

GNSS-Messungen mit Smartphones – Analyse der Beobachtungsdaten und cm-genaue Positionsbestimmung

GNSS Measurements with Smartphones – Observation Analysis and cm-accurate Positioning

Anja Heßelbarth | Lambert Wanninger

Zusammenfassung

Seit einigen Jahren ist es leicht möglich, auf die GNSS-Beobachtungsdaten von Android-Smartphones zuzugreifen. In diesem Beitrag werden die Code- und Phasendaten von drei verschiedenen solchen Smartphones (Xiaomi Mi8, Huawei P30 und Samsung S20) hinsichtlich Verfügbarkeit und Qualität analysiert. Es wird gezeigt, dass für Anwendungen unter sehr guten Bedingungen eine Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern möglich ist. Voraussetzung dafür ist, dass die Phasenbeobachtungen die Eigenschaft ganzzahliger Mehrdeutigkeiten aufweisen. Die Antennenkalibrierungen zeigen, dass für diese Genauigkeiten zumindest der Höhenoffset des Phasenzentrums berücksichtigt werden muss.

Schlüsselwörter: GNSS, Smartphones, Trägerphasenmessungen, Antennenkalibrierung, cm-Genauigkeit

Summary

For a few years now, GNSS observation data of Android smartphones are readily accessible. In this paper, code and carrier-phase observations of three different smartphones (Xiaomi Mi8, Huawei P30, and Samsung S20) are analyzed with respect to availability and quality. For applications under favorable environmental conditions, position determination with an accuracy of a few centimeters is feasible. A prerequisite is that the carrier-phase ambiguities have integer property. Smartphone antenna calibrations revealed that for cm-accurate positioning, at least the phase center height offset must be taken into account.

Keywords: GNSS, smartphones, carrier phase measurements, antenna calibration, cm-accuracy

1 Einführung

Jedes Smartphone kann aufgrund eines eingebauten GNSS-Chips zur Positionsbestimmung und Navigation genutzt werden. Die erzielbaren Genauigkeiten betragen dabei meist mehrere Meter. Bis vor einigen Jahren konnte der Nutzerkreis nur auf die intern gerechneten Positions- und

Geschwindigkeitsdaten zugreifen. Seit der Einführung von Android 7 im Jahr 2016 ist es allerdings möglich, auf die GNSS-Beobachtungsdaten zuzugreifen und diese aufzuzeichnen (Banville und van Diggelen 2016, GSA 2017). Zusätzlich können heutzutage einige Smartphones neben den Code-Beobachtungen auch Phasenmessungen durchführen und die eingebauten GNSS-Chips sind zweifrequenzfähig. Tab. 1 zeigt die drei Android Smartphones, die für die hier dargestellten Untersuchungen genutzt wurden. Alle drei liefern Code- und Phasenmessungen für GPS und Galileo auf den Frequenzen L1/E1 und L5/E5 und zusätzlich auf den Frequenzen R1 und B1-2 für GLONASS und BeiDou.

Tab. 1: Untersuchte Android-Smartphones (Broadcom 2017, Huawei 2017, Qualcomm 2021)

Smartphone	Chip	Release
Xiaomi Mi8	Broadcom 47755	Mai 2018
Huawei P30	Kirin 980	August 2018
Samsung S20	Snapdragon 865	März 2020

Die Antennen der Smartphones sind nicht für den reinen GNSS-Empfang konzipiert. Vielmehr nutzen andere Kommunikationskanäle, wie Bluetooth oder W-Lan, als auch die GNSS-Signale eine gemeinsame Antenne. Dies führt zu einem verstärkten Rauschen der GNSS-Signale (Critchley-Marrows et al. 2020).

Wenn die Phasenmessungen die Eigenschaft ganzzahliger Mehrdeutigkeiten aufweisen, dann sollte im Prinzip eine schnelle cm-genaue Positionsbestimmung möglich sein. Für GNSS-Messungen mit einem Smartphone ergibt sich daher folgende Fragestellung: *Weisen die Phasenmessungen die Eigenschaft ganzzahliger Mehrdeutigkeiten auf und wenn ja, welche Beobachtungsdauer ist für eine cm-genaue Positionsbestimmung notwendig?*

In den letzten drei bis vier Jahren haben viele Wissenschaftler sowohl die Qualität der einzelnen GNSS-Messgrößen als auch die erzielbaren Positionsgenauigkeiten von Smartphones untersucht. Die erreichten Genauigkeiten sind stark vom verwendeten Positionsalgorithmus und den genutzten Beobachtungsdaten abhängig. Wird ein Standardalgorithmus auf der Basis von Codebeobachtungen

verwendet, beträgt die Genauigkeit einige Meter (Gogoi et al. 2019, Psychas et al. 2019, Paziewski et al. 2019, Paziewski et al. 2020). Werden zusätzlich Phasendaten als Beobachtungsgrößen eingeführt, steigt die Genauigkeit zumindest für statische Anwendungen auf einige Dezimeter. Allerdings konnten die Phasenmehrdeutigkeiten bei vielen dieser Anwendungen nicht festgesetzt werden (Wu et al. 2019, Elmezayen und El-Rabbany 2019, Psychas et al. 2019). Erst durch die Hinzunahme von Beobachtungen einer koordinatenmäßig bekannten Referenzstation kann, wenn die Phasenmehrdeutigkeiten ganzzahlig bestimmbar sind, eine Genauigkeit von wenigen Zentimetern nach mehreren Minuten Beobachtungszeit erreicht werden (Darugna et al. 2019, Wanninger und Heßelbarth 2020, Darugna et al. 2021, Paziewski et al. 2021).

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Smartphones Xiaomi Mi8, Huawei P30 und Samsung S20 präsentiert. Die Analysen beziehen sich auf die Qualität und Verfügbarkeit der einzelnen Beobachtungsgrößen, die Bestimmung der Antennenphasenoffsets und -variationen sowie die Einordnung, ob die Trägerphasen ganzzahlige Eigenschaften besitzen. Am Ende werden Positionsgenauigkeiten unter der Verwendung von zusätzlichen Code- und Phasenbeobachtungen einer nahegelegenen Referenzstation berechnet. Um die Analysen und Ergebnisse einordnen zu können, erfolgt für alle Auswertungen ein Vergleich mit den Daten einer geodätischen Messausrüstung.

2 Datengrundlage und deren Verarbeitung

Alle Messungen wurden in einem Zeitraum von 1,5 Jahren (Huawei P30: Juni/Juli 2019, Xiaomi Mi8: Ende 2019/Anfang 2020, Samsung S20: Oktober/November 2020) auf dem Dach eines Bürogebäudes in Dresden durchgeführt (Abb. 1, Rahmen mit durchgezogener Linie). Um mit dem jeweiligen Smartphone immer in aufrechter Position mes-

sen und um es auf einem Dreifuß montieren zu können, wurde eine entsprechende Halterung entworfen (Abb. 1, Rahmen mit gestrichelter Linie). Dies hatte weiterhin den Vorteil, dass sich alle Messungen leicht auf denselben vermarkten Punkt beziehen lassen. Dieser wurde auch genutzt, um mit einer geodätischen Ausrüstung (Septentrio PolaRx5 Empfänger mit NaX3G+C Antenne) Vergleichsmessungen zu erzeugen und eine hochgenaue Sollposition zu bestimmen. Diese Vergleichsmessungen erfolgten im Dezember 2019. Alle Messungen fanden unter den gleichen abschattungs-freien Bedingungen statt, sodass Signalstörungen oder Signalabrisse auf ein Minimum reduziert sind.

Auf diesem Dach befindet sich ebenfalls eine permanent betriebene Referenzstation (Septentrio PolaRx5 Empfänger mit JavRingAnt_DM JVDM Antenne, Abb. 1, Rahmen mit gepunkteter Linie), deren Beobachtungen für die Basislinienauswertungen verwendet wurden.

Zum Aufzeichnen der Beobachtungen in eine ASCII-Ausgabedatei wurde immer die Android App GNSS Logger (Version 2.0.0.1, Release August, 2017) verwendet (GSA 2017, van Diggelen und Khider 2018). Für die anschließende Konvertierung der GNSS-Beobachtungen (Phase-, Code- und Dopplerdaten) in das standardisierte Receiver Independent Exchange Format (RINEX, IGS/RTCM 2018) wurde ein eigens entwickeltes Programm AND2RINEX genutzt. Die GNSS-Rohdaten wurden in diesem Schritt auf ein Intervall von 15 Sekunden ausgedünnt. Die anschließende Datenauswertung und -analyse sowie die Basislinienauswertung erfolgte mit der GNSS-Postprocessing Software WaSoft, entwickelt vom Koautor.

Es wurde bei den einzelnen Messsessionen immer versucht, eine möglichst lange Beobachtungsdauer zu erzielen. Allerdings wurden die Aufzeichnungen oftmals nach einigen Stunden (Huawei P30 und Samsung S20) bzw. vielen Stunden (Xiaomi Mi8) abgebrochen. Die Ursachen dafür können vielfältig sein und konnten nicht endgültig ermittelt werden.



Abb. 1:
Messanordnung
auf dem Dach eines
Bürogebäudes in
Dresden (Rahmen
mit durchgezogener
Linie, Quelle: www.google.com/earth),
Smartphone mit Hal-
terung (Rahmen mit
gestrichelter Linie),
Antenne der Refer-
enzstation (Rahmen
mit gepunkteter
Linie)

3 Analyse der Beobachtungen

In der ersten Analyse wurde die Vollständigkeit der aufgezeichneten Code- und Phasenbeobachtungen überprüft. Abb. 2 zeigt die durchschnittliche Anzahl der Phasen- und Codebeobachtungen der drei Smartphones und zum Vergleich des geodätischen Empfängers.

Galileo und BeiDou deutliche Unterschiede. Gerade im Vergleich zu den Smartphones Xiaomi Mi8 und Huawei P30 ist die Anzahl der durchschnittlichen Beobachtungen des geodätischen Empfängers oftmals doppelt so groß. Auch das Samsung S20 hat deutliche Schwierigkeiten, alle Phasendaten zu tracken. Die Hauptprobleme der Smartphones sind unter anderem:

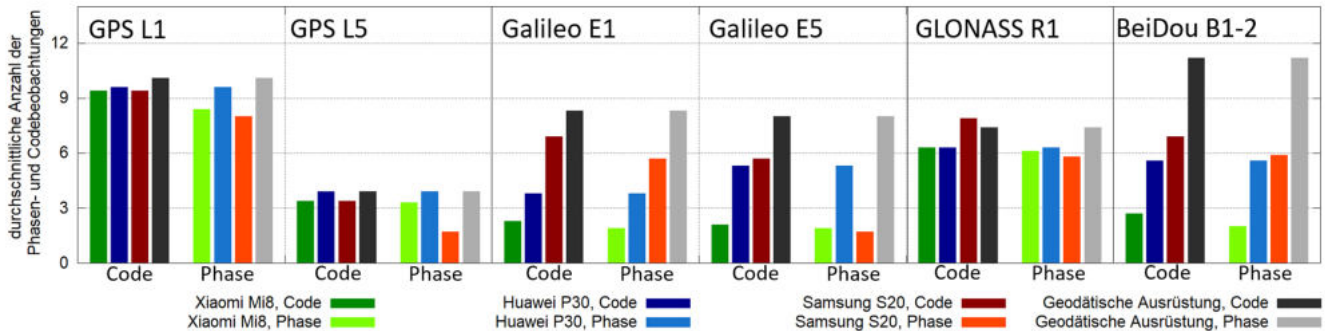


Abb. 2: Verfügbarkeit der Phasen- und Codebeobachtungen für die drei untersuchten Smartphones bzw. für die geodätische Ausrüstung

Die jeweiligen Durchschnittswerte basieren auf zusammenhängenden Messdatensätzen mit einer Dauer von mehreren Stunden, verteilt über jeweils vier bis fünf Tage zu unterschiedlichen Tageszeiten. Die Gesamtanzahl der verfügbaren Satelliten der einzelnen GNSS änderte sich während des Messzeitraums von 1,5 Jahren kaum, wie eine Analyse der aufgezeichneten Beobachtungsdaten der permanenten Referenzstation zeigte. Größere Unterschiede in der durchschnittlichen Anzahl der Code- und Phasenbeobachtungen sind daher dem jeweiligen Smartphone geschuldet.

Ende 2017 wurden die ersten BeiDou 3-Satelliten in Betrieb genommen. Seitdem können Messungen zu BeiDou 2- und BeiDou 3-Satelliten durchgeführt werden. Der Aufbau von BeiDou 3 war 2019 im Wesentlichen abgeschlossen. Sowohl die Smartphones als auch die geodätische Ausrüstung empfangen die Satelliten beider Generationen.

Während bei den Phasen- und Codedaten von GPS und GLONASS die Anzahl der Beobachtungen etwa auf einem Niveau sind, zeigen sich bei den Beobachtungsdaten von

- **Xiaomi Mi8:** Es wurden Ende 2019/Anfang 2020 bei Galileo und BeiDou nur die Beobachtungen von Satelliten aufgezeichnet, die von Anfang an sichtbar sind, neu hinzukommende Satelliten werden nicht aufgezeichnet.
- **Huawei P30:** Für Galileo E13, E15, E33 und E36 wurden im Sommer 2019 keine Beobachtungen erfasst, obwohl diese Satelliten aktiv und gesund gesetzt waren.
- **Samsung S20:** Grundsätzlich werden hier immer mehr Codebeobachtungen als die dazugehörigen Phasenbeobachtungen aufgezeichnet, besonders für L5/E5.

Für eine Auswertung von Phasenbeobachtungen sind auch die zusammenhängenden Beobachtungsböcke entscheidend. Diese sollten möglichst lang und ohne Phasensprünge (cycle slips) sein, damit die Phasenmehrdeutigkeiten in der späteren Auswertung nicht immer neu geschätzt werden müssen. In Abb. 3 sind die Anzahl der Beobachtungen pro Mehrdeutigkeitsblock dargestellt.

Alle Smartphones und der geodätische Empfänger hatten durch den Messaufbau auf dem Dach die gleichen idealen Umgebungsbedingungen, aber nur der geodätische

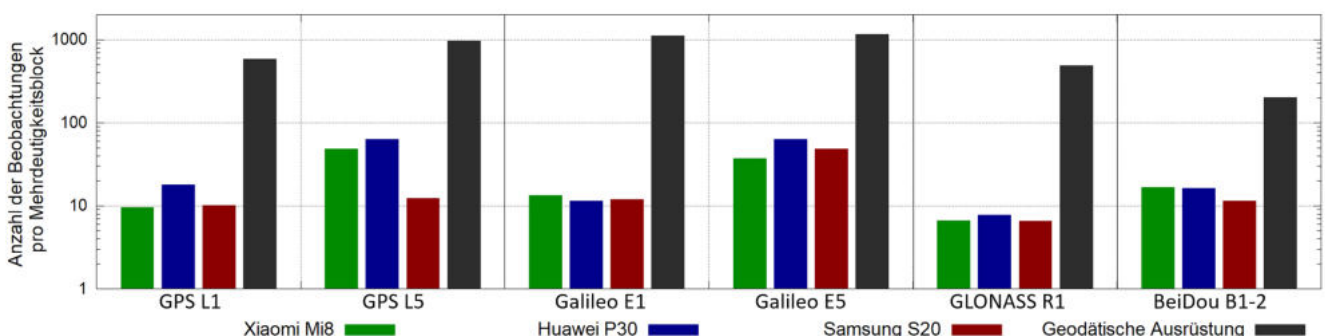


Abb. 3: Durchschnittliche Anzahl der Beobachtungen pro Mehrdeutigkeitsblock für die untersuchten Smartphones bzw. für die geodätische Ausrüstung

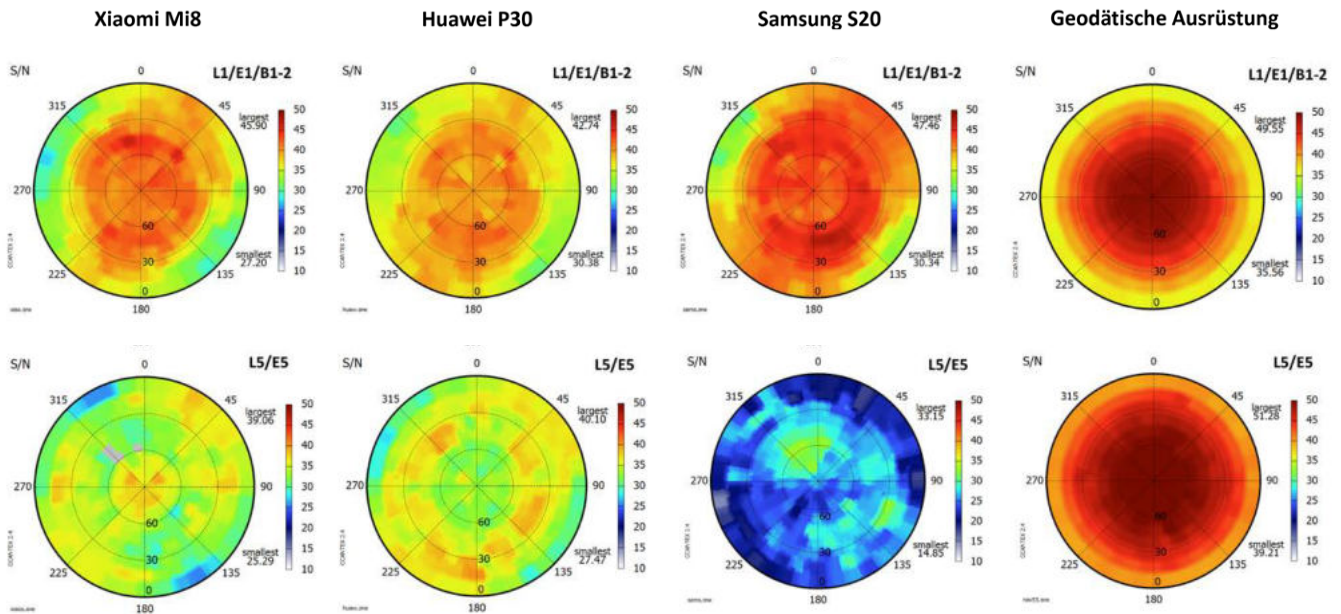


Abb. 4: Elevations- und azimutabhängige C/N_0 -Werte der GNSS-Messungen für die untersuchten Smartphones bzw. für die geodätische Ausrüstung (oberer Teil der Abbildung: Frequenzen L1/E1/B1-2, unterer Teil der Abbildung: Frequenzen L5/E5)

Empfänger zeigt die zu erwartenden langen Mehrdeutigkeitsblöcke, die in etwa einem Satellitendurchgang entsprechen. Die Smartphones haben nur sehr kurze Blöcke, d. h. die Messungen sind immer wieder durch Cycle Slips unterbrochen.

Neben den Code-, Phasen- und Dopplerbeobachtungen werden für alle Smartphones auch die Signalstärken in Form eines C/N_0 (engl. *Carrier-to-noise power density*) Verhältnisses angegeben. Dieser Wert ist nicht nur ein wichtiger Parameter, um die Signalqualität zu beurteilen, sondern auch ein Indikator, wie die Antenne die Signale in Abhängigkeit des einfallenden Winkels verstärken kann. Das C/N_0 wirkt sich direkt auf die Qualität der Code- und Phasenbeobachtungen des Empfängers aus. Bei geodätischen Antennen kennzeichnen Werte unter z. B. 34 dB-Hz schwache Signale (Langley 1997).

Abb. 4 vergleicht die C/N_0 -Werte der Frequenzen L1/E1/B1-2 (GPS, Galileo, BeiDou; oberer Teil der Abbildung) und der Frequenzen L5/E5 (GPS, Galileo; unterer Teil der Abbildung) basierend auf den Messungen der drei Smartphones und des geodätischen Empfängers in Abhängigkeit der Elevation und des Azimutes. Die C/N_0 -Werte basierend auf den Messungen mit den Smartphones sind im Durchschnitt in etwa 10 dB-Hz niedriger als die der geodätischen Ausrüstung. Zusätzlich fällt auf, dass sich die deutliche Elevationsabhängigkeit, wie sie für geodätische Antennen typisch ist, bei den Smartphones nicht wiederfindet. Stattdessen treten vermehrt azimutale Variationen auf, insbesondere für L1/E1/B1-2 bei niedrigen Elevationswinkeln. Beim Samsung S20 sind diese Variationen auf L5/E5 auch für Messungen in mittleren Elevationsbereichen zu finden. Außerdem ist hier die deutlich geringere Signalstärke auffällig (maximaler C/N_0 -Wert: 33,2 dB-Hz). Auch die Antennen des Xiaomi Mi8 und Huawei P30 sind weniger empfindlich für die Signale auf L5/E5.

Für das Xiaomi Mi8 wurden von Massarweh et al. (2020) in Abhängigkeit der Zeit betragsmäßig ähnliche Werte aufgezeigt. Paziewski et al. (2021) ermittelte die C/N_0 -Differenzen zwischen Smartphones der Marken Huawei sowie Xiaomi und einer geodätischen Ausrüstung. Diese betragen in dieser Studie zwischen 6 dB-Hz (GPS L1) und 15 dB-Hz (GPS L5, Galileo E5) und sind mit den Werten dieser Studie vergleichbar.

Die Qualität der Codebeobachtungen kann aus einem Vergleich mit den dazugehörigen Phasenbeobachtungen abgeleitet werden. Ungenaue Satellitenkoordinaten oder Abweichungen in der Position der Empfangsantenne wirken ebenso wie troposphärische Verzögerungen gleichermaßen auf die Code- und Phasenmessungen und fallen somit in Differenzen heraus. Wenn Zweifrequenz-Phasendaten vorliegen, können auch ionosphärische Verzögerungen minimiert werden. Die *Multipath*-Linearkombination (MP; Hauschild 2017) bzw. *Code-minus-Carrier*-Linearkombination (CMC; Braasch 2017) werden nur noch von Code-Mehrwegeeffekten und Rauschen beeinflusst. Aufgrund dessen, dass alle Messungen auf einem Dach und somit unter nahezu idealen Bedingungen stattfanden, ohne Störung der GNSS-Signale und mit nur geringen Signalreflektionen, spiegeln die Ergebnisse der Linearkombinationen die Qualität der Codebeobachtungen wider.

In Heßelbarth und Wanninger (2020) wurde gezeigt, dass die MP-Werte basierend auf den Beobachtungen der Smartphones Xiaomi Mi8 und Huawei P30 im Gegensatz zu denen der geodätischen Ausrüstung kaum eine Elevationsabhängigkeit vorweisen. Daher sind in Abb. 5 die MP-Werte in Beziehung zu den C/N_0 -Werten dargestellt. Insbesondere für die Beobachtungen auf L5/E5 zeichnet sich für das Huawei P30 und auch für das Xiaomi Mi8 eine Abhängigkeit zwischen Signalstärke und Betrag der MP-Werte ab. So sind die MP-Werte bei niedrigen

Tab. 2: RMS der MP-Werte über den gesamten Beobachtungszeitraum für die drei untersuchten Smartphones bzw. die geodätische Ausrüstung

GNSS	Qualität der Codebeobachtungen [m]			
	Xiaomi Mi8	Huawei P30	Samsung S20	Geodätische Ausrüstung
GPS (L1/L5)	2,0 / 1,2	1,8 / 1,6	2,2 / 1,6	0,2 / 0,2
Galileo (E1/E5)	2,0 / 1,4	2,0 / 1,8	2,2 / 1,5	0,2 / 0,2
GLONASS (R1)	2,2	2,2	2,2	0,5
BeiDou (B1-2)	1,9	2,2	2,5	0,4

C/N_0 -Werten (<25 dB-Hz) deutlich über 2 Meter. Bei steigenden C/N_0 -Werten werden die MP-Werte deutlich kleiner und unterschreiten für GPS L5 einen Wert von 1 Meter. Im Gegensatz dazu sind beim Samsung S20 die MP-Werte bei niedrigen C/N_0 -Werten deutlich geringer und fallen auch bei ansteigenden C/N_0 -Werten nicht so deutlich ab.

Als statistische Angaben wurden über den gesamten Beobachtungszeitraum der MP-Werte *root mean square* (RMS)-Werte berechnet (Tab. 2). Für die Smartphones ist erkennbar, dass die Codemessungen für L5/E5 etwas genauer ausfallen als für L1/E1/B1-2. Die Qualität der Codebeobachtungen für GPS und Galileo ist in etwa um eine Größenordnung besser, wenn diese auf den Messungen des geodätischen Empfängers beruhen.

In Psychas et al. (2019) wurde u. a. ebenfalls die Codequalität des Xiaomi Mi8 untersucht. Die berechneten MP-Werte für L1/E1 und L5/E5 entsprechen in etwa denen dieser Untersuchung.

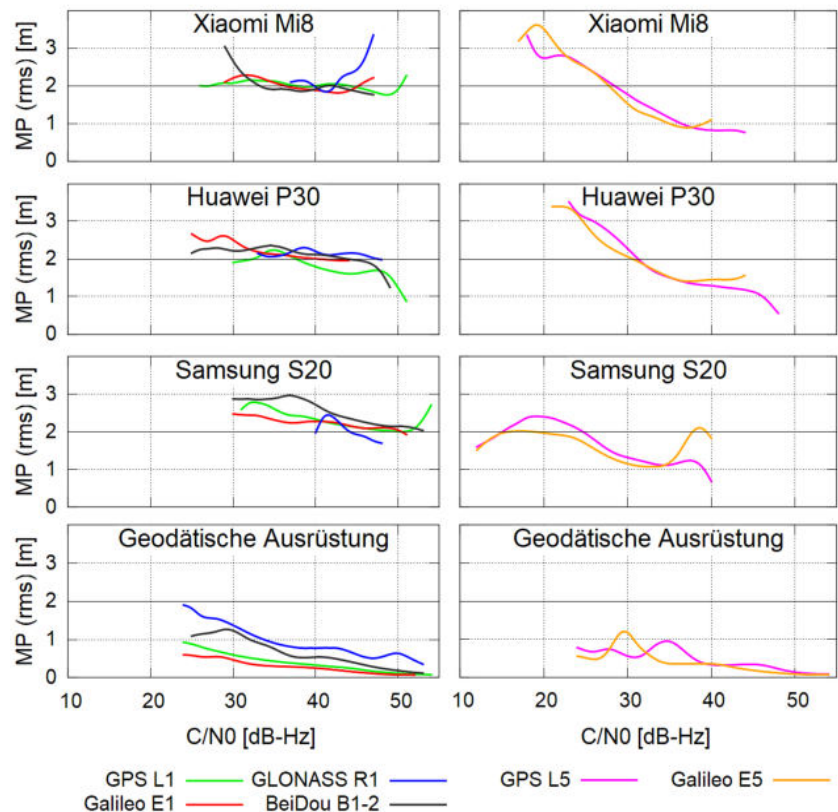


Abb. 5: MP-Werte in Abhängigkeit der Signalstärke basierend auf den Messungen der drei untersuchten Smartphones bzw. der geodätischen Ausrüstung

4 Mehrdeutigkeiten der Phasenmessung

Idealerweise haben die Phasenmehrdeutigkeiten die Eigenschaft, ganzzahlig zu sein. Um dies zu überprüfen, wurden Doppeldifferenz (DD)-Residuen der Basislinie zwischen der permanenten Station und den Smartphones bzw. der geodätischen Ausrüstung bestimmt. Aufgrund des bekannten Bezugspunktes, auf den alle Versuchsmessungen durchgeführt wurden (Abs. 2) und der ebenso koordinatenmäßig bekannten Referenzstation kann der Basislinienvektor als bekannter Parameter eingeführt werden. Die Distanz zwischen den beiden Stationen beträgt nur 7,3 Meter und die Residuen werden aufgrund dessen nicht durch atmosphärische Effekte oder Satellitenbahnfehler beeinflusst und enthalten nur Mehrwegeeffekte und Mess-

rauschen der Phasendaten sowie eventuelle differenzielle instrumentelle Verzögerungen.

Eine anschauliche Möglichkeit, um die Ganzzahligkeit der Phasenmessungen aufzeigen zu können, ist die Darstellung der DD-Residuen-Reststücke (engl. *fractional cycle DD residuals*) in Histogrammen (Abb. 6). In Tab. 3 sind zusätzlich die Prozentsätze der Residuen, die im Bereich $-0,1$ bis $+0,1$ Zyklen liegen, aufgelistet. Bei idealen Phasenmessungen, die nicht von Messrauschen, Mehrwegeeffekten oder instrumentellen Verzögerungen beeinflusst sind, sollten diese Reststücke den Wert 0 annehmen. Ausgeprägte Maxima um null weisen die Ganzzahligkeit der Phasenmehrdeutigkeiten nach.

Beim Huawei P30 ist ein ausgeprägtes Maximum nur für die GPS-Beobachtungen auf der Frequenz L1 erkennbar.

Tab. 3: Anzahl der DD-Residuen-Reststücke in einem Bereich zwischen $-0,1$ und $+0,1$ Zyklen für die drei untersuchten Smartphones bzw. die geodätische Ausrüstung

	Anzahl der Residuen zwischen $-0,1$ und $+0,1$ Zyklen in %					
	GPS L1	GPS L5	Galileo E1	Galileo E5	GLONASS R1	BeiDou B1-2
Xiaomi Mi8	48	42	46	36	–	52
Huawei P30	49	–	–	–	–	–
Samsung S20	65	50	69	47	–	60
Geodätische Ausrüstung	96	91	96	89	91	95

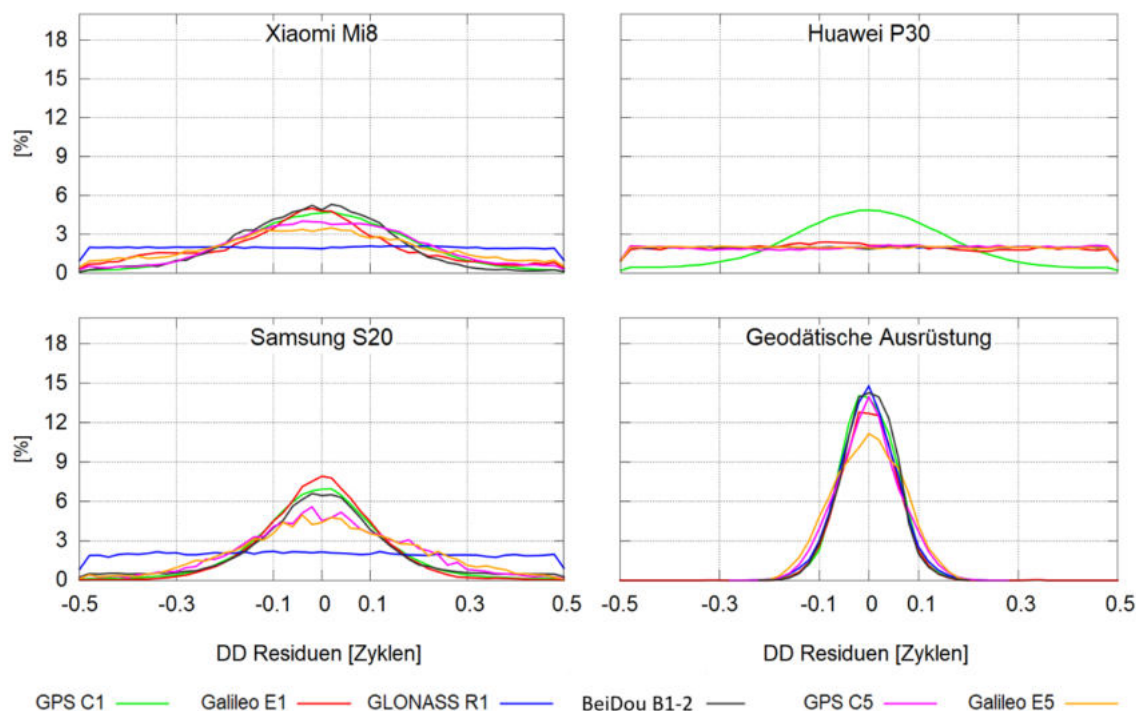


Abb. 6: Verteilung der DD-Residuen-Reststücke der Beobachtungen zwischen Referenzstation und den untersuchten Smartphones bzw. der geodätischen Ausrüstung

Im Gegensatz dazu zeigen die DD-Residuen-Reststücke des Xiaomi Mi8 und des Samsung S20 deutliche Maxima für alle Phasenbeobachtungen außer bei GLONASS. Sowohl graphisch als auch numerisch ist ersichtlich, dass die Maxima der DD-Residuen-Reststücke für das Samsung S20 ausgeprägter sind als die des Xiaomi Mi8. Wie zu erwarten, liegen beim geodätischen Empfänger die prozentualen Anteile der DD-Residuen, die in dem erwähnten Bereich von $-0,1$ bis $+0,1$ Zyklen liegen, nahezu immer über 90 %. Da andere Faktoren, wie Basislinienlänge, Qualität der Beobachtungen der Referenzstation, Software zur Berechnung der Phasenresiduen, identisch sind, lässt sich schlussfolgern, dass die geodätische Ausrüstung deutlich weniger von unterschiedlichen instrumentellen Verzögerungen und Mehrwegeeffekten der Phasenbeobachtungen beeinflusst wird.

5 Kalibrierung der Smartphone-Antennen

Neben der Eigenschaft der Ganzzahligkeit der Phasenmehrfachdeutigkeiten sind für eine cm-genaue Positionsbestimmung präzise Informationen über die Antennenphasenzentrumsoffsets erforderlich. Ebenfalls kann es je nach Anwendung und der damit verbundenen Genauigkeitsanforderung notwendig sein, die Phasenzentrumsvariationen mit zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurden alle Smartphones auf dem Dach des Gebäudes kalibriert. Das jeweilige Smartphone befand sich in der in Abb. 1 gezeigten Halterung, und die Mitte der Smartphone-Unterseite wurde als Antennenreferenzpunkt definiert. Die GNSS-Station, die permanent auf dem Dach betrieben wird, diente für die Kalibrierung als Referenzstation. Deren Antenne, JavRingAnt_DM JVDM, war in der Bonner Antennenkammer kalibriert worden (Zeimetz 2012).

Die Kalibrierung der Smartphones erfolgte durch azimutale Rotation (Nord, Ost, Süd, West). Diese kann auf zwei verschiedene Wege durchgeführt werden. Zum einen durch eine manuelle Drehung, bei der vier separate Messungen

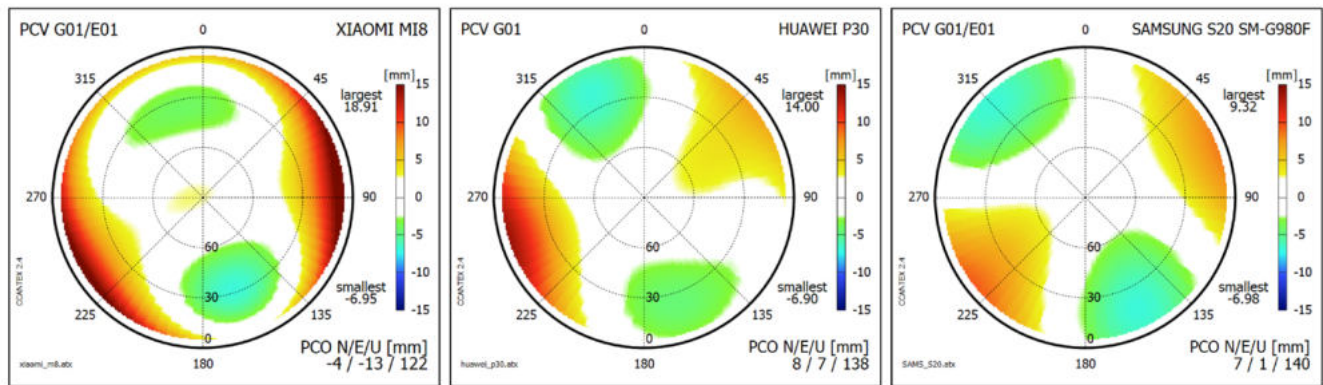


Abb. 7: Phasenzentrumsvariationen und Phasenzentrumsoffset der Frequenzen L1/E1 für die drei untersuchten Smartphones

von mehreren Stunden zu den jeweils vier verschiedenen azimuthalen Orientierungen erfolgen. Zum anderen kann mit der institutseigenen automatischen Dreheinrichtung (DRB2) eine automatisierte Rotation durchgeführt werden, welche es ermöglicht, in einer Minute alle vier azimuthalen Ausrichtungen zu beobachten (Schmolke et al. 2015). Der Zweck der Drehungen, ob manuell oder automatisiert, ist die Bestimmung der Phasenzentrumsvariationen für die komplette Hemisphäre. Weiterhin werden dadurch Mehrwegeeffekte verringert.

Eine Antennenkalibrierung für Trägerphasen ist nur dann erfolgreich, wenn in der Basislinie die Mehrdeutigkeiten festgesetzt werden konnten. Daher kann für das Huawei P30 nur eine Kalibrierung für die GPS L1 durchgeführt werden. Für das Xiaomi Mi8 und Samsung S20 sind theoretisch auch Kalibrierungen auf den Frequenzen L5/E5 möglich, allerdings existiert, wie Abb. 2 zeigt, keine ausreichende Anzahl an Beobachtungen, um zuverlässige Ergebnisse zu erzielen.

In Abb. 7 zeigen alle drei Smartphones große Ähnlichkeiten im Muster ihrer Phasenzentrumsvariationen. Diese erreichen bis zu 1 bis 2 cm, wobei das Xiaomi Mi8 die größten Variationen aufweist.

Der Phasenzentrumsoffset kann mit einer Genauigkeit von etwa 1 cm bestimmt werden und zeigt anhand der Höhenkomponente von deutlich mehr als einem Dezimeter, dass sich die Antenne im oberen Bereich des jeweiligen Smartphones befindet. Die Werte für den Offset in Nord und Ost lassen folgern, dass die Antenne in etwa mittig liegt, mit leichten Verschiebungen nach links (Huawei P30) bzw. rechts (Xiaomi Mi8).

In Darugna et al. (2021) wurden Antennenkalibrierungen für das Smartphone Huawei Matex20X durchgeführt. Da hier aber mit einem liegenden Smartphone gearbeitet wurde, sind Ergebnisvergleiche nur begrenzt möglich.

6 Positionsbestimmung

In den letzten beiden Abschnitten wurde gezeigt, dass in Abhängigkeit des Smartphones die Phasemehrdeutigkeiten für einige GNSS-Beobachtungen bestimmbar sind und auch Antennenkorrekturen ermittelt werden kön-

nen. Demzufolge sollte es möglich sein, eine Positionsbestimmung auf dem Niveau von wenigen Zentimetern durchzuführen. Allerdings kann aus den vorangegangenen Analysen gefolgert werden, dass eine cm-genaue Positionsbestimmung nur für L1/E1/B1-2 möglich sein wird. Entweder zeigen die Mehrdeutigkeiten keine Ganzzahligkeit (Huawei P30) oder es sind zu wenige Beobachtungen für L5/E5 (Xiaomi Mi8, Samsung S20) vorhanden. Da beim Huawei P30 nur für GPS L1 ein Festsetzen der Mehrdeutigkeiten möglich ist, beschränkt sich folgende Auswertung auf diese Beobachtungsgröße. Für alle Auswertungen wurden immer die dazugehörigen Beobachtungen der Permanentstation verwendet. Folgende Varianten sind analysiert worden:

- **DGNSS:** Differenzielle Auswertung der Codebeobachtungen,
- **Float:** Differenzielle Auswertung der Trägerphasen ohne Mehrdeutigkeitsfestsetzung,
- **Fixed:** Differenzielle Auswertung der Trägerphasen mit Mehrdeutigkeitsfestsetzung.

Diese Auswertungen wurden für verschiedene Beobachtungsblöcke (5–120 Minuten) durchgeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse mit der bekannten Sollposition verglichen und 3D RMS-Werte berechnet.

Abb. 8 zeigt die Ergebnisse der statischen Basislinienauswertungen zwischen Referenzstation und den drei Smartphones (links) bzw. zum Vergleich der geodätischen Ausrüstung (rechts). Die Smartphones erreichen für die drei Varianten in etwa ähnliche Genauigkeiten. Bei der DGNSS-Lösung, die rein auf Codebeobachtungen basiert, wird nach 120 Minuten eine Genauigkeit von ca. 2 Meter erreicht. Bei der Float-Lösung wird das typische Konvergenzverhalten sichtbar, d.h. die Genauigkeit beträgt nach 5 Minuten in etwa einen Meter und verbessert sich nach 120 Minuten auf ca. einen Dezimeter. Bei der Fixed-Lösung können schon nach wenigen Minuten Genauigkeiten in der Positionsbestimmung von wenigen Zentimetern erreicht werden. Allerdings ist festzuhalten, dass die Anzahl der Auswertungen, bei denen eine erfolgreiche Festsetzung der Phasemehrdeutigkeiten gelungen ist, bei 5 Minuten Beobachtungsdauer deutlich geringer ausfällt als nach 120 Minuten.

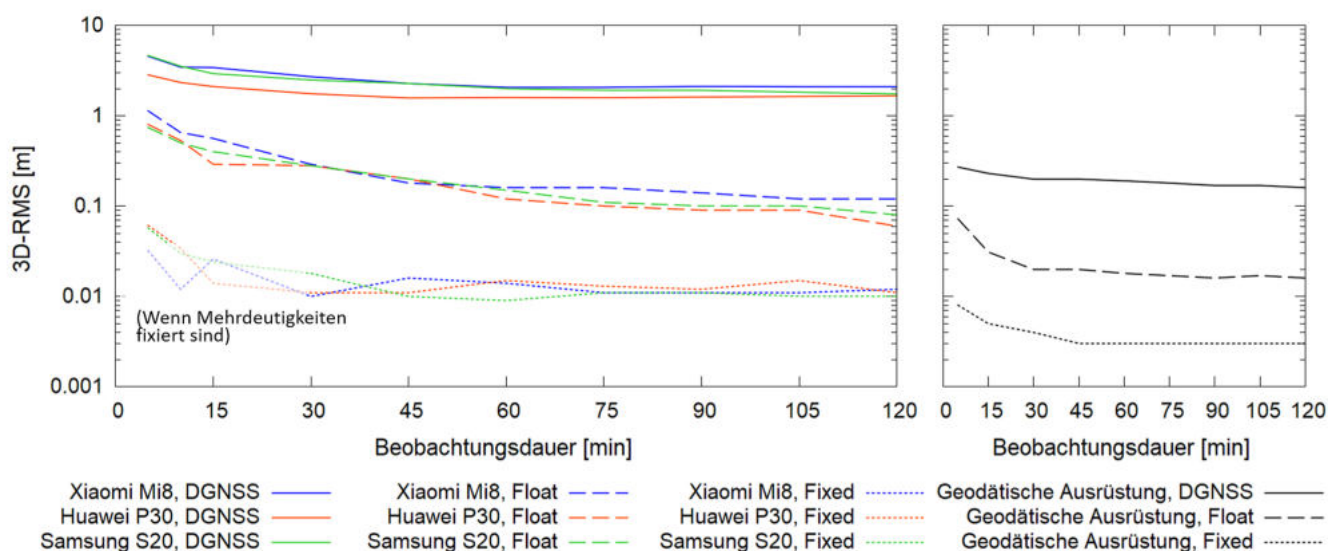


Abb. 8: Genauigkeiten verschiedener Auswertemethoden basierend auf den GPS L1-Beobachtungen der untersuchten Smartphones bzw. der geodätischen Ausrüstung

Tab. 4: Vergleich der Ergebnisse der Basislinienauswertung zwischen Permanentstation und Samsung S20 für GPS und GPS + Galileo

	GPS L1		GPS L1 + Galileo E1	
	30 min	120 min	30 min	120 min
Genauigkeit der DGNSS-Lösung, 3D RMS [cm]	250	170	200	160
Genauigkeit der Float-Lösung, 3D RMS [cm]	28	8	16	6
Genauigkeit der Fixed-Lösung, 3D RMS [cm]	1,5	1,0	1,3	1,2

Beim Vergleich der Ergebnisse basierend auf den Beobachtungen der geodätischen Ausrüstung mit denen der Smartphones zeigt sich, dass alle drei Auswertevarianten in etwa um eine Größenordnung besser sind. Weiterhin konnten alle Phasenmehrdeutigkeiten auch bei nur 5 Minuten Beobachtungsdauer festgesetzt werden. Diese Unterschiede in der Genauigkeit der Positionsbestimmung waren nach den Voruntersuchungen bzgl. der Qualität der Beobachtungen und insbesondere auch der Mehrdeutigkeitsuntersuchung der Phasendaten zu erwarten. Trotz allem bleibt festzuhalten, dass es bei allen drei untersuchten Smartphones gelungen ist, Phasenmehrdeutigkeiten zu fixieren und am Ende cm-genaue Positionen zu berechnen.

In Abb. 2 konnte gezeigt werden, dass das Samsung S20 im Vergleich zu den anderen beiden Smartphones mehr Beobachtungen für Galileo E1 aufzeichnet. Daher wurde abschließend untersucht, inwieweit sich diese zusätzlichen Code- und Phasenbeobachtungen unter Beibehaltung der anderen Parameter auf die einzelnen Basislinienlösungen auswirken (Tab. 4).

Wie zu erwarten, gibt es keine nennenswerten Verbesserungen bei den Fixed-Lösungen. Die Positionsgenauigkeiten der Float- und DGNSS-Lösung verbesserten sich insbesondere bei kürzerer Beobachtungsdauer.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Aufzeichnen und Abspeichern der originalen Beobachtungsdaten von Smartphones ermöglichte eine umfangreiche Analyse hinsichtlich des GNSS-Verhaltens des Xiaomi Mi8, Huawei P30 und des Samsung S20. Unter günstigen Umgebungsbedingungen gelang mit diesen ausgewählten Smartphones eine cm-genaue Positionsbestimmung. Voraussetzung war, dass diese Geräte Phasendaten aufzeichnen können und diese die Eigenschaft ganzzahliger Mehrdeutigkeiten besitzen.

Es zeigte sich, dass insbesondere bei Galileo und BeiDou aus verschiedenen Gründen nicht alle Signale empfangen oder verarbeitet werden konnten. Auch enthalten die Phasenbeobachtungen der Smartphones unter gleichen Umgebungsbedingungen deutlich mehr Cycle Slips als die eines geodätischen Empfängers. Die Analysen der C/N_0 -Werte zeigten, dass die empfangene Signalstärke der Smartphones geringer ist und starke Variationen in Abhängigkeit der Signaleinfallsrichtung aufweisen. Die Mehrwegeeffekte des Codes sind deutlich ausgeprägter als die der geodätischen Ausrüstung. Die Ganzzahligkeit der Phasenmehrdeutigkeiten konnte z. T. nachgewiesen werden, auch wenn die Ausprägungen im Vergleich zu einer geodätischen Ausrüstung

deutlich geringer sind. Die Größenordnungen der ermittelten Phasenzentrumsoffsets und -variationen waren für die untersuchten Smartphones ähnlich.

Es bleibt abzuwarten, wie sich die Entwicklung der in Smartphones eingebauten GNSS-Chips fortsetzt. Wünschenswert wären vor allem Verbesserungen in der Verarbeitung und Aufzeichnung der Beobachtungsdaten auf L5/E5. Würden diese zuverlässig in größerer Vollständigkeit vorliegen, können sie zur Bildung verschiedener Zweifrequenz-Linear kombinationen genutzt werden und andere Auswertelgorithmen zur Positionsbestimmung, z. B. des Precise Point Positioning (PPP), könnten angewandt werden.

Dank

Die Autoren danken Danielle Warstat und Lisa Salzmann für ihre Unterstützung bei den GNSS-Messungen mit dem Huawei P30 und Xiaomi Mi8. Ebenfalls geht ein Dank an Volker Frevert für seine Hilfe bei den Kalibrierungsuntersuchungen.

Literatur

- Banville, S., van Diggelen, F. (2016): Precise GNSS for everyone: Precise Positioning Using Raw GPS Measurements from Android Smartphones. In: GPS World, Nov. 2016, 43–48.
- Braasch, M. S. (2017): Multipath. In: Teunissen, P. J. G., Montenbruck, O. (Eds.): Springer handbook of global navigation satellite systems. Springer, Cham, 443–468.
- Broadcom (2017): BCM4775X-GNSS Receiver with Integrated Sensor Hub: Productbrief. www.broadcom.cn/products/wireless/gnss-gps-socs/bcm47755, letzter Zugriff 02/2021.
- Critchley-Marrows, J., Fortunato, M., Roberts, W. (2020): Accuracy for the Masses. In: Inside GNSS April 2020. <https://insidegnss.com/accuracy-for-the-masses/>.
- Darugna, F., Wübbena, J. B., Ito, A., Wübbena, T., Wübbena, G., Schmitz, M. (2019): RTK and PPP-RTK Using Smartphones: From Short-Baseline to Long-Baseline Applications. ION GNSS++. Miami, Florida. DOI: 10.33012/2019.17078.
- Darugna, F., Wübbena, J. B., Wübbena, G., Schmitz, M., Schön, S., Warneke, A. (2021): Impact of robot antenna calibration on dual-frequency smartphone-based high-accuracy positioning: a case study using the Huawei Mate20X. A case study using the Huawei Mate20X. In: GPS Solutions 25/2021. DOI: 10.1007/s10291-020-01048-0.
- Elmezayen, A., El-Rabbany, A. (2019): Precise Point Positioning Using World's First Dual-Frequency GPS/GALILEO Smartphone. In: Sensors 19/2019. DOI: 10.3390/s19112593.
- Gogoi, N., Minetto, A., Linty, N., Dosis, F. (2019): A Controlled-Environment Quality Assessment of Android GNSS Raw Measurements. In: Electronics 8/2019. DOI: 10.3390/electronics8010005.
- GSA (2017): Using GNSS Raw Measurements on Android Devices. www.gsa.europa.eu/system/files/reports/gnss_raw_measurement_web_0.pdf. DOI: 10.2878/449581.
- Hauschild, A. (2017): Combinations of Observations. In: Teunissen, P. J. G., Montenbruck, O. (Eds.): Springer handbook of global navigation satellite systems. Springer, Cham, 583–604.
- Heßelbarth, A., Wanninger, L. (2020): Towards centimeter accurate positioning with smartphones. The European Navigation Conference (ENC). Dresden, Germany.
- Huawei (2017): Huawei P30-specifications. <https://consumer.huawei.com/en/phones/p30/specs/>, letzter Zugriff 02/2021.
- IGS/RTCM (2018): RINEX – the receiver independent exchange format version 3.04. International GNSS Service (IGS), RINEX Working Group and Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committee 104 (RTCM – SC104). <http://acc.igs.org/misc/rinex304.pdf>.
- Langley, R. B. (1997): GPS Receiver System Noise. In: GPS World, Juni 1997, 40–45.
- Massarweh, L., Fortunato, M., Gioia, C. (2020): Assessment of Real-time Multipath Detection with Android Raw GNSS Measurements by Using a Xiaomi Mi 8 Smartphone. ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Portland, USA. DOI: 10.1109/PLANS46316.2020.9110169.
- Paziewski, J., Fortunato, M., Mazzoni, A., Odolinski, R. (2021): An analysis of multi-GNSS observations tracked by recent Android smartphones and smartphone-only relative positioning results. In: Measurement 175/2021. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109162.
- Paziewski, J., Pugliano, G., Robustelli, U. (2020): Performance assessment of GNSS single point positioning with recent smartphones. IMEKO TC-19 International Workshop on Metrology for the Sea. Naples, Italy.
- Paziewski, J., Sieradzki, R., Baryla, R. (2019): Signal characterization and assessment of code GNSS positioning with low-power consumption smartphones. In: GPS Solutions 23/2019. DOI: 10.1007/s10291-019-0892-5.
- Psychas, D., Bruno, J., Massarweh, L., Darugna, F. (2019): Towards Sub-meter Positioning using Android Raw GNSS Measurements. ION GNSS+. Florida, Miami. DOI: 10.33012/2019.17077.
- Qualcomm (2021): Snapdragon 865 5G Mobile Platform. www.qualcomm.com/system/files/document/files/prod_brief_qcom_sd865_5g.pdf, letzter Zugriff 02/2021.
- Schmolke, A., Wanninger, L., Frevert, V. (2015): Erste GNSS-Antennenkalibrierungen im Feldverfahren auf neuen Signalfrequenzen. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 5/2015, 140. Jg., 283–289. DOI: 10.12902/zfv-0083-2015.
- van Diggelen, F., Khider, M. (2018): GNSS Analysis Tools from Google. In: Inside GNSS März/April 2018, 48–57. <https://insidegnss.com/gnss-analysis-tools-from-google/>.
- Wanninger, L., Heßelbarth, A. (2020): GNSS code and carrier phase observations of a Huawei P30 smartphone: quality assessment and centimeter-accurate positioning. In: GPS Solutions 24/2020. DOI: 10.1007/s10291-020-00978-z.
- Wu, Q., Sun, M., Zhou, C., Zhang, P. (2019): Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GNSS Observations on Smartphone. In: Sensors 19/2019. DOI: 10.3390/s19092189.
- Zeimet, P. (2012): Zur Entwicklung und Bewertung der absoluten GNSS-Antennenkalibrierung im HF-Labor. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Band C 682.

Kontakt

Anja Heßelbarth | Lambert Wanninger
TU Dresden, Geodätisches Institut
Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden
anja_brit.hesselbarth@tu-dresden.de
lambert.wanninger@tu-dresden.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.