

Motivation

Viele Anwendungen von Low Earth Orbitern (LEO) setzen ihre präzise absolute Positionierung voraus. Diese wird häufig mit GNSS und kinematischem Precise Point Positioning (PPP) realisiert. Hier soll untersucht werden, wie bei zukünftigen LEO-Missionen die Positionierungsgenauigkeit erhöht werden kann, indem statt eines einzelnen GNSS-Empfängers mit nur einer Antenne ein Virtueller Empfänger eingesetzt wird. Dieses Konzept wurde bisher für reine Code-Positionierung von Nair/Bartone (2004) in einem Auto und von Kube et al. (2011) auf einem Flugzeug angewandt. Für den Einsatz auf LEOs wird es nun auf PPP übertragen.

Virtueller Empfänger zur absoluten kinematischen Positionierung

Idee:

- Mehrere GNSS-Antennen mit jeweils eigenem Empfänger auf Plattform (hier LEO)
- GNSS-Beobachtungen aller Antennen auf gemeinsamen Referenzpunkt (Massezentrum des LEO) reduzieren und zusammen ausgleichen
- Relative Positionen der Antennen bezogen auf Referenzpunkt im erdfesten Koordinatensystem als bekannt vorausgesetzt (Ausrichtung der Plattform für jede Epoche bekannt)
- Antennen unterschiedlich geneigt installieren, um insgesamt optimales Sichtfeld zu erhalten (Abb. 1)

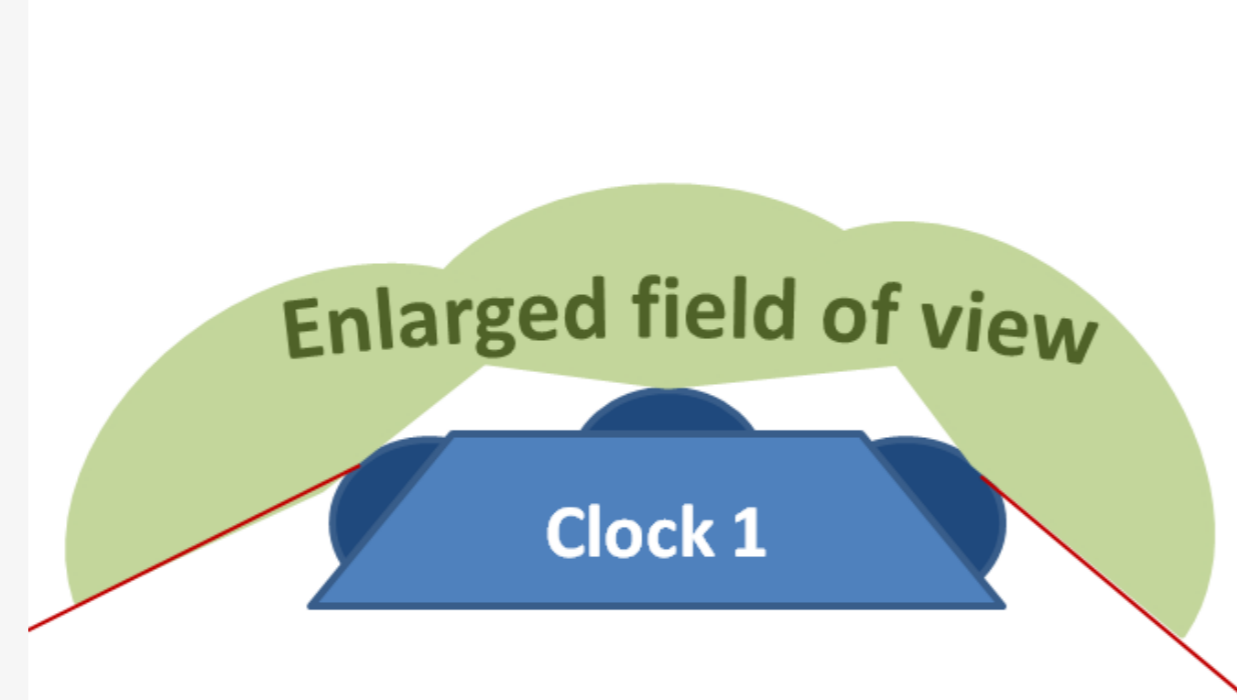


Abb. 1: Vergrößertes Sichtfeld durch Kombination mehrerer Antennen.

Virtueller Empfänger verfügt über bessere Beobachtungsgeometrie als einzelne Antennen, insbesondere bei Abschattungen durch Bauweise oder Rotation der Plattform.

Tab. 1: Mit Virtuellem Empfänger zu bestimmende Parameter (Reduktion der Parameteranzahl, wenn physische Empfänger des Virtuellen Empfängers mit gemeinsamer Uhr verbunden).

	Einfacher Virtueller Empfänger	Virtueller Empfänger mit gemeinsamer Uhr
Koordinaten	3 pro Epoche (X, Y, Z von Referenzpunkt)	
Empfängeruhrfehler	1 pro physischem Empfänger und Epoche	1 pro Epoche
Mehrdeutigkeiten	Pro Sichtbarkeitsbogen 1 pro physischem Empfänger	Pro Sichtbarkeitsbogen 1 (gemeinsam für alle Empfänger)*

* Zusätzliche differentielle Mehrdeutigkeiten a-priori ganzzahlig bestimmbar.

Simulation von Virtuellen Empfängern auf einem LEO

- LEO-Positionierung üblicherweise mit einer zum Zenit ausgerichteten Antenne (Abb. 2a, weiß)
- Hier: Simulation von vier GNSS-Antennen vorne (Abb. 2a, grün), hinten (gelb), links (rot) und rechts (cyan), die zu drei verschiedenen Virtuellen Empfängern kombiniert werden:
 - Vorne und Hinten (V/H)
 - Links und Rechts (L/R)
 - Alle 4 Antennen (4 Ant.)
- Simulierte Antennen um 20° gegenüber Zenit geneigt; unterschiedliche Sichtfelder (Abb. 2b)
- Cut-off Winkel im jeweiligen Antennen-System: 0°
- Verwendung eines realen GRACE-Orbits und realer GPS-Orbits, um Satellitensichtbarkeit an der realen und den vier simulierten Antennen zu berechnen
- Normalgleichungsmatrizen für Positionierung mit Einzelantenne und mit sechs verschiedenen Virtuellen Empfängern aufgestellt: drei Antennenkonstellationen (siehe oben), jeweils mit
 - getrennten Empfängeruhren und getrennten Mehrdeutigkeiten
 - gemeinsamer Empfängeruhr und gemeinsamen Mehrdeutigkeiten
- Einheitsgewichtung der ionosphärenfreien Code- und Trägerphasen-Linearkombinationen (a-priori Standardabweichung 3 m bzw. 3 mm)
- Bestimmung von formalen Standardabweichungen der Positionierungslösung und Transformation in Body-Frame des GRACE-Satelliten (Scientific Reference Frame (SF), siehe Case et al (2010))

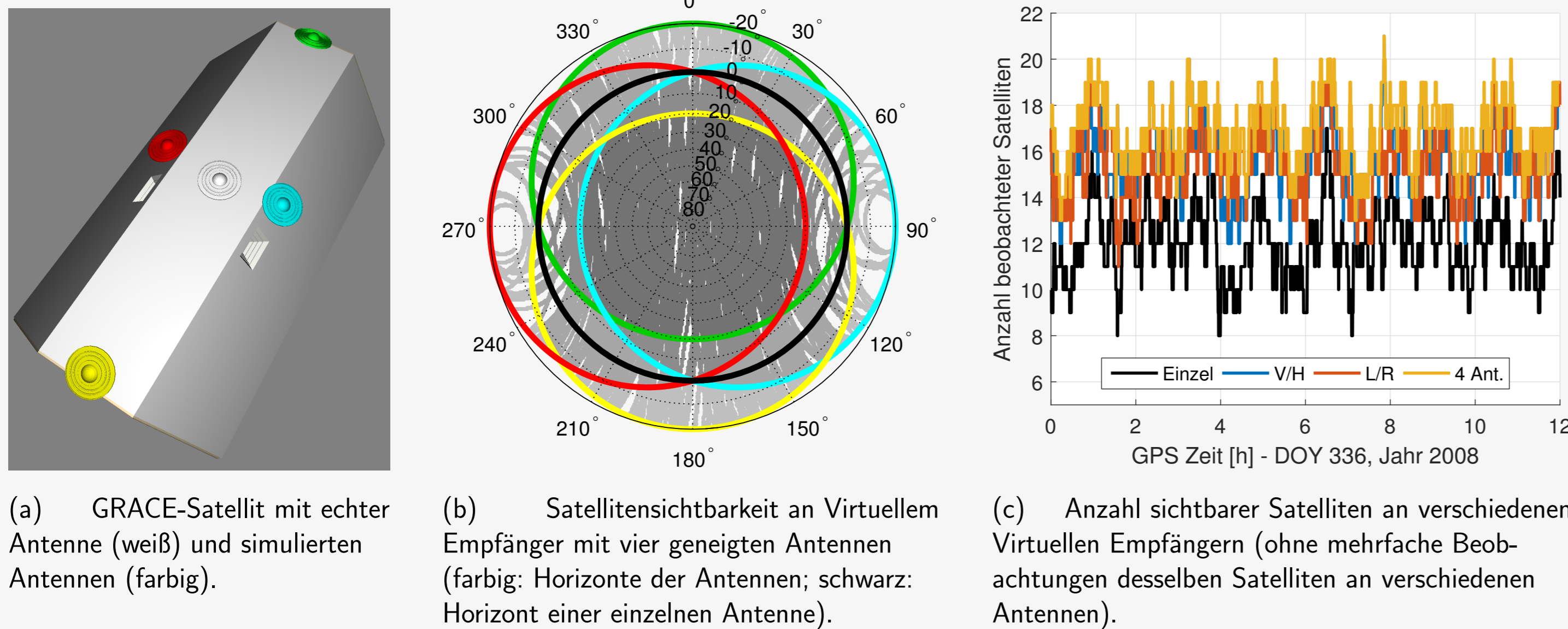


Abb. 2: Simulierte Antennen auf einem LEO und ihre Satelliten-Sichtbarkeiten während einer zwölfstündigen Session.

- An Antenne vorne (grün in Abb. 2b) bzw. hinten (gelb): GNSS-Satelliten gehen einige Minuten früher auf bzw. später unter als an zentraler Antenne (schwarz)
- An seitlichen Antennen (rot und cyan): einige zusätzliche besonders lange Sichtbarkeitsbögen
- Je mehr unterschiedlich geneigte Antennen verwendet, desto mehr verschiedene Satelliten in jeder einzelnen Epoche beobachtet (Abb. 2c)

Acknowledgement

The authors would like to thank the DFG Sonderforschungsbereich (SFB) 1128 Relativistic Geodesy and Gravimetry with Quantum Sensors (geo-Q) for financial support.

Ergebnisse der Simulation

- Mit Virtuellen Empfängern in jeder Epoche in allen drei Koordinatenachsen höhere Positionierungsgenauigkeit als mit Einzelantenne (vgl. Abb. 3-5 und Tabellen 2-4)
- Beide Virtuelle Empfänger mit je 2 Antennen haben gleiches Genauigkeitsniveau: in den horizontalen Komponenten jeweils Verringerung der mittleren Standardabweichungen um -39 %, in radialer Komponente um -43 % gegenüber Einzelantenne
- Bei Verwendung aller vier Antennen: Standardabweichungen weiter reduziert um insgesamt -57 % (horizontal) bzw. -60 % (radial)
- Durch Ausnutzung der gemeinsamen Uhr (gemeinsamer Empfängeruhrfehler und gemeinsame Mehrdeutigkeiten): Genauigkeit zusätzlich leicht gesteigert
- Positionierungsgenauigkeit abhängig von geographischer Breite (periodische Komponente in Verlauf der Standardabweichungen); Amplitude dieser Schwankung bei Virtuellen Empfängern geringer als bei Einzelantenne

X_{SF} -Richtung (entspricht etwa **along-track**):

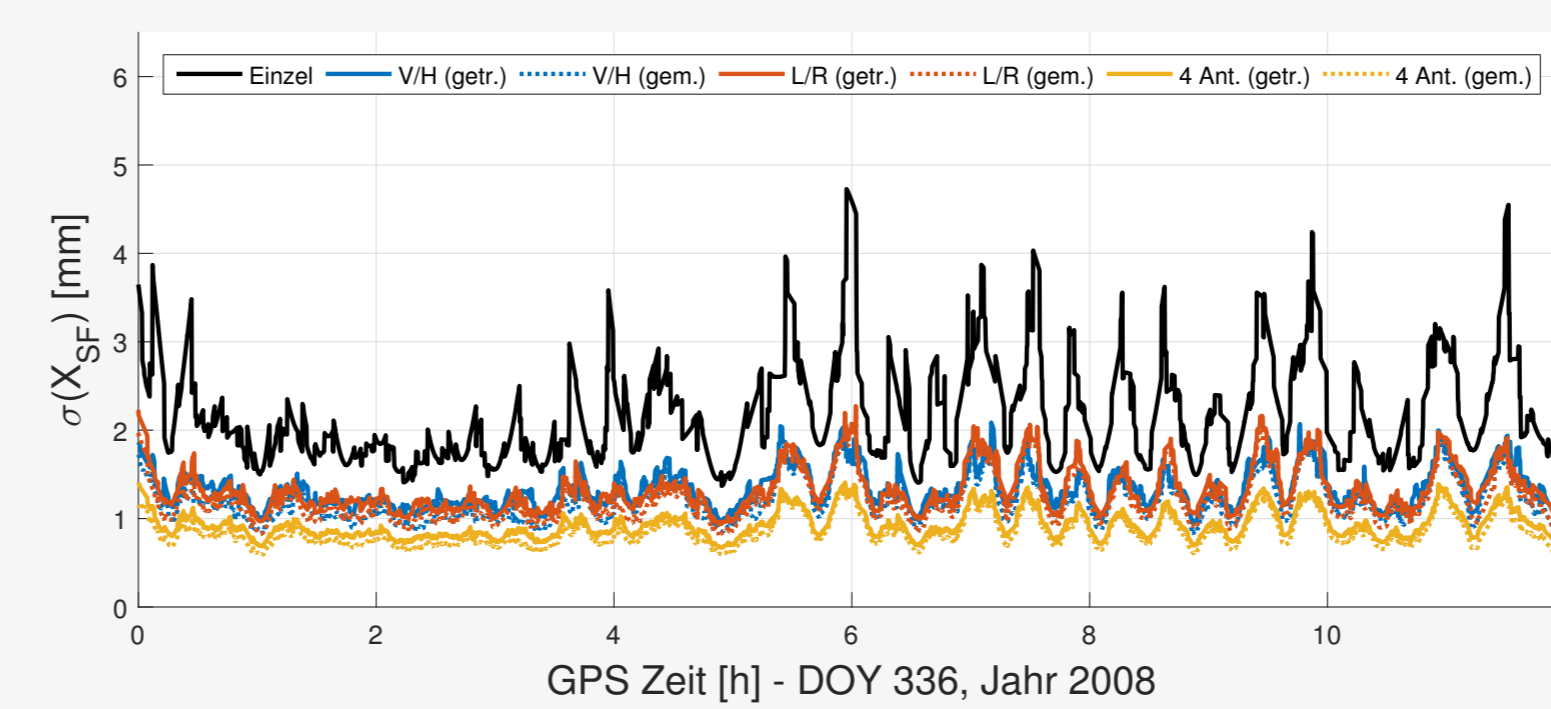


Abb. 3: Standardabweichung der X_{SF} -Koordinate.

Tab. 2: Mittlere Standardabweichung [mm] der X_{SF} -Koordinate bei verschiedenen Virtuellen Empfängern; in Klammern: Verhältnis zur Standardabweichung bei einer Einzelantenne.

Mehrd. & Uhr	Getrennt	Gemeinsam
Einzelantenne	2.19 (100 %)	2.19 (100 %)
Vorne/Hinten	1.33 (61 %)	1.20 (55 %)
Links/Rechts	1.33 (61 %)	1.22 (56 %)
Vier Antennen	0.93 (43 %)	0.85 (39 %)

Y_{SF} -Richtung (entspricht etwa **cross-track**):

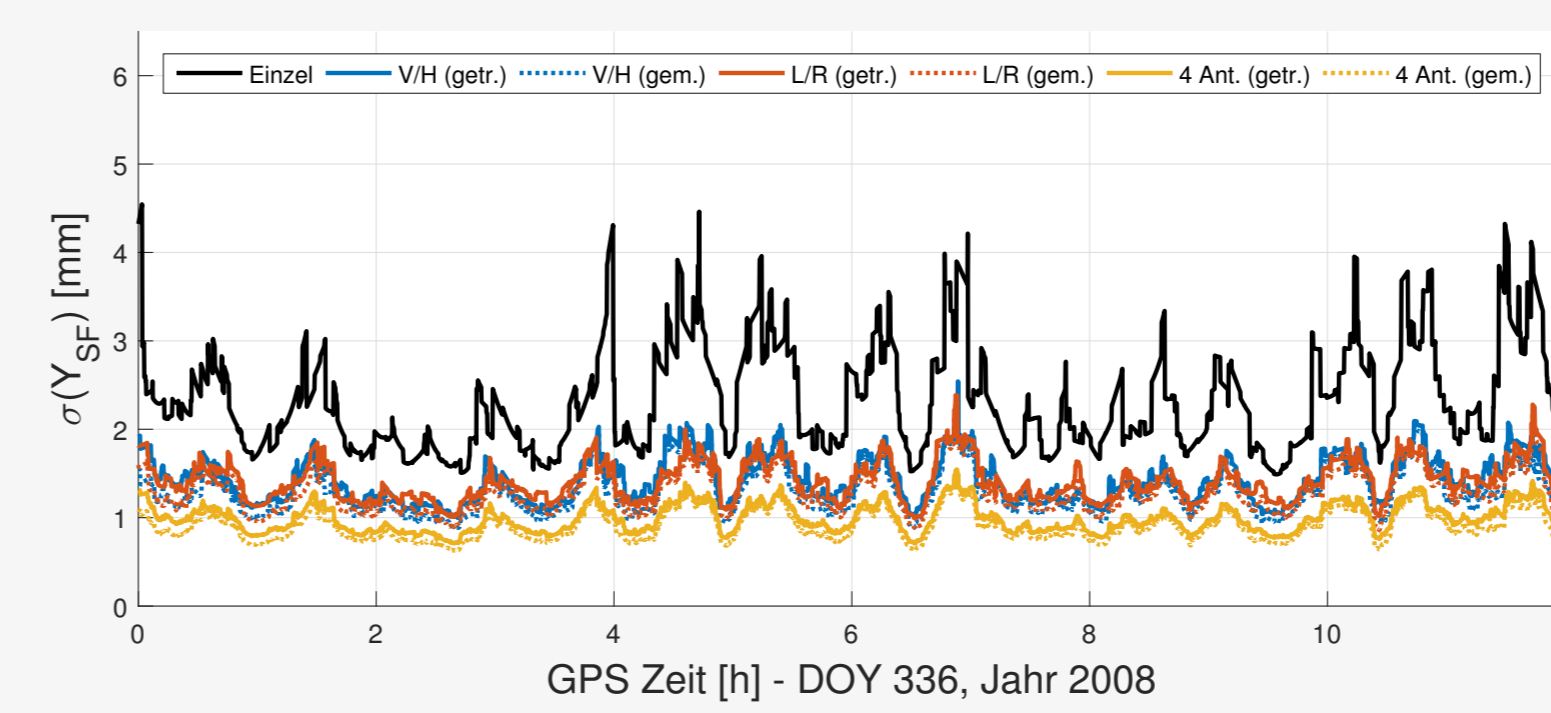


Abb. 4: Standardabweichung der Y_{SF} -Koordinate.

Tab. 3: Mittlere Standardabweichung [mm] der Y_{SF} -Koordinate bei verschiedenen Virtuellen Empfängern; in Klammern: Verhältnis zur Standardabweichung bei einer Einzelantenne.

Mehrd. & Uhr	Getrennt	Gemeinsam
Einzelantenne	2.32 (100 %)	2.32 (100 %)
Vorne/Hinten	1.42 (61 %)	1.30 (56 %)
Links/Rechts	1.42 (61 %)	1.30 (56 %)
Vier Antennen	0.99 (43 %)	0.91 (39 %)

Z_{SF} -Richtung (entspricht etwa **radial**):

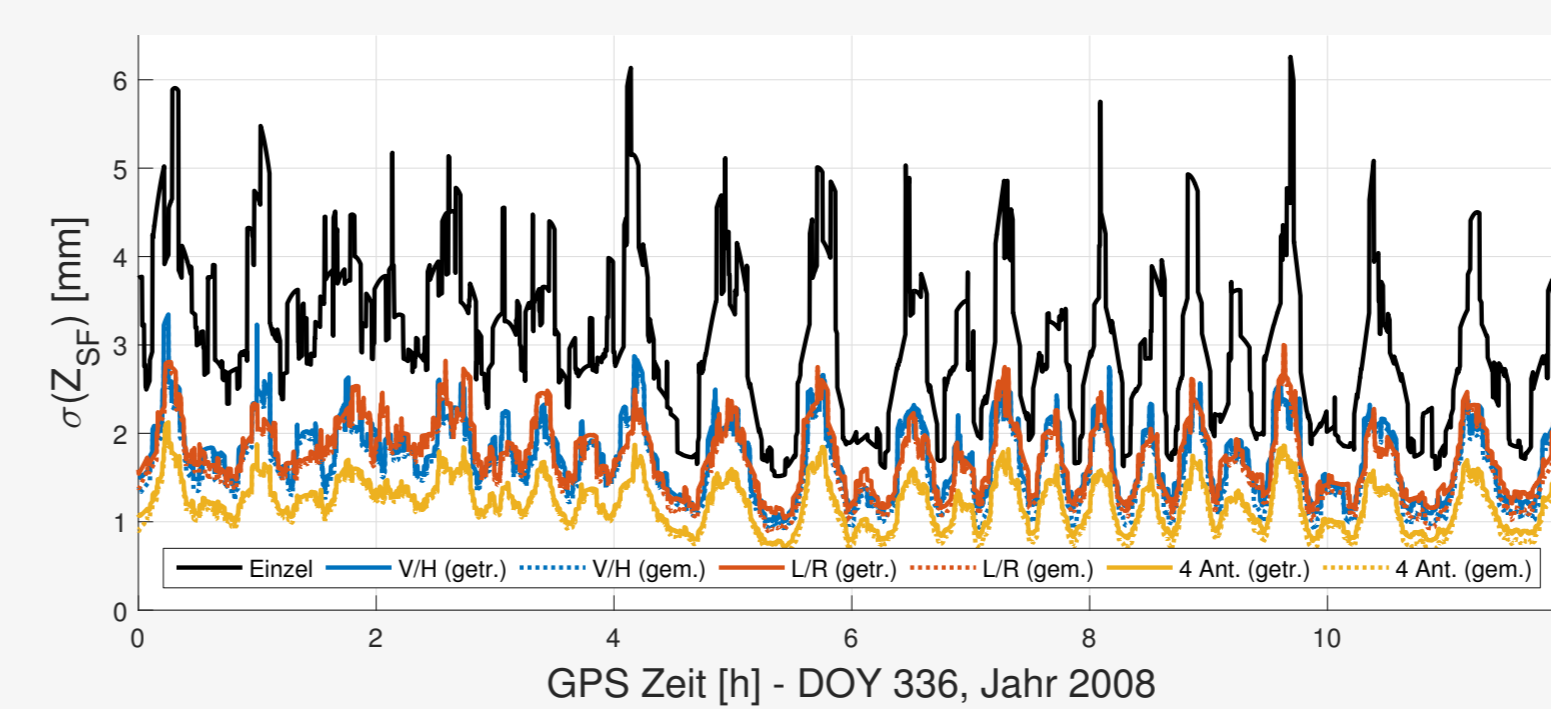


Abb. 5: Standardabweichung der Z_{SF} -Koordinate.

Tab. 4: Mittlere Standardabweichung [mm] der Z_{SF} -Koordinate bei verschiedenen Virtuellen Empfängern; in Klammern: Verhältnis zur Standardabweichung bei einer Einzelantenne.

Mehrd. & Uhr	Getrennt	Gemeinsam
Einzelantenne	3.06 (100 %)	3.06 (100 %)
Vorne/Hinten	1.74 (57 %)	1.64 (54 %)
Links/Rechts	1.75 (57 %)	1.67 (55 %)
Vier Antennen	1.22 (40 %)	1.16 (38 %)

Statisches Experiment

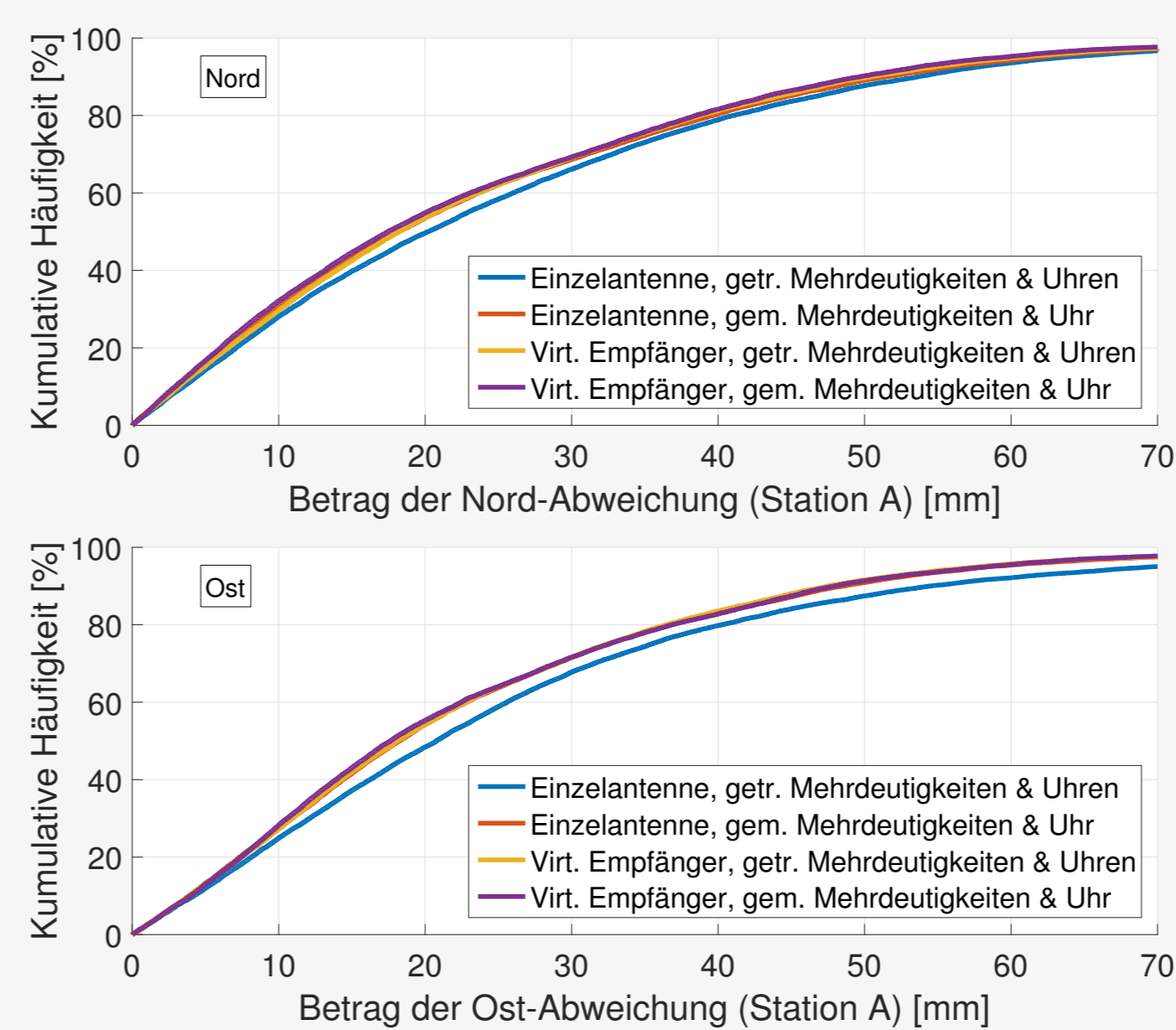


Abb. 6: Kumulierte Häufigkeit des Positionierungsfehlers der Station A mit verschiedenen Virtuellen Empfängern im Vergleich zum klassischen PPP.

- Experiment mit echten Beobachtungen zum
 - Stützen der Simulationsergebnisse
 - Testen des Algorithmus zur Lösung der differentiellen Mehrdeutigkeiten
- Zwei Stationen (A und B, Basislinien-Länge: 286 m) mit stabiler gemeinsamer Uhr und hochgenauen Sollkoordinaten
- Station A sowohl einzeln als auch mit Virtuellem Empfänger aus A und B positioniert
- Ergebnisse aus sechs Tages-Sessions:
 - Horizontaler Positionierungsfehler: durch Virtuellen Empfänger reduziert (Abb. 6)
 - Höhenkomponente kaum verbessert (mögliche Restsystematik durch Troposphäre)
 - Differentielle Mehrdeutigkeiten korrekt gelöst

Zusammenfassung

- Das für Positionierung mit Code-Beobachtungen entworfene Konzept des Virtuellen Empfängers kann auf Precise Point Positioning übertragen werden.
- Falls eine gemeinsame Uhr verwendet wird, können differentielle Mehrdeutigkeiten a-priori ganzzahlig gelöst werden (weniger Parameter und zusätzliche Genauigkeitssteigerung).
- Virtuelle Empfänger sind geeignet, um die Genauigkeit der absoluten Positionierung von LEOs zu steigern.

Referenzen

- Nair, Sidharth und Bartone, Chris (2004). Multiple Antenna GPS Configuration for Enhanced Performance. In: *Proceedings of the 60th Annual Meeting of The Institute of Navigation*, Dayton, OH, 188-199.
- Kube, Franziska, Schön, Steffen und Feuerle, Thomas (2011). Virtual Receiver to Enhance GNSS-based Curved Landing Approaches. In: *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation*, Portland, OR, 536-545.
- Case, Kelley, Kruizinga, Gerhard und Wu, Sien-Chong (2010). GRACE Level 1B Data Product, User Handbook. Jet Propulsion Laboratory.

