



Precise Point Positioning mit Smartphones

Precise Point Positioning with Smartphones

Marcus Franz Wareyka-Glaner, Wien

Kurzfassung

Eine wesentliche Funktion von Smartphones, die von vielen Applikationen genutzt wird, ist die geräteinterne Positionsbestimmung. Seit der Veröffentlichung von Android 7 können wir nicht nur auf diese vom Gerät intern berechnete Position, sondern auch auf die eigentlichen GNSS-Messungen von Android-Smartphones zugreifen. Dies erlaubt es zum Beispiel, die Position des Smartphones mit eigenen Korrekturdaten und Algorithmen zu berechnen. Hierfür hat sich Precise Point Positioning als ausgezeichneter Ansatz erwiesen und seit Jänner 2023 liefert der Galileo High Accuracy Service geeignete Korrekturen. Unter guten Bedingungen können mit modernen Smartphones nach einer Konvergenzzeit von rund zwei Minuten Genauigkeiten im Dezimeter-Bereich erreicht werden.

Schlüsselwörter: GNSS, PPP, Smartphones, Android, Galileo HAS

Abstract

An essential function of smartphones used by many applications is the device's internal positioning. Since the release of Android 7, we have been able to access not only the position calculated internally by the device but also the actual GNSS measurements of Android smartphones. This new option allows us, for example, to calculate the user's position using our own correction data and algorithms. Precise Point Positioning has proven to be an excellent approach for this, and the Galileo High Accuracy Service provides suitable corrections. Under good conditions, accuracies in the decimeter range can be achieved after a convergence time of around two minutes.

Keywords: GNSS, PPP, Smartphones, Android, Galileo HAS

1. Einleitung

Seit dem Release von Android 7 im Jahr 2016 ist es möglich, auf die GNSS-Messungen von Android-Smartphones zuzugreifen. Bei älteren Modellen und iOS-Geräten (z.B. iPhones) kann weiterhin nur die geräteinterne „Black-Box-Koordinatenlösung“ ausgelesen werden. Die direkte Zugriffsmöglichkeit auf die GNSS-Messungen eröffnet Android-Nutzer:innen neue Möglichkeiten [1][2]. So können eigene Algorithmen implementiert werden, um etwa die Genauigkeit der Positionsbestimmung mit präzisen Modellen zu erhöhen oder GNSS-Messungen von Nutzer:innen mittels Crowdsourcing¹ zur Untersuchung der Atmosphäre zu sammeln [3].

Dieser Artikel beschreibt die Rahmenbedingungen des Zugriffs auf die GNSS-Messungen von Smartphones, gibt einen Einblick in die Datenqualität und beschreibt daraus resultierende Herausforderungen bei der Verarbeitung. Die Positionierungstechnik Precise Point Positioning (PPP) wird im Hinblick auf den Anwendungsfall von Smartphones vorgestellt und es werden echtzeitaugliche Ergebnisse präsentiert, die mit

einem Google Pixel 7, dem Galileo High Accuracy Service und der Open-Source-Software raPPPid (<https://github.com/TUW-VieVS/raPPPid>) erzielt wurden. Abschließend wird der Inhalt kurz zusammengefasst und ein Ausblick gegeben.

2. Probleme und Herausforderungen

Typischerweise bieten aktuelle Smartphone-Modelle dank moderner Hardware und Software mehr GNSS-Möglichkeiten als ältere Geräte. Seit dem Jahr 2018 sind Dual-Frequency (DF) Smartphones am Markt erhältlich, die GNSS-Signale im L1- und L5- Frequenzband empfangen. Ältere Modelle liefern nur Ein-Frequenz-Beobachtungen auf L1. Im besten Fall empfängt ein modernes Mobiltelefon GNSS-Signale von allen vier GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) auf zwei Frequenzen und erlaubt Zugriff auf die Phasenmessung. Allerdings gibt es selbst bei ganz aktuellen Smartphone-Modellen Einschränkungen.

Manche Smartphones liefern keine DF-Messungen, obwohl ein DF-Chip verbaut ist. Weiters kann auch der Zugriff auf die Phasenmessung unmöglich sein (z.B. bei aktuellen Samsung Galaxy Modellen). Darüber hinaus gibt es länderspezifische Unterschiede. Zum Beispiel liefert ein

1) <https://camaliot.org/> (Zugriff: 13.12.2013)

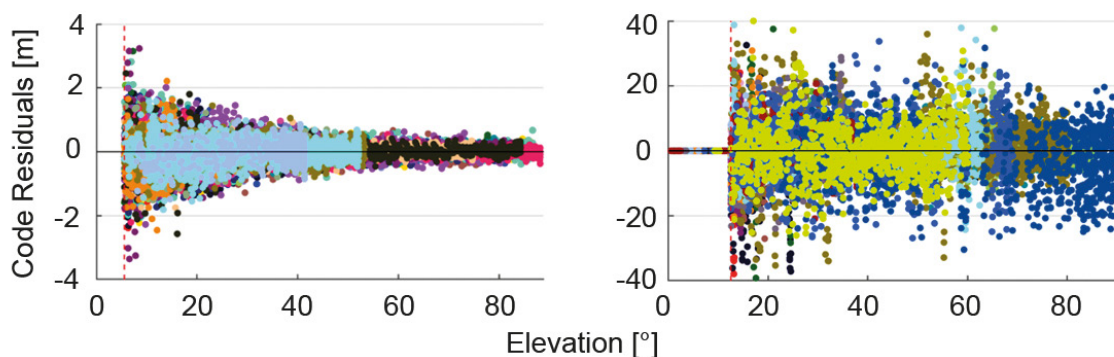


Abb. 1: Code Residuen über die Elevation für einen geodätischen Empfänger (links) und ein Smartphone (rechts). Die Residuen sind nach Satelliten farbkodiert.

Google Pixel 8 gekauft in den USA keine BeiDou-Beobachtungen, ein „österreichisches“ Google Pixel 8 aber schon. Diese Beispiele verdeutlichen, dass es sinnvoll ist, sich vor dem Gerätekauf einen Überblick über diese Eigenheiten zu verschaffen, etwa mithilfe der Datenbank der Applikation GPSTest von Sean Barbeau².

Die Android Programmierschnittstelle liefert die Messungen des GNSS-Chips in der Form von Zeitstempeln der empfangenen Signale. Die üblichen GNSS-Beobachtungen (Code, Phase, Doppler-Verschiebung) müssen erst aus diesen Zeitstempeln generiert werden. Glücklicherweise existieren verschiedene Applikation, die diese Aufgabe übernehmen und RINEX-Files zur Weiterverarbeitung erzeugen (z.B. Google GnsLogger, CAMALIOT, Geo++ RINEX Logger). Zu beachten ist allerdings, dass die Generierung der Code-Pseudorange ein wenig kompliziert ist [4] und nicht von allen Applikationen korrekt durchgeführt wird [5]. Daher sollten die erzeugten RINEX-Files sorgfältig geprüft werden oder, wie in diesem Artikel beschrieben, die Zeitstempel der empfangenen Signale direkt aufgezeichnet werden, um diese mit einer geeigneten Software weiterzuverarbeiten.

Smartphones sind mit einfachen und kostengünstigen GNSS-Empfängern ausgestattet und liefern deswegen GNSS-Messungen niedriger Qualität [6][7]. Es gibt deutliche Unterschiede zu geodätischen Geräten und die GNSS-Beobachtungen von Smartphones verhalten sich unberechenbarer. Üblicherweise ist die Qualität der Code- und Phasenmessung um einen Faktor 10–100 schlechter als bei hochwertigen GNSS-

Empfängern (Abbildung 1). Darüber hinaus ist die Carrier-to-Noise Density (C/N_0), ein Maß für die Signalstärke, typischerweise um 10 dBHz geringer. Im Gegensatz zu hochwertigen GNSS-Geräten gibt es keine Korrelation zwischen dem Elevationswinkel der Messungen und deren Genauigkeit (Abbildung 1). Daher wird bei Smartphones üblicherweise die Carrier-to-Noise Density zur Gewichtung der Beobachtungen bei der Parameterschätzung verwendet.

Smartphones liefern normalerweise GNSS-Messungen mit einer zeitlichen Auflösung von einer Sekunde. Durch die hohe zeitliche Auflösung kann mit einer Dreifach-Differenz aufeinanderfolgender Messungen die Qualität der Beobachtungen beurteilt werden. Diese Dreifach-Differenz C_{diff} eliminiert bei einem statischen Empfänger alle Einflüsse bis auf das Rauschen. Sie kann in einer Messepoche i für die Code-Beobachtungen C eines bestimmten Satelliten wie folgt berechnet werden:

$$C_{\text{diff}} = (C_i - C_{i-1}) - (C_{i-2} - C_{i-3})$$

Die Berechnung für die Phasenbeobachtung erfolgt analog. Mit dieser Dreifach-Differenz können typische Werte für das Messrauschen der Code- und Phasenbeobachtung gefunden werden, die für Smartphones und geodätische Empfänger in Tabelle 1 zusammengefasst sind.

	Smartphone	Geodätischer Empfänger
Code	5–10 m	3–5 dm
Phase	5–10 cm	1–3 mm

Tab. 1: Typische Werte für die Standardabweichung des Messrauschens von Code- und Phasenbeobachtung für Smartphones und geodätische Empfänger

2) <https://bit.ly/gptest-device-database>
(Zugriff: 13.12.2013)

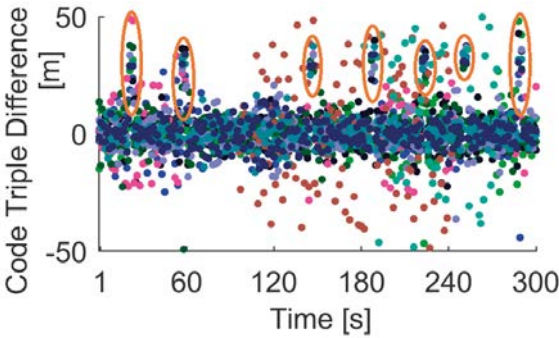


Abb. 2: Dreifach-Differenz der Code-Beobachtung (GPS, C1C) bei nicht-deaktiviertem Duty Cycling (Samsung Galaxy S20FE, farbkodiert nach Satelliten). Sprünge aufgrund von Duty Cycling sind mit orangen Ellipsen hervorgehoben.

Üblicherweise aktiviert und deaktiviert Android die GNSS-Hardware andauernd, um die Akkulaufzeit zu erhöhen [2]. Dieses Verhalten wird Duty Cycling genannt und bewirkt, dass GNSS-Signale nicht kontinuierlich erfasst werden. Folglich kann die konstante Eigenschaft der Phasen-Mehrdeutigkeit verloren gehen oder Sprünge in der Code-Beobachtung auftreten. Abbildung 2 zeigt ein solches Verhalten für die Dreifach-Differenz der GPS C1C Codebeobachtung eines Samsung Galaxy S20FE. Glücklicherweise können Nutzer:innen seit Android 9 Duty Cycling in den Entwickler-Optionen deaktivieren. Auf Android 12 oder höher können sogar Applikationen Duty Cycling verhindern, während sie aktiv sind. Diese wesentliche Einstellung erlaubt präzisere Positionierungen, da zum Beispiel eine konstante Phasen-Mehrdeutigkeit geschätzt werden kann.

3. Precise Point Positioning für Smartphones

Precise Point Positioning (PPP) hat sich aufgrund seiner Eigenschaften als hervorragende Positionierungstechnik für Smartphones erwiesen. PPP basiert auf präzisen Satellitenbahnen, -uhren und -biases und verwendet komplexe Modelle und Algorithmen zur Schätzung der Nutzer:innen-Position. Die benötigten Satellitenprodukte sind unabhängig von der Nutzer:innen-Position global gültig. Im Gegensatz zu relativen Verfahren werden also keine nahegelegenen Referenzstationen benötigt. Der größte Nachteil von PPP ist üblicherweise die Konvergenzzeit, also die Zeitdauer, bis der gewünschte Genauigkeitsbereich erreicht ist.

PPP ist eine sehr flexible Positionierungstechnik und eignet sich dadurch hervorragend für GNSS-Beobachtungen geringer Qualität. Insbesondere

das „uncombined model“ hat sich als vielversprechend erwiesen, da es auch für Ein-Frequenz-Smartphones oder eine geringe Anzahl an Zweifrequenz-Beobachtungen geeignet ist. Darüber hinaus kann ein Ionosphären-Modell direkt in die Parameterschätzung eingeführt werden, was zum „uncombined model with ionospheric constraint“ führt [8]. Dieser Ansatz stabilisiert die Positionslösung insbesondere für Low-Cost-Geräte und Smartphones.

$$C_1 = \rho + c(dt_r + \delta t^g) + dTrop^{wet} + dIono_1 + \varepsilon \quad (1)$$

$$L_1 = \rho + c(dt_r + \delta t^g) + dTrop^{wet} - dIono_1 + \lambda_1 N_1 + \varepsilon \quad (2)$$

Die Gleichungen (1) und (2) zeigen die PPP-Beobachtungsgleichungen des „uncombined model“ für Code C und Phase L auf der L_1 Frequenz. Tabelle 2 erklärt die verwendeten Variablenbezeichnungen.

Variable	Erklärung
ρ	geometrische Distanz
c	Lichtgeschwindigkeit
dt_r	Empfänger-Uhr-Fehler für GPS
δt^g	Empfänger Uhr-Offset für alle anderen GNSS
$dTrop^{wet}$	feuchter Teil der troposphärischen Laufzeitverzögerung
$dIono_1$	ionosphärische Laufzeitverzögerung (L_1 Frequenz)
N	reelle Phasen-Mehrdeutigkeit
λ	Wellenlänge
ε	Messrauschen, andere Fehler

Tab. 2: Erklärung der Variablen, die in den PPP-Beobachtungsgleichungen verwendet werden

Diese PPP-Beobachtungsgleichungen bilden den Zusammenhang zwischen den Messungen und den unbekannten Parametern, die mit einem Kalman-Filter geschätzt werden. Dabei ist die unbekannte Smartphone-Position in der geometrischen Distanz ρ zwischen Satellit und Smartphone enthalten. Für ein DF-Smartphone können ähnliche Gleichungen für die „zweite“ L_5 -Frequenz aufgestellt und ins Beobachtungsmodell integriert werden. Für Details zu diesem PPP-Modell und der Verwendung von ionosphärischen Pseudobeobachtungen bei der Parameterschätzung ist auf weiterführende Literatur verwiesen [9][10].

4. Ergebnisse

Für die im folgenden gezeigten PPP-Ergebnisse wurde am 12. Dezember 2023 ein Google Pixel 7 Pro für eine halbe Stunde auf einem Messpfeiler am Messdach der TU Wien in der Gußhausstraße platziert (Abbildung 3). Die GNSS-Messungen des Smartphones wurden mit der „GnssLogger App“ von Google aufgezeichnet. Das entstandene Textfile mit den Zeitstempeln der GNSS-Messungen des Smartphones wurde dann mit raPPPid, dem Open-Source-PPP-Modul der Vienna VLBI and Satellite Software [11] in Quasi-Echtzeit-Einstellungen verarbeitet: Alle Input-Daten sind in Echtzeit verfügbar und die durchgeführten Berechnungen sind echtzeitauglich. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die wichtigsten Einstellungen bei der PPP-Prozessierung.

Smartphone	Google Pixel 7 Pro
Beobachtungen	GPS: L1 und L5 Galileo: E1 und E5a
Satellitenbahnen, -uhren, -biases	Navigationsnachricht + Galileo HAS
PPP Modell	Uncombined Model with ionospheric constraint
Ionosphären Modell	Experimental IGS Realtime GIM
Troposphären Modell	GPT3 [12]
Korrekturmodelle	Feste Erdzeiten, relativistische Effekte, Phase Wind-Up

Tab. 3: Überblick über die PPP-Prozessierung

Um die Satellitenposition und Satellitenuhr der Navigationsnachricht zu verbessern, wurden die Daten des Galileo High Accuracy Service (HAS) verwendet. Seit Jänner 2023 überträgt der Galileo HAS PPP-Korrekturdaten für GPS und Galileo über das Satellitensignal auf der E6 Frequenz und das Internet3. Dieses Service ermöglicht, abhängig von der Qualität des GNSS-Empfängers und der Positionierungsalgorithmen, Genauigkeiten im Bereich weniger Dezimeter mit einer zu erwartenden Konvergenzzeit von einigen Minuten. Aufgrund seiner Eigenschaften eignet sich der Galileo HAS ausgezeichnet für Smartphones und ist eine Alternative zu den Echtzeit-Korrekturen des International GNSS Services, die über das Internet verfügbar sind (Ntrip Format).

3) <https://www.euspa.europa.eu/european-space/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has> (Zugriff: 10.12.2023)

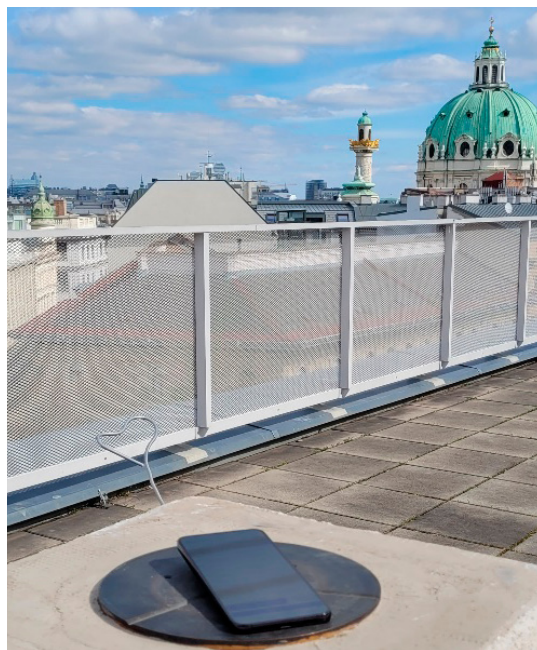


Abb. 3: Google Pixel 7 Pro, platziert auf einem Pfeiler am Messdach der TU Wien

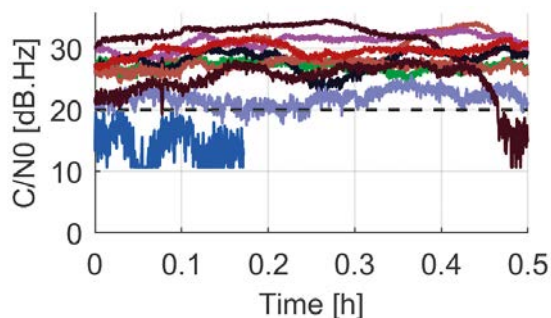


Abb. 4: Carrier-to-Noise Density über die Zeit der Messungen des Google Pixel 7 für GPS L5 und Galileo E5a (farbkodiert nach Satellit)

Abbildung 4 zeigt die Carrier-to-Noise Density der aufgezeichneten GNSS-Messungen auf der GPS-L5 und Galileo-E5a-Frequenz. Da die Werte der C/N0 deutlichen Schwankungen unterliegen und auch sehr schwache Signale empfangen werden, werden Beobachtungen mit einer besonders geringen Signalstärke verworfen. Hierfür hat sich ein Grenzwert von 20 dBHz als sinnvoll erwiesen. Darüber hinaus wird ein Cutoff-Winkel von 10° verwendet, um Beobachtungen von Satelliten aus niedrigen Elevationen auszuschließen, da diese tendenziell von sehr niedriger Qualität und fehlerbehaftet sind (z.B. Mehrwegeeffekte).

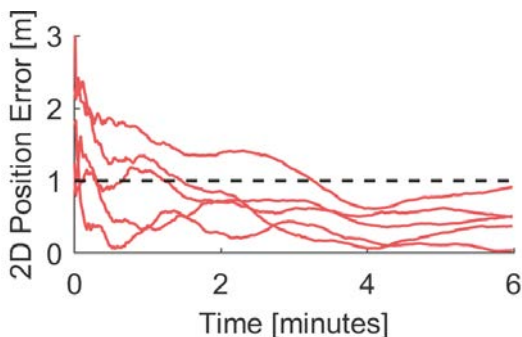


Abb. 5: 2D-Positionsfehler über die Zeit für die fünf Konvergenzabschnitte des Testfalles

Grundsätzlich sind effiziente Datenchecks essentiell bei der Verarbeitung von GNSS-Messungen von Smartphones. Daher werden die Code- und Phasen-Beobachtungen jeder Messepoche mit dem Beobachtungsmodell verglichen und bei zu großer Abweichung von der Parameterschätzung eliminiert. Da insbesondere die erfolgreiche Einbindung der Phasenbeobachtung in die PPP-Lösung wesentlich für das Erreichen hoher Genauigkeiten ist, müssen Cycle Slips verlässlich detektiert werden. Hierfür eignet sich ein Ansatz basierend auf der gemessenen Doppler-Verschiebung. Schlussendlich wird auch ein einfacher Algorithmus verwendet, um Mehrwegeeffekte zu detektieren. Dieser stützt sich auf die Dreifach-Differenz der Code-Beobachtungen und dem Vergleich mit einem Grenzwert.

Da das Smartphone auf einem Messpfiler platziert wurde, kann die PPP-Koordinatenlösung mit den „wahren“ Koordinaten verglichen werden. Die Abbildung 5 und 6 zeigen den resultierenden 2D- und 3D-Positionsfehler über die Zeit. Um die Ergebnisse besser beurteilen zu können, wurden die PPP-Berechnungen alle sechs Minuten neu gestartet. So ein Reset entspricht einem Neustart der PPP-Lösung und auf diese Weise entstehen fünf Konvergenzabschnitte in den Abbildungen. Diese erlauben es, die Konvergenzzeit und Genauigkeit der PPP-Koordinatenlösung zu beurteilen.

Nach einer Konvergenzzeit von zwei bis drei Minuten wird in der Lage eine Genauigkeit im Bereich einiger Dezimeter erreicht (Abbildung 5). Die 3D-Positionsdivergenz erreicht nach einer etwas ausgeprägteren Konvergenzzeit eine Genauigkeit von rund einem Meter oder darunter (Abbildung 6).

Abschließend noch ein paar Statistiken zum vorgestellten Testfall: Durchschnittlich wird ein 2D-Positionsfehler unter einem Meter nach rund 75 Sekunden erreicht und der Median des 2D-

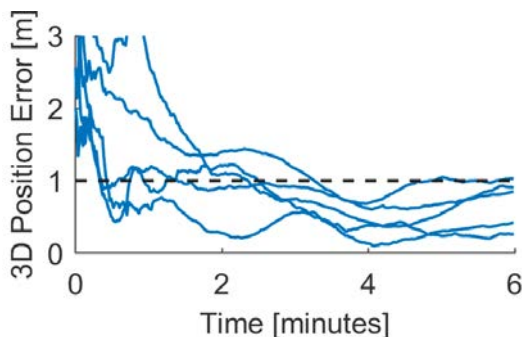


Abb. 6: 3D-Positionsfehler über die Zeit für die fünf Konvergenzabschnitte des Testfalles

Positionsfehlers aller Epochen beträgt 57 cm. Der durchschnittliche 3D Positionsfehler am Ende der fünf Konvergenzabschnitte (also nach 6 Minuten) beträgt rund 70 cm.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Nicht alle modernen Smartphones erlauben einen vollständigen Zugriff auf ihre GNSS-Messungen und die vorhandenen GNSS-Messungen bieten einige Herausforderungen für eine präzise Positionierung. Mit einer hochwertigen PPP-Software sind bei Verwendung der Korrekturen des Galileo HAS nach einer Konvergenzzeit von zwei bis drei Minuten Lage-Genauigkeiten im Bereich einiger Dezimeter möglich. Die 3D-Position erreicht eine Genauigkeit von rund einem Meter oder darunter. Diese Ergebnisse wurden unter guten Bedingungen (z.B. Open Sky und statisch) erzielt. Darauf aufbauend wird momentan mit Upstream Mobility und den Wiener Netzen/EPOSA eine Smartphone-Applikation entwickelt, die diese PPP-Berechnungen auf dem Smartphone in Echtzeit durchführen wird.

Es ist zu erwarten, dass der Zugriff auf die GNSS-Messungen von Smartphones in naher Zukunft noch umfangreicher wird. Durch Verfeinerungen des Beobachtungsmodells (z.B. verbesserte Gewichtung der Beobachtungen, Einführung von Phasenzentrumskorrekturen der Antenne) könnten die Ergebnisse weiter verbessert werden. Im Gegensatz zur kombinierten Standortbestimmung („fused location“) von Android-Smartphones basieren die hier gezeigten Ergebnisse rein auf GNSS. Weiterführende Forschungsarbeiten für eine stabile Positionslösung in schwierigeren Umgebungen sind in Planung. Dafür soll das Positionierungs-Modell auf kinematische Anwendungsfälle und andere Smartphone-Sensoren (z.B. Beschleunigungsmesser) ausgeweitet werden.

Referenzen

- [1] Paziewski, J. (2020). Recent advances and perspectives for positioning and applications with smartphone GNSS observations. *Measurement Science and Technology*, 31(9), 091001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab8a7d>
- [2] Zangenehnejad, F., & Gao, Y. (2021). GNSS smartphones positioning: Advances, challenges, opportunities, and future perspectives. *Satellite Navigation*, 2(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s43020-021-00054-y>
- [3] See, L., Soja, B., Kłopotek, G., Sturn, T., Weinacker, R., Karanam, S., Georgieva, I., Pan, Y., Crocetti, L., Rothacher, M., Navarro, V., Fritz, S., & McCallum, I. (2023). Collecting volunteered geographic information from the Global Navigation Satellite System (GNSS): Experiences from the CAMALIOT project. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 2818–2841. <https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2239761>
- [4] European GNSS Supervisory Authority. (2017). Using GNSS raw measurements on Android devices: White paper. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2878/449581>
- [5] Zangenehnejad, F., Jiang, Y., & Gao, Y. (2023). GNSS Observation Generation from Smartphone Android Location API: Performance of Existing Apps, Issues and Improvement. *Sensors*, 23(2), 777. <https://doi.org/10.3390/s23020777>
- [6] Zhang, X., Tao, X., Zhu, F., Shi, X., & Wang, F. (2018). Quality assessment of GNSS observations from an Android N smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach. *GPS Solutions*, 22(3), 70. <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0736-8>
- [7] Wanninger, L., & Heßelbarth, A. (2020). GNSS code and carrier phase observations of a Huawei P30 smartphone: Quality assessment and centimeter-accurate positioning. *GPS Solutions*, 24(2), 64. <https://doi.org/10.1007/s10291-020-00978-z>
- [8] Glaner, M. F. (2022). Towards instantaneous PPP convergence using multiple GNSS signals [PhD Thesis, TU Wien]. <https://doi.org/10.34726/HSS.2022.73610>
- [9] Boitsits, J., Glaner, M., & Weber, R. (2020). Regiomontan: A Regional High Precision Ionosphere Delay Model and Its Application in Precise Point Positioning. *Sensors*, 20(10), 2845. <https://doi.org/10.3390/s20102845>
- [10] Glaner, M. F., & Weber, R. (2023). Breaking the One-Meter Accuracy Level with Smartphone GNSS Data. *Engineering Proceedings*, 54(1). <https://doi.org/10.3390/ENC2023-15465>
- [11] Glaner, M. F., & Weber, R. (2023). An open-source software package for Precise Point Positioning: RaPPPid. *GPS Solutions*, 27(4), 174. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01488-4>
- [12] Landskron, D., & Böhm, J. (2018). VMF3/GPT3: Refined discrete and empirical troposphere mapping functions. *Journal of Geodesy*, 92(4), 349–360. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1066-2>

Anschrift des Autors

Dr. Marcus Franz Wareyka-Glaner, Department für Geodäsie und Geoinformation, Wiedner Hauptstraße 8/E120.4, 1040 Wien.

E-Mail: marcus.glaner@geo.tuwien.ac.at



Besuchen Sie die OVG Facebook Seite!

- ➡ Ankündigung von Veranstaltungen
- ➡ Aktuelle Berichte
- ➡ Treffpunkt der Community (aktuell ~100 Abonnenten)
- ➡ Funktioniert auch ohne Facebook Account!



www.facebook.com/OVGAustria



:: Be part of it! ::