

## Einleitung

Eine genaue Positionsbestimmung mittels GNSS basiert auf einem präzisen Signalempfang. Im Falle von Trägerphasenmessung stellt ein gleichförmiger Kugelstrahler eine ideale Empfängerantenne dar. Abweichungen von dieser idealen Phasenfront werden als Phasenzentrumskorrekturen (PCC), die sich aus dem Phasenzentrumsoffset (PCO) sowie den richtungsabhängigen Phasenzentrumsvariationen (PCV) zusammensetzen, bezeichnet. In dem vom International GNSS Service (IGS) bereitgestellten Antennenkorrekturen im Antenna Exchange Format (ANTEX) sind zurzeit nur Phasenzentrumskorrekturen für GPS und GLONASS L1 und L2 vorhanden. Kalibrierwerte für neuere Signale, wie beispielsweise GPS L5 und Galileo-Signale, werden bislang nicht vom IGS bereitgestellt. Lediglich im EPN stehen teilweise Kammerkalibrierwerte für diese Signale zur Verfügung. Das Institut für Erdmessung (IfE) ist in der Lage Phasenzentrumsvariationen für die neueren GNSS-Signale zu bestimmen.

## Methodik

Das IfE ist eine vom IGS anerkannte Kalibrierinstitution und kalibriert seit Jahren operationell nach dem absoluten Verfahren geodätische Antennen. In einem neueren Ansatz können nun auch PCC für GPS L5 und Galileo-Signale in einem Postprocessing Ansatz mittels einer sphärisch-harmonischen Kugelfunktionsentwicklung geschätzt werden.

### Datenerhebung

- Set-up: Kurze Basislinie ( $\approx 8$  m), gemeinsames Frequenznormal.
- Festgelegter Bewegungsablauf des Roboters.
- Rotation und Neigung der zu kalibrierenden Antenne um raumfesten Punkt.
- Aufzeichnung der GNSS-Rohdaten auf beiden Stationen.
- Speichern der Orientierungsparameter des Roboters mit GPS-Zeitstempel.

### Datenaufbereitung

- Übereinstimmende Beobachtungen beider Stationen finden. Bedingung: Standphase des Roboters.
- Berechnung von zeitdifferenzierten Single Differenzen (dSD):
  - Großteil des GNSS-Fehlerbudget wird aufgrund kurzer Basislinie und kurzen Zeiträumen reduziert.
  - Modellierung des Phase-wind Ups und der Roboterstellung.



Abb. 1: IfE Roboter für die absolute Antennenkalibrierung. Im Hintergrund ist die Referenzstation MSD8 erkennbar.

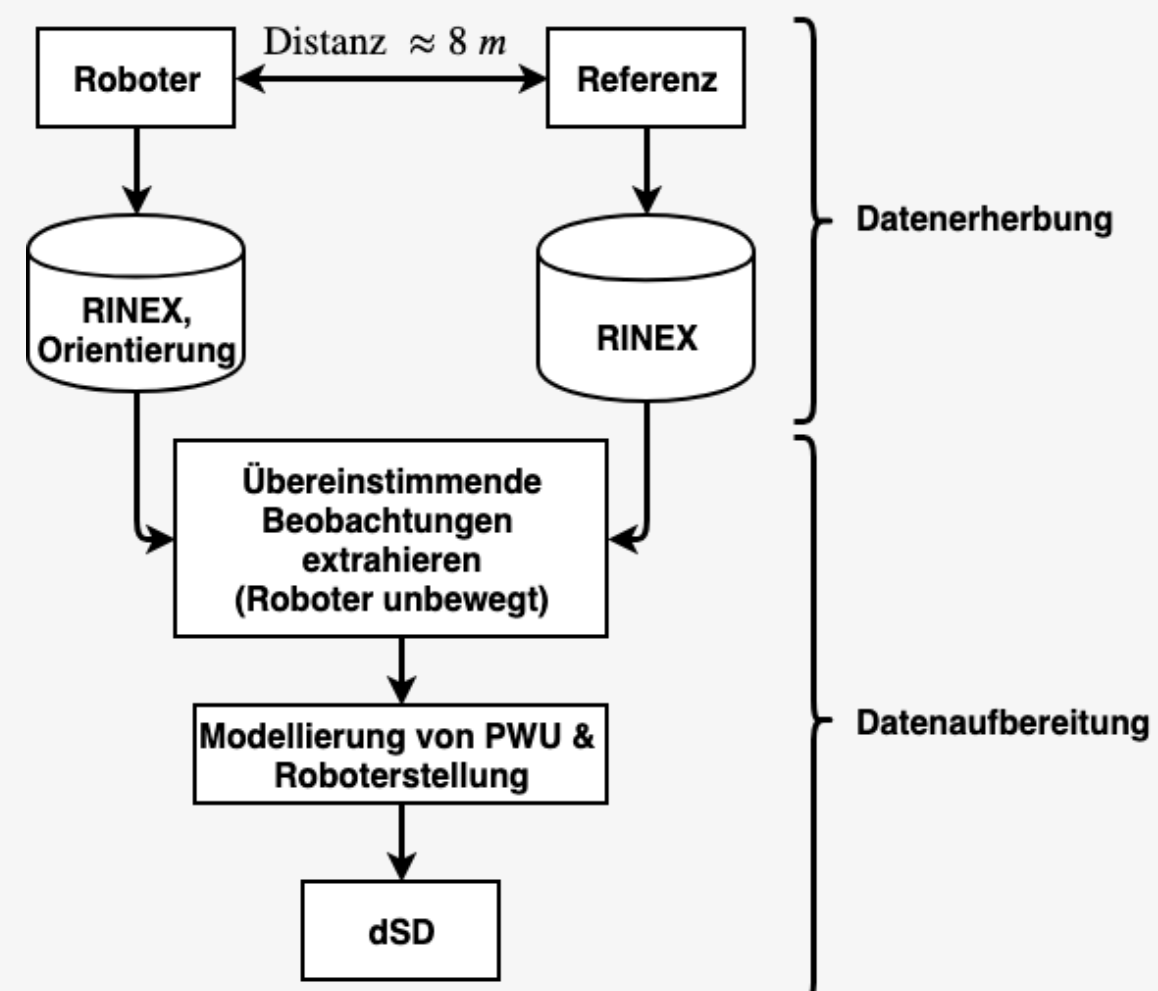


Abb. 2: Ablauf der Datenerhebung und Datenaufbereitung nach dem Hannoverschen Verfahren. Die zeitdifferenzierten Single Differenzen (dSD) dienen als Beobachtungen für die PCC Schätzung.

$$dSD = \Delta PCC_A^k(t_i, t_{i+1}) + \epsilon(t_i, t_{i+1}) \quad (1)$$

### PCC Schätzung

- Parametrisierung der PCC mittels Kugelfunktionsentwicklung (SH) bis Grad  $m = 8$  und Ordnung  $n = 8$ .

$$PCC(\alpha^k, z^k) = \sum_{m=1}^{m_{max}} \sum_{n=0}^m \tilde{P}_{mn}(\cos(z^k)) (a_{mn} \cos(n\alpha^k) + b_{mn} \sin(n\alpha^k)) \quad (2)$$

- SH-Analyse um unbekannte Koeffizienten  $a_{mn}$  and  $b_{mn}$  zu schätzen.
- Koeffizienten mit einer ungeraden Indexsumme werden im Gauß-Markov Modell (GMM) unter Zwang zu Null geschätzt.
- SH-Synthese um aus geschätzten Koeffizienten ein PCC-Gitter zu schätzen.
- PCO- und PCV-Anteile werden aus PCC mittels der Methode kleinster Quadrate geschätzt.

### Wiederholbarkeit geschätzter Pattern

- Verschiedene Kalibrierungen unterschiedlicher Antennen und Antennentypen im Februar und August 2019 (Tab. 1).
- Analyse der Wiederholbarkeit durch Berechnung des RMS der Differenzpattern.
- Insgesamt zeigen die Ergebnisse eine gute Wiederholbarkeit ( $RMS \leq 1$  mm) außer für GL5X (von weniger Satelliten übertragen). Die größten Abweichungen treten in niedrigen Elevationen auf (Abb. 3).
- Frequenzabhängigkeit der PCC ist ersichtlich, besonders für LEIAR20 (Abb. 4).
- PCC für LEIAR25 und LEIAR20 sind ähnlich und weisen Korrekturen bis 15 cm auf [2].

Tab. 1: Antennen, die mittels des Hannoverschen Verfahrens kalibriert wurden.

Antennentyp	Seriennummer	DOY (2019)	RMS [mm]			
			GL1C	GL5X	EL1X	EL5X
LEIAR25.R3 LEIT	08360013	056, 057	0.23	1.36	0.61	0.79
LEIAR20 NONE	22100043	220, 221	0.40	0.93	0.25	0.27
LEIAR20 LEIM	22100043	224, 225	0.62	0.98	0.54	0.71
LEIAR20 LEIM	22100016	227, 228	0.38	1.63	1.01	0.94

Abb. 3: GL5X Differenzpattern für LEIAR20 NONE (S/N: 22100043).

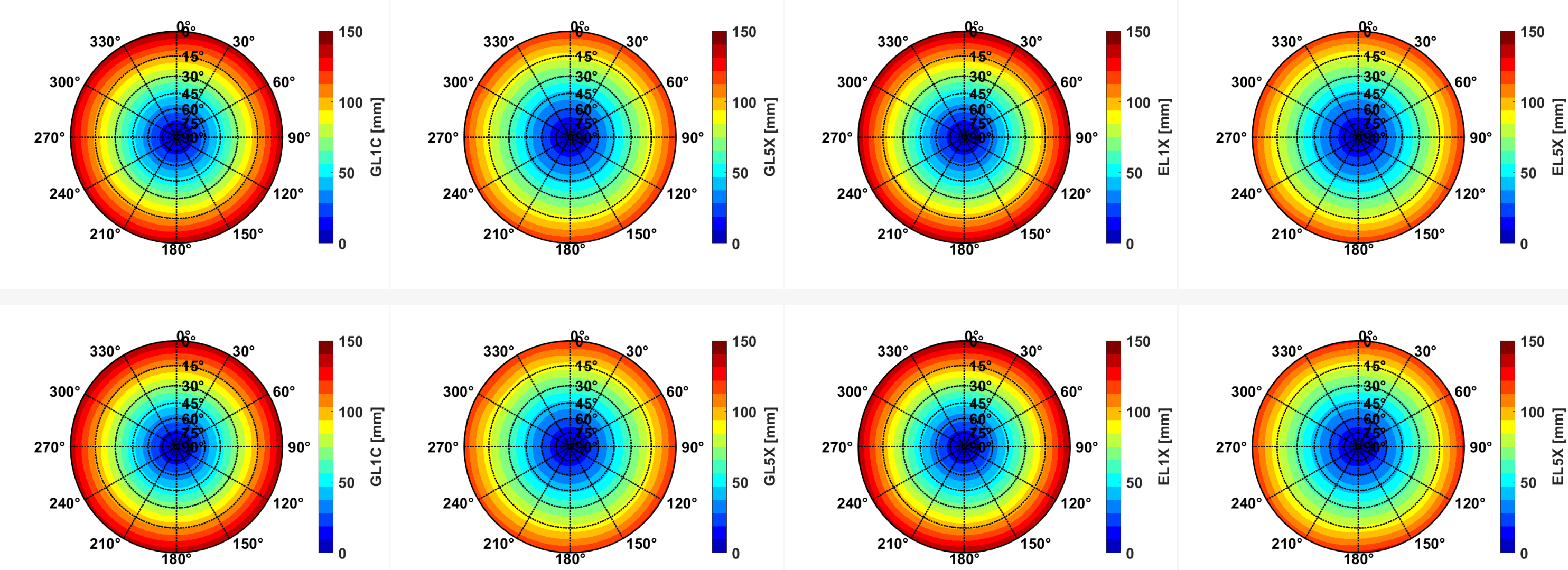


Abb. 4: Mittels Hannoverschen Verfahrens geschätzte PCC für LEIAR20 LEIM (S/N: 22100043). Oben: PCC für folgende Signale am DOY 224 (von links nach rechts): GL1C, GL5X, EL1X, EL5X. Unten: Gleiche Signale für DOY 225.

## Validierung

- Experimentaufbau (PTB Braunschweig, Abb. 5): Kurze Basislinie ( $\sim 5$  m), gemeinsames Frequenznormal um Receiver-zu-Receiver Single Differenzen (SD) zu berechnen (Tab. 2).
- Multi-GNSS Messungen vom 4. - 7. Februar 2019 (DOY35 - DOY38).
- Präzise Stationskoordinaten von 0081 und 0082 sind mit Submillimeter Genauigkeit relativ zur Referenzstation PT11 berechnet.
- Geschätzte PCC für NOV703GGG.R2 sind in [1] und [2] dargestellt. Kammerkalibrierungen sind nicht veröffentlicht, sodass die ähnlichen PCC der LEIAX120GG verwendet werden.



Abb. 5: Messaufbau an der PTB. Verwendete Antennen sind in Rot umrandet.

Tab. 2: Hardware Setup an der PTB.

Station	Antenne	S/N	Empfänger	S/N
0081	NOV703GGG.R2 NONE	12420040	JAVAD DELTA TREG3T	081
0082	LEIAR25.R3 LEIT	08360013	JAVAD DELTA TREG3T	082

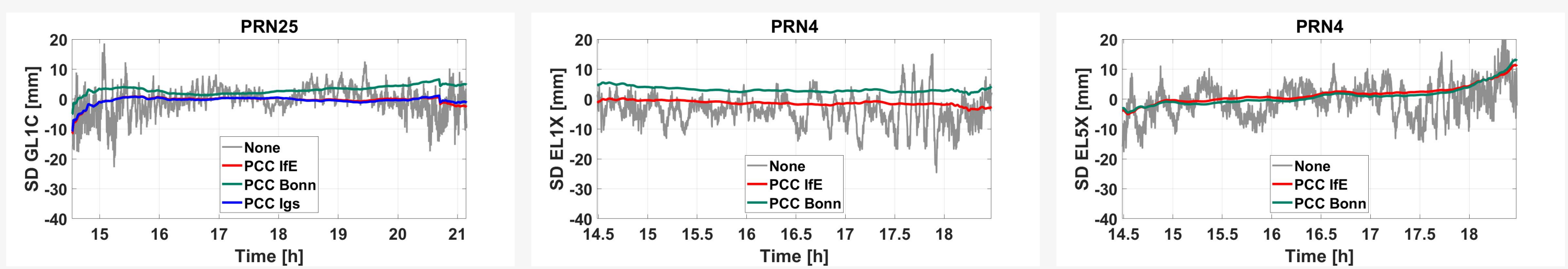


Abb. 6: SD (grau) von DOY 35 bezogen auf den Antennen Referenzpunkt (ARP) ohne PCC. Beispielhafte Ergebnisse für GL1C (PRN25), EL1X (PRN4) and EL5X (PRN4). Eingefärbte SD enthalten PCC und sind für eine bessere Sichtbarkeit geglättet.

Tab. 3: Durchschnittliche sowie maximale Verbesserung des RMS der SD.

Frequenz	$\varnothing$ RMS [mm]	max. RMS [mm]
GL1C	+8 %	+25 %
EL1X	+7 %	+24 %
EL5X	+1 %	+7 %

- Vom IfE geschätzte PCC spiegeln den Verlauf der SD gut wider und reduzieren den RMS um bis zu 25 % für GL1C (Tab. 3).
- Der PCC Offset (z.B. PRN4) kann durch die unterschiedliche Datumsdefinition zwischen Kammer- und Absolutkalibrierung erklärt werden.
- Oszillationen der SD aufgrund von Mehrwegeeffekten.

### Einfluss des Empfängertyps

Die Positionslösung hängt auch von der Antennen-Empfänger Kombination ab. Daher wurde eine Nullbasislinie aufgesetzt, um den Einfluss des Empfängertyps auf die geschätzten PCC zu untersuchen.

- Zwei unterschiedliche Empfänger werden jeweils mit den Antennen an beiden Stationen verbunden (Tab. 4).
- Untersuchung wird anhand der LEIAR25.R3 LEIT (S/N: 08430002) durchgeführt.
- Trackingloop Parameter, Kalibrierungszeit- und ablauf sind für alle 4 Empfänger identisch.
- Um die Wiederholbarkeit zu betrachten, werden drei verschiedene Kalibrierungen durchgeführt.

Tab. 4: Hardware Setup der Nullbasislinie am IfE.

Station	Antenne	S/N	Empfänger	S/N	Frqz. G	Frqz. E
ROBO	LEIAR25.R3 LEIT	08430002	JAVAD DELTA TREG3T SEPT PolaRx5TR	082 3051345	L1C, L5X L1C, L5Q	L1X L5X L1C, L5Q
MSD8	LEIAR25.R3 LEIT	09330001	JAVAD DELTA TREG3T SEPT PolaRx5TR	081 3051372	L1C, L5X L1C, L5Q	L1X, L5X L1C, L5Q

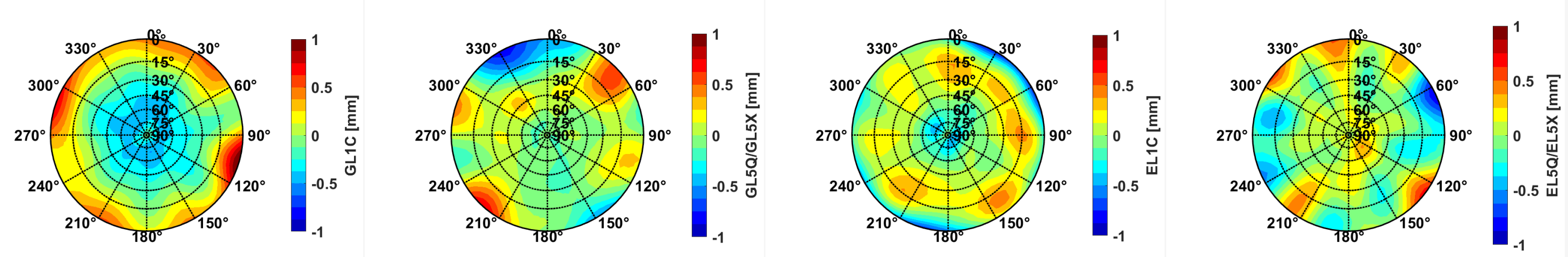


Abb. 7: Differenzpattern zwischen geschätzten PCC mit Javad oder Septentrio Empfängern am DOY 239 für folgende Frequenzen: GL1C, GL5Q/GL5X, EL1C/EL1X und EL5Q/EL5X.

Abb. 7 zeigt, dass der verwendete Empfänger einen Einfluss auf die PCC-Schätzung hat:

- Kleine Differenzen bis 1 mm auf allen Frequenzen, was z.B. durch unterschiedliche Trackingalgorithmen (GL5Q bei Septentrio, GL5X bei Javad Empfängern) erklärt werden kann.
- $\varnothing$  RMS < 0.6 mm, Spread ( $dPCC_{max} - dPCC_{min}$ ) kleiner gleich 4 mm (Tab. 5).

Tab. 5: Aus 3 Kalibrierungen durchschnittlicher RMS und Spread [3] der PCC-Differenzpattern (Schätzung mit Septentrio oder Javad Empfängern).

Frequenz	G01	G05	E05
$\varnothing$ RMS [mm]	0.40	0.51	0.58
$\varnothing$ Spread [mm]	1.43	3.54	4.07

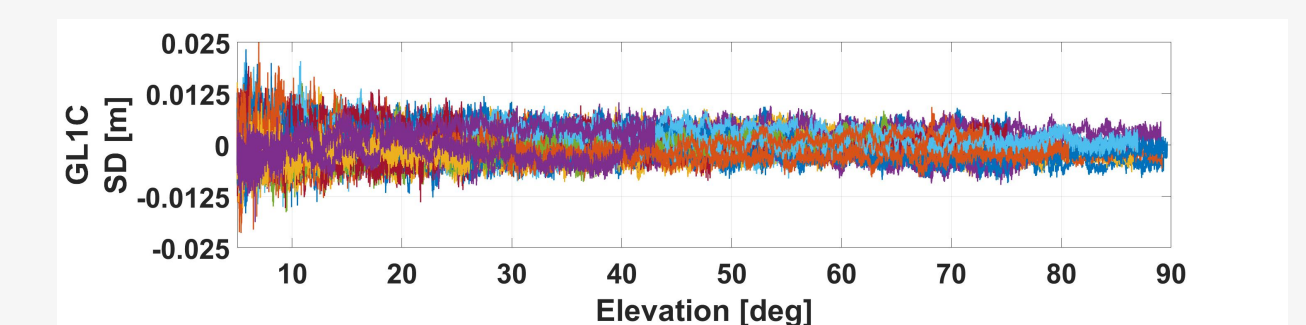


Abb. 8: Rauschniveau der Nullbasislinie für GL1C.

### Fazit & Ausblick

- Am IfE besteht die Möglichkeit PCC für diverse GNSS-Signale mittels *Hannoverschen Verfahrens* zu schätzen.
- Gute Wiederholbarkeit ( $RMS \leq 1$  mm, außer für GL5X) wird erreicht. Differenzen können aufgrund von unterschiedlichen Kalibrierabläufen- und -zeiten (andere Satellitengeometrie) auftreten.
- Kalibrierung weiterer Signale (z.B.: GL2L, EL7Q & EL8Q) möglich.
- Weitere Analyse des Empfängereinflusses auf die PCC-Schätzung, insbesondere im Hinblick auf die Validierung der geschätzten PCC.

### Literatur und Danksagung

- [1] Breda et al. (2019). Validation of phase center corrections for new GNSS signals obtained with absolute antenna calibration in the field. In: *Geophysical Research Abstracts* 21, 7-12 April, 2019, Vienna, Austria.
- [2] Kröger et al. (2019). Phase Center Corrections for new GNSS signals. In: *Geophysical Research Abstracts* 21, 7-12 April, 2019, Vienna, Austria.
- [3] Schön, S. and Kersten, T. (2014). Comparing antenna phase center corrections: challenges, concepts and perspectives. In: *IGS Analysis Workshop*, 23-27 June, 2014, Pasadena, California.
- Kalibrierwerte vom IGS (Methode ROBOTER & KAMMER): <ftp://igs.org/pub/station/general/igs14.atx>, Kalibrierwerte der Universität Bonn (Methode KAMMER) veröffentlicht im European Permanent GNSS Network (EPN): [ftp://epncb.eu/pub/station/general/indiv\\_calibrations/](ftp://epncb.eu/pub/station/general/indiv_calibrations/)
- Die Autoren möchten der PTB, insbesondere A. Bauch, für die Unterstützung während der praktischen Messungen auf dem Gelände der PTB in Braunschweig danken.