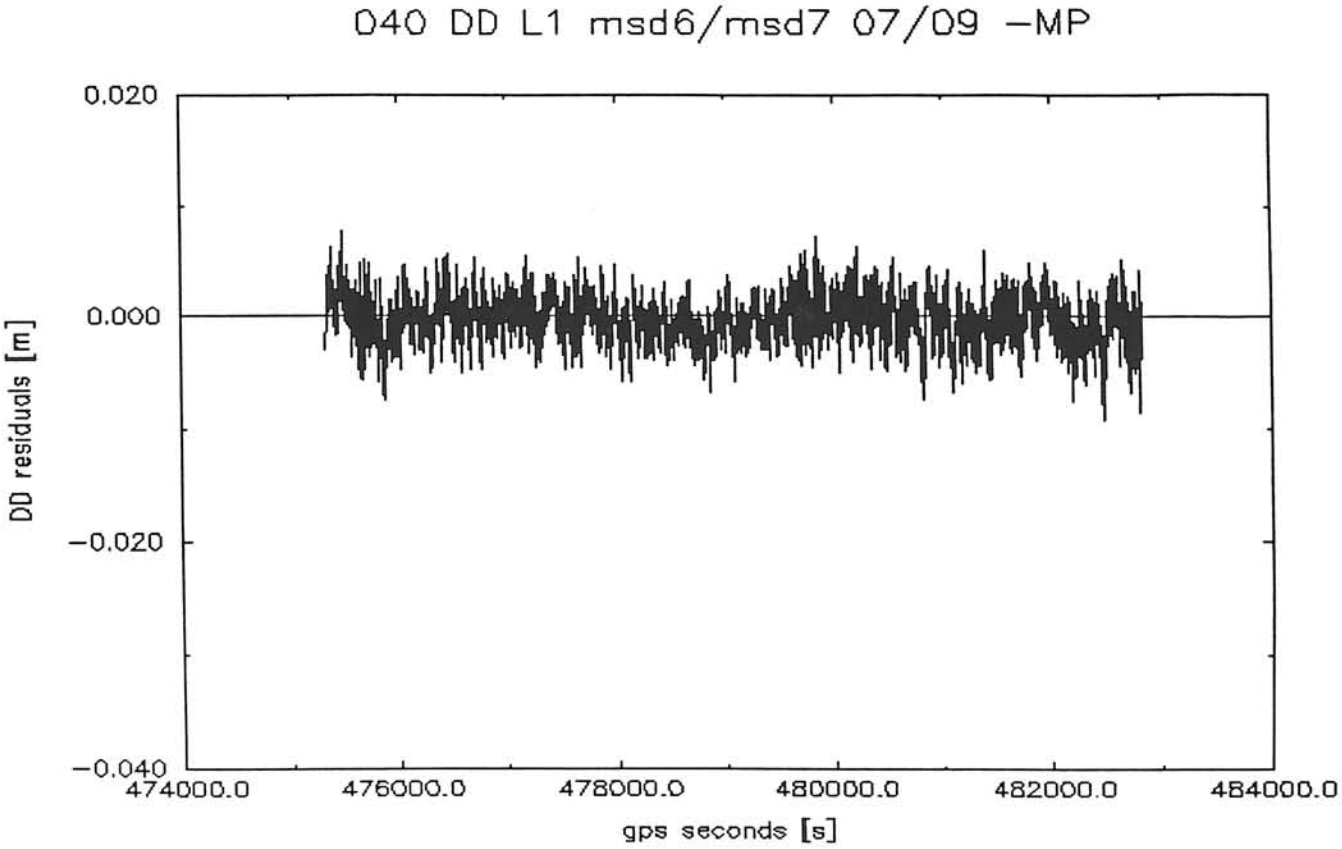
- Satellitenkonstellation (GPS) wiederholt sich nach 24 h siderischer Zeit (24 h - 3 min 56 s)
- Multipath wiederholt sich in derselben Umgebung bei gleicher Satellitenposition (Elevation, Azimut)

⇒ Differenzen der Phasenresiduen zwischen 2 Epochen mit 24 h siderischer Zeitdifferenz sind »Multipathfrei«

Doppelte Differenzen mit MP: L1



Tagesdiff. d. Doppelten Differenzen

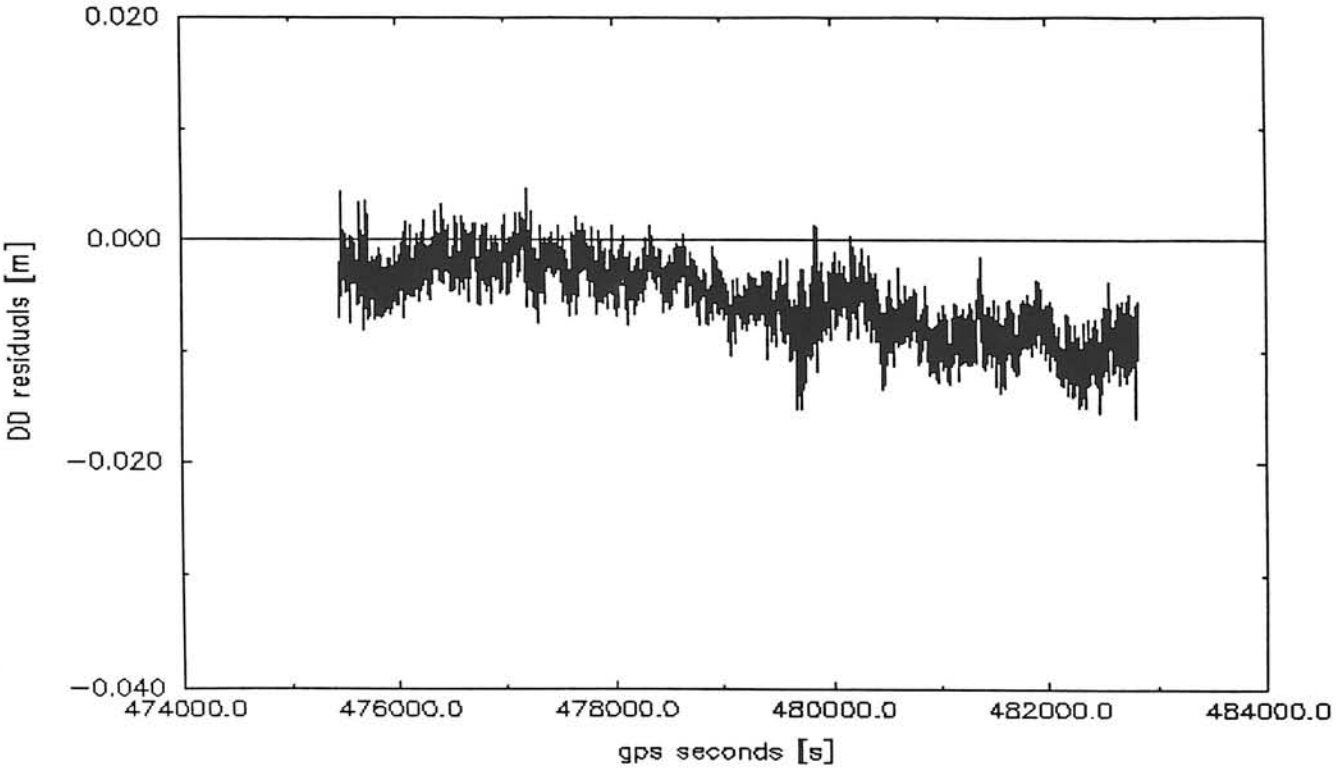


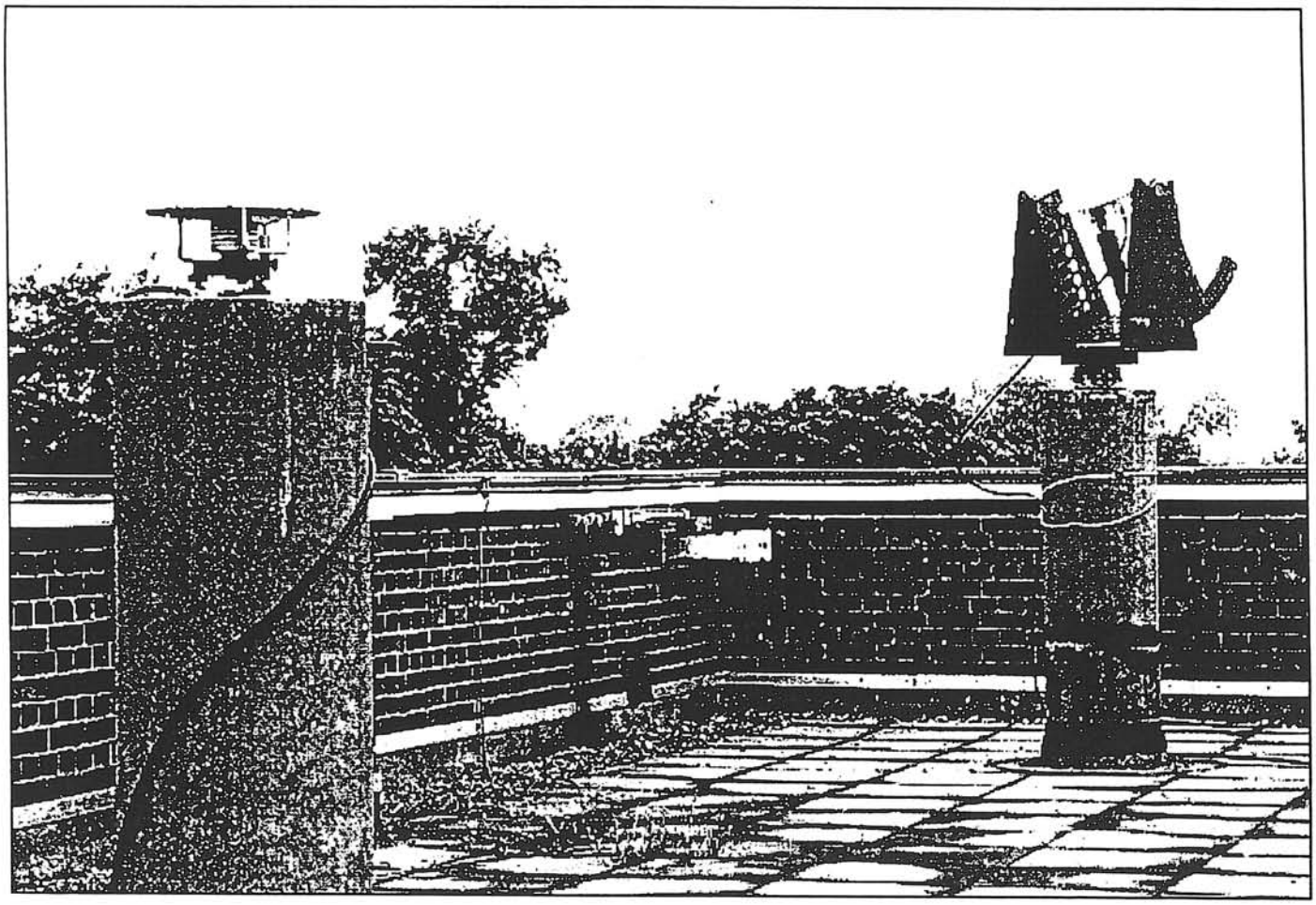
Siderische Differenz

- Siderische Doppelte Differenzen zweier GPS Meßgrößen auf kurzer Basis sind frei von
  - Satellitenbahn- und -uhrfehlern
  - ionosphärischen und troposphärischen Einflüssen
  - Mehrwegeeffekten
  - Antennenphasenzentrumsvariationen
  - Standpunktkoordinaten
- Siderische Doppelte Differenzen zeigen »weißes Rauschen«
- Rotation einer Antenne an einem Tag liefert das PCV-Signal dieser Antenne

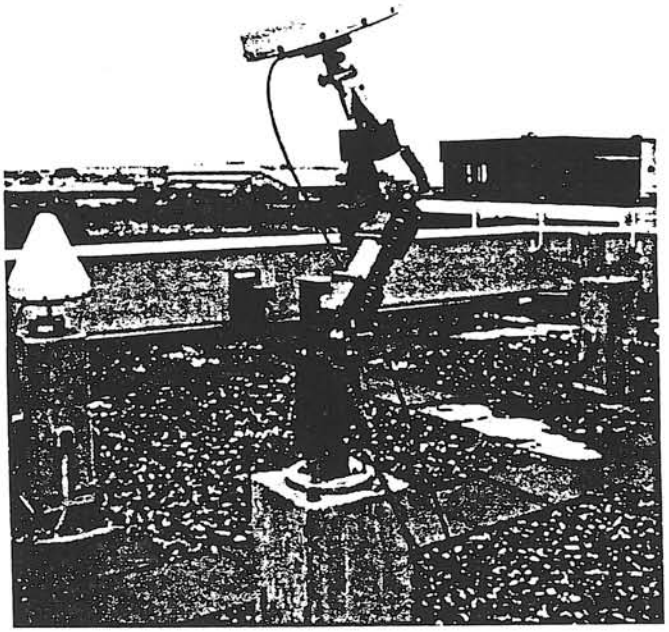
Tagesdiff. mit rotierter Antenne

040 DD L1 msd6/msd7 07/09 −MP +PCV





Automatisierung der absoluten Feldkalibrierung von GPS-Antennen



im Rahmen des Projektes

Kalibrierung von GPS-Antennenaufstellungen

durchgeführt von

Institut für Erdmessung **Geo++**

gefördert von

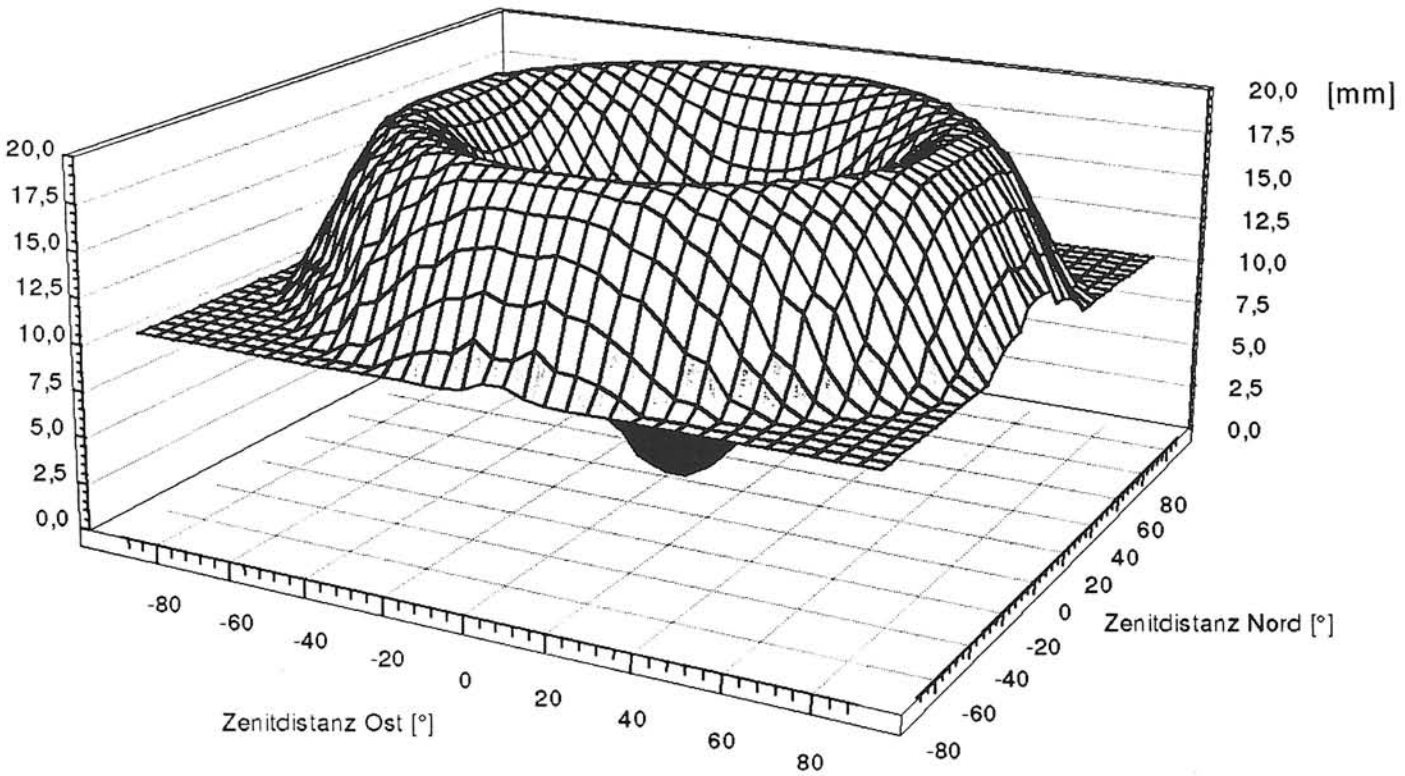
BMBF **DLR**

bmb+f Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie

unter dem FKZ 50 NA 98098

Trimble Choke Ring

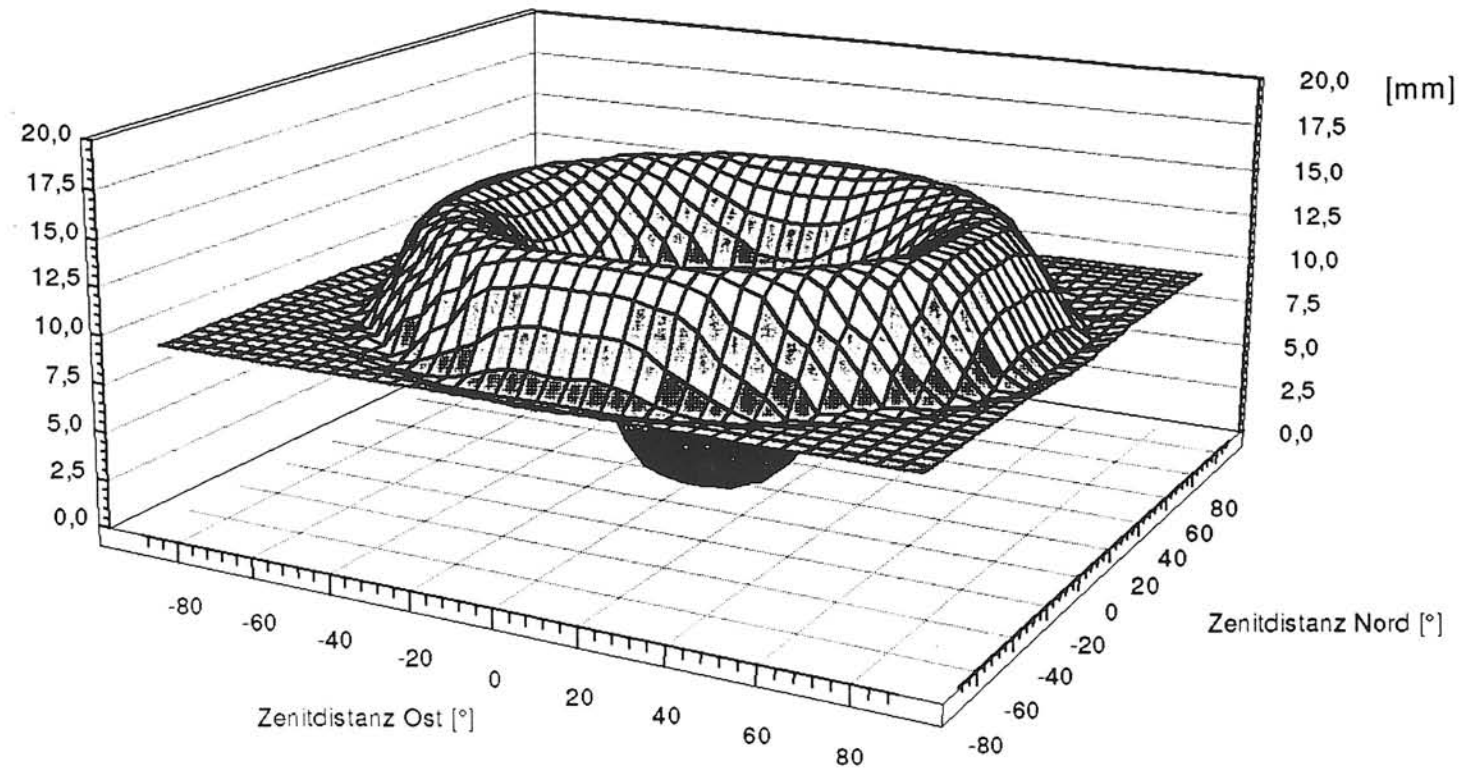
L1, Modell 8,1, reduziert um Offsets



T1-B

Ashtech Choke Ring

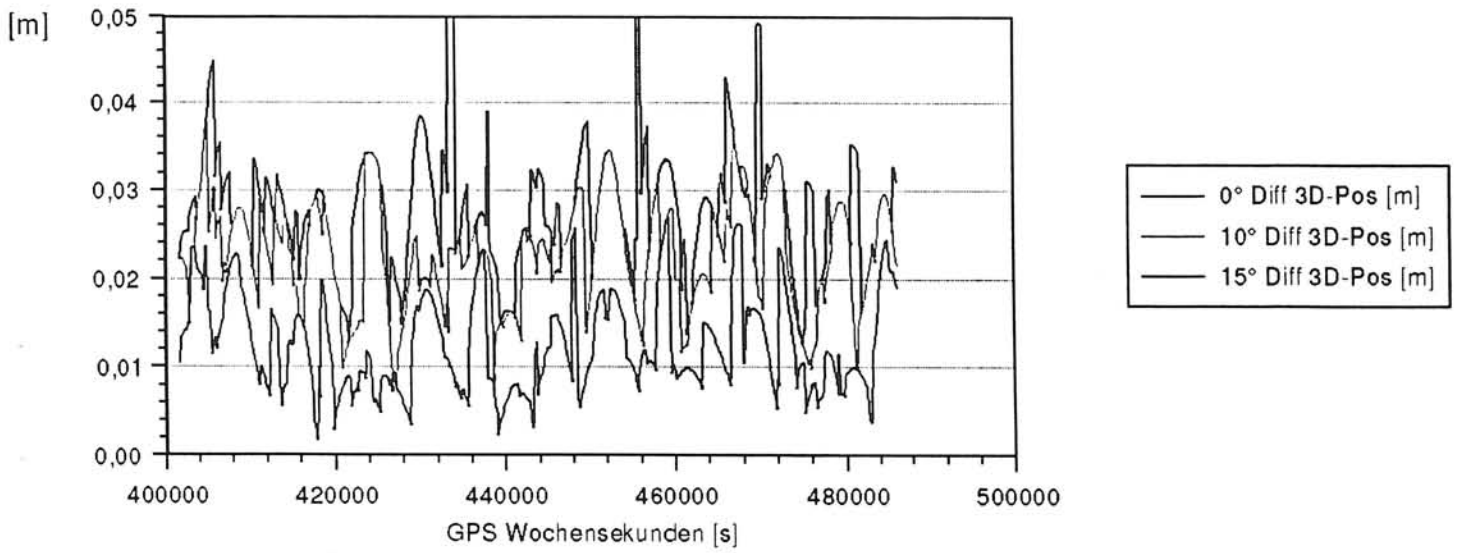
L1, Modell 8,1, reduziert um Offsets



P2-B

Einfluß PCV-Korrekturen

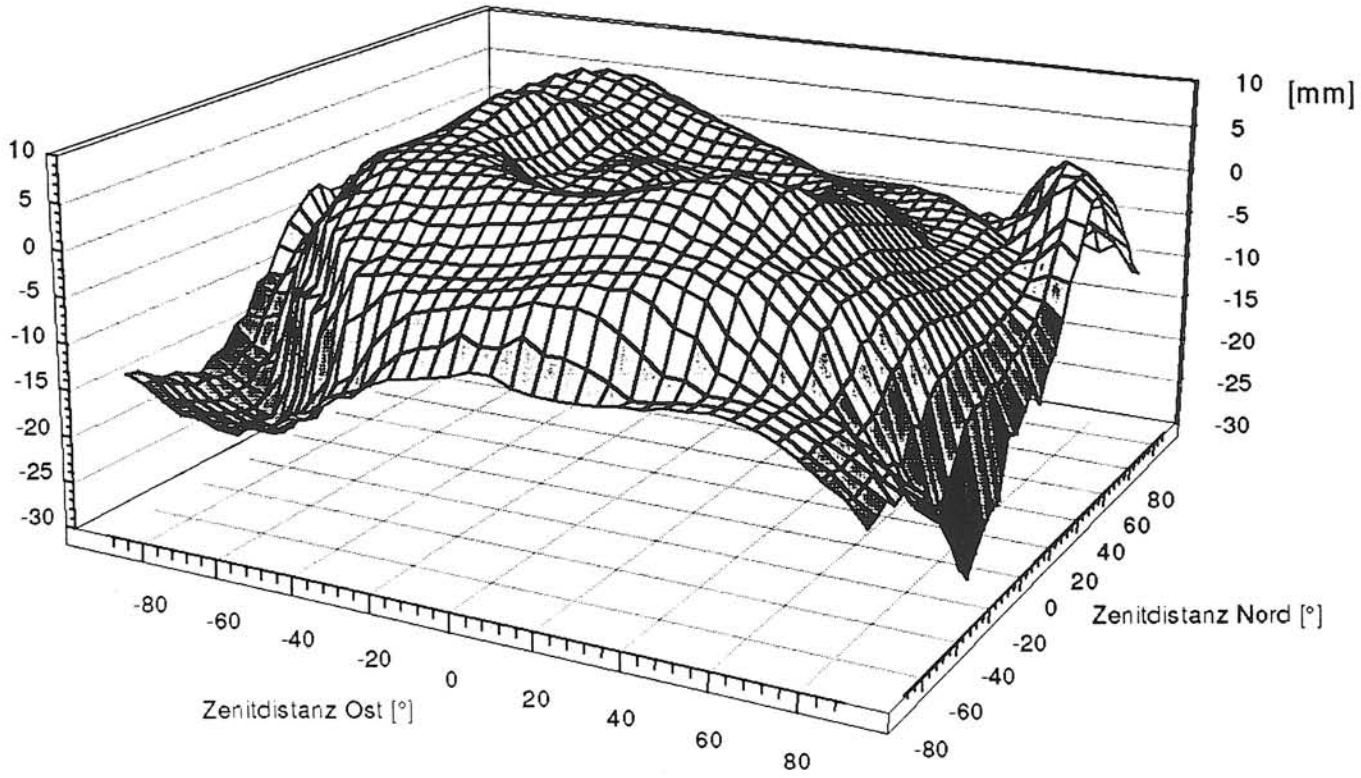
L1, 3D-Position



Trimble Choke Ring

Ashtech Geodetic II

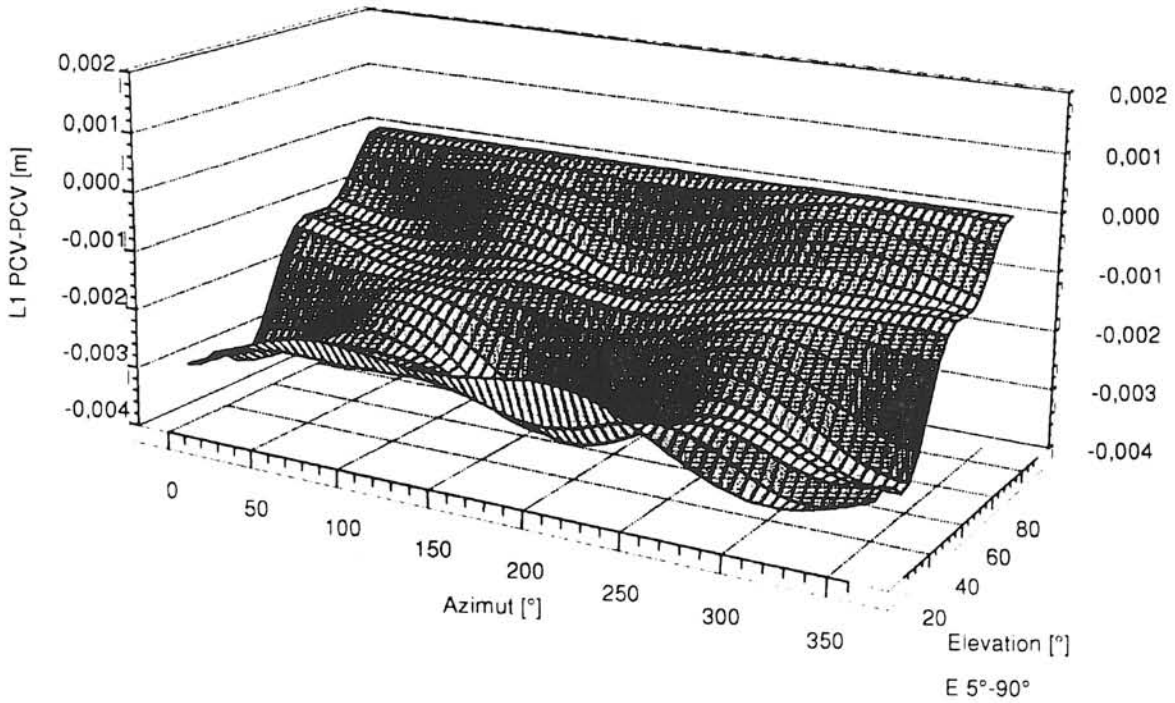
L1, Modell 10,5



IIE 219-96

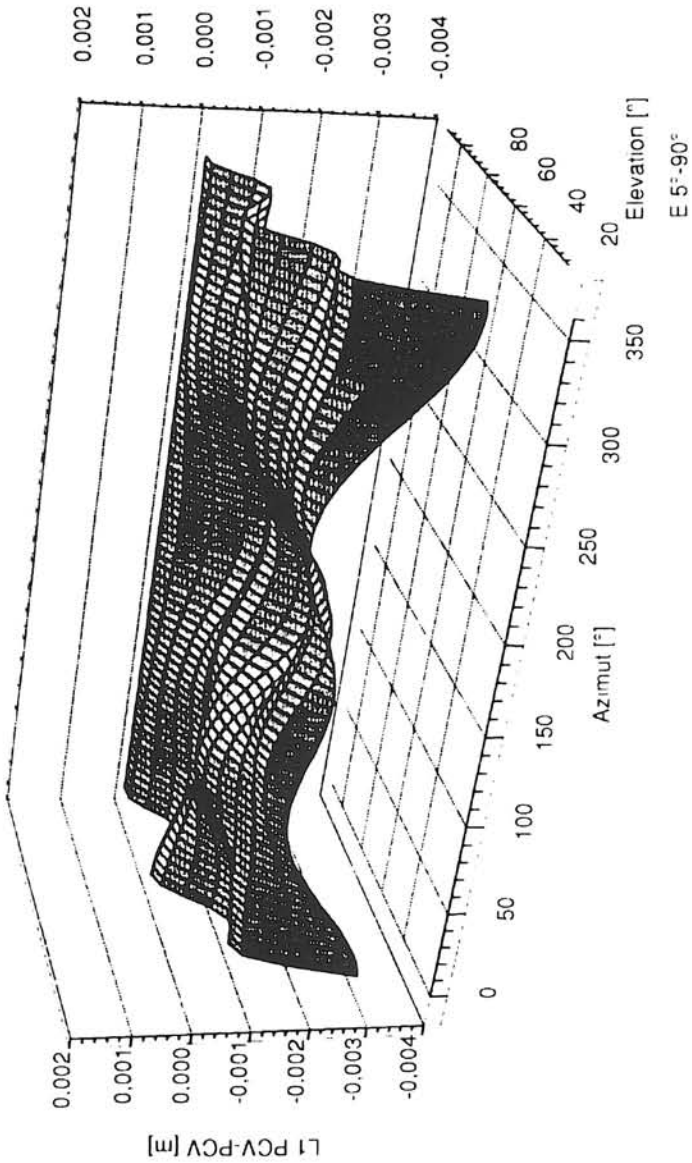
PCV Azimutabhängigkeit Ant1 L1

(8,3)-(8,1)



PCV Azimutabhängigkeit Ant2 L1

(8,3)-(8,1)



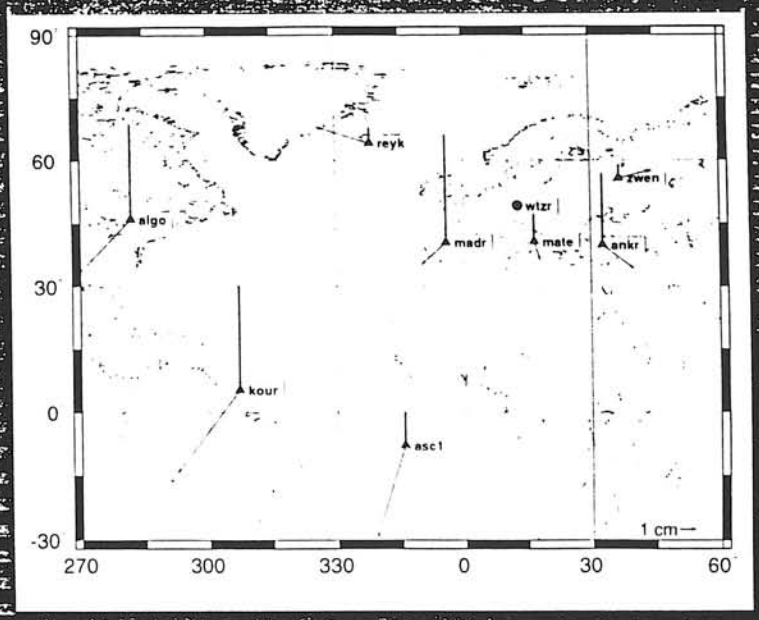
Nutzung absoluter oder relativer Kalibrierungen

- setzt gleiche Orientierung der Antennen voraus
  - nicht gewährleistet in großräumigen Netzen
  - nicht gewährleistet bei nicht horizontierten Antennen (Maschinensteuerung, Hydrographie, ...)
- Kalibrierung setzt Verfügbarkeit geeigneter Referenzantennen voraus (Dorne Margoline-T ?) bzw. Transport der relativen Information über andere Antennen (Fehlerfortpflanzung)

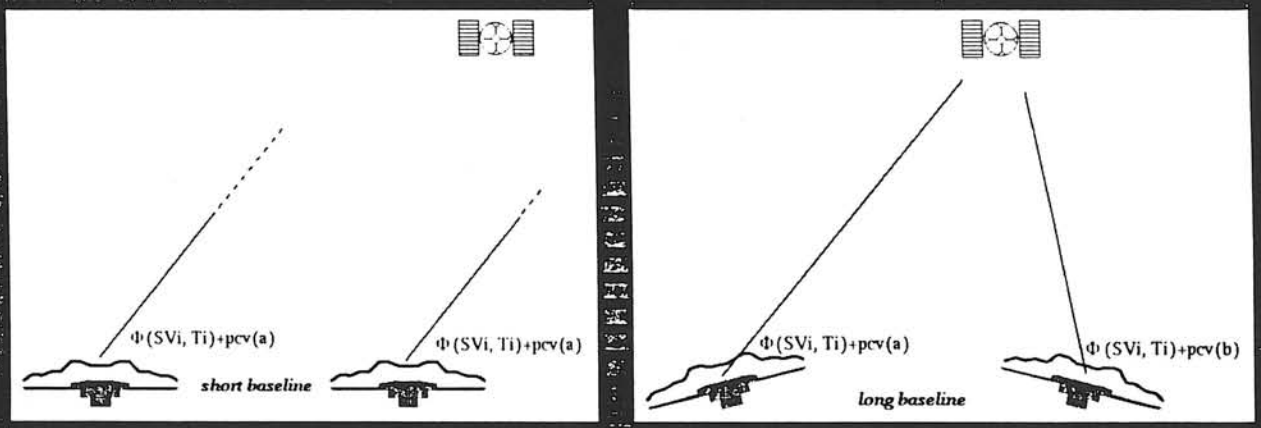
© 1999 Geo++ Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH

Using Identical Antennas -
Experiments with Absolute PCV

- effects up to the several cm
- transformations of solutions always show scale > $1.2*10^{-8}$



Advantages of Absolute PCV -
Discussion



small network > signals received under almost identical azimuth, elevation angles

large network > directions of simultaneously received signals differ more and more with increasing baseline length

Nutzung absoluter oder relativer Kalibrierungen

Absolute Kalibrierung

- für alle Anwendungen anwendbar
- Kalibrierung aufwendig

- Verwendung absoluter PCV in Zukunft unverzichtbar
- Kalibrierung absolut oder relativ zu absolut bekannten Antennen

© 1999 Geo++ Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH

Standards und PCV

RINEX und RTCM

bisher nur Offsets

RINEX auch Antennentyp

RTCM 2.2 (4.3.18 Cb) überläßt dem Betreiber die Wahl zwischen Korrektur der Antennen-PCVs aufgrund von Kalibrierungsdaten (Nullantenne) oder der Bereitstellung der Kalibrierungsparameter (nicht in Echtzeit).

© 1999 Geo++ Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH

Empfehlung für SAPOS

Abstrahlung von GPS-Korrekturdaten (Typ 20/21) bezogen auf eine »Nullantenne«,

d.h. Korrektur der Beobachtungen um absolute PCV auf allen Referenzstationen

V: damit bereits standardkonform (RTCM 2.1/2.2)

V: Roversystem muß nur die eigene Antenne korrigieren

V: individuelle Kalibrierungen oder »in situ« Kalibrierungen möglich

© 1999 Geo++ Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH

Literatur Absolute Antennenkalibrierung

Menge, F., G. Seeber, C. Völksen, G. Wübbena, M. Schmitz, (1998). Results of Absoluite Field Calibration of GPS Antenna PCV. Proceedings of the International Technical Meeting, ION GPS-98, Nashville, Tennesse. BEST PAPER AWARD.

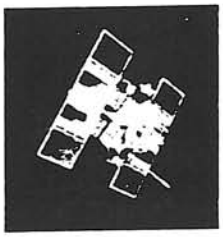
Seeber, G., F. Menge, C. Völksen, G. Wübbena, M. Schmitz (1997). Precise GPS Positioning Improvements By Antenna and Site Dependent Effects. Presented at the IAG Symposium, IUGG Assembly, September 1997, Rio de Janeiro, Brasil. IAG Symposium, No. 115, Springer Verlag.

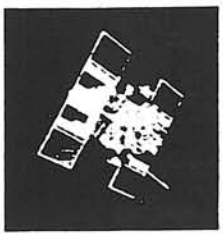
Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, G. Seeber, C. Völksen (1997). A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. Navigation, Journal of The Institute of Navigation, Vol. 44, No. 2, 247-256.

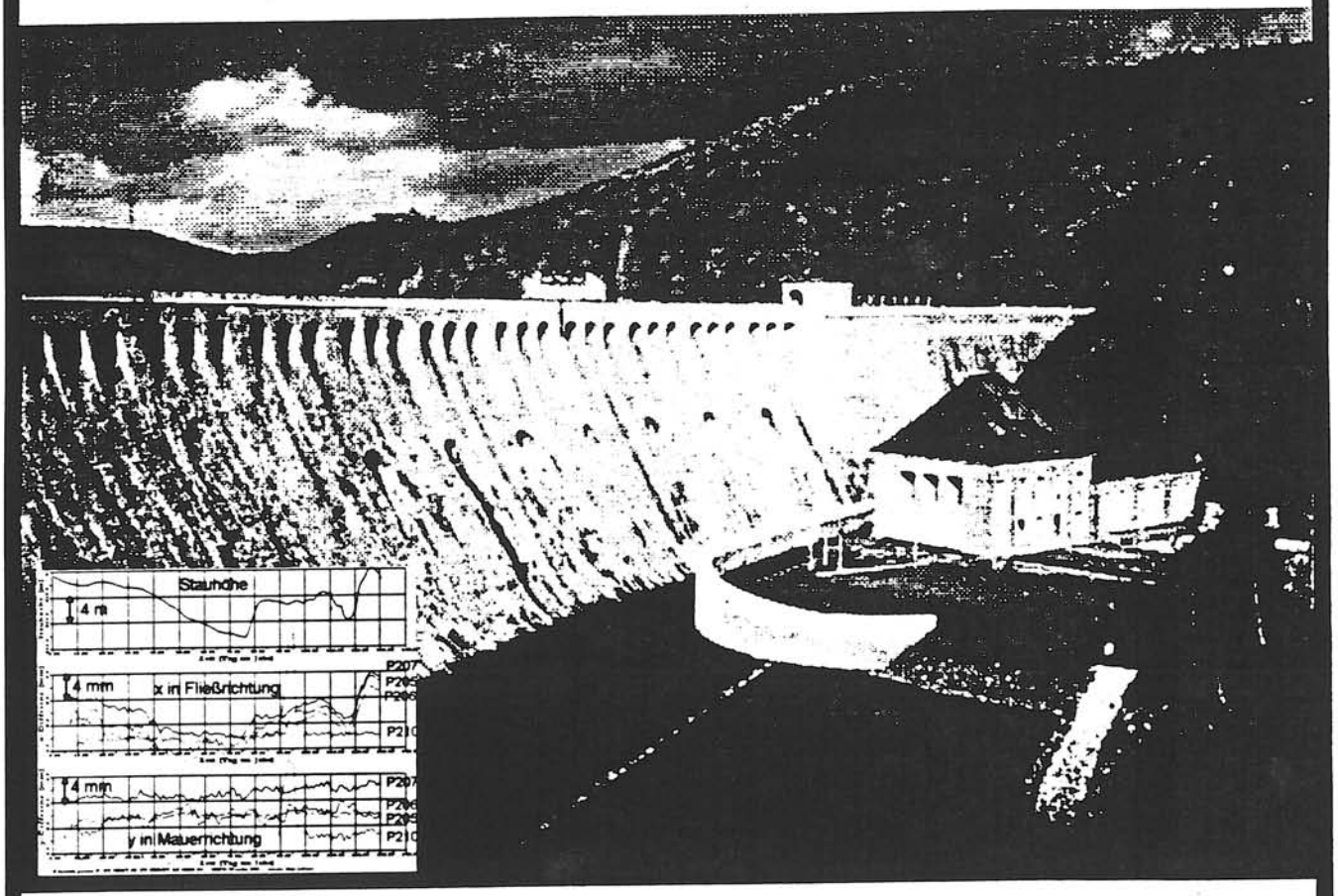
Wübbena, G., F. Menge, M. Schmitz, G. Seeber, C. Völksen (1996). A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. Proceedings of the International Technical Meeting, ION GPS-96, Kansas City, Missouri, 1205-1214. BEST PAPER AWARD.

© 1999 Geo++ Gesellschaft für satellitengestützte geodätische und navigatorische Technologien mbH

Elimination von Mehrwegeeffekten und Antennenfehlern bei Langzeitbeobachtungen







von

M. Bäumker

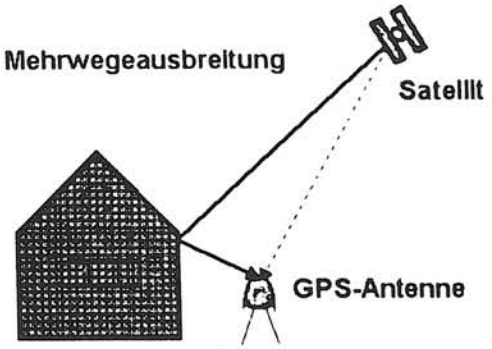
FH Bochum

Problemstellung

Hochgenaue GPS-Messungen im 1 mm- Bereich erfordern spezielle Maßnahmen zur Elimination von:

Antennenfehler: Offset, Variation des Antennenphasenzentrums (... 5 mm)

Mehrwegeeffekte:
abhängig vom Installationsort der GPS-Antenne, i.d.R. dominierend (... 2 cm !)



Beide Effekte werden durch eine schlechte Satellitenkonstellation (PDOP) verstärkt!

Gegenmaßnahmen

Idealfall

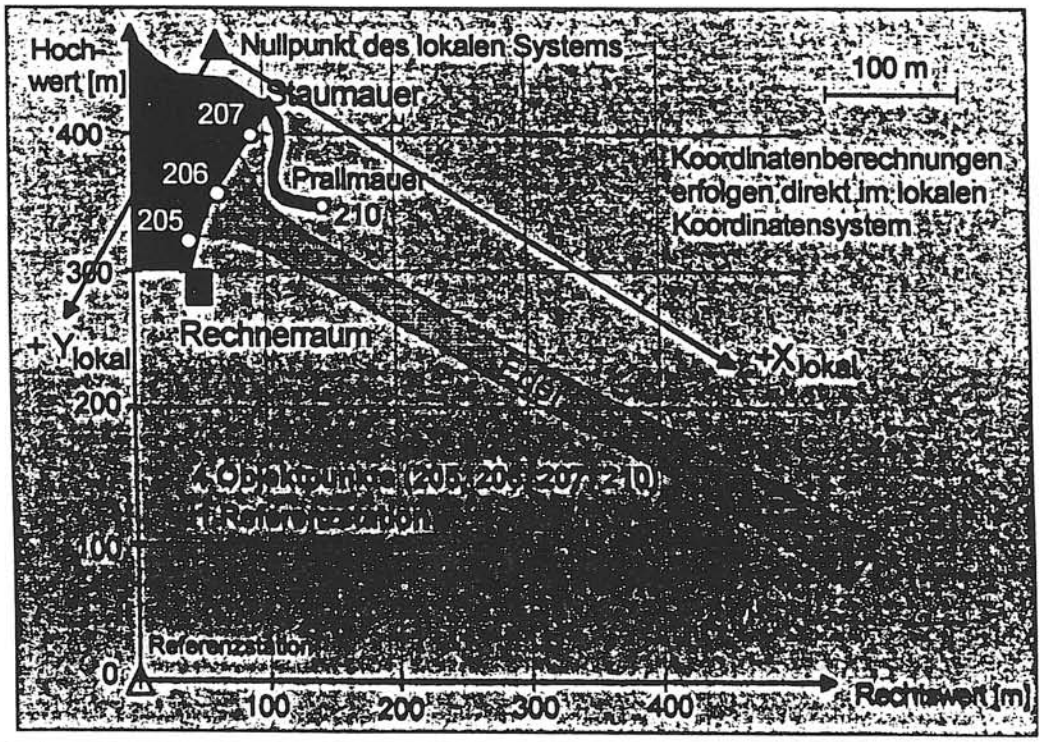
Antennenstandorte mit großer Horizontfreiheit
Choke-Ring-Antennen
Kalibration des Antennenoffsets
Kalibration der Variation des Antennenphasenzentrums

Praxis

Antennenstandorte nicht frei wählbar
keine Chokering-Antennen am Objektpunkt einsetzbar
Antennen müssen möglichst unauffällig sein

Beispiel: Überwachung von Staumauern mit GPS

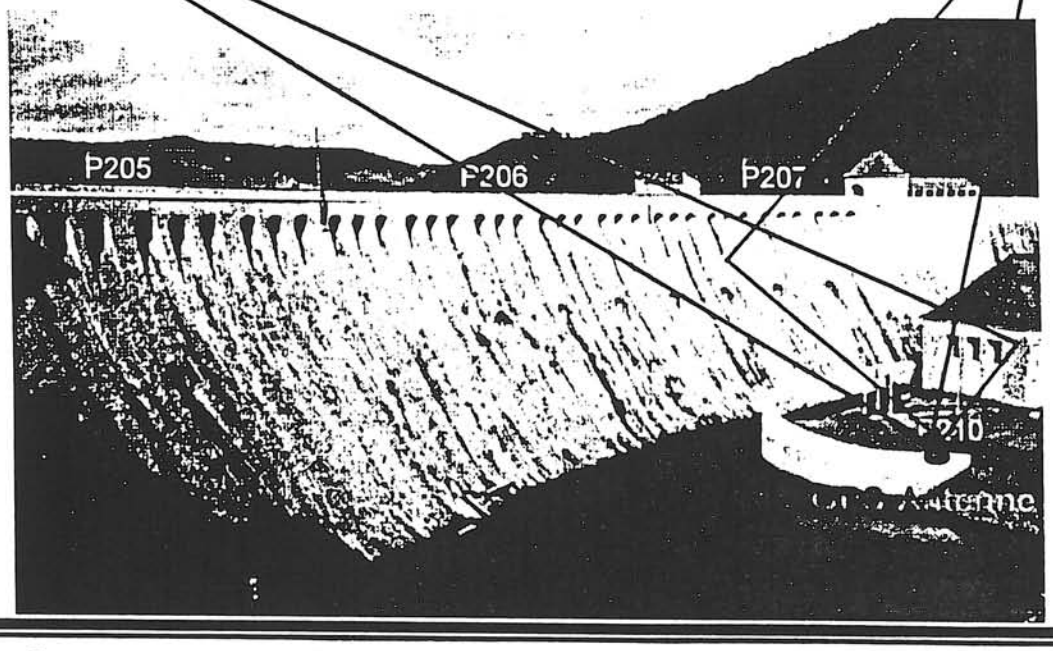
Installation des GPS-Meßsystems an der Edertalsperre



Überwachung mit GPS **FH Bochum**

Mehrwegeausbreitung

Reflektionen der Satellitensignale z.B. an Gebäuden oder Wänden



Edertalsperre **FH Bochum**

Überwachung von Staumauern

Beispiel: Edertalsperre (reger Publikumsverkehr)

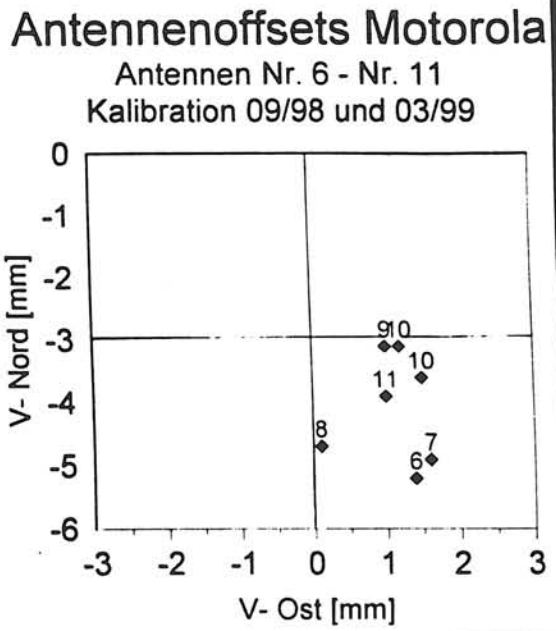
Einsatz von kostengünstigen GPS-Komponenten zur Minimierung des Vandalismusrisikos

Motorola ONCORE 8 Kanal- Einfrequenzempfänger mit Standard-GPS-Antenne (< DM 2000 .-)

GPS-Empfänger nicht sichtbar und zugänglich in den Überläufen montiert

GPS-Antennen in Zwangszentrierung voll in der Mauerkrone versenkt und fest verklebt

Vor Einbau: Einmalige Kalibration des Antennenoffsets (± 0.25 mm)



Spezielles GPS-Meßverfahren für langsame Bewegungen:

SEMIKINEMATISCH

entwickelt speziell für kostengünstige Einfrequenzempfänger, wie z.B. MX 4200, MX 9212, LEICA 9400, Motorola ONCORE

Voraussetzung: Bewegungen < 10 cm/min
erreichbare Genauigkeiten: ± 5..10 mm

In Situ Elimination von Mehrwegeeffekten und Variationen des Antennenphasenzentrums

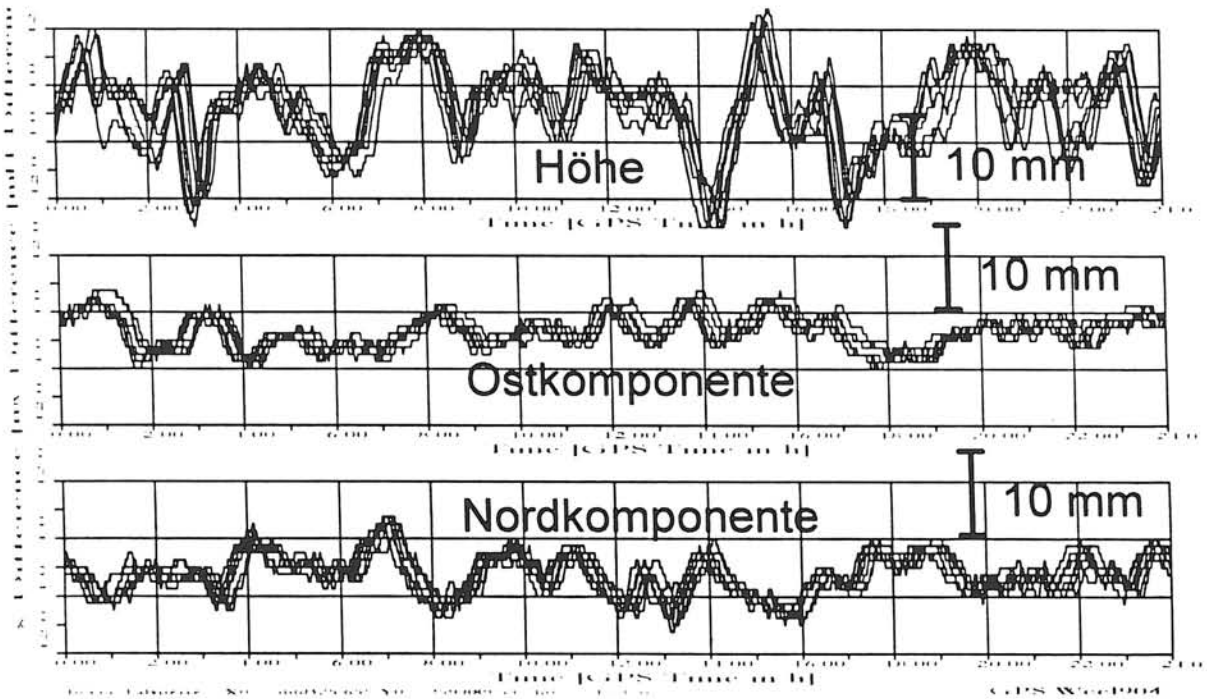
Einsatz spezieller Filter zur Trennung der Bewegungen (Signale) von diesen Störeffekten

Anwendung der Filter erfolgt direkt in Echtzeit auf die 3D- Koordinaten; komplexere Filter im Postprocessing

Anzuwendende Filter sind abhängig von den zu erfassenden Bewegungen (☞Durchlaßcharakteristik)

Durch die einfache Differenzbildung von Koordinaten oder die Korrektur der Doppeldifferenzen zwischen zwei Epochen in Abständen von 86156 s (23^h 55^{min} 56^s) ist eine Unterscheidung zwischen absoluter Bewegung und diesen Störeffekten nicht möglich!

Original 100 s- Daten einer Woche (0 - 24 h)



Dominierende Fehlerquellen

Rauschen der Trägerphasenmessungen
Mehrwegeeffekte
Variationen des Antennenphasenzentrums

Mehrwegeeffekte und Antennenfehler sind hochkorreliert mit der Satellitenkonstellation, die sich unter Berücksichtigung der mittleren Drehrate der Satelliten Ω_s (Umlaufzeit) und der Erddrehrate Ω_E nach folgender Zeitdauer ΔT wiederholt:

$$\Delta T = \frac{2\pi}{\Omega_s - \Omega_E} = 86156\,s = 23^h 55^{\min} 56^s$$

Hieraus resultiert eine Hauptstörfrequenz von

$$f_{jam} = \frac{1}{\Delta T} = 1.161 \cdot 10^{-5} Hz$$

Notchfilter

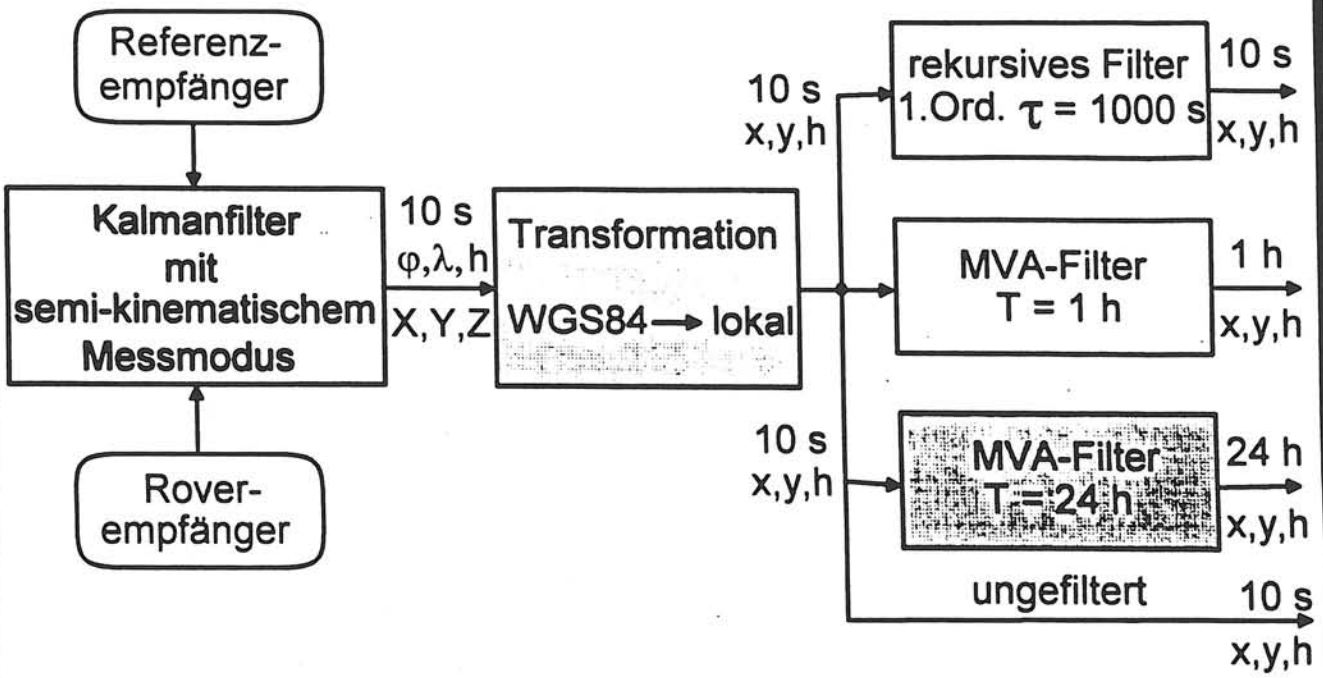
Mehrwegeeffekte und Variationen des Antennenphasenzentrums lassen sich mittels eines speziellen Notchfilters (Kerbfilter) eliminieren.

Voraussetzung:

Daten über mehrere Tage/Wochen liegen kontinuierlich mit einer hohen Datenrate vor
Antennenposition ändert sich nur unwesentlich
Empfangsbedingungen bleiben konstant

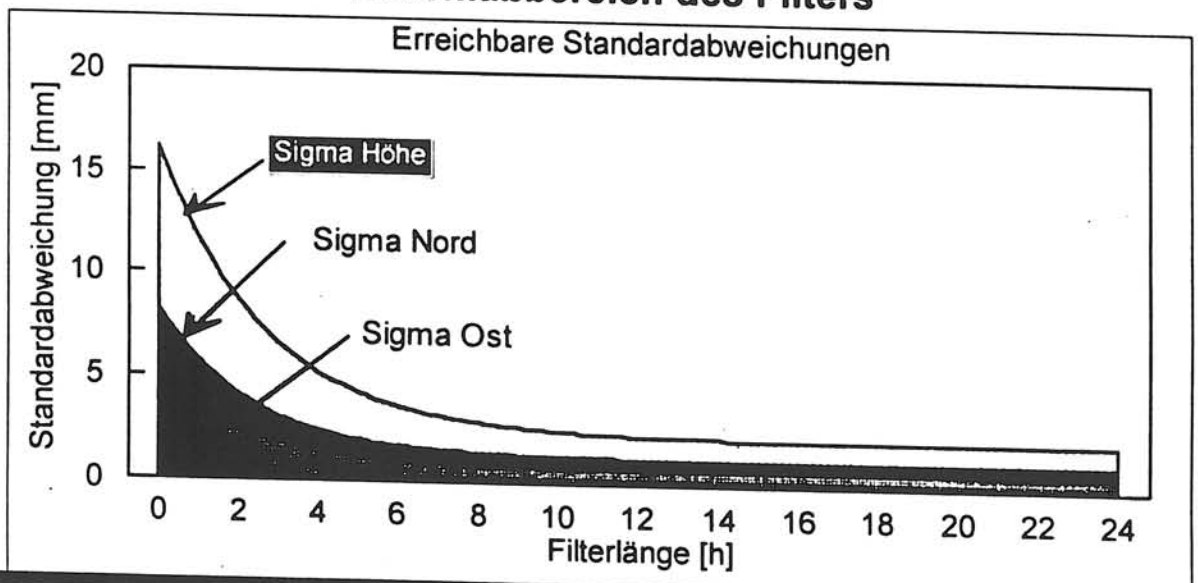
Wegen der Komplexität (Ordnung) des Filters ist der Einsatz des Filters hauptsächlich im Postprocessing sinnvoll und weniger für Echtzeitanwendungen geeignet

Eingesetzte Filter an der Edertalsperre

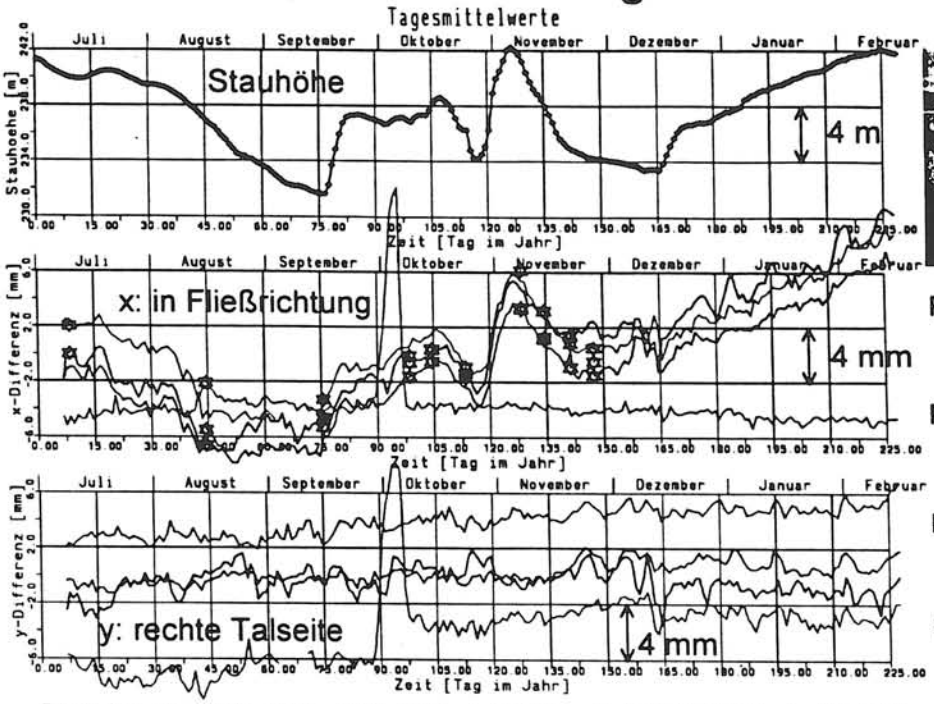


Erreichbare Genauigkeiten in Abhängigkeit von der Filterlänge

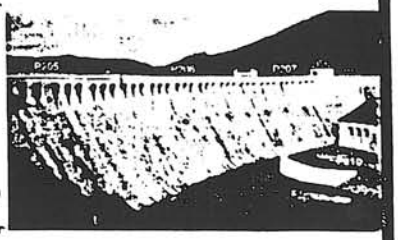
Voraussetzung: **zu erfassende Bewegungen bleiben im Durchlaßbereich des Filters**



Stauhöhen und Tagesmittelwerte von Juli 1998 - Febr. 1999 sowie konventionelle Alignementsmessungen (✡)



Edertalsperre, P205, P206, P207, P210 7.7.1998 - 13.2.1999 (GPS-Woche 965-996)



P205: Mauer, Wasserseite
(Bild oben links)

P206: Mauer, Luftseite rechts
(Bild oben Mitte)

P207: Mauer, Luftseite links
(Bild oben rechts)

P210: Prallmauer im Tal,
Antenne auf verstellbarem Kreuzschlitten
(Bild unten rechts)

Edertalsperre **FH Bochum**

Zusammenfassung

Antennenfehler und Mehrwegeeffekte sind bei Genauigkeitsanforderungen im mm- Bereich zu elimieren!

Variationen des Antennenphasenzentrums wirken wie die ortsabhängigen Mehrwegeeffekte, die i.d.R. dominieren (auch bei Chokering-Antennen)!

☺ ☺ ☺ **Lösung** ☺ ☺ ☺

- ☞ **Kalibration des Antennenoffsets (einmalig)**
- ☞ **Simultane Elimination der Variationen des Antennenphasenzentrums und der Mehrwegeeffekte durch z.B. semi-kinematische Meßmethode und zusätzliche Filter, die auf die zu erwartende Bewegung des Rovers abzustimmen sind.**

Überwachung mit GPS **FH Bochum**

Rolf Hohlfeld

IEEE
Std 145-1983
(Revision of ANSI/IEEE
Std 145-1973)

P. 20

IEEE Standard
Definitions of Terms for Antennas

Definition:

phase center. The location of a point associated with an antenna such that, if it is taken as the center of a sphere whose radius extends into the far-field, the phase of a given field component over the surface of the radiation sphere is "essentially" constant, at least over that portion of the surface where the radiation is significant.

F.F.!

angular

→ Winkelbereichs-Kriterium

NOTE: Some antennas do not have a unique phase center, but a smeared phase center!

$\pm \theta/°$, in dem $\Delta\phi'' \leq 22.5°$ $(\lambda_0/8)$

Antenna Standards Committee of the
IEEE Antennas and Propagation Group

© Copyright 1983 by

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc
345 East 47th Street, New York, NY 10017

No part of this publication may be reproduced in any form, in an electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

ANALYSIS OF REFLECTOR ANTENNAS

W. V. T. RUSCH, Prof. (†1992)
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA
LOS ANGELES, CALIFORNIA

P. D. POTTER
JET PROPULSION LABORATORY
PASADENA, CALIFORNIA

ACADEMIC PRESS 1970 NEW YORK — LONDON

The phase center may be experimentally determined. With reference to Fig. 3.5, the phase difference $\Delta\Phi(\theta)$ as a function of observation

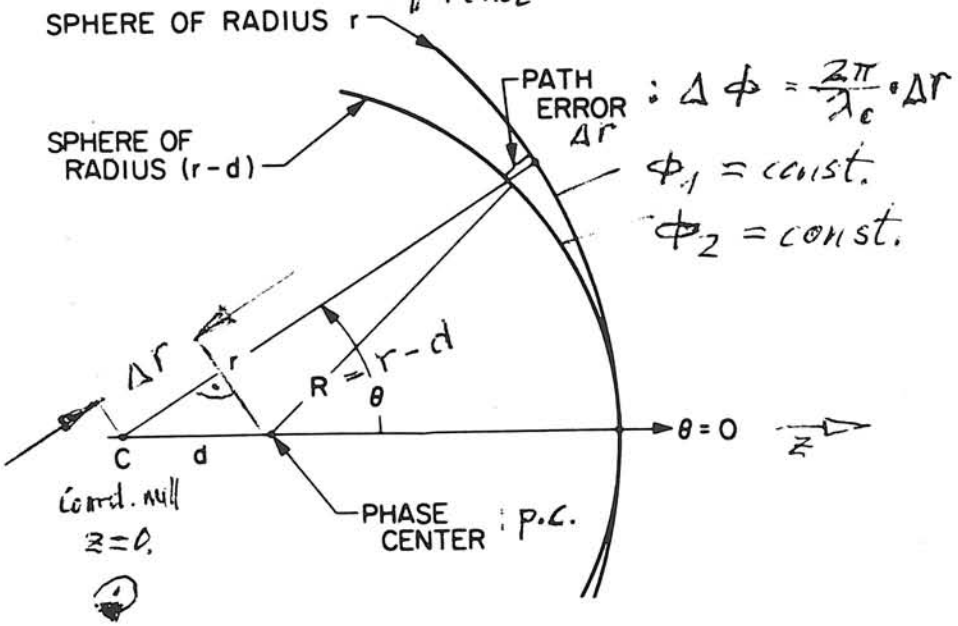


FIG. 3.5. Phase center geometry.

direction about the point c $(z=0)$ is

$$\Delta\Phi(\theta) = kd(1 - \cos\theta) + \Phi(\theta = 0) \tag{3.15-10}$$

from which

$$d = \frac{\Delta\Phi(\theta)}{\underbrace{k}_{2\pi/\lambda_c}(1 - \cos\theta)} \rightarrow \frac{d}{\lambda_0} = \frac{\Delta\phi(\theta_c)}{2\pi(1-\cos\theta)} \tag{3.15-11}$$

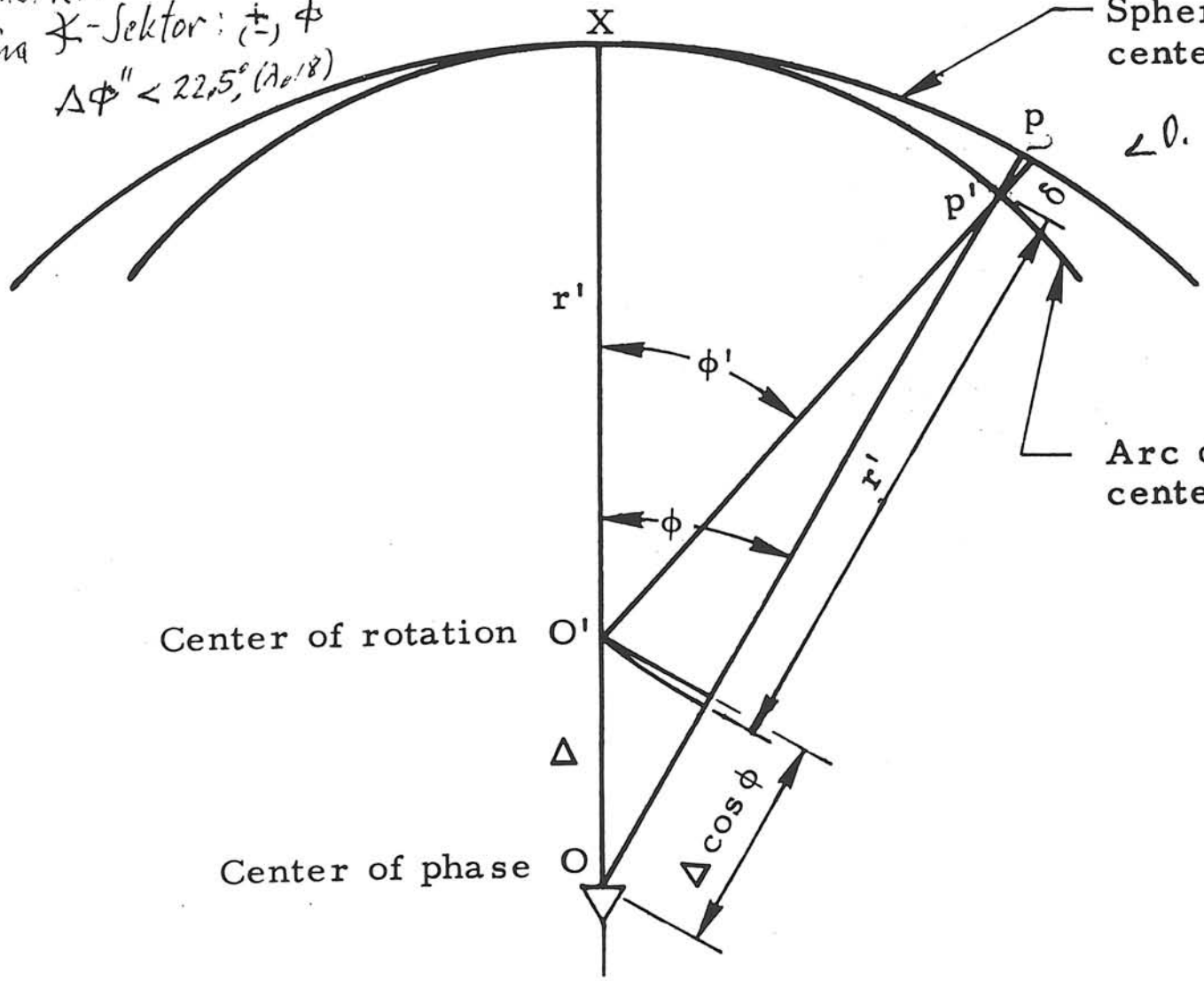
where $\Phi(\theta = 0) \equiv 0$.

3.16 Effective Antenna-Noise Temperature

Every antenna receives noise power from its environment. By analogy to the familiar concept of thermal noise power generated by a matched termination, an *effective antenna-noise temperature* T_a is defined as follows:

$$T_a \equiv W_a/k(\Delta f) \quad (°\mathrm{K}) \tag{3.16-1}$$

p.c. Kriterium.
in ∡-Sektor: (±) ϕ
$\Delta\phi'' < 22{,}5°$ (λ_0 18)



$\angle 0.$

$\delta \hat{=} \Delta r = (1 - \cos\phi)\cdot\Delta$

$\Delta\phi'' = \frac{2\pi}{\lambda_0}\cdot\Delta r$

$\Delta = f(\phi)$!

MICROWAVE
ANTENNA
MEASUREMENTS

Edited by

J. S. Hollis, B. E. E., M. S. E. E.

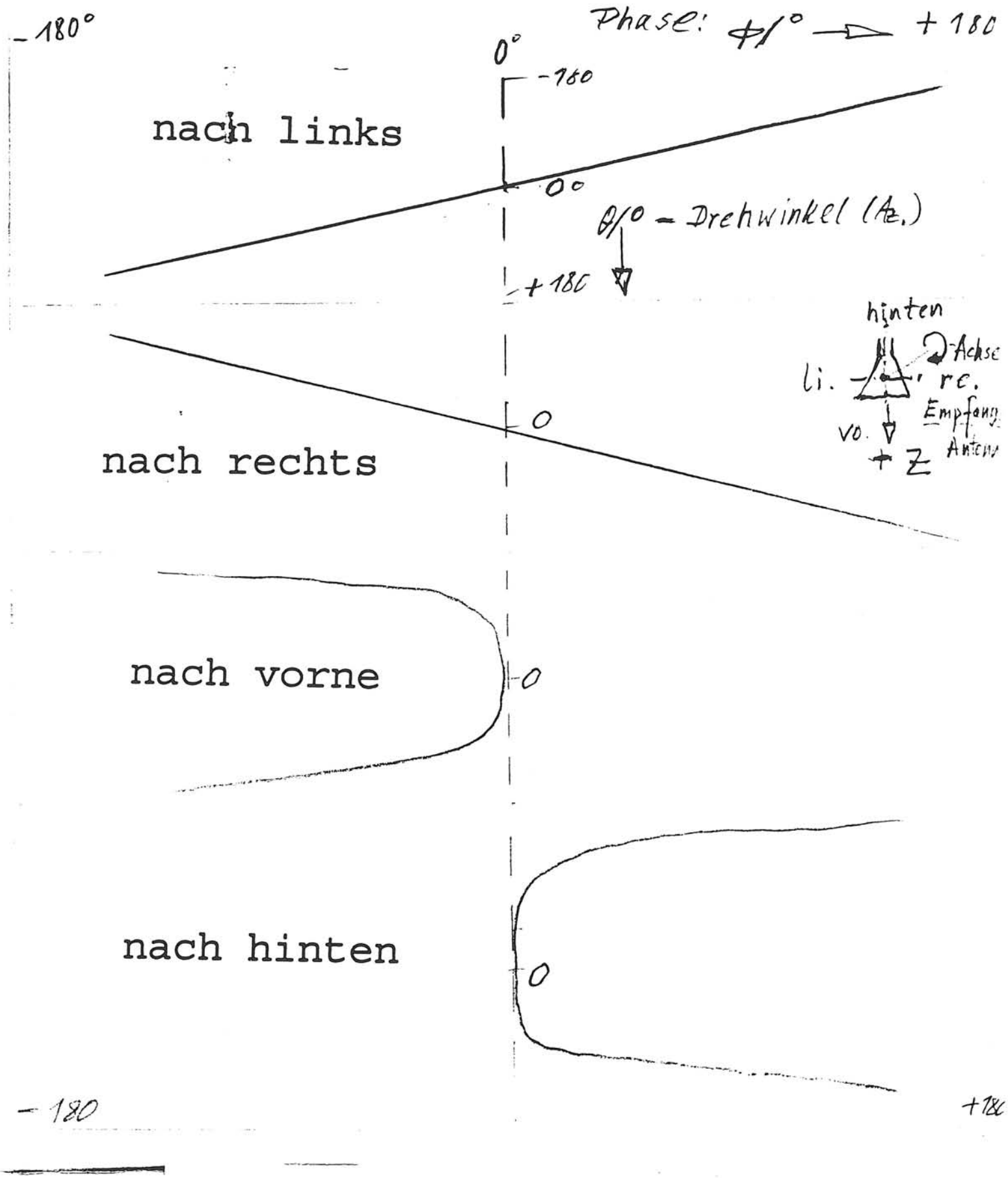
T. J. Lyon, B. E. E., M. S. E. E.

L. Clayton, Jr., B. S., M. S., Ph. D.

Scientific-Atlanta,
Atlanta, Georgia,

July 1970, p. 9-1

FIGURE 9.9 Geometry illustrating deviation of phase measured by probe from constant phase front of spherical wave. When Δ is small, $\phi' \to \phi$.



PHASENZENTRUM-Messung
KORREKTUREN beim Messen

SCHIEBEN der Antennen
in Bezug auf die Drehtisch-ACHSE

Fig.49 Strahlungsozentrum (z_{az}) und Phasenzentrum (z_p)

f = 2 GHz

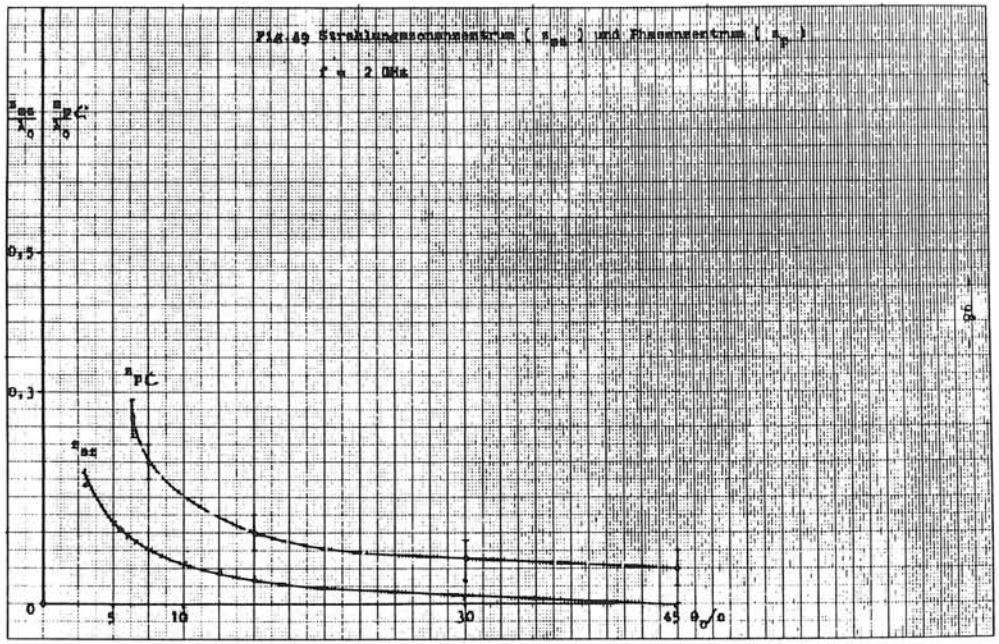


Fig.47 Strahlungsozentrum (z_{az}) und Phasenzentrum (z_p)

f = 1 GHz

Die Intervallbreite von ± 0,05·λ_0 bei der z_p-Kurve deutet die Grenzen an, in denen die Phasenzentren bei der angegebenen Genauigkeit liegen.

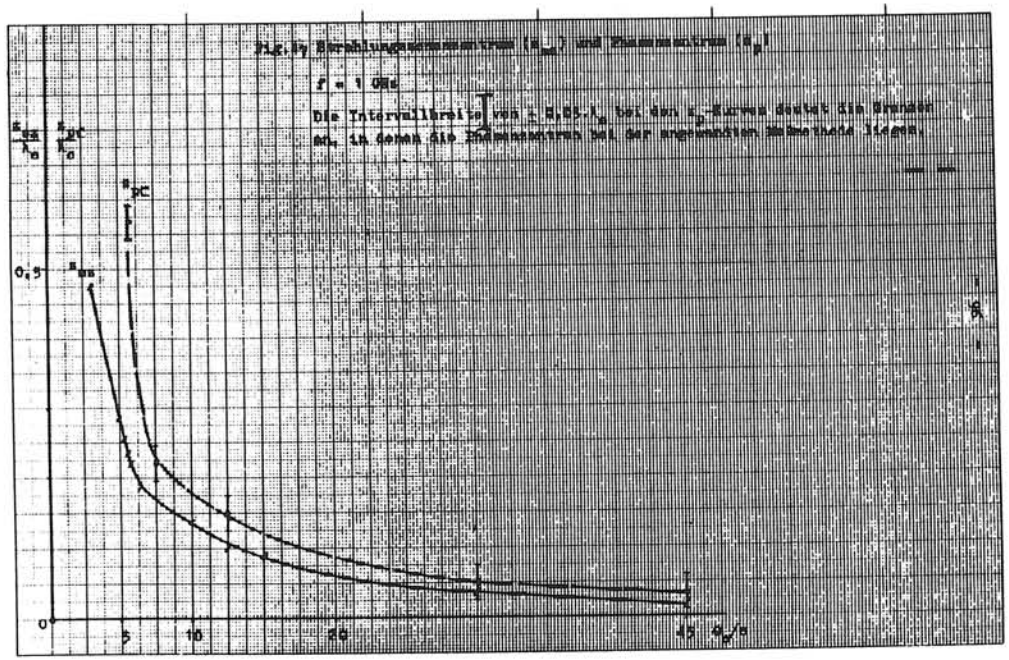


Fig.50 Strahlungsozentrum (z_{az}) und Phasenzentrum (z_p)

f = 2,5 GHz

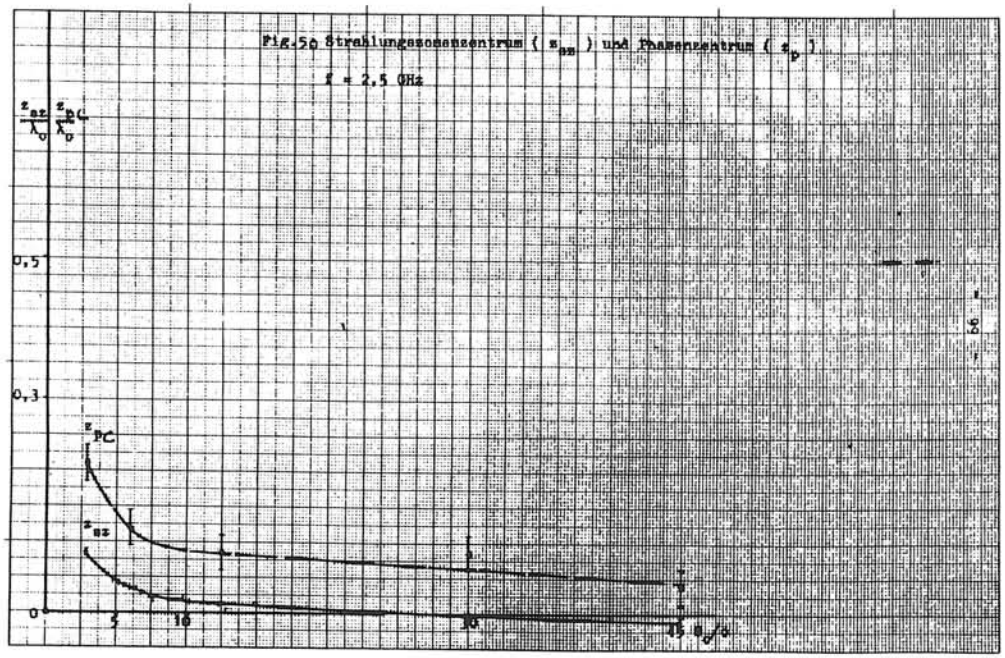
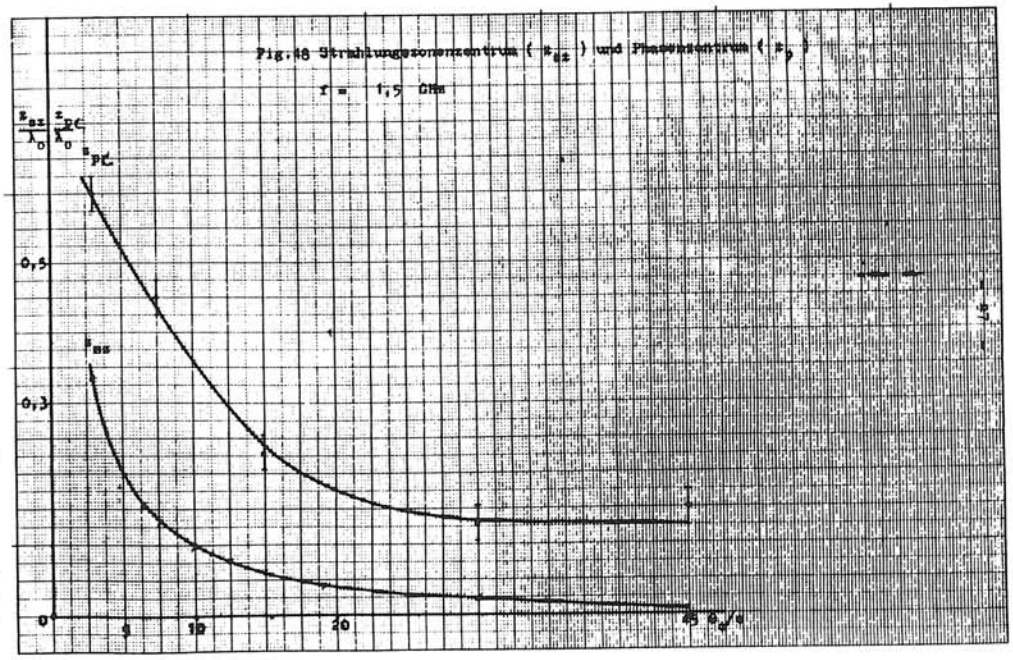
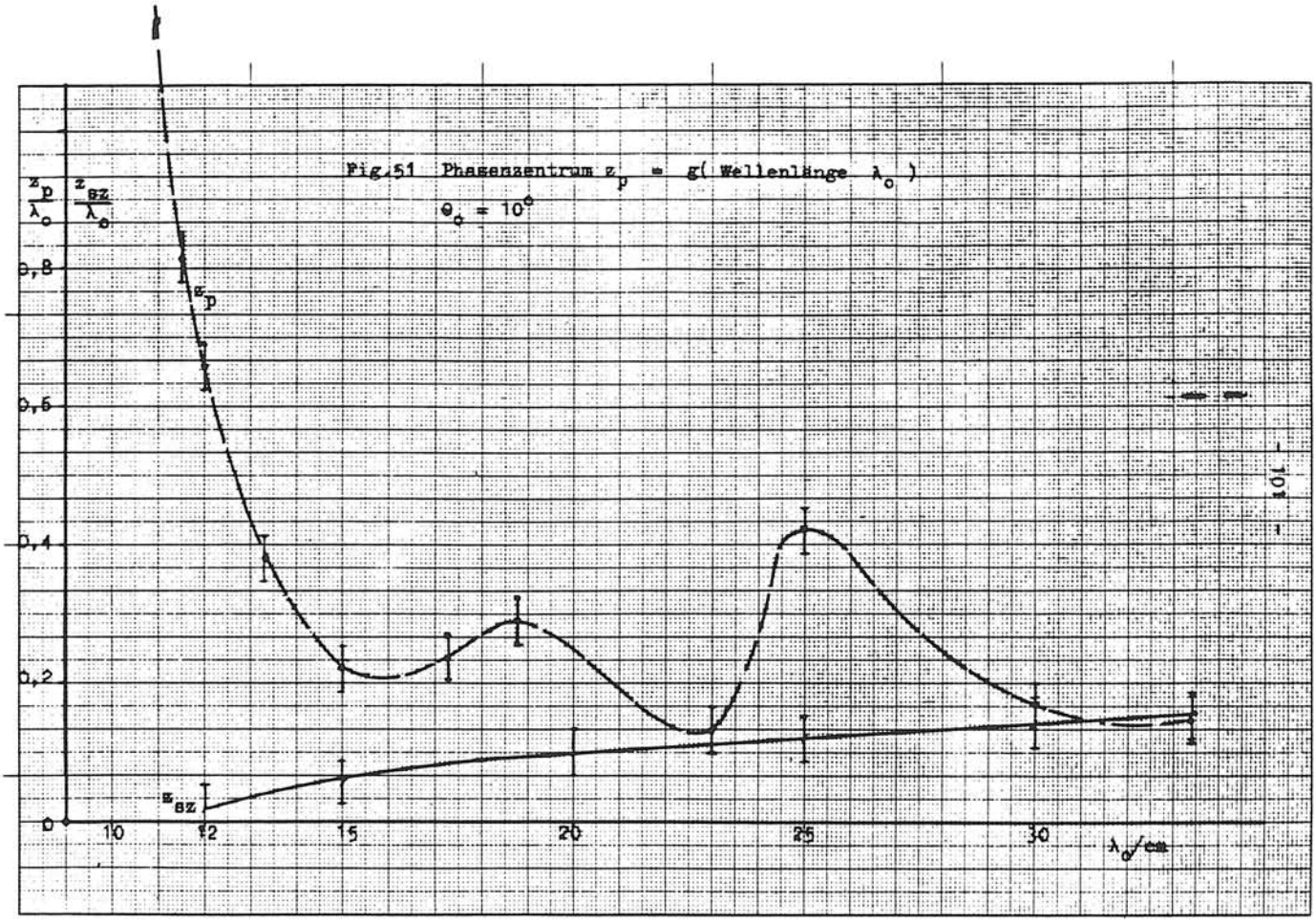


Fig.48 Strahlungsozentrum (z_{az}) und Phasenzentrum (z_p)

f = 1,5 GHz





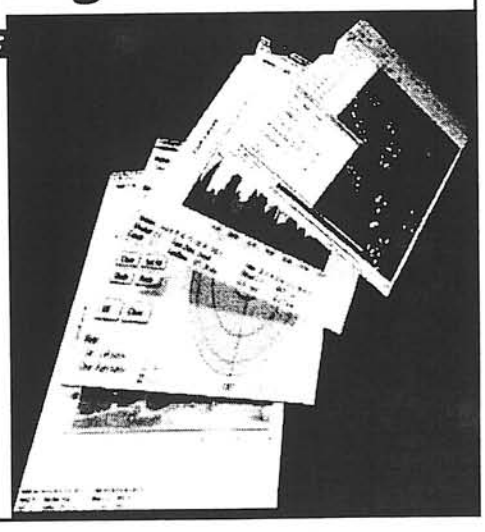
.\\

Zusammenfassung
==========
-IEEE-Definition des Phasen-Zentrums(phase center,pc) einer Antenne, 1983
-ITG/VDE-Definition existiert nach "Begriffen" v.1993 (noch) nicht!
-Messung des pc nach RUSCH u.POTTER 1970 [1]
-Messung des pc. nach HOLLIS et.al. "Scientific-Atlanta" Handbuch[2]
-Praktische Hinweise: Schieben der Antenne ueber dem Drehpunkt
des Drehtischs (in der Absorberkammer [3])
-Spezielle Verhaeltnisse bei einer kegelfoermigen, logarithmischen
Spiral-Antenne [Diss.1969]
Abhaengigkeit des pc vom Kegeloeffnungs-Winkel u.der Wellenlaenge

Literatur: 1,2 u. Diss. im Text
[3]Wohlleben,R.,Mattes,H.,Lochner,O., The "Dynamics" of the
MPIfR Anechoic Chamber between 300 and 2mm Wavelength,
11th ESTEC Antenna Workshop on "Antenna Measurements", Gothenburg/
Schweden, 20.June, 1988, pp. 225- 235.

SPECTRA PRECISION

Modellierung von Antennenpha



Herbert Landau
Spectra Precision TERRASAT

SOFTWARE APPLICATIONS & PRODUCTS

SPECTRA PRECISION

Fehlereinflüsse

- Unterschied zwischen mechanischem und elektrischem Phasenzentrum
- Typische Größenordnung:
  - Horizontale Offsets < 10 mm
  - Vertikale Offsets < 100 mm
  - Unterschied zwischen L1 und L2
  - Frequenzabhängigkeit bei GLONASS
  - Elevationsabhängig < 20 mm
  - Azimutabhängig < 20 mm
  - Maßstabseffekt: 0.01 ppm
- Hohe Korrelation mit Höhen- und Troposphärenkomponente

SOFTWARE APPLICATIONS & PRODUCTS

SPECTRA PRECISION

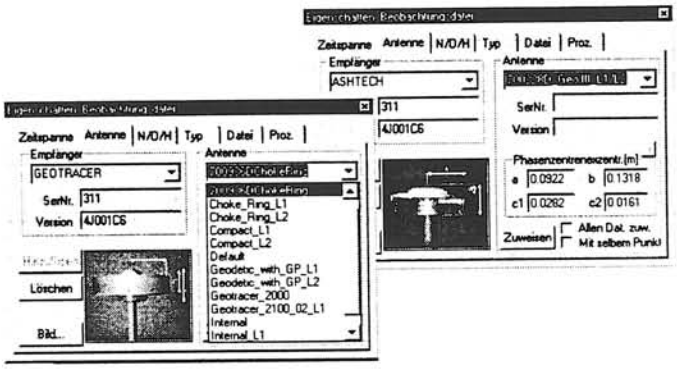
Kalibrierung

- Feld- oder Laborkalibrierung
- Relative Kalibrierung
  - Mit einer gewählten Antenne als Referenz (Dorne Margolin)
- Absolute Kalibrierung
  - Durch Versuchsaufbau derart, daß auf einanderfolgenden Tagen mit sich wiederholender Empfänger-Satellitengeometrie beobachtet wird (3 min 56 sec)
- Meist wird nur die Elevationsabhängigkeit betrachtet
- Abhängigkeit von Azimut gegeben, doch da die meisten Antennen eine rotationssymmetrische Ausbildung aufweisen, wird dies oft vernachlässigt

SOFTWARE APPLICATIONS & PRODUCTS

SPECTRA PRECISION

Definition des Antennentyps



SOFTWARE APPLICATIONS & PRODUCTS

SPECTRA PRECISION

Definition des Phasenzentrums

- Offset des elektromagnetischen Zentrums zum Referenzpunkt für L1 und L2 in
  - Nord
  - Ost
  - Höhe
- Modellierung des elevationsabhängigen Anteils über Tabelle für L1 und L2

SOFTWARE APPLICATIONS & PRODUCTS

SPECTRA PRECISION

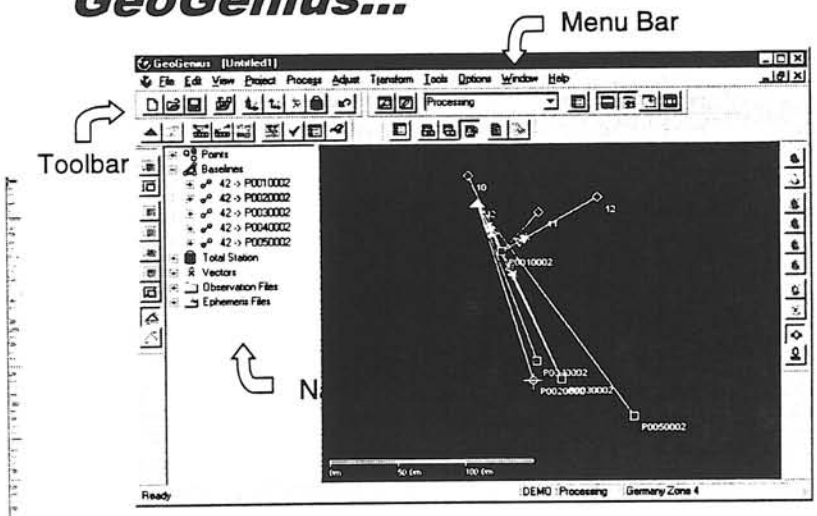
Unterstützte Dateiformate

- Folgende international gebräuchlichen Dateiformate werden unterstützt
  - NOAA/NGS National Geodetic Survey (CORS)
  - International Geodetic Service (IGS)
  - EUREF
- Dateien sind frei verfügbar und können von Internetservern erhalten werden
- Alle Daten, die von obigen Institutionen zur Verfügung gestellt werden, werden unterstützt.

SOFTWARE APPLICATIONS & PRODUCTS

SPECTRA PRECISION

GeoGenius...



SOFTWARE APPLICATIONS & PRODUCTS

SPECTRA PRECISION

Über GeoGenius

- Entwickelt auf der Basis "neuester" Technologie
- Extrem schnelle Datenprozessierung
- Unterstützt GPS/GLONASS, Totalstationsdaten und Nivellement
- Einsatzbereich Vermessung, Navigation, Photogrammetrie und GIS Aplikationen
- Konfigurierbar
- Lauffähig unter Windows 95/98 und Windows NT
- Macro Sprache

SOFTWARE APPLICATIONS & PRODUCTS

Vergleich von GPS-Antennen für Kampagnen und Permanentstationen am Observatorium Lustbühel Graz (OLG)

P. Pesec[1], G Stangl[2]

[1]Institut für Weltraumforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften
[2]Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen

Ziele

- Kalibrierung für Feldmessungen mit unterschiedlichen Antennentypen
- Untersuchung der Koordinatenänderungen durch Ersatzantennen an Permanentstationen
- Auswirkung von Radom-Kuppeln auf Permanentstationen

Methoden

- Bildung lokaler Cluster bevorzugt (max. 50 m)
- Überprüfung durch lokale geodätische Einmessung (Lage+Höhe)
- Überprüfung durch lange Basislinien (10 – 1000 km)

Ergebnisse

- Bestätigung/Verwerfen von bestehenden Phasenkorrekturen (Firmen, IGS)
- Erkennen von fehlerhaften Antennen (Phasenzentrum verschoben/instabil)
- Feststellen der Verschiebungswerte für Korrektur
- Einfluß der Umgebung auf Meßergebnisse (Multipath, Schnee)

Chronik

1992 Cluster OLG-Gaberl

Vergleich Ashtech, Leica, Rogue, Trimble

Phasenkorrekturen IGS

Basislinien bis 10 m und 50 km

→ signifikante Abweichung Leica ca. 25 mm

1994 Neue Phasenkorrekturen IGS (Elevationsabhängigkeit)

Test an Kampagnen (20 – 300 km)

→ bis auf Leica alle Differenzen im mm-Bereich

→ sofortige Applikation (vor offizieller Einführung)

→ Neuberechnung älterer Kampagnen

1996 Nachweis der Kompatibilität für AREF

privates Netz in Österreich (300 Punkte)

Antennen Choke Ring, Trimble, Leica, Geotracer (insges. 9 Typen)

Zusammenarbeit mit TU-Wien

Dachcluster (max. 20 m), Feldcluster (ca. 20 km)

→ Feststellung neuer Korrekturen für Leica und Geotracer

→ Bestätigung der IGS-Korrekturen

→ Radom-Problem bei Ashtech

1997- Untersuchung an Permanentstationen

Probleme mit Radomkuppeln in EUREF (z.B. MOPI)

Ausscheiden fehlerhafter Antennen (VILH, WIEN)

Test der eigenen Radom-Produktion (PFAN, VILH, WIEN)
Veränderungen unter der Signifikanzgrenze ($2\sigma = 5$ mm)

Noch ungelöstes (Multipath?) Problem SBGZ

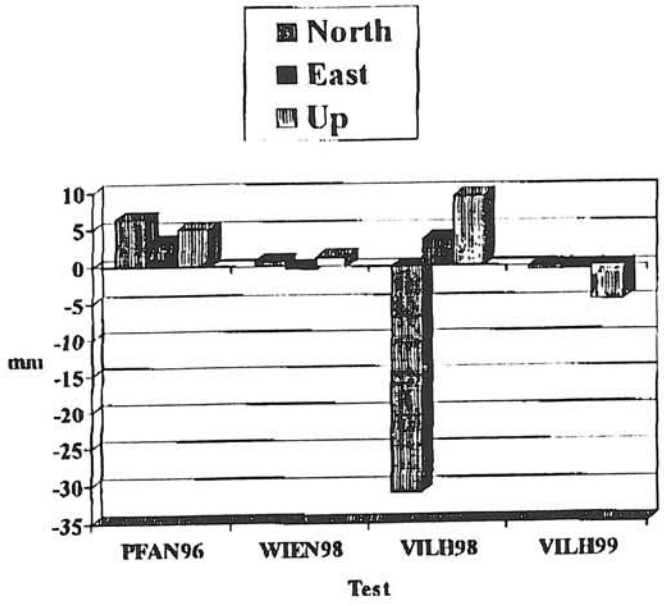
<u>Zukunft</u>

Phasenkorrekturen für Radom-Konfigurationen wichtig

Noch breitere Palette an Antennentypen berücksichtigen (RTK)

Störeinflüsse (elektromagnetisch) abschätzen

Differenzen der Basislinien in mm



PFAN96 = S003-M002 (GPS RADOM -konventionell)

WIEN98 = S002-S001 (GPS RADOM-GPS OPEN)

VILH98 = GRAZ-VILH (Fehlerhafte D. M. TRIM - TR GEOD L1/L2 GP)

VILH99 = GRAZ-VILH (GPS RADOM- GPS OPEN)

Resümee der Abschlußdiskussion

Workshop zur Festlegung des Phasenzentrums von GPS-Antennen am 28.04.1999 im Geodätischen Institut der Universität Bonn

Eine von Herrn Manfred Spata (LVermA NRW) anhand des Leitfadens "Anforderungsprofil zur GPS-Antennen-Kalibrierung" (Anlage) moderierte Abschlußdiskussion verdeutlicht wissenschaftliche und praktische Aspekte der Thematik.

Vorbemerkung zum Eichrecht

Zunächst wird auf die rechtliche Grundlage der Eichung von Vermessungsinstrumenten gemäß § 2 Abs. 1 Bundeseichgesetz von 1992 hingewiesen. Derzeit fehlt immer noch eine bundesrechtliche "Eichverordnung für Vermessungsinstrumente", ebenso fehlt es an einer EU-Richtlinie für Eichung. Hieraus folgt zwangsläufig, daß gemäß § 26 alle Vermessungsstellen von der Pflicht zur Eichung durch die Eichämter ausgenommen sind und somit für die Eichung (Kalibrierung) ihrer Vermessungsinstrumente und -geräte grundsätzlich eigenverantwortlich sind.

Mechanischer Antennenreferenzpunkt ARP

Es wurde als vorrangige Aufgabe angesehen, die bestehenden Kalibrierergebnisse der unterschiedlichen Stellen vergleichbar zu machen. Aus der Sicht der Praktiker ist hier zunächst eine eindeutige Festlegung der mechanischen Antennenreferenzpunkte (ARP) wie z.B. die Höhenmarkierung als Unterkante Grundplatte, notwendig. Auf den ARP beziehen sich dann sowohl die eigentlichen Antennenparameter (Offset und richtungsabhängige Phasenkorrekturen) als auch die äußeren Zentrierelemente. Dieses scheinbar triviale Problem führt in der heutigen GPS--Praxis häufig zu Höhenzentrierfehlern. Vertreter der Antennenhersteller und der AdV werden im laufenden Jahr zur eindeutigen Festlegung der ARP, unter Berücksichtigung der antennenspezifischen Montierungen, Abstimmungen treffen. Die in der IGS-Datei angegebenen und bereits international anerkannten ARP sollen dabei nach Möglichkeit übernommen werden.

Modellansatz der Antennenparameter

Es besteht Einvernehmen über den Umfang des Antennenparameter-Modells. Die Parameter (jeweils getrennt für L1 und L2) sind generell zu unterscheiden in eine Nullpunktkorrektion (konstanter Offset nach Lage und Höhe eines sog. mittleren elektrischen Phasenzentrums) sowie azimut- und elevationsabhängige Phasenkorrektionen. Diese können durch Polynom-, Polygon- oder Kugelfunktionsansatz modelliert werden. Die Definition eines mittleren elektrischen Phasenzentrums führt

zu einer minimalen Auswirkung der richtungsabhängigen Phasenfehler auf das Positionsergebnis, wenn letztere nicht angebracht werden (wichtig für Nutzer, die nicht die höchste Genauigeit anstreben). Dies gilt jedoch nur, wenn die verwendete Elevationsmaske bei der Auswertung identisch mit derjenigen bei der Bestimmung des mittleren Phasenzentrums ist (eine Folge der Definition des mittleren Phasenzentrums).

Es wurde darauf hingewiesen, daß die konstanten Lage- und Höhen-Offsets und die elevations- und azimutabhängigen Phasenkorrekturen stets gemeinsam, wenn auch in zwei aufeinanderfolgenden Schritten, bestimmt werden müssen. Bei dem Vergleich der Parameter aus verschiedenen Bestimmungen ist eine Umrechnung der richtungsabhängigen Korrekturen erforderlich, die den Unterschied der Offset-Festlegung berücksichtigt. Die Angabe der Phasenkorrekturen geschieht meist in tabellarischer Form (z.B. in 5 Grad-Schritten) oder aber auch in Form von Koeffizienten der Polynom- oder Kugelfunktionsentwicklungen.
(Anlage: Bsp. aus der IGS-Tabelle)

Genauigkeitsanforderungen

Nach bisheriger Erfahrung reicht es für die Genauigkeitsanforderungen der Vermessungsverwaltungen aus, Kalibrierergebnisse für Gruppen gleichartiger Antennentypen zu bestimmen. Bei höheren Genauigkeitsanforderungen (z.B. auch bei SAPOS-Permanentstationen) werden individuelle Antennenkalibrierungen als notwendig erachtet.

Bei Vermessungsaufgaben mit Genauigkeitsanforderungen im Zentimeterbereich sollte die Angabe des Höhenoffsets, d.i. die vertikale Differenz zwischen mittlerem elektrischen Phasenzentrum und Höhenmarkierung (ARP) genügen. Dies gilt somit auch für kinematische GPS-Einsätze, wo die Zentimetergenauigkeit nicht unterschritten wird.

Bei präzisen Vermessungen im Millimeterbereich, vor allem bei der (relativen) Höhenbestimmung, kann auf eine volle Berücksichtigung der Antennenparameter (Offsets und richtungsabhängige Phasenkorrekturen) nicht verzichtet werden.

Es wurde darauf hingewiesen, daß bei größeren Netzen durch die Abweichung der Zenitrichtungen (Effekt der Erdkrümmung) auch bei Verwendung gleicher Antennentypen eine richtungsabhängige Phasenkorrektur in der Auswertung notwendig ist.

Kalibriermeßverfahren

Es werden generell Absolutverfahren (z.B. im Mikrowellen-Absorber-Raum) und Relativverfahren (mit bekannter Referenzantenne im Feld) unterschieden. Die

absolute Kalibrierung ist wegen der speziellen Anforderungen an den Versuchsaufbau (z.B. echoloser Raum, ferngesteuerte 3D-Antennenrotation) nur an wenigen Stellen realisierbar; sie bleibt höheren Genauigkeitsanforderungen (z.B. auch bei SAPOS-Permanentstationen oder sogen. Eichantennen von Vermessunsstellen) vorbehalten. Antennenergänzungen durch Grundplatte oder Radom erfordern jeweils eine spezielle Kalibrierung. Die theoretisch wünschenswerte In-Situ-Kalibrierung entspricht heute noch nicht den praktischen Gegebenheiten. Die Feldkalibrierung mit Elimination von Mehrwegeeffekten erfordert einen wesentlich erhöhten, mehrtägigen Meßaufwand.

In Abhängigkeit von dem angestrebten Genauigkeitsniveau des Kalibrierergebnisses sind Meßgeometrie und Meßdauer im Einzelfall festzulegen, wobei 24hMessungen mit vollständiger Satellitengeometrie bevorzugt werden. Pauschale Vorgaben bestehen jedoch offenbar nicht.

Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, daß erstmalige Kalibrierungen im Zuge der Antennenbeschaffung ausreichen und turnusmäßige Wiederholungen im Normalfall nicht notwendig sind.

Kalibrierauswertung

Heute erlauben einige am Markt befindliche GPS-Auswerteprogramme eine Bestimmung von Antennenparametern. Einzelne Kalibrierergebnisse können sich in Abhängigkeit von den zugrundeliegenden Modellansätzen und der Kalibrierlokalität signifikant unterscheiden. In den meisten präsentierten Ergebnissen zeigt sich jedoch schon jetzt eine recht gute Übereinstimmung im Bereich von einigen Millimetern.

Die Ergebnisse sind immer aufgrund eines vorgegebenen Sicherheitsniveaus (z.B. S = 99,9 %) auf Signifikanz zu testen; nur signifikante Kalibrierparameter dürfen für weitere GPS-Auswertungen verwendet werden. Um ein wirksames Testverfahren zu entwickeln, müssen allerdings noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Für die Anforderungen der Vermessungverwaltungen sollten die einzelnen Kalibrierparameter auf wenige Millimeter genau bestimmt werden.

Ergebnisdokumentation

Die Kalibrierergebnisse sind sorgfältig zu dokumentieren (Kalibrierzeugnis bzw. Eichschein). Sie sind in der Regel den Vermessungsschriften beizufügen. Die Autoren der GPS-Auswerteprogramme sind aufgefordert, die o.a. Modellansätze bzw. die Parameter, wie z.B. Nullpunktkorrektion, Azimut- und Elevationskorrektionen, auch antennenindividuell als Eingabemöglichkeit zu implementieren. Dies ist auch für Echtzeitsysteme meßtechnisch erforderlich.

Ergebnisabgabe an Dritte

Die Abgabe der Kalibrierergebnisse in Dateiform auf der Basis der IGS-Konventionen ist unstrittig.

Für die SAPOS-Echtzeitanwendungen sollten die entsprechenden Antennenparameter innerhalb der Referenzstations-Software berücksichtigt bzw. herausgerechnet werden, um die Echtzeitkorrekturdaten von einer idealisierten "Nullantenne" der Permantstation an Dritte abzugeben. Alternativ wäre auch die Integration der Antennenparameter oder zumindest die Angabe des Antennentyps in den RTCM-Datensätzen möglich. Einzelheiten hierzu sind durch die zuständigen AdV-Gremien noch zu spezifizieren.

Schlußbemerkung

Aufgrund des großen Interesses an dem behandelten Themenkreis und im Hinblick auf die zu erwartenden Entwicklungen in diesem Gebiet wurde angeregt, weitere Workshops in regelmäßigen Abständen stattfinden zu lassen.

Landesvermessungsamt
Nordrhein-Westfalen

GPS-Eichung in Nordrhein-Westfalen

Anforderungsprofil zur Antennen-Kalibrierung

- **Antennenreferenzpunkt (ARP):**
  Fester Bezugspunkt für die variablen L1/L2-Phasenzentren (Antennenparameter) sowie für die Antennenzentrierung am Boden (Antennenexzentrizität nach Lage und Höhe)
- **Modellansatz der Antennenparameter:**
  Nullpunktkorrektionen (Offsets nach Lage und Höhe) sowie Azimut- und Elevationskorrektionen (azimut- und elevationsabhängige Phasenkurven, IGS-Modell, MCP-EDC-Modell)
- **Kalibriermeßverfahren:**
  Absolutverfahren (Laborkalibrierung) und Relativverfahren (Feldkalibrierung), Meßgeometrie, Meßdauer, Grundplatte, Antennenhaube
- **Kalibrierauswertung:**
  Programmauswahl, Parameterschätzung, Korrelationen, Genauigkeiten, Signifikanz
- **Ergebnisdokumentation:**
  Kalibrierzeugnis, Eingabe in GPS-Auswerteprogramme und Echtzeitsysteme
- **Abgabe an Dritte:**
  Eigene Parameter-Datei oder Integration in Header-Satz der RINEX-Daten

NRW.

Auszug aus
IGS_01.PCV (Stand Juli 1996)

```
123456789112345678921234567893123456789412345678951234567896123456789712345678 98
         0         0         0         0         0         0         0         0
VENDOR          MODEL #                DESCRIPTION                    (AVE) YR/MO/DY
                                                                     |AVE = # in average
 [north]   [ east]   [  up ]                                         | L1 Offset (mm)
 [90]   [85]   [80]   [75]   [70]   [65]   [60]   [55]   [50]   [45]  | L1 Phase at
 [40]   [35]   [30]   [25]   [20]   [15]   [10]   [ 5]   [ 0]         | Elevation (mm)
 [north]   [ east]   [  up ]                                         | L2 Offset (mm)
 [90]   [85]   [80]   [75]   [70]   [65]   [60]   [55]   [50]   [45]  | L2 Phase at
 [40]   [35]   [30]   [25]   [20]   [15]   [10]   [ 5]   [ 0]         | Elevation (mm)

TURBOROGUE      DORNE MARGOLIN T                                       (  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   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   0.0   0.0   0.0
TRIMBLE         4000ST L1/L2 GEOD      Mod. 14532                     ( 10) 96/06/30
       0.0      -3.0      78.0
   0.0   1.1   3.1   6.3  10.2  13.7  15.7  16.4  16.3  15.8
  14.6  13.0  11.4  10.2   8.5   7.3   7.0   0.0   0.0
      -3.1      -1.3      74.4
   0.0   0.1   0.5   0.7   1.2   2.2   3.4   4.2   4.2   3.9
   3.6   3.3   2.7   2.0   1.5   1.0   0.2   0.0   0.0
TRIMBLE         TR GEOD L1/L2 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

...
```