



TU WIEN
DEPARTMENT OF
GEODESY AND
GEOINFORMATION

DIPLOMARBEIT

Google Decimeter Challenge: Prozessierung von kinematischen Smartphone GNSS Daten

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur/in

ausgeführt am Department für

Geodäsie und Geoinformation

Forschungsbereich Höhere Geodäsie

der Technischen Universität Wien

unter Anleitung von

Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gregor Möller

und

Dipl.-Ing. Dr.techn. Marcus Franz Wareyka-Glaner

durch

Till Weigert

Matrikelnummer: 11715770

Wien, September 2024

Unterschrift (Verfasser/in)

Unterschrift (Betreuer/in)

Eidesstaatliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Wien, September 2024

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird die Prozessierung kinematischer Smartphone-GNSS-Daten mit Hilfe von Precise Point Positioning (PPP) im Rahmen der Google Smartphone Decimeter Challenge 2023 untersucht. Dabei werden verschiedene Smartphone-Modelle und unterschiedliche Prozessierungsmethoden, wie eine reine Codelösung, eine Kalman-gefilterte Codelösung, eine Doppler- und phasengeglättete Codelösung sowie eine kombinierte Code- und Phasenlösung verglichen. Als PPP-Beobachtungsmodell dient das Uncombined-Modell, da es im Zusammenhang mit Smartphone-Beobachtungen einige Vorteile bietet. Ziel ist es, die gewählten Ansätze im Hinblick auf die Genauigkeit zu untersuchen und Limitierungen aufzuzeigen. Dabei werden sowohl ganze Messfahrten als auch ausgewählte Streckenabschnitte mit variierenden Umgebungsbedingungen betrachtet. Untersucht wird eine Freeway-Fahrt auf gerader Strecke, eine Freeway-Kreuzung mit Unterführungen und der Halt vor einer Ampel. Die Ergebnisse werden sowohl graphisch als auch statistisch analysiert, indem die ermittelten Lösungstrajektorien mit den Referenztrajektorien eines geodätischen Empfängers verglichen werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Genauigkeit der Positionsbestimmung stark von der gewählten Prozessierungsmethode und den örtlichen Gegebenheiten entlang der Route abhängt. Die Codelösung kann durch die Kalman-Filterung bei nahezu allen untersuchten Szenarien und Smartphones signifikant verbessert werden. Unter einfachen Umgebungsbedingungen kann die Genauigkeit der Lösung durch Hinzunahme der Trägerphasenbeobachtung weiter gesteigert werden. Sind die örtlichen Gegebenheiten jedoch anspruchsvoller, leidet die Trägerphasenverfolgung darunter und die Ergebnisse besitzen eine gesteigerte Abweichung. Die zuverlässigsten Ergebnisse unter komplizierten Bedingungen werden mit der Doppler-geglätteten Codelösung erzielt. Unter einfachen Bedingungen sind die phasengeglättete Codelösung und die kombinierte Code- und Phasenlösung genauer. In Kombination mit einem gut angepassten Kalman-Filter können Abweichungen von unter einem Meter erzielt werden.

Abstract

This work examines the processing of kinematic smartphone GNSS data using Precise Point Positioning (PPP) within the framework of the Google Smartphone Decimeter Challenge 2023. Various smartphone models and different processing methods, such as a code-only solution, a Kalman-filtered code solution, a Doppler- and phase-smoothed code solution, and a combined code and phase solution, are compared. The Uncombined Model serves as the PPP observation model, as it offers several advantages in the context of smartphone observations. The goal is to examine the chosen approaches in terms of accuracy and to identify limitations. Both entire measurement drives and selected route sections with varying environmental conditions are considered. The analysis focuses on a freeway drive on a straight section, a freeway intersection with underpasses, and stopping at a traffic light. The results are analyzed both graphically and statistically by comparing the determined solution trajectories with the reference trajectories of a geodetic receiver.

The results show that the accuracy of position determination heavily depends on the chosen processing method and the local conditions along the route. The code solution can be significantly improved in nearly all scenarios and smartphones by applying Kalman filtering. Under simple environmental conditions, the accuracy of the solution can be further enhanced by incorporating carrier phase observations. However, in more challenging local conditions, the carrier phase tracking suffers, resulting in increased deviations in the results. The most reliable results under complex conditions are achieved with the Doppler-smoothed code solution. Under simple conditions, the phase-smoothed code solution and the combined code and phase solution are more accurate. In combination with a well-tuned Kalman filter, deviations of less than one meter can be achieved.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Abstract	III
Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 GNSS und Smartphones	1
1.3 Google Smartphone Decimeter Challenge	3
1.4 Vorgehensweise und Aufbau	3
2 Methodik	5
2.1 PPP Modell und Filter	5
2.1.1 Uncombined Model	5
2.1.2 Kalman-Filter	6
2.2 Satellitenprodukte	7
2.2.1 Satellitenbahnen (Orbits)	8
2.2.2 Satellitenuhren (Clocks)	8
2.2.3 Empfänger- und satelliteninterne Signalverzögerungen (Biases)	9
2.3 Umgang mit herausfordernden Beobachtungen	9
2.4 Atmosphärische Einflüsse	10
2.4.1 Ionosphäre	11
2.4.2 Troposphäre	11
3 Prozessierung	13
3.1 Smartphone-Daten	13
3.1.1 GSDC-Datensätze	13
3.1.2 Konvertierung	14
3.1.3 Systeme und Frequenzen	14
3.2 Prozessierungsmethoden	15
3.2.1 Code Only (No Filter)	15
3.2.2 Code Only (Kalman-Filter)	15
3.2.3 Code (Doppler Smoothing)	16
3.2.4 Code (Phase Smoothing)	17
3.2.5 Code + Phase	17
3.3 Einstellungen	18

Inhaltsverzeichnis

3.4	GSDC-Abgabedatei	18
4	Ergebnisse	20
4.1	Ausgewählte Messfahrten	20
4.1.1	Messfahrt 02.04.2021	20
4.1.2	Messfahrt 24.08.2021	21
4.1.3	Messfahrt 07.12.2021	23
4.1.4	Kombination der Messfahrten	24
4.2	Ausgewählte Streckenabschnitte	25
4.2.1	Szenario 1: Freeway - Gerade Strecke	26
4.2.2	Szenario 2: Freeway / Expressway - Interchange	28
4.2.3	Szenario 3: Freeway - Auffahrt mit Halt	34
4.3	Testdaten und Lösungsabgabe	39
5	Diskussion	42
6	Ausblick	44
	Referenzen	45

Abbildungsverzeichnis

3.1	GNSS Frequenzbänder	14
3.2	Aufbau der GSDC-Abgabedatei	19
4.1	Route der Messfahrt am 02.03.2021	20
4.2	Route der Messfahrt am 24.08.21	22
4.3	Route der Messfahrt am 07.12.2021	23
4.4	Gesamte Messfahrt vom 02.04.2021 mit den drei Testszenarien	25
4.5	Szenario 1: Gerader Strecke - Freeway im Satellitenbild	26
4.6	Szenario 1 (Freeway), Runde 1 (Epochen 178 - 237): Vergleich der mit der Methode Code + Phase erstellten Ergebnisse des Mi 8 und Pixel 5 mit deren jeweiligen Referenztrajektorien	27
4.7	Szenario 2: Freeway / Expressway - Interchange im Satellitenbild	29
4.8	Szenario 2 (Interchange), Runde 3 (Epochen 421 - 480): Verbesserung der ungefilterten Codelösung durch Doppler-Glättung des Coderauszens beim Pixel 5. Zusätzlich ist die Referenztrajektorie aufgeführt.	30
4.9	Szenario 2 (Interchange), Runde 3 (Epochen 1187 - 1246): Vergleich der Doppler-geglätteten Codelösungen des Mi 8 und des Galaxy S20	32
4.10	Szenario 2 (Interchange), Runde 3 (Epochen 1892 - 1951): Hohe Abweichung des Mi 8 aufgrund der Unterführung. Vergleich der ungefilterten Codelösung mit der Code + Phasen-Lösung	33
4.11	Szenario 2 (Interchange), Runde 3 (Epochen 1892 - 1951): Vergleich der Horizontal Dilution of Precision des Galaxy S20 und des Mi 8	34
4.12	Szenario 3 (Ampel): Auffahrt auf Freeway mit Halt vor Ampel im Satellitenbild	34
4.13	Szenario 3 (Ampel), Runde 1 (Epochen 95 - 154): Vergleich der Doppler-geglättete Codelösung und der Code + Phasen-Lösung des Galaxy S20 mit der Referenztrajektorie	36
4.14	Szenario 3 (Ampel), Runde 2 (Epochen 909 - 968): Vergleich der mit der Methode Code + Phase erstellten Lösungen des Pixel 5 und des Galaxy S20 mit deren jeweiliger Referenztrajektorie. Beim Galaxy S20 ist ein deutlicher Drift zu erkennen.	37
4.15	Szenario 3 (Ampel), Runde 2 (Epochen 909 - 968): Untersuchung der Herkunft des Drifts während dem Halt beim Galaxy S20. Neben der mit der Methode Code + Phase ertstellten Trajektorie, sind die Trajektorien der ungefilterten und der Kalman-gelilterten Lösung, sowie die Referenztrajektorie aufgeführt.	38
4.16	Szenario 3 (Ampel), Runde 3 (Epochen 1617 - 1676): Vergleich der Streuung der ungefilterten Codelösung mit der Code + Phasen-Lösung des Pixel 5 während dem Halt vor der Ampel	39

Tabellenverzeichnis

3.1	Verwendete GNSS und Beobachtungstypen	15
3.2	Filter Einstellungen - Kalman-Filter	16
3.3	Einstellungen Prozessierung	18
4.1	RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone für die Messfahrt am 02.04.2021	21
4.2	RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone für die Messfahrt am 24.08.2021	23
4.3	RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone für die Messfahrt am 07.12.2021	24
4.4	RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone für die kombinierten Ergebnisse der untersuchten Messfahrten	24
4.5	Szenario 1 (Freeway), Runde 1 (Epochen 178 - 237): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone	27
4.6	Szenario 1 (Freeway), Runde 2 (Epochen 982 - 1041): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone	28
4.7	Szenario 1 (Freeway), Runde 3 (Epochen 1695 - 1754): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone	28
4.8	Szenario 2 (Interchange), Runde 1 (Epochen 421 - 480): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone	30
4.9	Szenario 2 (Interchange), Runde 2 (Epochen 1187 - 1246): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone	31
4.10	Szenario 2 (Interchange), Runde 3 (Epochen 1892 - 1951): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone	32
4.11	Szenario 3 (Ampel), Runde 1 (Epochen 95 - 154): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone	35
4.12	Szenario 3 (Ampel), Runde 2 (Epochen 909 - 968): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone	36
4.13	Szenario 3 (Ampel), Runde 3 (Epochen 1617 - 1676): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone	39
4.14	Ergebnisse der GSDC: Es sind die erzielten Scores sowie die errechneten 2D-Abweichungen der öffentlichen und der privaten Lösungen aufgeführt. Die Ergebnisse sind für die fünf Prozessierungsmethoden aufgelistet.	40

Abkürzungsverzeichnis

- C/N₀** Carrier-to-Noise Density
- CODE** Center for Orbit Determination Europe
- CNES** Centre National d'Études Spatiales
- DCB** Differential Code Biases
- ECMWF** European Centre for Medium-range Weather Forecasts
- GLONASS** Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema
- GNSS** Global Navigation Satellite System
- GPS** Global Positioning System
- GPT3** Global Pressure and Temperatur Model 3
- GSDC** Google Smartphone Decimeter Challenge
- HDOP** Horizontal Dilution of Precision
- IGS** International GNSS Service
- IMU** Inertial Measurement Unit
- IF LK** Ionosphärenfreie Linearkombination
- ION** Institute of Navigation
- IONEX** Ionosphere Map Exchange
- LLI** Loss-Of-Lock Indikator
- NaN** Not a Number
- PCO** Phase Center Offset
- PCV** Phase Center Variation
- PPP** Precise Point Positioning
- RINEX** Receiver Independent Exchange Format
- RMS** Root Mean Square
- SNR** Signal-to-Noise Ratio
- SPP** Single Point Positioning
- UTC** Coordinated Universal Time
- VieVS** Vienna VLBI and Satellite Software

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Die auf dem Markt erhältlichen Smartphones werden immer kostengünstiger und leistungsfähiger. Durch effektivere Hard- und Software ist es möglich, die mit Hilfe von GNSS erzielte Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Positionslösung zu steigern. Dies ist insbesondere für Fußgänger- und Fahrzeugnavigation, Mobile Mapping Anwendungen, Workforcemanagement oder Location Based Apps wie Location Based Advertising oder Augmented Reality relevant (Zangenehjad und Gao, 2021). Zudem ist eine hohe Zuverlässigkeit und Positionierungsgenauigkeit Grundvoraussetzung für autonomes Fahren und Verkehrsmanagement. Sicherheitsbezogene Anwendungen, wie z.B. der GNSS-Notruf, profitieren ebenfalls von einer verbesserten Positionslösung.

Im Zusammenhang mit geodätischen Empfängern hat sich Precise Point Positioning (PPP) als Alternative zu den klassischen relativen Positionierungsmethoden etabliert. Es werden Multi-GNSS-Beobachtungen, präzise Satellitendaten und komplexe Algorithmen genutzt, um die Empfängerposition zu bestimmen. Im Gegensatz zu den Beobachtungen eines geodätischen Empfängers weisen die Beobachtungen der in Smartphones verbauten Ultra-Low-Cost Empfänger eine niedrigere Qualität auf und stellen die Auswertung mit PPP vor Herausforderungen (Glaner und Weber, 2023a).

Diese Arbeit untersucht kinematische Smartphone-GNSS-Daten mit Hilfe eines modernen PPP-Ansatzes. Dieser Ansatz ist in der Open-Source-PPP-Software raPPPid implementiert. Mit dieser Software werden die Positionslösungen bestimmt und analysiert. Die rohen Smartphone-Beobachtungen verschiedener Messfahrten und Modelle werden über die Google Smartphone Decimeter Challenge (GSDC) 2023 bezogen, an welcher im Zuge dieser Arbeit teilgenommen wird. Diese Arbeit soll aufzeigen, welche Möglichkeiten Precise Point Positioning im Zusammenhang mit kinematischen Smartphone-Daten bietet. Es werden die erzielten Lösungen sowie der Weg dorthin vorgestellt und fünf verschiedene Auswertemethoden verglichen. Dabei wird eine reine Codelösung, eine Kalman-gefilterte Codelösung, eine Doppler- und eine phasengeglättete Codelösung und eine Code- und Phasenlösung betrachtet. Sämtliche Prozessierungen werden soweit dies möglich ist mit Quasi-Echtzeit-Einstellungen vorgenommen. Zusätzlich werden Limitierungen des Ansatzes anhand von ausgewählten Szenarien untersucht. Zum Schluss wird eine optimale Lösung auf Basis der vorherigen Untersuchungen bei der GSDC eingereicht.

1.2 GNSS und Smartphones

Seit der Veröffentlichung von Goolges Android Operating System 7 im Jahr 2016 kann auf rohe Smartphone-GNSS-Beobachtungen zugegriffen werden. Es können die Pseudorange, Trägerphase, der Doppler-Shift und das Signal-Rausch-Verhältnis in Form der Carrier-to-Noise Density (C/N0) ausgelesen werden (Zangenehjad und Gao, 2021). Davor konnte nur die

von internen Algorithmen bestimmte Positionslösung betrachtet werden (Paziewski, 2020). Seitdem wurden viele Untersuchungen durchgeführt, um neue Algorithmen zur Verbesserung der GNSS-Positionierung zu entwickeln (Zangenehjad und Gao, 2021).

Die ersten Smartphones arbeiteten nur auf einer Übertragungsfrequenz und konnten nur GPS empfangen. Im Jahr 2017 wurden mit dem Samsung S8 und dem Huawei P10 die ersten Multi-GNSS fähigen Smartphones vorgestellt, welche das Tracking der Trägerphase erlauben. 2018 folgte mit dem Xiaomi Mi 8 das erste Smartphone, welches auf zwei Frequenzen beobachten konnte. Dieses kann zusätzlich die Frequenzen L5 und E5a der Systeme GPS/QZSS und Galileo empfangen. Dadurch ist es möglich, ionosphärenfreie Linearkombinationen (IF LK) durchzuführen, um die ionosphärische Laufzeitverzögerung zu eliminieren. Mittlerweile sind in vielen erhältlichen Smartphone-Modellen Multi-Konstellations und zweifrequenz Chipsets verbaut (Zangenehjad und Gao, 2021).

Aufgrund der niedrigen Qualität der in Smartphones verbauten Ultra-Low-Cost Empfänger und Antennen, wird die Prozessierung der Beobachtungen erschwert und die Genauigkeit der Positionslösung limitiert. Die Trägerwellenverfolgung leidet unter häufigen Cycle-Slips, wodurch keine kontinuierliche Beobachtung möglich ist und ein ganzzahliges Fixieren der Trägerwellenmehrdeutigkeit praktisch nicht durchführbar ist. Die Signalstärke ist starken Schwankungen unterworfen, welche auch unter einem hohen Beobachtungswinkel auftreten. Im Vergleich zu einem geodätischen Empfänger ist die C/N_0 typischerweise um 10 dBHz niedriger und das Rauschen der Code- und Phasenbeobachtungen um den Faktor 10 bis 100 größer (Glaner und Weber, 2023a). Dies erschwert den Umgang mit Mehrwegeeffekten.

Die Genauigkeit der Positionslösung wird zudem dadurch beeinflusst, dass häufig die Eigenschaften der Antenne, wie beispielsweise das Phasenzentrum unbekannt sind. Seit Android 11 ist zwar der Zugriff auf die Antennenparameter möglich, allerdings nur für einige Modelle und nicht für ein individuelles Gerät (Paziewski, 2020).

In Bezug auf die kontinuierliche Phasenbeobachtung führte Duty Cycling bis 2018 zu Problemen. Duty Cycling ist ein Stromsparmmodus, bei dem der GNSS-Chip des Smartphones diskontinuierlich arbeitet. Seit der Veröffentlichung von Android 9 kann Duty Cycling abgestellt werden (Paziewski, 2020).

Die tatsächlich zu erreichende Genauigkeit ist abhängig von der Beobachtungszeit und ob der Empfänger ruhend (statisch) oder in Bewegung (kinematisch) ist. Weiterhin ist zu unterscheiden zwischen Echtzeitanwendungen und Postprocessing-Lösungen. Während im Postprocessing sämtliche Korrekturdaten zur Verfügung stehen, spielen bei der Positionierung in Echtzeit die Verfügbarkeit der Korrekturdaten, die Konvergenzzeit und die benötigte Rechenleistung eine große Rolle. Bei statischen Tests konnten mit PPP Genauigkeiten unter einem Meter bis in den Dezimeterbereich erzielt werden (Zangenehjad und Gao, 2021).

1.3 Google Smartphone Decimeter Challenge

Die Google Smartphone Decimeter Challenge (GSDC) ist ein seit 2021 stattfindender Wettbewerb, welcher von Google, Kaggle und dem Institut of Navigation (ION) ausgetragen wird (*ION - Smartphone Decimeter Challenge 2023*). Der Wettbewerb hat das Ziel, die Grenzen der GNSS-Positionierungsgenauigkeit von Smartphones zu ermitteln und neue Modelle zur Positionslösung auf Basis roher GNSS-Beobachtungen von Android-Smartphones zu entwickeln. Die GSDC 2023 beginnt am 12. September 2023. Der letzte mögliche Abgabetermin ist am 23. Mai 2024. Es werden Preisgelder an die drei Teilnehmer mit den besten Lösungen ausbezahlt und diese bekommen die Möglichkeit ihre Ergebnisse auf der ION GNSS+ 2024 in Baltimore vorzustellen. Zur Entwicklung und Evaluierung der Lösungen werden zwei Datensätze zur Verfügung gestellt. Bei dem einen Datensatz handelt es sich um Trainingsdaten, welche die rohen Beobachtungen sowie deren Referenzlösungen beinhalten. Für den zweiten Datensatz ist diese Referenz nicht verfügbar. Mit diesen Daten wird die Abgabedatei erzeugt, welche zur Evaluierung der Lösung dient. Für jede Einreichung wird ein Score berechnet. Die Höhe des erzielten Scores ergibt die Platzierung (Chow et al., 2023).

Der Score wird anhand des Mittelwerts der Distanzfehler des 50. und 95. Perzentils berechnet. Für jedes Smartphone wird einmal pro Sekunde der horizontale Abstand zwischen der vorhergesagten Position und der tatsächlichen Position berechnet. Diese Distanzabweichungen bilden eine Verteilung, aus der die Abweichungen des 50. und 95. Perzentils bestimmt werden. Anschließend werden die Abweichungen für jedes Smartphone gemittelt. Der Mittelwert der Abweichungen aller Smartphones im Testdatensatz ergibt den Score (Chow et al., 2023).

1.4 Vorgehensweise und Aufbau

Diese Arbeit ist wie folgt aufgebaut: In der Einleitung wird die Motivation und Zielsetzung der Untersuchungen beschrieben. Es wird ein kurzer Überblick über die Entwicklung und den aktuellen Stand der Technik im Bereich Smartphone-GNSS-Positionierung gegeben. Anschließend wird die Google Smartphone Decimeter Challenge 2023 vorgestellt. Im Kapitel 2 Methodik werden die zur Berechnung der Positionslösungen benötigten Ansätze und Modelle vorgestellt. Das verwendete PPP-Modell und der genutzte Kalman-Filter werden erläutert. Weiterhin werden die benötigten Satellitenprodukte in den Unterkapiteln Satellitenbahn-daten, Satellitenuhren und empfänger- und satelliteninterne Signalverzögerungen (Biases) eingeführt. Nachfolgend wird der Umgang mit problematischen Beobachtungen beschrieben und Verfahren zum Detektieren von Cycle-Slips aufgezeigt. Weiterhin wird die Handhabung der atmosphärischen Laufzeitverzögerung erläutert. Im Kapitel 3 Prozessierung werden die zur Verfügung stehenden Daten und deren Konvertierung beschrieben. Es wird erläutert, welche GNSS-Systeme und Frequenzen zur Lösungsbestimmung verwendet werden. Die fünf in dieser Arbeit untersuchten Prozessierungsmethoden werden vorgestellt und er-

klärt. Dabei handelt es sich um eine reine Codelösung, eine Kalman-gefilterte Codelösung, eine Doppler- und eine phasengeglättete Codelösung und eine Code- und Phasenlösung. Anschließend wird aufgezeigt, wie ein Abgabefile für die GSDC erstellt werden kann. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, werden drei Messfahrten der Trainingsdaten näher betrachtet. Dies geschieht in Kapitel 4 Ergebnisse. Die Unterschiede der Lösungen der fünf Prozessierungsmethoden werden sowohl graphisch als auch statistisch ausgewertet, indem die Ergebnisse ausgewählter Messfahrten mit den Referenztrajektorien verglichen werden. Aus den Differenzen wird die Genauigkeit abgeleitet. Dies geschieht zum einen für gesamte Messfahrten als auch für ausgewählte Teilabschnitte. Zudem werden Smartphones verschiedener Hersteller verglichen. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse wird eine Lösung für die Testdaten bei der GSDC eingereicht und der erzielte Score angegeben. Im Kapitel 5 Diskussion werden die Ergebnisse zusammengefasst und das gewählte Vorgehen eingeordnet. Auf Problematiken, die bei der Generierung der Lösungen aufgetreten sind, wird eingegangen. Im Kapitel 6 Ausblick werden offene Fragestellungen im Hinblick auf eine Fortführung der Arbeit aufgeführt.

2 Methodik

2.1 PPP Modell und Filter

PPP ist ein präzises Positionierungsverfahren und stellt seit 1997 eine attraktive Alternative zu differenziellen GNSS-Verfahren dar (Zumberge et al., 1997). Da PPP ein absolutes Verfahren ist, ist eine simultane Beobachtung durch zwei Stationen für die Positionslösung nicht notwendig. Grundsätzlich werden bei PPP undifferenzierte, zweifrequenz Pseudorange- und Trägerphasenbeobachtungen in Kombination mit präzisen Satellitenbahninformationen und Uhrenkorrekturen verwendet, um statische und kinematische Positionslösungen zu bestimmen (Teunissen und Montenbruck, 2017). Die Qualität der Positionslösung hängt von verschiedenen Faktoren ab. Neben präzisen Satellitendaten ist ebenfalls die Qualität der Code- und Phasenbeobachtungen, welche bei den in Smartphones verbauten Ultra-Low-Cost Empfängern und Antennen niedrig ist, zu beachten. Es sind Verfahren nötig, um Beobachtungen mit niedriger Qualität aus dem Modell auszuschließen. Aufgrund von ionosphärischen- und troposphärischen Laufzeitverzögerungen muss ebenfalls der Einfluss der Atmosphäre im Modell berücksichtigt werden.

Generell kann zwischen zwei PPP-Ansätzen unterschieden werden, welche sich in erster Linie in der Handhabung der ionosphärischen Verzögerung unterscheiden. Beim Conventional Model wird auf Basis von Zwei-Frequenz-Beobachtungen eine ionosphärenfreie Linearkombination gebildet, um die ionosphärische Verzögerung zu eliminieren. Beim Uncombined Model wird die ionosphärische Verzögerung als Parameter mitgeschätzt und das Modell ist nicht auf eine bestimmte Anzahl an Frequenzen angewiesen (Glaner und Weber, 2023b). Im Folgenden wird das in dieser Arbeit verwendete Uncombined Model näher erläutert. Die anschließende Parameterschätzung findet mit Hilfe eines Kalman-Filters statt, welcher im Anschluss beschrieben wird. Die verwendeten Modelle und Ansätze sind in der Software raPPPid implementiert. Die Open-Source-Software ist mit Matlab geschrieben und bildet das PPP-Modul der Vienna VLBI and Satellite Software (VieVS PPP). Die Software besitzt eine grafische Benutzeroberfläche und kann Beobachtungen auf einer, zwei und drei Frequenzen verarbeiten. Weiterhin bietet die Software die Möglichkeit aus verschiedenen Satellitenprodukten, Modellen und Parametern zu wählen, wodurch sowohl die Beobachtungen von High-Quality- als auch von Low-Cost-Empfängern prozessiert werden können (Glaner und Weber, 2023b).

2.1.1 Uncombined Model

Im Gegensatz zum Conventional Model besitzt das Uncombined Model einige Vorteile in Bezug auf das Prozessieren von Smartphone-Beobachtungen. Es werden die rohen Beobachtungen verarbeitet und es werden keine Linearkombinationen gebildet. Dadurch wird das vorhandene Grundrauschen der Smartphone-Beobachtungen nicht verstärkt. Da keine ionosphärenfreie Linearkombination gebildet wird, muss die ionosphärische Verzögerung mitge-

schätzt werden. Dies führt dazu, dass die Anzahl an Unbekannten höher ist und der Rechenaufwand im Gegensatz zum Conventional Model steigt. Das Uncombined Model kann gegenüber dem Conventional Model um eine beliebige Anzahl an zusätzlichen Frequenzen erweitert werden, wodurch es sowohl auf Einfrequenz-Beobachtungen als auch auf Mehrfrequenz-Beobachtungen angewendet werden kann. Weiterhin kann das Modell mit einer unterschiedlichen Anzahl an Frequenzen innerhalb eines GNSS umgehen. Fehlende Beobachtungen auf einer Frequenz führen nicht dazu, dass ganze Epochen von der Parameterschätzung ausgeschlossen werden müssen (Glaner, 2022). Dies ist sehr hilfreich, da nicht garantiert werden kann, dass bei den untersuchten Smartphones durchgehend auf zwei Frequenzen beobachtet werden kann.

2.1.2 Kalman-Filter

Der Kalman-Filter ist eine rekursive Methode zur Schätzung der zufälligen Zustände eines dynamischen Systems, sodass die mittleren quadratischen Vorhersagefehler minimiert werden (Teunissen und Montenbruck, 2017). Er ist nach Rudolf Emil Kalman benannt, welcher ihn 1960 vorstellte (Kalman, 1960). Der Algorithmus bietet die Möglichkeit, zeitabhängige und variierende Parameter effizient und in Echtzeit zu schätzen. Im Gegensatz zu einer epochenweisen Kleinste-Quadrate-Schätzung nimmt der Kalman-Filter Informationen über die geschätzten Parameter und deren Kovarianzen mit in die nächste Epoche (Glaner, 2022). Nach seiner Initialisierung folgt der Kalman-Filter einem rekursiven zweistufigen Verfahren zur Zeit- und Messwertaktualisierung (Teunissen und Montenbruck, 2017). Diese zwei Stufen des Filterprozesses sind: Die Vorhersage des Systemzustands und die Aktualisierung dieser Schätzung basierend auf neuen Messungen (Kalman, 1960). Da zwischen den Parametern der PPP-Beobachtungsgleichungen keine Linearität besteht, ist in raPPPid ein iterativer erweiterter Kalman-Filter implementiert (Glaner, 2022).

Bei PPP wird der Kalman-Filter typischerweise für die Schätzung der Unbekannten verwendet. Beim Uncombined Model handelt es sich dabei um die Empfängerkoordinaten, den Empfängeruhrenfehler, die Phasenmehrdeutigkeiten, die ionosphärische Verzögerung auf der ersten Frequenz für jeden Satelliten, sowie die empfängerseitigen differentiellen Code Biases (DCB), welche im Parametervektor x zusammengefasst werden (Glaner, 2022). Dem gegenüber stehen die Beobachtungen aus Code- und Phasenmessungen im Beobachtungsvektor l . Bevor mit der Filterung begonnen werden kann, muss der Kalman-Filter mit Hilfe von a-priori-Werten für die Parameter und die entsprechenden Varianzen und Kovarianzen initialisiert werden. Der so entstehende Parametervektor und die Kovarianzmatrix dienen als Ausgangspunkt für die Schätzung in der ersten Epoche (Glaner, 2022). Anschließend beginnt das zweistufige Verfahren der Kalman-Filterung:

$$\tilde{x}_{q+1} = T x \quad (2.1)$$

$$\tilde{Q}_{x,q+1} = T Q_x T^T + N \quad (2.2)$$

Im ersten Schritt wird basierend auf dem dynamischen Modell und dem Systemrauschen der Systemzustand für die nächste Epoche prädiziert (Time-Update). Der prädizierte Parametervektor \tilde{x}_{q+1} setzt sich aus der Transitions-Matrix T und dem Parametervektor der aktuellen Epoche x zusammen (siehe Formel 2.1). Die zugehörige Kovarianz-Matrix $\tilde{Q}_{x,q+1}$ basiert auf der Kovarianzmatrix der aktuellen Epochen Q_x , der Transitionsmatrix T und der System-Rausch-Matrix N (siehe Formel 2.2).

$$\hat{x} = \tilde{x} + G(l - A\tilde{x}) \quad (2.3)$$

$$\hat{Q}_x = (I - GA)\tilde{Q}_x \quad (2.4)$$

Im zweiten Schritt wird der vorhergesagte Systemzustand \tilde{x} mit Hilfe der Messwerte l , dem Kalman-Gain G und der Design-Matrix A aktualisiert (Measurement Update) (Teunissen und Montenbruck, 2017) (siehe Formel 2.3). Gleiches gilt für die dazugehörige Kovarianz-Matrix (siehe Formel 2.4).

$$G = \tilde{Q}_x A^T (Q_1 + A \tilde{Q}_x A^T)^{-1} \quad (2.5)$$

Das Kalman-Gain G spielt eine entscheidende Rolle, da es das Vertrauen in die Beobachtungen im Vergleich zu der Modellvorhersage gewichtet (Kalman, 1960). Über die Kovarianzmatrizen der Unbekannten \tilde{Q}_x und der Beobachtungen Q_1 werden mit Hilfe der Design-Matrix A deren Unsicherheiten berücksichtigt (siehe Formel 2.5) (Glaner, 2022). Weiterführende Informationen können in Teunissen und Montenbruck, 2017, Kapitel 22.5 Kalman Filtering gefunden werden.

2.2 Satellitenprodukte

PPP ist auf präzise Bahninformationen, Satellitenuhren (Clocks) und Angaben bezüglich der satelliteninternen Signalverzögerungen (Biases) angewiesen, um die Empfängerposition zu bestimmen. Diese Informationen werden üblicherweise aus der Analyse von Tracking-Daten abgeleitet, die von einem global verteilten GNSS-Empfängernetzwerk gesammelt werden (Teunissen und Montenbruck, 2017). Anschließend werden sie dem Empfänger zur Verfügung gestellt.

2.2.1 Satellitenbahnen (Orbits)

Jedes Satellitennavigationssystem stellt Bahninformationen zur Verfügung, welche es dem Empfänger ermöglichen, die Position und Geschwindigkeit der GNSS-Satelliten in der Konstellation zu bestimmen. Je nach System werden diese Informationen alle 10 Minuten bis zu 3 Stunden aktualisiert (Teunissen und Montenbruck, 2017). Für die angestrebte Genauigkeit bei PPP reichen diese Broadcastephemeriden nicht aus und es sind qualitativ höherwertige Satellitenprodukte nötig. Im Postprocessing kann auf die ultra-rapid, rapid und final Produkte des International GNSS Service (IGS) zurückgegriffen werden. Die final Orbits sind am genauesten, stehen allerdings erst nach 12 - 18 Tagen zur Verfügung. Soll PPP in Echtzeit genutzt werden, werden die Daten über einen Correction-Stream bezogen. Einen solchen Stream stellt beispielsweise das Centre National d'Études Spatiales, Toulouse (CNES) zur Verfügung. Dieser Stream beinhaltet umfassende Multi-GNSS-Korrekturen für GPS, GLO-NASS, Galileo und BeiDou. Die Korrekturen der Satellitenbahnen werden in einem satellitenfesten Koordinatensystem bereitgestellt. Die drei Achsen sind in Bewegungsrichtung des Satelliten, in Richtung des Radiusvektors und orthogonal zu diesen beiden angeordnet. Der Ursprung liegt im Schwerpunkt des Satelliten (Glaner, 2022). Um möglichst reale Anwendungsbedingungen nachzustellen, geschieht die Prozessierung in dieser Arbeit soweit möglich mit Quasi-Echtzeit-Einstellungen. Es wird über den IGS auf den aufgezeichneten Real-Time-Correction-Stream des CNES Archivs zurückgegriffen.

2.2.2 Satellitenuhren (Clocks)

Die Genauigkeit und Stabilität der Atomuhren an Bord der GNSS-Satelliten ist entscheidend für die Genauigkeit des Systems. Die Uhren weisen Unregelmäßigkeiten auf, weshalb sie bei der Positionsbestimmung nicht zuverlässig modelliert werden können (Teunissen und Montenbruck, 2017). Die Navigationsnachrichten liefern dem Empfänger Informationen über die Zeit- und Frequenzabweichungen der Satellitenuhren von ihren nominalen Werten, sowie deren linearen Frequenzdrift. Durch diese Parameter wird die virtuelle Synchronisierung der Uhren in der Satelliten-Konstellation ermöglicht. Die Uhrenparameter werden wie die Broadcast-Ephemeriden mindestens einmal täglich von den Bodenkontrollzentren aktualisiert (Jaduszliwer und Camparo, 2021). Für PPP reichen die Genauigkeit und Aktualisierungsrate der über die Broadcastmessage bereitgestellten Uhreninformationen nicht aus. Sowohl in den Postprocessing-Produkten des IGS als auch im hier verwendeten CNES-Real-Time-Correction Stream sind präzisere Korrekturen für die Satellitenuhren enthalten. Die berechneten Korrekturen werden auf den Wert der Broadcastmessage aufaddiert (Glaner, 2022).

2.2.3 Empfänger- und satelliteninterne Signalverzögerungen (Biases)

Satelliten-Biases in Code- und Phasenmessungen entstehen durch frequenz- und signalabhängige Hardware-Verzögerungen im Satelliten oder Empfänger und können die Qualität der PPP-Lösung beeinträchtigen (Glaner, 2022). Eine unvollständige Synchronisierung der verschiedenen Signale ist die Folge (Teunissen und Montenbruck, 2017). Die Biases können nicht absolut bestimmt werden, da sie stark mit anderen Parametern wie beispielsweise dem Uhrenfehler korreliert sind. Da die Phasen-Biases von der Float-Ambiguität absorbiert werden, können sie vernachlässigt werden. Wenn Mehrdeutigkeiten fixiert werden, müssten sie jedoch angebracht werden. Da dies in dieser Arbeit nicht geschieht, muss nur die Verzögerung aufgrund der Code-Biases berücksichtigt werden. Die Satelliten-Biases werden mit Hilfe geeigneter Bias-Produkte korrigiert, welche ebenfalls über den CNES-Correction-Stream bezogen werden. Die empfängerseitigen Code-Biases werden im Zuge der Kalman-Filterung mitgeschätzt (Glaner, 2022).

2.3 Umgang mit herausfordernden Beobachtungen

Die PPP-Lösung ist sehr empfindlich gegenüber Ausreißern und Beobachtungen mit niedriger Qualität. Diese müssen aus der Parameterschätzung und der Filterung ausgeschlossen werden, um Unvollkommenheiten und Diskontinuitäten in den geschätzten Parametern zu vermeiden. Signale von Satelliten nahe des Horizonts sind anfälliger für Mehrwegeeffekte und Fehlereinflüsse aufgrund der Atmosphäre. Daher werden Satelliten unterhalb eines bestimmten Elevationswinkels (z.B. 10 Grad) ausgeschlossen (Elevation Cutoff). Ebenfalls werden Beobachtungen ohne präzise Bahndaten, ohne Uhrenkorrekturen und ohne Satelliten-Biases ausgeschlossen. Dies kann aufgrund von Datenlücken oder ungültigen Einträgen im Real-Time-Correction-Stream vorkommen. Beobachtungen mit einem niedrigeren C/N0 als 20 dBHz werden ebenfalls eliminiert. Das C/N0 der jeweiligen Beobachtung kann der RINEX-Datei entnommen werden (Glaner, 2022). Zusätzlich findet eine Gewichtung der Beobachtungen auf Basis des Signal-to-Noise Ratio (SNR) statt. Dies ist bei Smartphone-Daten sinnvoller als eine Gewichtung auf Basis der Elevation (Glaner und Weber, 2023b).

Die Phasenbeobachtungen von Smartphone-Aufzeichnungen lassen sich nicht ohne weiteres prozessieren und werden von Cycle-Slips beeinflusst (Glaner und Weber, 2023b). Unentdeckte Cycle-Slips gefährden die Annahme konstanter Phasenambiguitäten und somit die PPP-Lösung. Daher ist das Auffinden von Cycle-Slips mit effektiven Methoden essenziell für eine stabile PPP-Lösung (Glaner, 2022). Obwohl der Loss-Of-Lock Indikator (LLI) die Cycle-Slips in der RINEX-Datei markiert, sodass diese Beobachtungen ausgeschlossen werden können (Glaner, 2022), werden nicht alle Cycle-Slips auf diese Weise erkannt. Daher werden in dieser Arbeit zwei weitere Methoden für die Detektion vorgestellt. Der Ansatz in Formel 2.6 ist eine effektive Methode auf Basis der Doppler-Beobachtungen.

$$L_{\text{now}} = L_{\text{old}} + dt \cdot \sqrt{D_{\text{now}} \cdot D_{\text{old}}} \quad (2.6)$$

Bei der Detektion mittels Doppler-Shift werden die Phasenbeobachtungen der letzten Epoche L_{old} in Kombination mit den Doppler-Beobachtungen der letzten D_{old} und der aktuellen Epoche D_{now} genutzt, um die Phasenbeobachtung der aktuellen Epoche L_{now} vorherzusagen. Die prädizierte Phase kann nun mit der tatsächlichen Phasenbeobachtung verglichen werden (Glaner und Weber, 2023a). Unterscheiden sie sich um mehr als eine vorher festgesetzte Anzahl an Cycles wird die Beobachtung ausgeschlossen. Eine weitere Möglichkeit zum Auffinden von Cycle-Slips stellt das Bilden von geometriefreien Linearkombinationen dar. Hierbei werden alle geometrischen und nicht dispersiven Bestandteile der GNSS-Beobachtungsgleichung eliminiert. Formel 2.7 beschreibt diesen phasenbasierten Ansatz.

$$dL_i = L_i(q) - L_i(q - 1) \quad (2.7)$$

Es werden die Phasenbeobachtungen der aktuellen $L_i(q)$ und der letzten Epoche $L_i(q - 1)$ verwendet, um eine geometriefreie Linearkombination durchzuführen. Dies geschieht zwei Mal für zwei Frequenzen i, j (Bspw. L1 und L5).

$$dL_{i,j} = |dL_i - dL_j| \quad (2.8)$$

Die Differenz $dL_{i,j}$ dieser beiden Linearkombinationen (Formel 2.8) wird mit einem vorher festgelegten Schwellenwert verglichen. Übersteigt die berechnete Differenz diesen Schwellenwert, wurde ein Cycle-Slip detektiert. Bei Erkennung eines Cycle-Slips wird die spezifische Phasenbeobachtung ausgeschlossen und die geschätzte Phasenambiguität im Parametervektor zurückgesetzt. Die entsprechende Codebeobachtung wird weiterhin verwendet (Glaner, 2022).

2.4 Atmosphärische Einflüsse

Die Signale der GNSS-Satelliten bewegen sich als elektromagnetische Wellen durch den Raum zu den Empfängern. Dabei durchqueren sie die Ionosphäre und die Troposphäre (neutrale Atmosphäre), was dazu führt, dass die Signale verzögert, gedämpft und gebrochen werden (Teunissen und Montenbruck, 2017). Im Folgenden wird der Umgang mit den Auswirkungen der Atmosphäre auf die Signalausbreitung bei dem gewählten Ansatz beschrieben.

2.4.1 Ionosphäre

Die Ionosphäre ist der ionisierte Teil der Erdatmosphäre und reicht von etwa 50 km bis in eine Höhe von etwa 1000 km (Teunissen und Montenbruck, 2017). Die höchste Konzentration an freien Elektronen befindet sich zwischen 300 und 400 km Höhe. Da die Anzahl an freien Elektronen direkt von der Sonnenstrahlung abhängt, ist sie sowohl zeitlich als auch geographisch variabel. Die freien Elektronen beeinflussen die Ausbreitung der GNSS-Signale und verzögern diese. Die so entstehenden Distanzfehler liegen im Bereich von einigen Metern bis zu 100 Metern in extremen Fällen. Insgesamt ist die Ionosphäre eine der größten Fehlerquellen bei GNSS-Messungen und stellt eine große Herausforderung dar (Glaner, 2022). Üblicherweise wird der Einfluss der Ionosphäre auf die Signallaufzeit bei PPP mit Hilfe von ionosphärenfreien Linearkombinationen eliminiert. Da beim Uncombined Model keine Linearkombinationen gebildet werden, ist diese Herangehensweise hier nicht möglich. Das Uncombined Model bietet allerdings die Möglichkeit, die ionosphärische Verzögerung aus externen Ionosphärenmodellen in die Parameterschätzung einzuführen (Glaner und Weber, 2023a). Dabei wird die modellierte ionosphärische Verzögerung auf der ersten Frequenz als zusätzliche Pseudobeobachtung für jeden Satelliten in die Parameterschätzung eingefügt und es entsteht das Uncombined Model mit ionosphärischem Zwang. Im Zuge der Filterung werden die Ungenauigkeiten des ionosphärischen Modells und somit auch der ionosphärischen Pseudobeobachtungen durch die Schätzung der ionosphärischen Verzögerung ausgeglichen. Damit die zusätzlichen Pseudobeobachtungen die Genauigkeit der resultierenden PPP-Lösung erhöhen, ist eine hohe Qualität des zugrunde liegenden Ionosphärenmodells erforderlich (Glaner, 2022). Da es nicht einfach ist, ein präzises globales Ionosphärenmodell in Echtzeit zu erhalten und anzuwenden (Glaner, 2022), wird auf ein nachbearbeitetes Modell zurückgegriffen. Um die Ionosphäre zu modellieren wird eine IONEX-Datei des Center for Orbit Determination Europe (CODE) verwendet.

2.4.2 Troposphäre

Die Troposphäre ist der untere Teil der Erdatmosphäre, in dem sich etwa 80 % der Atmosphärenmasse und 99 % ihres Wasserdampfs befinden. Sie erstreckt sich in der Regel bis zu einer Höhe von etwa 10 km, kann aber auch eine Höhe von 20 km erreichen (Teunissen und Montenbruck, 2017). Der Einfluss der neutralen Atmosphäre auf die Laufzeit hängt von den meteorologischen Bedingungen entlang des Signalwegs ab und kann in hydrostatische (trockene) Anteile und feuchte Anteile unterteilt werden. Die hydrostatischen Anteile machen 90 % und die feuchten Anteile 10 % der troposphärischen Laufzeitverzögerung aus. Die hydrostatischen Anteile lassen sich sehr gut mit Hilfe von meteorologischen Messungen (Druck und Temperatur) auf der Erdoberfläche modellieren und können somit gut eliminiert werden (Nilsson et al., 2013). Die feuchten Anteile werden größtenteils durch den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre entlang des Signalweges bestimmt. Dieser weist eine hohe

räumliche und zeitliche Variation auf und kann nur schwer modelliert werden (Teunissen und Montenbruck, 2017). Im Gegensatz zu der Ionosphäre ist die Troposphäre kein dispersives Medium. Die troposphärische Laufzeitverzögerung ist somit praktisch unabhängig von der Frequenz der Signale und kann nicht über Linearkombinationen, bzw. die Beobachtung auf mehreren Frequenzen eliminiert werden (Glaner, 2022). Der Distanzfehler in Richtung Zenit beträgt für den hydrostatischen Anteil etwa 2,3 Meter und für den feuchten Anteil etwa 0,4 Meter bezogen auf Meereshöhe (Nilsson et al., 2013). Um den hydrostatischen Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung zu modellieren, wird das empirische Modell Global Pressure and Temperatur 3 (GPT3) in Kombination mit dem Modell nach Saastamoinen, 1973 verwendet. Der feuchte Anteil wird mit einer Kombination aus GPT3 und dem Modell nach Askne und Nordius, 1987 modelliert. Das GPT3 Modell nutzt ein globales Temperatur- und Druck-Gitter aus Wetterkarten, bereitgestellt vom European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) (Landskron und Böhm, 2018). Um die Verzögerung für die tatsächliche Elevation der Beobachtung zu bestimmen, werden die GPT3-Projektionsfunktionen verwendet.

3 Prozessierung

3.1 Smartphone-Daten

3.1.1 GSDC-Datensätze

Die von Google zur Verfügung gestellten Daten wurden überwiegend in Kalifornien im Großraum Los Angeles und San Francisco aufgenommen. Es liegen Aufzeichnungen von verschiedenen Smartphone-Modellen der Hersteller Google, Samsung und Xiaomi vor. Alle Smartphones erlauben die Aufnahme von Code- und Phasenbeobachtungen. Bei einem Großteil der Smartphones können Daten der Systeme GPS, GLONASS, Galileo und Beidou auf den Frequenzen L1 und L5, G1, E1 und E5a, und B1 empfangen werden. Neben den rohen GNSS-Beobachtungen werden zusätzlich die Messwerte der inertialen Messeinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) zur Verfügung gestellt, welche in dieser Arbeit jedoch keine Verwendung finden.

Für die Datenaufnahme wurden die Smartphones auf dem Armaturenbrett unterhalb der Windschutzscheibe mit Hilfe einer 3D-gedruckten Halterung aufgereiht. Die Aufzeichnung der Referenztrajektorie erfolgte über einen auf dem Dach des Messfahrzeugs angebrachten GNSS-Empfänger der Firma Novatel. Der Lever-Arm wurde mit Hilfe von Messungen eines Roboterarms in der Größenordnung von wenigen Millimetern kompensiert. Für die Datenaufzeichnung wurde der GNSS Logger von Google in der Version 3.0.6.3 verwendet (Fu et al., 2023). Die Beobachtungen liegen sowohl als .txt-Datei, als auch als .csv-Datei vor.

Die Daten bestehen aus einem Trainings- und einem Testdatensatz. Die Trainingsdaten umfassen 65 Messfahrten zwischen dem 25.06.2020 und dem 07.09.2023. Es liegen insgesamt 187 Beobachtungsdateien von zwanzig verschiedenen Smartphone-Modellen vor. Neben den rohen GNSS-Beobachtungen sind zusätzlich die wahren Positionen in Form von Referenztrajektorien bekannt. Zu beachten ist, dass auch Smartphones der selben Messfahrt unterschiedliche Referenztrajektorien besitzen. Die Testdaten umfassen 40 Messfahrten von 13 verschiedenen Smartphone-Modellen. Im Gegensatz zu den Trainingsdaten wird hier pro Messfahrt lediglich ein Smartphone verwendet. Die wahren Positionen sind den Teilnehmern nicht bekannt. Aus den Positionslösungen des Testdatensatzes wird die Abgabedatei erzeugt und anschließend der unter 1.3 vorgestellte Score berechnet. Der Score kann in einen öffentlichen und einen privaten Score eingeteilt werden. Mit der einen Hälfte der eingereichten Trajektorien wird der Public Score und mit der anderen Hälfte der Private Score bestimmt. Zur Bestimmung der Scores stehen somit jeweils 20 Lösungen zur Verfügung. Der Public Score ist öffentlich einsehbar, während der Private Score erst nach Ende der Einreichfrist veröffentlicht wird. Die Platzierung wird durch den Private Score bestimmt.

3.1.2 Konvertierung

Die .txt-Dateien der rohen GNSS-Beobachtungen werden mit Hilfe der Konsolenanwendung UofC CSV2RINEX in das Receiver Independent Exchange Format (RINEX) konvertiert. Die Anwendung wurde von Farzaneh Zangenehjad und Yang Jiang entwickelt und ist unter <https://github.com/FarzanehZangeneh/csv2rinex> (Stand 17.05.2024) zu finden. Obwohl raPPPid den Import von .txt-Dateien generell zulässt, ist eine Konvertierung sinnvoll. Nicht alle .txt-Dateien lassen sich einlesen und die RINEX-Dateien werden zuverlässiger prozessiert.

3.1.3 Systeme und Frequenzen

Von den zur Verfügung stehenden GNSS-Systemen wird GPS und Galileo für das weitere Vorgehen ausgewählt, da sich diese Kombination als die zuverlässigste erwies. Bei beiden Systemen liegen Beobachtungen auf zwei Frequenzen vor. Konkret wird GPS mit den Frequenzen L1 und L5, sowie Galileo mit den Frequenzen E1 und E5a verwendet. Betrachtet man Abbildung 3.1 aus Povero, 2019 ist zu erkennen, dass sich die Frequenzbänder L1, E1 und L5, E5a überlappen.

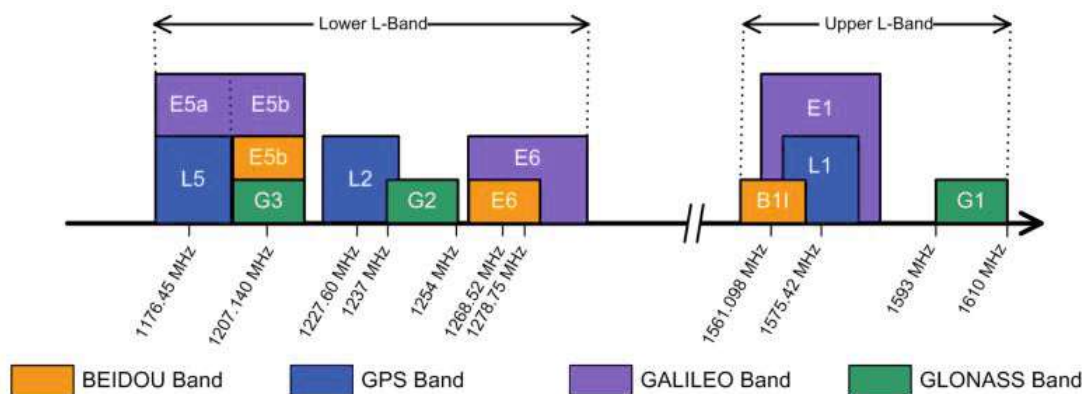


Abbildung 3.1: GNSS Frequenzbänder

Zu beachten ist, dass nicht alle GPS-Satelliten auf der Frequenz L5 senden. Ursprünglich sendete GPS auf den Frequenzen L1 und L2. Im Zuge der Modernisierung wird das System seit dem Start des ersten Block IIF Satelliten im Jahr 2010 auf drei Frequenzen umgestellt (Teunissen und Montenbruck, 2017). Die untersuchten Messdaten sind aus dem Jahr 2021. Zu diesem Zeitpunkt senden mehr als die Hälfte der GPS Satelliten auf drei Frequenzen.

Die verwendeten RINEX Beobachtungscode sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Für beide GNSS stehen 4 Beobachtungstypen zur Verfügung. Die erste Stelle des dreistelligen Codes bezeichnet den Beobachtungstyp (C = Pseudorange, L = Trägerphase, D = Doppler und S = Signalstärke). Die zweite und dritte Stelle beschreiben das Frequenzband und den spezifischen

Modulations- bzw. Trackingmodus (Teunissen und Montenbruck, 2017).

GNSS	Beobachtungstyp			
GPS	C1C	L1C	S1C	D1C
	C5Q	L5Q	S5Q	D5Q
Galileo	C1C	L1C	S1C	D1C
	C5Q	L5Q	S5Q	D5Q

Tabelle 3.1: Verwendete GNSS und Beobachtungstypen

3.2 Prozessierungsmethoden

Im Folgenden werden die fünf in dieser Arbeit verwendeten Methoden mit denen die Positionslösungen bestimmt werden, erläutert. Zuerst werden drei Methoden, welche nur die Codebeobachtungen nutzen beschrieben. Anschließend werden zwei Methoden bei denen zusätzlich die Phasenbeobachtungen verwendet werden, vorgestellt. Zwei Verfahren zur Glättung des Rauschens der aus den Codebeobachtungen generierten Pseudorange werden vorgestellt. Die Glättung erfolgt im ersten Ansatz mit Hilfe der Doppler-Beobachtungen. Im zweiten Ansatz werden die Trägerphasenbeobachtungen verwendet. Die Bezeichnungen der Prozessierungsmethoden entsprechen den in raPPPid vorzufindenden Optionen.

3.2.1 Code Only (No Filter)

Die Methode Code Only (No Filter) nutzt nur die Codebeobachtungen der Aufzeichnungen. Es wird das Uncombined Model wie im Kapitel 2.1.1 beschrieben verwendet. Im Unterschied zu den folgenden Prozessierungsmethoden wird keine Kalman-Filterung, sondern lediglich ein vermittelnder Ausgleich zur Parameterschätzung durchgeführt. Die verwendeten Einstellungen können dem Kapitel 3.3 entnommen werden.

3.2.2 Code Only (Kalman-Filter)

Aufbauend auf die Prozessierungsmethode Code Only (No Filter) findet die Parameterschätzung bei der Methode Code Only (Kalman-Filter) mit Hilfe des Kalman-Filters wie im Kapitel 2.1.2 beschrieben statt. Die Einstellungen des Filters können der Tabelle 3.2 entnommen werden. Für die Koordinaten, den Empfängeruhrenfehler, die Differentiellen Code-Biases des Empfängers, die Float-Mehrdeutigkeiten und die ionosphärische Laufzeitverzögerung werden jeweils die initiale Standardabweichung und das Systemrauschen festgelegt. Es ist zu beachten, dass die Einträge für die Float-Mehrdeutigkeit erst bei späteren Prozessierungsmethoden relevant werden, wenn die Phasenbeobachtungen hinzu genommen werden. Im Vergleich zu den Einstellungen für einen geodätischen Empfänger (siehe Glaner, 2022) müssen bei Smartphones höhere Standardabweichungen für die Initialisierung und ein deutlich

höheres Systemrauschen angenommen werden. Die konkreten Werte werden durch gezieltes Testen einzelner Parameter in einem iterativen Prozess ermittelt und optimiert. Hierbei wird die 2D-Positionsabweichung in Bezug auf die Referenztrajektorie als Maß für die Verbesserung verwendet.

	Initiale Standardabweichung [m]	Systemrauschen [$\frac{m}{\sqrt{h}}$]
Koordinaten	1.000	10.000
Empfängeruhrenfehler	300.000	300.000
Empfänger DCBs	1000	20
Float-Mehrdeutigkeiten	2000	0
Ionosphärische Verzögerung	1	1

Tabelle 3.2: Filter Einstellungen - Kalman-Filter

Eine funktionsfähige Kalman-Filterung stellt die Grundlage für die folgenden Prozessierungsmethoden dar. Daher findet der vorgestellte Filter bei allen weiteren Methoden Anwendung. Es werden die ermittelten Einstellungen verwendet.

3.2.3 Code (Doppler Smoothing)

Es existieren verschiedene Herangehensweisen um das Rauschen der aus Codebeobachtungen generierten Pseudoranges zu glätten und dadurch die Genauigkeit der Positionslösungen zu verbessern. Grundsätzlich wird bei diesen Ansätzen ein Low-Pass-Filter verwendet, der die niederfrequenten Anteile der Satellitensignale von dem hochfrequenten Rauschen trennt. Neben der Code- und Phasenbeobachtung erlaubt GNSS das Messen der Dopplerverschiebung. Dieser Doppler-Shift entsteht aufgrund der kontinuierlichen Distanzänderung zwischen dem Empfänger und dem Satelliten. Der Doppler-Shift kann genutzt werden um das Rauschen der Pseudoranges zu glätten. Hierzu wird die aktuell gemessene Pseudorange mit der Pseudorange der vergangenen Epoche kombiniert und die zu erwartende Distanzänderung mit Hilfe des Doppler-Shifts bestimmt (Zhou und Li, 2017). Formel 3.1 beschreibt den gewählten Ansatz zur Glättung der Codebeobachtungen mit Hilfe des Doppler-Shift.

$$P_{\text{geglättet}} = (1 - \alpha) P_i + \alpha \left(P_{i-1} - \frac{D_{11} c dt}{f} \right) \quad (3.1)$$

P_i bezeichnet die Pseudorange der aktuellen Epoche und P_{i-1} die geglättete Pseudorange der vergangenen Epoche. Der Doppler-Shift der ersten Frequenz D_{11} wird mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit c , der zeitlichen Differenz der beiden Epochen dt und der Frequenz der Trägerphase f in die Distanzänderung zwischen der aktuellen und der vergangenen Epochen umgerechnet. Der dimensionslose Glättungsfaktor α bestimmt, wie stark die aktuelle Messung in die geglättete Pseudorange eingeht. Ein kleiner Glättungsfaktor bedeutet, dass

die aktuelle Messung stärker gewichtet wird, während ein größerer Glättungsfaktor die Messung der letzten Epoche stärker gewichtet. Der gewählte Glättungsfaktor von 0,1 gewichtet die aktuelle Epoche somit deutlich stärker als die vergangene. Ein Vorteil der Glättung mit Hilfe von Doppler-Beobachtungen im Vergleich zu der Glättung auf Basis der im Folgenden vorgestellten Phasenbeobachtungen ist, dass dieser Ansatz immun gegen Cycle-Slips ist (Zhou et al., 2020). Anschließend findet die Parameterschätzung wie im vorherigen Kapitel vorgestellt mit Hilfe des Kalman-Filters statt, wobei nun die geglätteten Pseudoranges die Beobachtungen bilden.

3.2.4 Code (Phase Smoothing)

Eine weitere Möglichkeit zur Glättung des Coderausens ist die Nutzung der Trägerphasenbeobachtungen. Hierfür muss die Trägerphase möglichst durchgehend verfolgt werden. Allerdings kann dies nur gelingen wenn die Phasenbeobachtungen keine Cycle-Slips enthalten. Für die Cycle-Slip Detektion werden die im Kapitel 2.3 vorgestellten Methoden herangezogen. Für den Ansatz auf Basis des Doppler-Shifts wird ein Schwellenwert von 2 Cycles festgelegt. Für die Detektion über geometriefreie Linearkombinationen wird ein Schwellenwert von 0,8 m gesetzt. Der gewählte Ansatz zur Glättung des Coderausens mit Hilfe der Trägerphase wird in Formel 3.2 vorgestellt.

$$P_{\text{geglättet}} = (1 - \alpha) P_i + \alpha (P_{i-1} + dL1) \quad (3.2)$$

Die geglättete Pseudorange $P_{\text{geglättet}}$ ergibt sich aus der gewichteten Kombination der aktuellen Codebeobachtung P_i und der geglätteten Beobachtung der vergangenen Epoche P_{i-1} . Zu der beobachteten Pseudorange der vergangenen Epoche wird die mit Hilfe der Trägerphase bestimmte Distanzänderung $dL1$ zwischen den beiden Epochen addiert. Anschließend wird mit Hilfe des Glättungsfaktors α die Gewichtung zwischen der aktuellen und der mittels der Phase korrigierten vergangenen Epoche festgelegt. Bei den vorgestellten Untersuchungen konnten die besten Ergebnisse mit einem Glättungsfaktor von 0,8 erzielt werden. Bei diesem Faktor geht die aktuelle Pseudorange lediglich zu 20 % in die geglättete Pseudorange ein. Nach Abschluss der Glättung wird wiederum der Kalman-Filter zur Parameterschätzung verwendet.

3.2.5 Code + Phase

Für eine genauere Positionslösungen ist die Beobachtung der Trägerphase und deren direkte Berücksichtigung in der Parameterschätzung notwendig. Da die Anzahl an ganzen Wellenlängen zwischen dem Satelliten und dem Empfänger nicht bekannt ist, kann deren Distanz nicht direkt bestimmt werden. Daher wird die Trägerphase ab der ersten Messung verfolgt und deren Mehrdeutigkeit in Form einer Gleitkommazahl (Float) als weiterer Parameter

im Zuge der Kalman-Filterung mitgeschätzt. Durch die Anpassung der sehr genauen aber mehrdeutigen Phasenbeobachtung an die weniger genaue aber eindeutige Codebeobachtung kann die Genauigkeit der Positionslösung deutlich gesteigert werden. Hierbei werden die rohen Beobachtungen mit unterschiedlichen Standardabweichungen versehen. Für die Codemessungen wird eine Standardabweichung von 1 m und für die Messung der Trägerphase eine Standardabweichung von 0,01 m angenommen. Für die Schätzung der Ionosphäre wird eine Standardabweichung von 2 m gesetzt. Die Cycle-Slip Detektion erfolgt über den LLI sowie die in Kapitel 2.3 eingeführten Verfahren. Die Signaleverzögerung der Trägerphase wird von der Float-Ambiguität absorbiert. Weitere Fehlerquellen wie die Gezeiten der festen Erde, relativistische Effekte und die Offsets des Antennen-Phasenzentrum der Satelliten werden berücksichtigt. Die Offsets des Phasenzentrums der Smartphones können nicht modelliert werden, da keine Daten bezüglich deren Kalibrierung vorliegen. Die verwendeten Einstellungen sind in Kapitel 3.3 in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

3.3 Einstellungen

Die folgenden in Tabelle 3.3 dargestellten Einstellungen und Modelle werden für die Prozessierung verwendet. Als Ausgangspunkt werden die unter Glaner und Weber (2023a) zu findenden Einstellungen für statische Smartphone-Beobachtungen herangezogen und an die kinematischen Beobachtungen angepasst.

PPP Modell	Uncombined Model mit ionosphärischem Zwang
Orbits, Clocks und Biases	CNES Real-Time-Correction-Stream
Standardabweichung der rohen Beobachtungen	Code: 1 m Phase: 0,01 m Ionosphäre: 2 m
Gewichtsfunktion der Beobachtungen	$10^{-\frac{\max(0;55-SNR)}{7}}$
Modell der Ionosphäre	CODE
Modell der Troposphäre	trockener Anteil: GPT3 + Saastamoinen feuchter Anteil: GPT3 + Askne
Ausschluss von Satelliten	C/N0 < 20 dBHz Elevation < 10°
Cycle-Slip Detektion	Doppler Shift: 2 Cycles $dL_i - dL_j$ Differenz: 0,8 m

Tabelle 3.3: Einstellungen Prozessierung

3.4 GSDC-Abgabedatei

Um eine Lösung bei der GSDC einzureichen, müssen die Ergebnisse der 40 Testfahrten in einer speziell formatierten Abgabedatei zusammengefasst werden. Diese .csv-Datei besteht aus

vier Spalten. In der ersten Spalte steht die für jede Fahrt und jedes Smartphone individuelle Trip ID. Für eine Messfahrt des Pixel 4xl am 11.12.2020 lautet diese Trip ID beispielsweise 2020-12-11-19-30-us-ca-mtv-e/pixel4xl. In der zweiten Spalte steht die Zeit in Unix Time Millis. Dieser Zeitstempel beschreibt die vergangenen Millisekunden seit dem Unix Epoch Start am 01.01.1970 um 00:00:00 UTC. In der dritten und vierten Spalte sind die geographische Breite und Länge (Latitude, Longitude) in Grad aufgeführt. Alle Einträge werden durch Kommata getrennt. Die so entstehende Datei muss inklusive Kopfzeile genau 71937 Zeilen aufweisen, ansonsten wird die Abgabe nicht akzeptiert. Zur Orientierung dient eine von Google bereitgestellte Beispieldatei. Die ersten Zeilen einer generierten Abgabedatei sind in Abbildung 3.2 dargestellt.

```
tripId,UnixTimeMillis,LatitudeDegrees,LongitudeDegrees
2020-12-11-19-30-us-ca-mtv-e/pixel4xl,1607715055442,37.523908368,-122.3499558496
2020-12-11-19-30-us-ca-mtv-e/pixel4xl,1607715056442,37.523902531,-122.3499382199
2020-12-11-19-30-us-ca-mtv-e/pixel4xl,1607715057442,37.523905142,-122.3499561951
2020-12-11-19-30-us-ca-mtv-e/pixel4xl,1607715058442,37.523903115,-122.3499793258
2020-12-11-19-30-us-ca-mtv-e/pixel4xl,1607715059442,37.523933091,-122.3499715054
```

Abbildung 3.2: Aufbau der GSDC-Abgabedatei

Die Abgabedatei wird mit Hilfe eines Matlab Skripts erstellt. In diesem werden alle 40 mit raPPPid generierten Ausgabedateien zusammengefasst und es erfolgt eine epochenweise Umrechnung der GPS Zeit in Unix Time Millis. Da die mit raPPPid generierten Dateien mehr Epochen aufweisen, als sie laut Beispieldatei haben dürften, müssen die überschüssigen Epochen am Anfang und am Ende der Messfahrten entfernt werden. Anschließend findet eine grobe Ausreißerkontrolle statt, da vereinzelte Epochen eine Abweichung zur vorherigen Epoche um viele Grad aufweisen. Diese Einträge werden mit dem Eintrag Not a Number (NaN) ersetzt.

4 Ergebnisse

4.1 Ausgewählte Messfahrten

Im Folgenden sind die Ergebnisse von drei ausgewählten Messfahrten aus dem Jahr 2021 des Trainingsdatensatzes aufgeführt. Die Wahl fiel auf diese Fahrten, da hier jeweils ein Smartphone der Hersteller Google, Samsung und Xiaomi verwendet wurde, sodass diese Fahrten als repräsentativ für den gesamten Trainings- und Testdatensatz angesehen werden können. Konkret handelt es sich bei den Smartphone-Modellen um das Google Pixel 5, das Samsung Galaxy S20 Ultra 5G (G988B) und das Xiaomi Mi 8. Um Aussagen über die mit der jeweiligen Prozessierungsmethode erzielte Genauigkeit zu treffen, werden die Lösungen mit den entsprechenden Referenztrajektorien verglichen. Die mittleren 2D-Abweichungen für jedes Smartphone und jede Methode werden tabellarisch aufgelistet. Da die Höhe für die GSDC und für viele Navigationsanwendungen nicht relevant ist, wird diese im Folgenden nicht untersucht.

4.1.1 Messfahrt 02.04.2021

Die erste untersuchte Messfahrt fand am 02.03.2021 in San Jose in der Nähe des San Jose Mineta International Airport statt. Das Messfahrzeug fuhr drei Runden auf der in Abbildung 4.1 dargestellten Route. Insgesamt umfasst die Fahrt 2284 Epochen, wobei jede Epoche einer Sekunde entspricht.

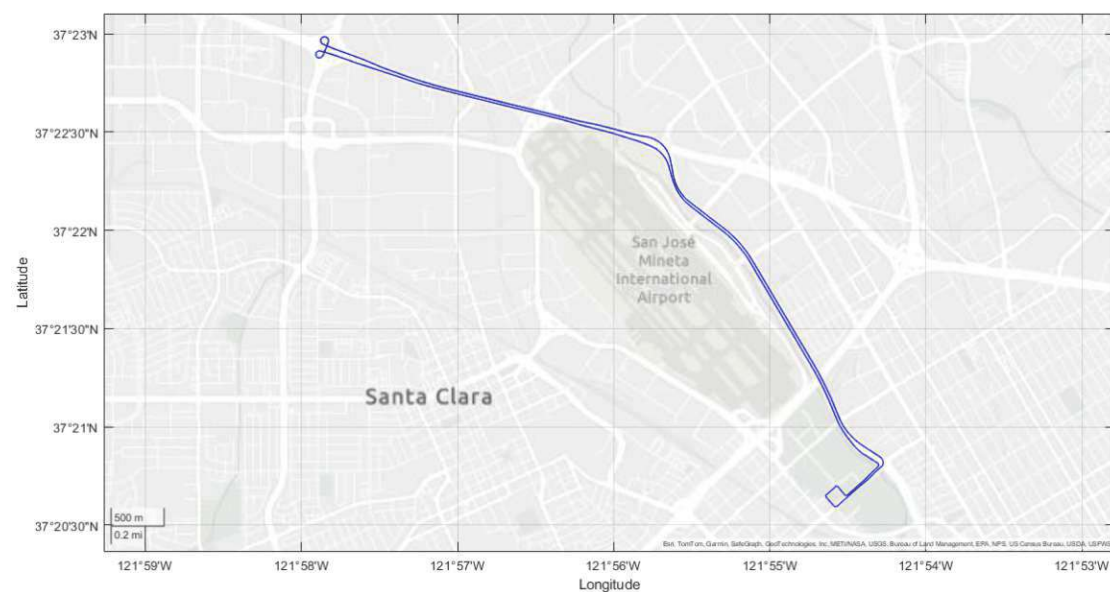


Abbildung 4.1: Route der Messfahrt am 02.03.2021

Die Root Mean Square (RMS) Abweichungen der bestimmten Trajektorien zu den Referenzlösungen sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Es werden die Werte für jede der fünf Prozessie-

rungsmethoden und die drei Smartphones aufgeführt. Um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, werden zusätzlich die Abweichungen der Smartphones und der Methoden gemittelt.

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	8,778	3,293	2,715	4,928
Code (Kalman-Filter)	5,099	2,580	2,659	3,446
Code (Doppler Smoothing)	5,051	2,413	2,574	3,346
Code (Phase Smoothing)	5,063	2,545	2,584	3,397
Code + Phase	3,541	2,019	2,348	2,636
Mittelwert	5,506	2,570	2,576	

Tabelle 4.1: RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone für die Messfahrt am 02.04.2021

Das Mi 8 weist bei allen Methoden eine deutlich höhere Abweichung auf als die beiden anderen Smartphones, deren Ergebnisse in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Die geringste Abweichung kann mit etwas über 2 m mit der Methode Code + Phase in Kombination mit dem Pixel 5 erzielt werden. Die höchste Abweichung liegt bei der Codelösung ohne Filterung beim Mi 8 mit etwa 8,8 m vor. Die Hinzunahme des Kalman-Filters bewirkt bei allen Smartphones eine deutliche Steigerung der Genauigkeit. Auch das Einführen der Phasenbeobachtungen verbessert die Ergebnisse signifikant. Die geglätteten Codelösungen liegen in einer ähnlichen Größenordnung, wobei die Glättung mittels Doppler-Shift etwas genauer ist. Auffällig ist zudem, dass sich die Ergebnisse des Galaxy S20 lediglich in einem Intervall von 40 cm bewegen. Die Lösungen der beiden anderen Smartphones weisen einen deutlich höheren Schwankungsbereich auf.

4.1.2 Messfahrt 24.08.2021

Die zweite betrachtete Messfahrt fand am 24.08.2021 statt. Die Route führte durch die kalifornische Stadt Sunnyvale. Sie ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Es wurden zwei Runden mit insgesamt 3139 Epochen gefahren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

4 ERGEBNISSE

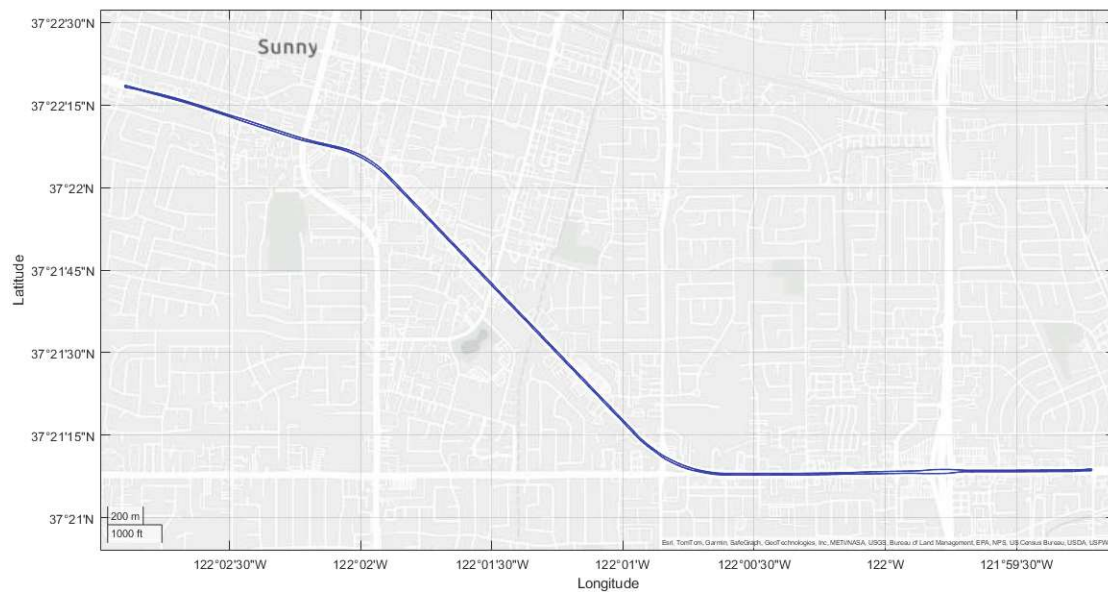


Abbildung 4.2: Route der Messfahrt am 24.08.21

Im Unterschied zu der ersten Messfahrt liegen die Ergebnisse des Mi 8 bei dieser Messfahrt in einer ähnlichen Größenordnung wie die Ergebnisse des Pixel 5 und des Galaxy S20. Mit der Methode Code + Phase kann beim Mi 8 sogar die Lösung mit der geringsten Abweichung generiert werden. Betrachtet man alle Prozessierungsmethoden liefert das Galaxy S20 die geringsten Abweichungen mit einem Mittelwert von 2,72 m. Das Intervall, in dem sich die Lösungen des Galaxy S20 bewegen, ist auch bei dieser Messfahrt am geringsten. Das ungenaueste Ergebnis entsteht beim Pixel 5 bei der ungefilterten Codelösung. Dieses Smartphone liefert bei allen Methoden die Ergebnisse mit den höchsten Abweichungen. Bei dieser Messfahrt ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Verfahren zur Glättung des Coderausgangs festzustellen. Der phasenbasierte Ansatz weist bei allen Smartphones eine geringere Abweichung auf als die Glättung auf Basis der Doppler-Beobachtung. Beim Pixel 5 liegt dieser Unterschied bei über 60 cm. Bei allen Smartphones bewirkt die Hinzunahme des Kalman-Filters und der Trägerphase eine Steigerung der Genauigkeit.

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	3,418	3,915	2,968	3,434
Code (Kalman-Filter)	3,335	3,734	2,902	3,324
Code (Doppler Smoothing)	3,227	3,608	2,845	3,227
Code (Phase Smoothing)	2,960	2,965	2,684	2,870
Code + Phase	2,061	2,554	2,176	2,264
Mittelwert	3,000	3,355	2,715	

Tabelle 4.2: RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone für die Messfahrt am 24.08.2021

4.1.3 Messfahrt 07.12.2021

Als Drittes wird eine Messfahrt vom 07.12.2021 untersucht. Die Route führte durch den Stadtteil Woodland Hills in Los Angeles und ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die Fahrt umfasst eine Runde mit 1433 Epochen. Die Abweichungen der Ergebnisse von den Referenztrajektorien sind in Tabelle 4.3 aufgeführt.

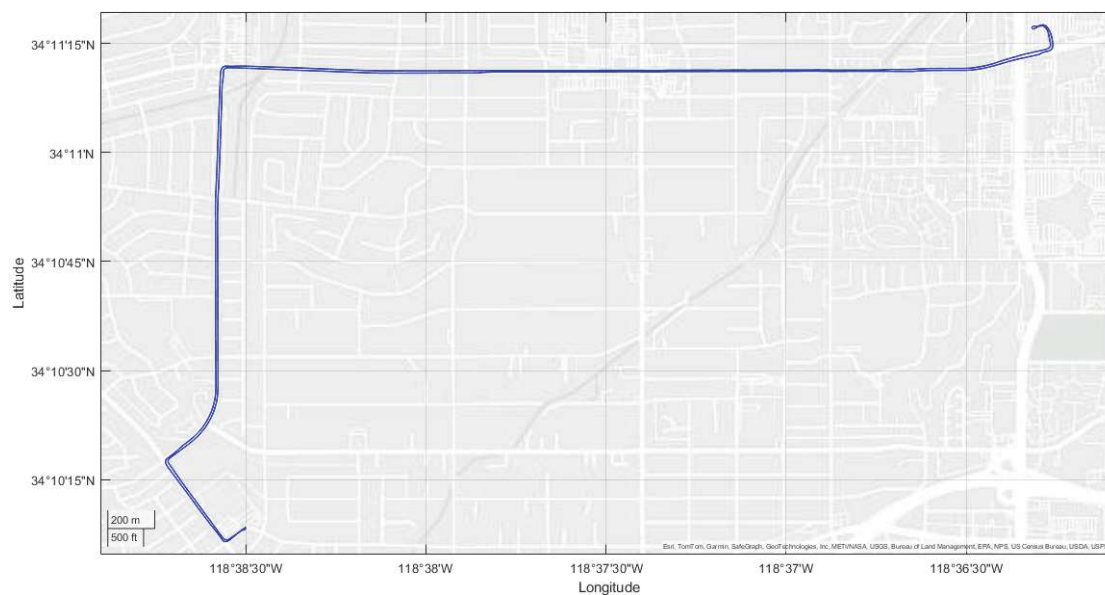


Abbildung 4.3: Route der Messfahrt am 07.12.2021

Obwohl das Pixel 5 mit knapp 2,3 m bei der Methode Code + Phase das genaueste Ergebnis dieser Messfahrt liefert, weist es bei allen anderen Prozessierungsmethoden die größten Abweichungen auf. Somit stellt die ungefilterte Codelösung des Pixel 5 das ungenaueste Ergebnis dieser Messfahrt dar. Die Codelösung mit Phasenglättung ist auch hier wieder genauer als die mittels Doppler-Shift geglättete Lösung. Jedoch sind die Unterschiede nicht so groß wie bei der Messfahrt am 24.08.2021. Mit Hilfe des Kalman-Filters könne die Ergebnisse

aller Smartphones verbessert werden. Auch hier findet die größte Genauigkeitssteigerung durch Hinzunahme der Trägerphasenmessungen statt. Wie schon bei den vorangehenden Messfahrten weisen die Lösungen des Galaxy S20 die geringste Variation im Hinblick auf die Prozessierungsmethode auf.

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	3,713	3,865	3,416	3,665
Code (Kalman-Filter)	3,543	3,641	3,345	3,510
Code (Doppler Smoothing)	3,453	3,535	3,284	3,424
Code (Phase Smoothing)	3,236	3,431	3,178	3,282
Code + Phase	2,366	2,279	2,451	2,366
Mittelwert	3,262	3,350	3,135	

Tabelle 4.3: RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone für die Messfahrt am 07.12.2021

4.1.4 Kombination der Messfahrten

Um allgemeingültige Aussagen über die verschiedenen Prozessierungsmethoden und die unterschiedlichen Smartphones treffen zu können, werden die Ergebnisse der drei untersuchten Messfahrten (Tabellen 4.1, 4.2 und 4.3) kombiniert. Hierzu werden die einzelnen Lösungen gemittelt. Da die Messfahrten unterschiedliche Längen aufweisen, findet eine Gewichtung auf Basis der Epochenanzahl statt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.2 dargestellt.

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	5,265	3,697	2,977	3,980
Code (Kalman-Filter)	3,966	3,330	2,914	3,403
Code (Doppler Smoothing)	3,882	3,195	2,846	3,308
Code (Phase Smoothing)	3,718	2,922	2,754	3,132
Code + Phase	2,618	2,318	2,291	2,409
Mittelwert	3,890	3,093	2,756	

Tabelle 4.4: RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone für die kombinierten Ergebnisse der untersuchten Messfahrten

Für alle Smartphones können mit der Methode Code + Phase Ergebnisse unter 2,7 m erzielt werden. Die Lösungen des Pixel 5 und des Galaxy S20 liegen bei etwa 2,3 m. Werden die Ergebnisse der Methode Code + Phase gemittelt, liegt die durchschnittliche Abweichung bei etwa 2,4 m. Werden alle Prozessierungsmethoden betrachtet und gemittelt, entsteht für das Galaxy S20 die geringste Abweichung mit weniger als 2,8 m. Mit lediglich einer Spanne von

70 cm bewegen sich die Lösungen des Galaxy S20 im kleinsten Intervall. Mit 1,4 m ist dieses Intervall für das Pixel 5 doppelt so groß. Das Mi 8 weist bei allen Prozessierungsmethoden die größten Abweichungen auf, kann jedoch auch die größte Verbesserung der Ergebnisse mit 2,6 m vorweisen. Gemittelt können die Ergebnisse im Vergleich zur ungefilterten Codelösung ausgehend von 4 m um knapp 1,6 m auf 2,4 m verbessert werden. Diese Verbesserung setzt sich aus 60 cm, welche durch die Kalman-Filterung entstehen, und 1 m, welcher durch die Hinzunahme der Trägerphasenbeobachtungen entsteht, zusammen. Durch die Glättung der Pseudorange können die gefilterten Codelösungen verbessert werden. Diese Verbesserung liegt bei knapp 10 cm bei der Glättung mittels Doppler und bei über 20 cm bei der Glättung mit Hilfe der Phasenbeobachtung.

4.2 Ausgewählte Streckenabschnitte

Aufgrund der Vielseitigkeit der Streckenführung wird im Folgenden die Messfahrt vom 02.04.2021 in San Jose genauer betrachtet. Es werden drei unterschiedliche Streckenabschnitte, welche in Abbildung 4.4 dargestellt sind, untersucht. Die betrachteten Szenarien umfassen jeweils eine Minute bzw. 60 Epochen. Bei dem ersten Streckenabschnitt handelt es sich um eine Freeway-Fahrt auf gerader Strecke. Im zweiten Szenario wird die Freeway Auf- bzw. Abfahrt bei einem Autobahnkreuz untersucht. Im dritten Szenario stoppt das Messfahrzeug vor einer Ampel. Da die gesamte Strecke dreimal befahren worden ist, liegen für jede der drei Runden Daten vor. Jedes Szenario kann somit dreimal untersucht werden, wodurch die Ergebnisse validiert werden können.

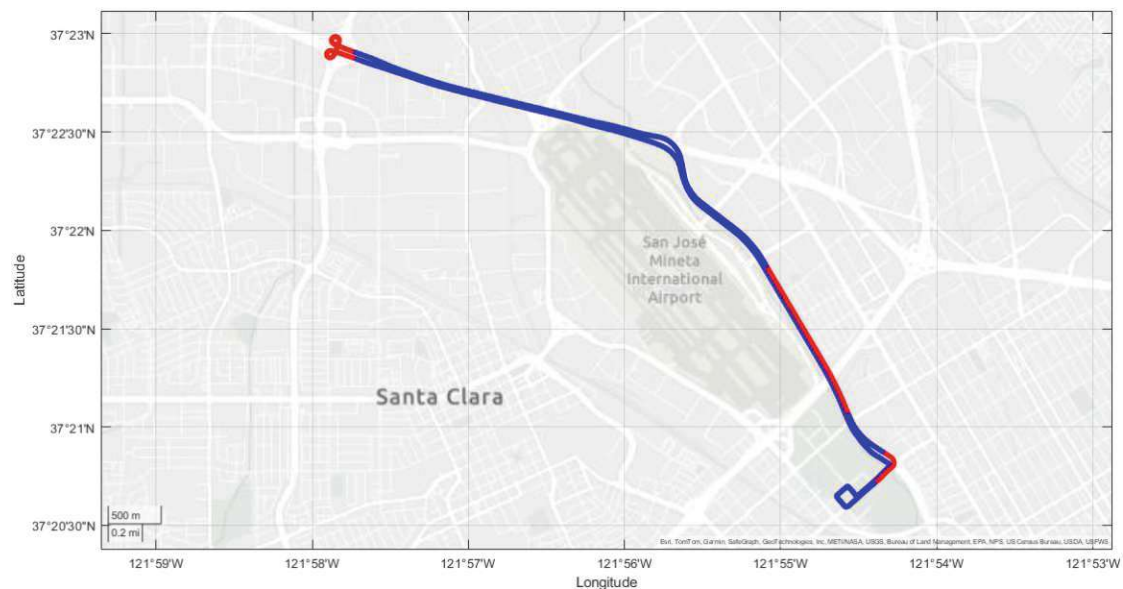


Abbildung 4.4: Gesamte Messfahrt vom 02.04.2021 (blau) mit den drei Testszenarien (rot)

4.2.1 Szenario 1: Freeway - Gerade Strecke

Als erstes Szenario wird eine Fahrt auf gerader Strecke mit relativ konstanter Geschwindigkeit gewählt. Hier kann eine hohe Positionierungsgenauigkeit erwartet werden. Der untersuchte Streckenabschnitt des Guadalupe Freeway (California State Route 87) stellt somit eine Referenz für optimale Bedingungen für einen Anwendungsfall im Bereich Fahrzeugnavigation dar. Für einen besseren Überblick über die örtlichen Gegebenheiten ist in Abbildung 4.5 der Streckenabschnitt im Satellitenbild dargestellt.



Abbildung 4.5: Szenario 1: Gerader Strecke - Freeway im Satellitenbild

Runde 1: Epochen 178 - 237

Die statistischen Ergebnisse der ersten gefahrenen Runde sind in Tabelle 4.5 dargestellt. Bei diesem Szenario schneidet das Mi 8 mit einem Mittelwert von 0,89 m über alle Prozessierungsmethoden am besten ab. Bei der Methode Code + Phase liegt lediglich eine Abweichung von etwas über 20 cm vor. Eine deutlich höhere Abweichung entsteht beim Pixel 5. Die Methode Code + Phase erreicht hier nur eine Genauigkeit von 1,8 m.

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	1,158	2,457	1,963	1,860
Code (Kalman-Filter)	1,088	2,411	1,806	1,768
Code (Doppler Smoothing)	0,987	2,293	1,740	1,673
Code (Phase Smoothing)	0,998	2,044	1,909	1,650
Code + Phase	0,226	1,841	0,942	1,003
Mittelwert	0,891	2,209	1,672	

Tabelle 4.5: Szenario 1 (Freeway), Runde 1 (Epochen 178 - 237): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone

In Abbildung 4.6 wird dieser Fall visualisiert. Während die berechnete Trajektorie des Mi 8 sehr gut mit der Referenzlösung zusammenfällt, ist die Trajektorie des Pixel 5 in Fahrtrichtung deutlich nach links verschoben.

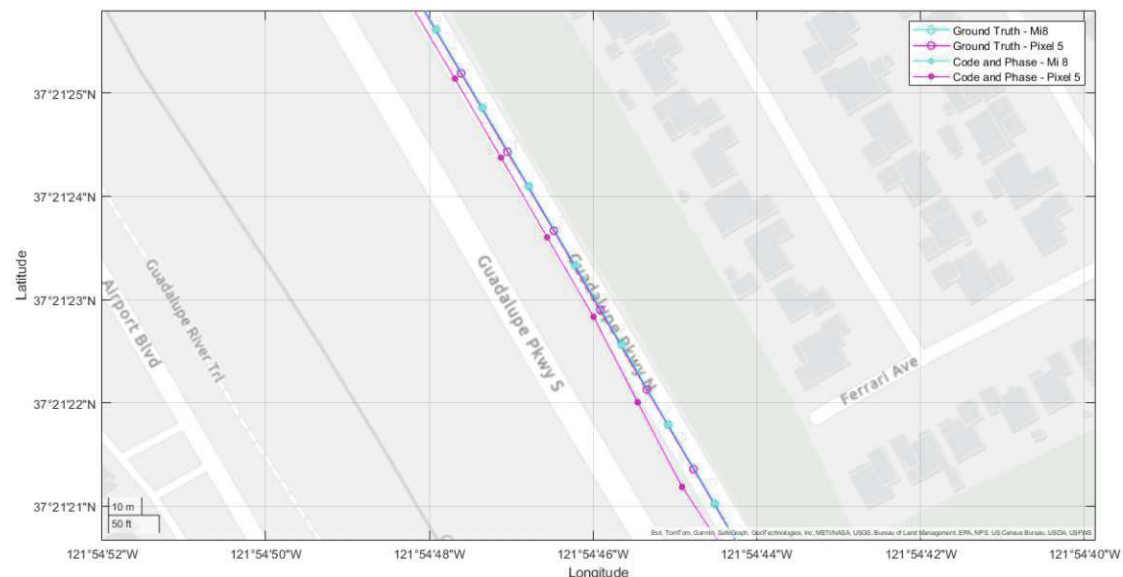


Abbildung 4.6: Szenario 1 (Freeway), Runde 1 (Epochen 178 - 237): Vergleich der mit der Methode Code + Phase erstellten Ergebnisse des Mi 8 und Pixel 5 mit deren jeweiligen Referenztrajektorien

Runde 2: Epochen 982 - 1041

Die Ergebnisse der einzelnen Smartphones der zweiten gefahrenen Runde (4.6) weichen deutlich von den Ergebnissen der ersten Runde ab. Die geringsten Abweichungen werden bei jedem Smartphone mit der Methode Code + Phase erreicht. Das Pixel 5 schneidet hier mit einer Abweichung von lediglich 1,17 m am besten ab. Das Mi 8 hat sich bei dieser Methode im Vergleich zur ersten Runde um mehr als einen Meter auf 1,28 m verschlechtert, das Galaxy S20 mit 2,5 m sogar um mehr als 1,5 m. Beim Galaxy S20 unterscheiden sich die Ergebnisse

für die mittels der Trägerwellen geglätteten Pseudorange zu der Code + Phasen Lösung um lediglich 1,6 cm.

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	2,235	2,285	3,097	2,539
Code (Kalman-Filter)	1,816	2,110	2,849	2,258
Code (Doppler Smoothing)	1,707	1,973	2,789	2,156
Code (Phase Smoothing)	1,802	1,996	2,515	2,104
Code + Phase	1,282	1,174	2,499	1,652
Mittelwert	1,768	1,908	2,740	

Tabelle 4.6: Szenario 1 (Freeway), Runde 2 (Epochen 982 - 1041): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone

Runde 3: Epochen 1695 - 1754

Die reinen Codelösungen der dritten Runde (Tabelle 4.7) bewegen sich bei allen Smartphones mit etwas über 2,5 m in einer ähnlichen Größenordnung. Davon ausgehend kann das Mi 8 um 1,25 m auf 1,38 m verbessert werden. Beim Pixel 5 gelingt eine Verringerung der Abweichung auf 1,18 m. Beim Galaxy S20 wird mit der Methode Code + Phase lediglich eine Genauigkeit von 1,75 m erzielt. Die Glättung mittels Phase liefert im Vergleich zu der Glättung mittels Doppler bei zwei Smartphones eine Lösung mit einer größeren Abweichung. Nur beim Galaxy S20 ist die Abweichung der mit Hilfe der Trägerphase geglätteten Lösung geringer.

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	2,637	2,554	2,500	2,564
Code (Kalman-Filter)	2,093	2,280	2,245	2,206
Code (Doppler Smoothing)	1,943	2,136	2,156	2,078
Code (Phase Smoothing)	1,976	2,299	1,990	2,088
Code + Phase	1,382	1,176	1,753	1,437
Mittelwert	2,006	2,089	2,129	

Tabelle 4.7: Szenario 1 (Freeway), Runde 3 (Epochen 1695 - 1754): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone

4.2.2 Szenario 2: Freeway / Expressway - Interchange

Als zweites Szenario wird ein im Hinblick auf die Positionsbestimmung komplexerer Streckenabschnitt untersucht. Wie in Abbildung 4.7 dargestellt, kreuzt der Bayshore Freeway (US 101) den Montague Expressway (CR G4). Das Messfahrzeug fährt vom Bayshore Free-

way ab, indem es den Montague Expressway unterquert und anschließend mit einer Schleife auf diesen auffährt. Danach verlässt es den Montague Expressway wieder und fährt in entgegengesetzter Richtung wieder auf den Bayshore Freeway auf. Hier wird der Montague Expressway ein zweites Mal unterquert. Insbesondere die beiden Unterführungen haben Einfluss auf die Qualität der GNSS-Singale und sind herausfordernd für die Positionsbestimmung.



Abbildung 4.7: Szenario 2: Freeway / Expressway - Interchange im Satellitenbild

Runde 1: Epochen 421 - 480

Die Ergebnisse der ersten Runde sind in Tabelle 4.8 dargestellt. Die Lösungen weisen deutlich höhere Abweichungen auf als beim ersten Szenario. Die geringste Abweichung zur Referenztrajektorie wird mit der Methode Code (Doppler Smoothing) beim Mi 8 erzielt. Die Hinzunahme der Phasenbeobachtung kann die Ergebnisse nicht verbessern. Die phasengeglätteten Lösungen sind ungenauer als die mittels Doppler geglätteten Lösungen. Die mit der Methode Code + Phase generierten Ergebnisse sind beim Mi 8 und dem Galaxy S20 ungenauer als die ungefilterte Codelösung. Die geringsten Abweichungen werden bei jedem Smartphone mit der Methode Code (Doppler Smoothing) erzielt.

4 ERGEBNISSE

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	3,553	7,227	2,833	4,538
Code (Kalman-Filter)	2,728	4,096	2,898	3,241
Code (Doppler Smoothing)	2,577	3,803	2,762	3,047
Code (Phase Smoothing)	2,622	4,095	2,978	3,232
Code + Phase	4,232	4,885	3,727	4,281
Mittelwert	3,142	4,821	3,040	

Tabelle 4.8: Szenario 2 (Interchange), Runde 1 (Epochen 421 - 480): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone

In Abbildung 4.8 ist der Einfluss der beiden Unterführungen auf die Qualität der Positionsbestimmung gut zu erkennen. Es sind die Referenzlösung (grün), sowie die Trajektorien für die reine Codelösung (blau) und die Doppler-geglättete Codelösung (rot) dargestellt. Durch Hinzunahme des Kalman-Filters und des Algorithmus zur Glättung der Pseudorange mittels Doppler-Beobachtungen kann die Abweichung von 7 auf 4 m verringert werden.

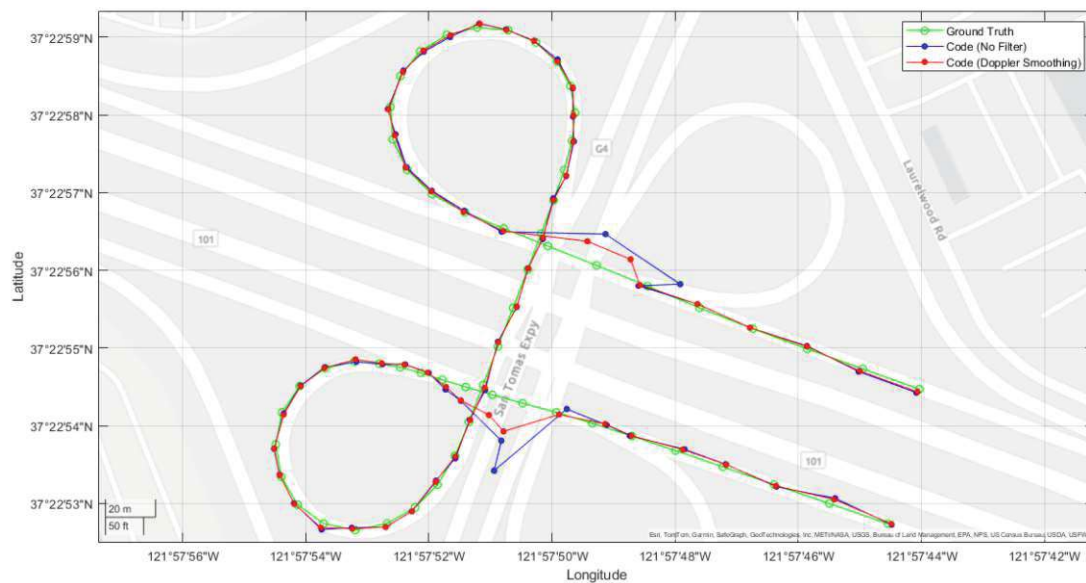


Abbildung 4.8: Szenario 2 (Interchange), Runde 3 (Epochen 421 - 480): Verbesserung der ungefilterten Codelösung durch Doppler-Glättung des Coderausens beim Pixel 5. Zusätzlich ist die Referenztrajektorie aufgeführt.

Runde 2: Epochen 1187 - 1246

Auch bei der zweiten Runde weisen die Ergebnisse der Methode Code (Doppler Smoothing) im Mittel die niedrigsten Abweichungen auf. Das beste Ergebnis wird mit dieser Methode beim Mi 8 mit 2,04 m erzielt. Die Phasenbeobachtungen können die Ergebnisse auch in

dieser Runde nicht verbessern. Lediglich beim Galaxy S20 wird mit einer Abweichung von 5,5 m mit der Methode Code + Phase das genaueste Ergebnis dieses Smartphones erzielt. Das Ergebnis der Methode Code (Doppler Smoothing) liegt mit 5,6 m allerdings nur 10 cm darüber. Zu beachten ist auch die starke Senkung der Abweichung der reinen Codelösung beim Pixel 5 nach Hinzunahme des Kalman-Filters um mehr als 6 m.

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	3,018	9,926	6,278	6,407
Code (Kalman-Filter)	2,177	3,573	6,156	3,969
Code (Doppler Smoothing)	2,043	3,460	5,617	3,707
Code (Phase Smoothing)	2,239	3,642	6,090	3,990
Code + Phase	2,552	4,240	5,513	4,101
Mittelwert	2,406	4,968	5,931	

Tabelle 4.9: Szenario 2 (Interchange), Runde 2 (Epochen 1187 - 1246): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone

Abbildung 4.9 zeigt die Unterschiede zwischen der Doppler-geglätteten Lösung des Mi 8 und der des Galaxy S20 bei gleichen Prozessierungseinstellungen. Der Unterschied wird besonders bei der ersten Unterführung deutlich. Die Lösung für das Galaxy S20 weicht kurzzeitig um mehr als 30 m von der Referenzlösung ab. Anschließend benötigt die Trajektorie mehrere Epochen, um sich der Referenz wieder anzunähern. Beim Mi 8 ist der Einfluss der Unterführung auf die Positionierung ebenfalls erkennbar. Die entstehenden Abweichungen sind allerdings deutlich geringer.

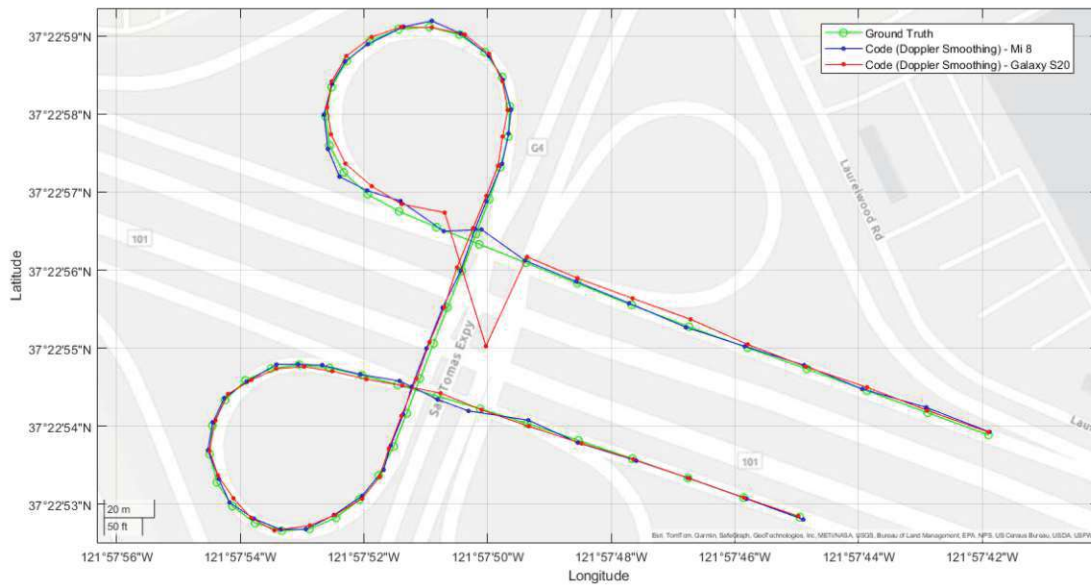


Abbildung 4.9: Szenario 2 (Interchange), Runde 3 (Epochen 1187 - 1246): Vergleich der Doppler-geglätteten Codelösungen des Mi 8 und des Galaxy S20

Runde 3: Epochen 1892 - 1951

Bei den Ergebnissen für die dritte Runde fallen die sehr hohen Abweichungen des Mi 8 auf. Für die ungefilterte Codelösung liegen diese bei über 50 m. Mit der Methode Code + Phase können die Ergebnisse auf 18 m verbessert werden. Auffällig ist, dass die Ergebnisse der beiden anderen Smartphones ähnlich sind wie in den vorherigen Runden und keine großen Ausreißer aufweisen.

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	51,764	3,216	2,718	19,233
Code (Kalman-Filter)	28,447	3,224	2,729	11,467
Code (Doppler Smoothing)	28,442	2,960	2,652	11,351
Code (Phase Smoothing)	28,450	3,052	2,634	11,379
Code + Phase	18,249	4,346	2,479	8,358
Mittelwert	31,070	3,360	2,642	

Tabelle 4.10: Szenario 2 (Interchange), Runde 3 (Epochen 1892 - 1951): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone

Abbildung 4.10 visualisiert die Abweichungen des Mi 8. Bei der zweiten Unterführung kommt es zu mehreren Ausreißern mit einer Abweichung von teilweise über 200 m. Durch Hinzunahme des Kalman-Filters und der Phasenbeobachtungen können diese Abweichungen verringert werden.

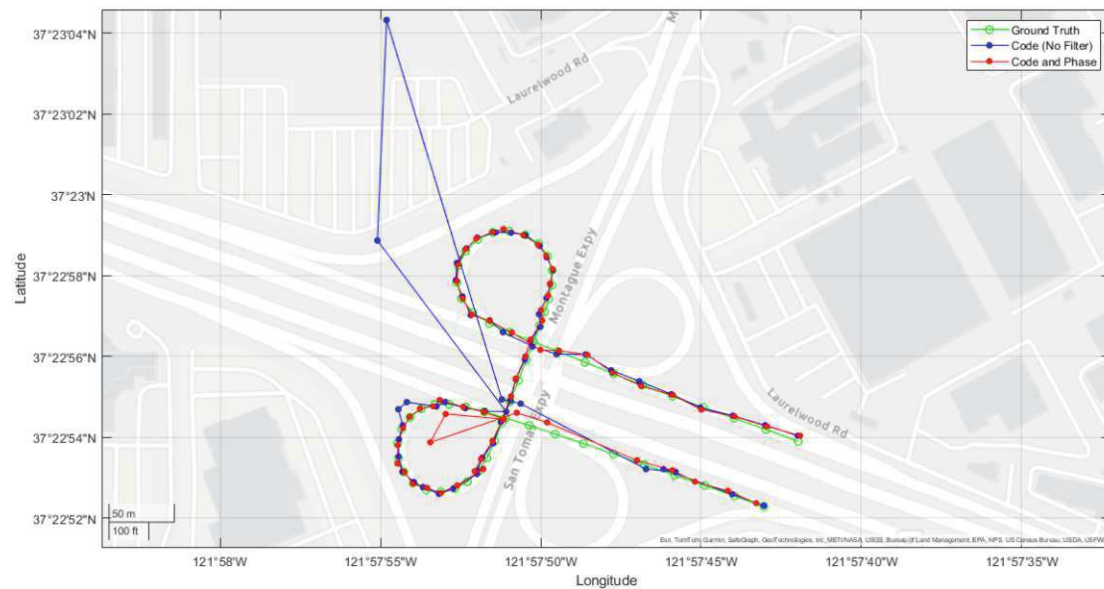


Abbildung 4.10: Szenario 2 (Interchange), Runde 3 (Epochen 1892 - 1951): Hohe Abweichung des Mi 8 aufgrund der Unterführung. Vergleich der ungefilterten Codelösung mit der Code + Phasen-Lösung

Der Grund für diese starken Abweichungen wird deutlich, wenn man die Werte der Horizontal Dilution of Precision (HDOP) betrachtet. Dieser dimensionslose Parameter beschreibt die Qualität der zweidimensionalen Positionsbestimmung auf Basis der Geometrie der Satellitenkonstellation. Je niedriger der Wert ist, desto höher ist die Qualität der Positionsbestimmung (Teunissen und Montenbruck, 2017). Abbildung 4.11 vergleicht den HDOP des Mi 8 mit dem des Galaxy S20. Die beiden Unterführungen können als deutliche Ausschläge erkannt werden. Der HDOP des Mi 8 ist um ein Vielfaches höher als der des Galaxy S20.

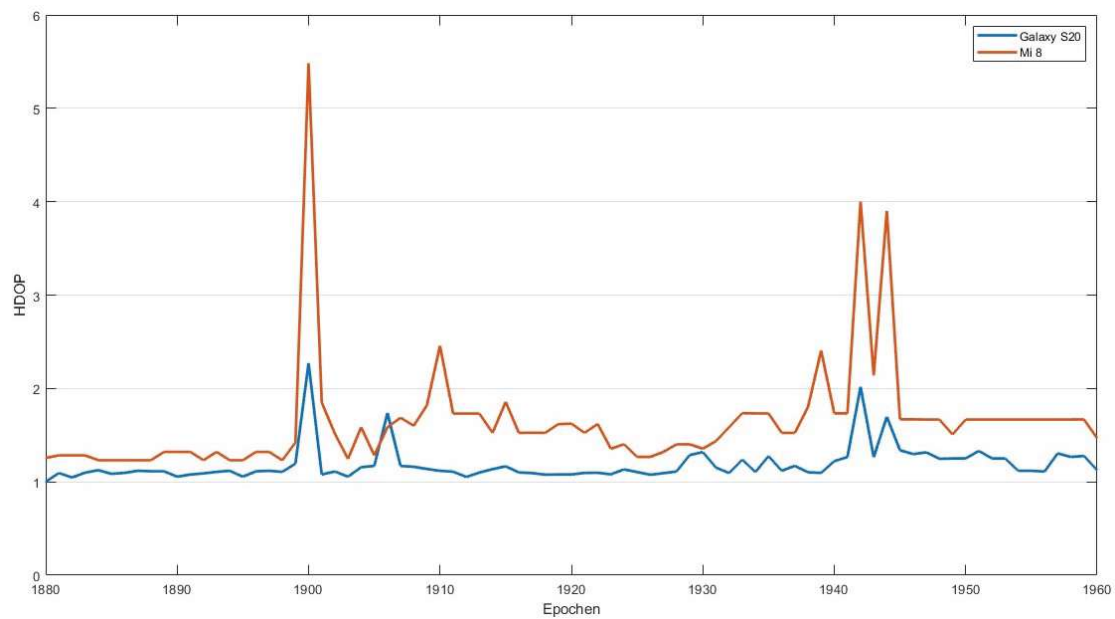


Abbildung 4.11: Szenario 2 (Interchange), Runde 3 (Epochen 1892 - 1951): Vergleich der Horizontal Dilution of Precision des Galaxy S20 und des Mi 8

4.2.3 Szenario 3: Freeway - Auffahrt mit Halt

Als drittes Szenario wird die Auffahrt auf den Guadalupe Freeway untersucht. Kurz vor der Auffahrt kam das Messfahrzeug bei jeder Runde vor einer Ampel zum Stehen. Der Einfluss dieses Stopps auf die Qualität der Positionslösungen wird im Folgenden untersucht.



Abbildung 4.12: Szenario 3 (Ampel): Auffahrt auf Freeway mit Halt vor Ampel im Satellitenbild

Runde 1: Epochen 95 - 154

Die Ergebnisse für dieses Szenario schwanken bei allen Smartphones und bei allen Methoden zwischen 2 und 3 m. Die Abweichungen des Mi 8 bewegen sich abhängig von der Prozessierungsmethode lediglich in einem Intervall von 20 cm zwischen 2,4 m und 2,6 m. Beim Mi 8 und beim Galaxy S20 wird mit der Methode Code (Doppler Smoothing) das jeweils beste Ergebnis erzielt. Das Pixel 5 erreicht die geringste Abweichung mit der Methode Code + Phase mit 2,2 m. Beim Mi 8 und dem Galaxy S20 ist die Code + Phasen-Lösung ungenauer als die gefilterte Codelösung.

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	2,607	3,026	2,813	2,815
Code (Kalman-Filter)	2,514	2,916	2,738	2,723
Code (Doppler Smoothing)	2,423	2,771	2,700	2,631
Code (Phase Smoothing)	2,541	2,540	2,800	2,627
Code + Phase	2,605	2,204	3,021	2,610
Mittelwert	2,538	2,691	2,814	

Tabelle 4.11: Szenario 3 (Ampel), Runde 1 (Epochen 95 - 154): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone

Abbildung 4.13 zeigt die mit Hilfe der Doppler-Beobachtungen geglättete Lösung (blau) und die Trajektorie der Code + Phasen-Lösung (rot). Obwohl die geglätteten Positionslösungen eine höhere Streuung während des Stopps aufweisen, liegt die Punktwolke dennoch näher an der Referenztrajektorie (grün) als die auf Basis der Code- und Phasenbeobachtungen generierten Lösungen. Zudem ist die Abweichung der geglätteten Ergebnisse sowohl vor als auch nach dem Stopp geringer. Beide Trajektorien sind in Bezug auf die Fahrtrichtung nach rechts verschoben.

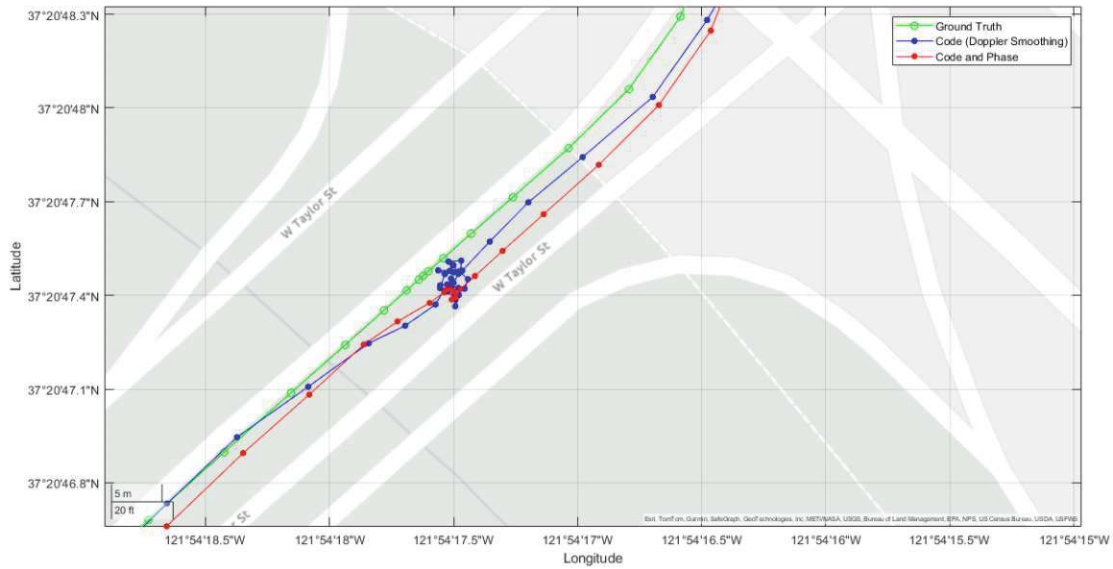


Abbildung 4.13: Szenario 3 (Ampel), Runde 1 (Epochen 95 - 154): Vergleich der Doppler-geglättete Codelösung und der Code + Phasen-Lösung des Galaxy S20 mit der Referenztrajektorie

Runde 2: Epochen 909 - 968

Bei der zweiten Runde (Tabelle 4.12) fällt vor allem die geringe, mit der Methode Code + Phase beim Pixel 5 generierte Abweichung von unter einem Meter auf. Beim Galaxy S20 wird mit dieser Lösung lediglich ein Wert von knapp 3 m erreicht. Dennoch ist diese Methode bei allen Smartphones mit Abstand am genauesten. Mit Hilfe der Phasenglättung können die Ergebnisse ebenfalls verbessert werden. Die phasengeglätteten Ergebnisse weisen eine über 70 cm höhere Genauigkeit als die Doppler-geglätteten Lösungen auf.

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	2,572	3,949	4,367	3,629
Code (Kalman-Filter)	2,395	3,796	4,625	3,606
Code (Doppler Smoothing)	2,281	3,712	4,569	3,521
Code (Phase Smoothing)	1,854	2,796	3,682	2,777
Code + Phase	1,396	0,967	2,949	1,770
Mittelwert	2,100	3,044	4,038	

Tabelle 4.12: Szenario 3 (Ampel), Runde 2 (Epochen 909 - 968): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone

Obwohl mit der Methode Code + Phasen bei allen Smartphones die besten Ergebnisse in dieser Runde erzielt werden, liegen dennoch große Unterschiede zwischen den Modellen vor. Abbildung 4.14 zeigt die berechneten Code + Phasen-Trajektorien für das Pixel 5 und das

4 ERGEBNISSE

Galaxy S20 sowie deren Referenzen. Während des Pixel 5 während den Stopps die Position relativ konstant hält (Magenta), weist das Galaxy S20 einen deutlichen Drift, welcher sich über mehrere Meter erstreckt, auf (Cyan).

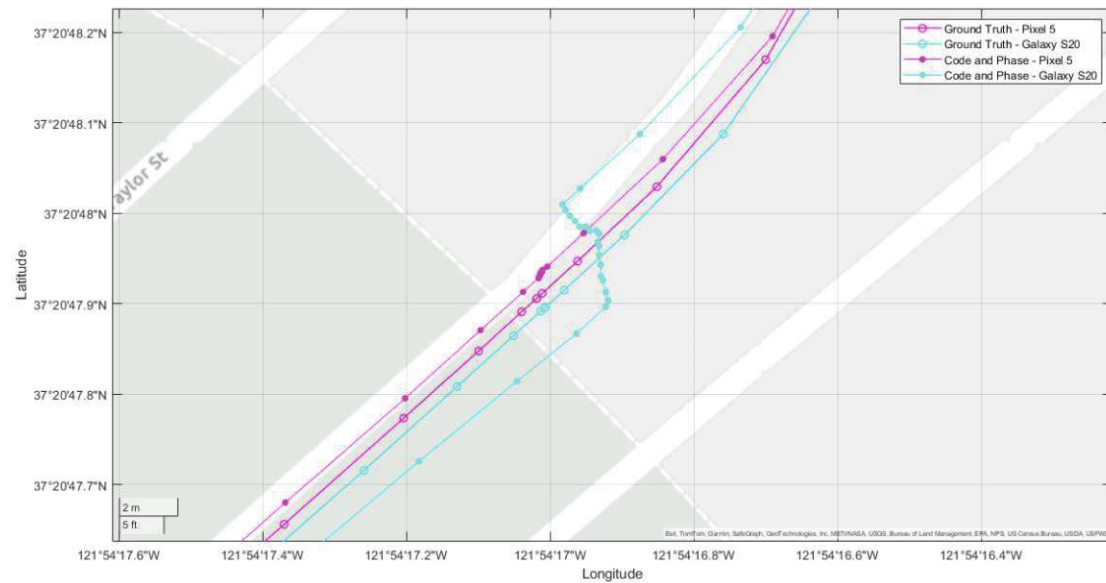


Abbildung 4.14: Szenario 3 (Ampel), Runde 2 (Epochen 909 - 968): Vergleich der mit der Methode Code + Phase erstellten Lösungen des Pixel 5 und des Galaxy S20 mit deren jeweiliger Referenztrajektorie. Beim Galaxy S20 ist ein deutlicher Drift zu erkennen.

Betrachtet man Abbildung 4.15 fällt auf, dass der Drift erst mit Hinzunahme der Trägerphasenbeobachtung bei der Methode Code + Phase entsteht. Der Kalman-Filter beeinflusst die grundsätzliche Geometrie der Streuung der ungefilterten Codelösungen kaum und ist somit nicht für den Drift verantwortlich.

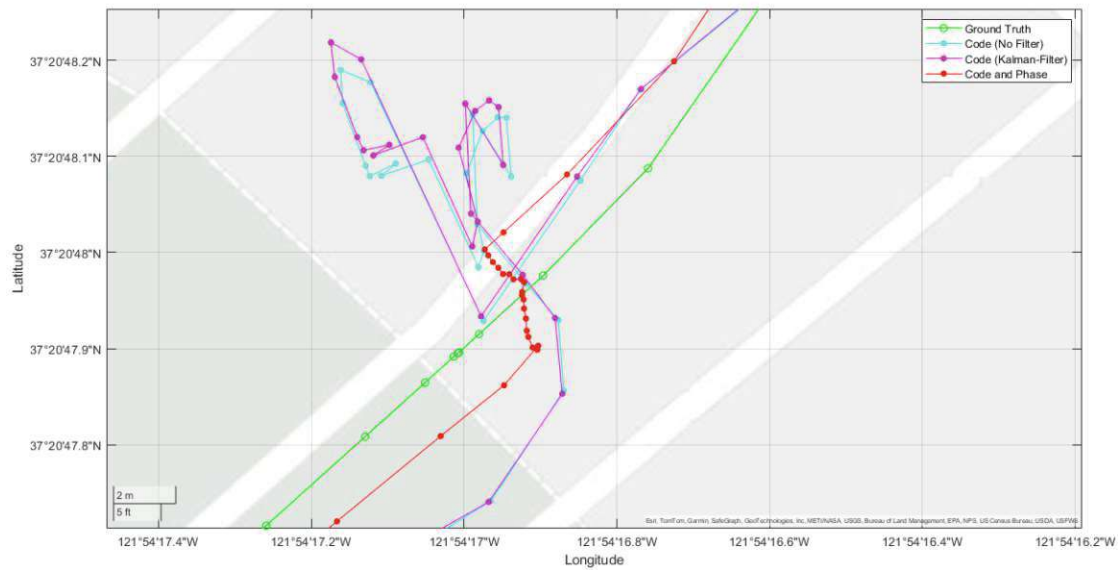


Abbildung 4.15: Szenario 3 (Ampel), Runde 2 (Epochen 909 - 968): Untersuchung der Herkunft des Drifts während dem Halt beim Galaxy S20. Neben der mit der Methode Code + Phase erstellten Trajektorie, sind die Trajektorien der ungefilterten und der Kalman-gelilterten Lösung, sowie die Referenztrajektorie aufgeführt.

Runde 3: Epochen 1617 - 1676

Betrachtet man die Ergebnisse der dritten Runde, fällt die deutliche Verbesserung der Positionslösung des Pixel 5 auf. Die Abweichungen der ungefilterten Codelösung lagen bei knapp 5 m. Durch Hinzunahme des Kalman-Filters und der Phasenbeobachtungen konnte die Genauigkeit um 3,5 m auf 1,5 m gesteigert werden. Obwohl die Methode Code + Phase auch bei den beiden anderen Smartphone-Modellen die Ergebnisse mit den geringsten Differenzen liefern, weisen diese dennoch eine Abweichung von über 3 m auf. Mit der Phasenglättung werden im Schnitt knapp 15 cm bessere Ergebnisse erzielt als mit der Glättung auf Basis der Doppler-Beobachtungen.

Prozessierungsmethode	2D-RMS-Abweichung [m]			
	Mi 8	Pixel 5	Galaxy S20	Mittelwert
Code (No Filter)	4,752	4,893	3,213	4,286
Code (Kalman-Filter)	4,559	4,710	3,172	4,147
Code (Doppler Smoothing)	4,512	4,592	3,127	4,077
Code (Phase Smoothing)	4,251	4,575	2,964	3,930
Code + Phase	3,740	1,549	3,069	2,786
Mittelwert	4,363	4,064	3,109	

Tabelle 4.13: Szenario 3 (Ampel), Runde 3 (Epochen 1617 - 1676): RMS-Abweichungen in Metern nach Prozessierungsmethode und Smartphone

Die Optimierung der Positionslösung des Pixel 5 durch den Kalman-Filter und durch Hinzunehmen der Phasenbeobachtungen ist in Abbildung 4.16 dargestellt. Die ungefilterten Codelösungen (blau) sind stark um den Haltepunkt gestreut. Die gefilterte Code + Phasen-Lösung weist eine deutlich geringere Streuung auf und besitzt eine geringere Abweichung zur Referenztrajektorie.

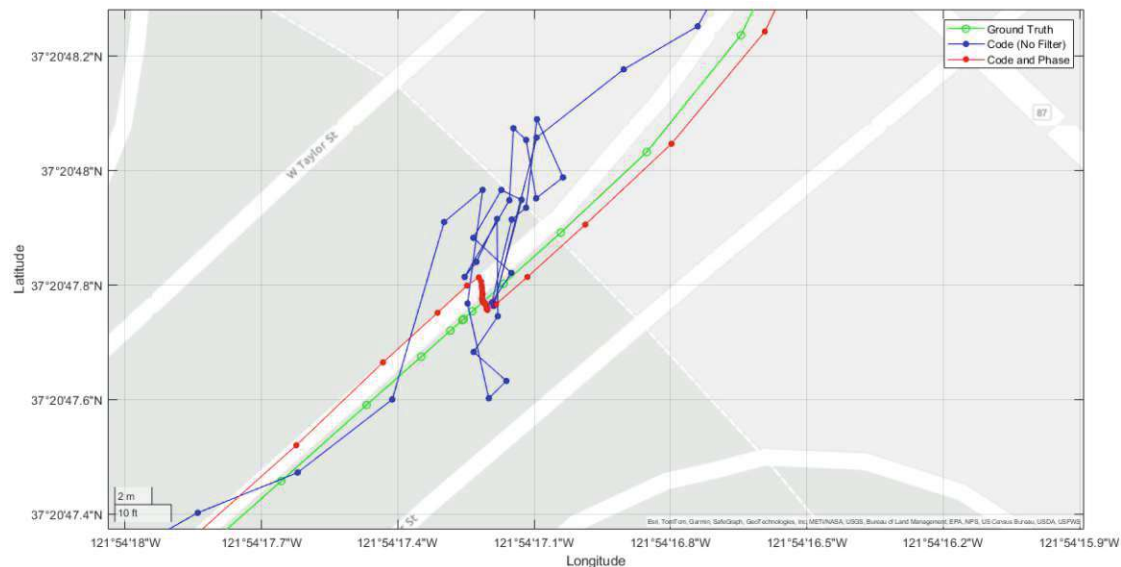


Abbildung 4.16: Szenario 3 (Ampel), Runde 3 (Epochen 1617 - 1676): Vergleich der Streuung der ungefilterten Codelösung mit der Code + Phasen-Lösung des Pixel 5 während dem Halt vor der Ampel

4.3 Testdaten und Lösungsabgabe

Nachdem bei den vorangehenden Kapiteln der Trainingsdatensatz betrachtet wurde, wird nun mit Hilfe des Testdatensatzes eine Lösung für die GSDC generiert. Beim Testdatensatz werden keine Referenztrajektorien zur Verfügung gestellt, sodass die Qualität der ermittel-

ten Lösungen erst nach dem Einreichen in Form des unter 1.3 und 2.1 vorgestellten Public bzw. Private Scores beurteilt werden kann. Für die 40 von Google zur Verfügung gestellten Testfahrten werden die individuellen Lösungstrajektorien mit den im Kapitel zwei und drei beschriebenen Modellen und Methoden bestimmt. Es werden so weit wie möglich die gleichen Prozessierungseinstellungen wie bei den vorherigen Ergebnissen verwendet. Bei den im Folgenden aufgeführten Testfahrten konnte nur GPS L1 prozessiert werden, da eine abweichende Konfiguration zu einer falschen Epochenanzahl in der Lösungsdatei führt.

- 2022-04-25-21-04-us-ca-ebf-x/mi8
- 2021-11-30-20-59-us-ca-mtv-m/mi8
- 2021-09-28-21-56-us-ca-mtv-a/mi8
- 2022-10-06-20-46-us-ca-sjc-r/sm-a205u

Im Anschluss an die Bestimmung der individuellen Lösungen werden diese wie unter 3.4 beschrieben in einer Datei zusammengefasst und bei der GSDC eingereicht. Die erzielten Scores für die fünf untersuchten Prozessierungsmethoden sind in Tabelle 4.14 zusammengefasst.

Methode	Public		Private	
	Score [m]	2D-Abw. [m]	Score [m]	2D-Abw. [m]
Code (No Filter)	4,439	2,66	6,127	3,68
Code (Kalman-Filter)	4,393	2,64	6,057	3,63
Code (Doppler Smoothing)	4,276	2,57	5,882	3,53
Code (Phase Smoothing)	4,898	2,94	5,898	3,54
Code + Phase	4,377	2,63	5,490	3,29

Tabelle 4.14: Ergebnisse der GSDC: Es sind die erzielten Scores sowie die errechneten 2D-Abweichungen der öffentlichen und der privaten Lösungen aufgeführt. Die Ergebnisse sind für die fünf Prozessierungsmethoden aufgelistet.

In den Workshop-Folien zur Einführung in die GSDC (Fu et al., 2023) wird beschrieben, dass der Score mit dem Faktor 0,6 multipliziert werden kann, um die mittlere Genauigkeit zu erhalten. Diese Umrechnung ist sinnvoll, um die Ergebnisse mit den Lösungen aus den vorherigen Kapiteln vergleichen zu können. Die entstehenden Werte für die Abweichungen sind ebenfalls in Tabelle 4.14 aufgeführt.

Die 2D-Abweichungen des Public Scores bewegen sich innerhalb einer Spanne von einem halben Meter zwischen 2,5 und 3 m. Das beste Ergebnis wird mit der Methode Code (Doppler Smoothing) mit einer Abweichung von 2,57 m erzielt. Das ungenaueste Ergebnis entsteht bei der phasengeglätteten Codelösung mit einer Abweichung von 2,94 m. Die ungefilterte Codelösung liefert ein Ergebnis von 2,66 m. Dieses kann mit dem Kalman-Filter um 2 cm

4 ERGEBNISSE

verbessert werden. Wird die Phasenbeobachtung hinzugenommen, kann die Abweichung nochmals um 1 cm auf 2,63 m verringert werden.

Die Abweichungen des Private Scores sind um etwa einen Meter ungenauer als die des Public Scores und die Ergebnisse sind etwas breiter gestreut. Die ungefilterte Codelösung erreicht eine Genauigkeit von 3,68 m. Mit dem Kalman-Filter kann diese um 5 cm auf 3,63 m verbessert werden. Die beiden Algorithmen zu Glättung des Coderausens erreichen mit 3,53 m (Doppler-Glättung) und 3,54 m (Phasenglättung) sehr ähnliche Werte. Das genaueste Ergebnis wird mit der Code + Phasen-Lösung mit einer Abweichung von 3,29 m erzielt.

5 Diskussion

Im Folgenden werden die ermittelten Ergebnisse eingeordnet und die bedeutendsten Erkenntnisse zusammengefasst. Zudem wird das gewählte Vorgehen hinterfragt und Schwierigkeiten werden aufgezeigt.

Die mit Hilfe der fünf Prozessierungsmethoden bestimmten Ergebnisse weisen sowohl zwischen den betrachteten Messfahrten als auch zwischen den einzelnen Szenarien eine hohe Variation auf. Zudem verhalten sich dieselben Smartphones in verschiedenen Runden bei gleichen Einstellungen sehr unterschiedlich, was zu deutlichen Unterschieden bei den resultierenden Abweichungen führt. Dennoch lassen sich einige allgemeingültige Aussagen aus den Untersuchungen ableiten: Der Kalman-Filter verbessert die Ergebnisse bei nahezu jedem untersuchten Szenario und Smartphone signifikant. Auch die Hinzunahme der Trägerphasenbeobachtung verbessert die Ergebnisse in vielen Fällen deutlich. Sind die örtlichen Gegebenheiten jedoch anspruchsvoller, leidet die Trägerphasenverfolgung darunter und die Ergebnisse besitzen eine gesteigerte Abweichung. Dies wird besonders im zweiten vorgestellten Szenario deutlich. Beim Durchfahren der Unterführungen entstehen bei der Methode Code + Phase im Vergleich zu den anderen Methoden häufig die größten Abweichungen. Die Doppler-geglättete Codelösung ist hier am zuverlässigsten und liefert die genauesten Ergebnisse. Im Vergleich dazu ist die phasengeglättete Codelösung in den weniger anspruchsvollen Szenarien meistens genauer. Aufgrund der höheren Qualität der Phasenbeobachtungen bei diesen Szenarien werden hier jedoch mit der Methode Code + Phase die besten Ergebnisse erzielt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Methode Code (Doppler Smoothing) auch unter komplizierten Bedingungen zuverlässige Ergebnisse liefert, während die höchste Genauigkeit bei weniger anspruchsvollen Bedingungen mit der Methode Code + Phase erreicht wird. Je nach örtlichen Bedingungen sollte somit entweder die Methoden Code (Doppler Smoothing) oder Code + Phase gewählt werden.

Ein Vergleich zwischen den drei untersuchten Smartphones gestaltet sich als schwierig, da dieselben Smartphones bei gleichen Einstellungen in verschiedenen Runden teilweise große Unterschiede bezüglich deren erzielten Genauigkeiten aufweisen. Dies wird besonders beim Mi 8 deutlich. Hier sind die Unterschiede zwischen den gefahrenen Runden häufig größer als ein Meter. Obwohl die Lösungen des Galaxy S20 nicht immer am genauesten sind, weisen sie über alle Messfahrten eine hohe Stabilität auf. Eine Aussage, welches Smartphone mit einem bestimmten Szenario am besten umgehen kann, kann aufgrund des unvorhersehbaren Verhaltens der drei untersuchten Modelle nicht getroffen werden.

Um die erzielten Lösungen und deren zugrunde liegenden Modelle einzuordnen, wurden diese sowohl graphisch als auch statistisch betrachtet. Die graphische Auswertung fand über einen Vergleich der generierten Trajektorien mit deren jeweiligen Referenztrajektorien statt. Als statistisches Maß wurde die 2D-RMS-Abweichung gewählt. Dieses Maß ist leicht zu berechnen und wird in vielen Bereichen der Datenanalyse verwendet. Die RMS-Abweichung ist jedoch empfindlich gegenüber Ausreißern, wodurch große Fehler den Wert deutlich erhöhen

und zu einem verzerrten Bild der Gesamtgenauigkeit führen. Zusätzlich wird nur die Größe der Fehler und nicht deren Richtung berücksichtigt. Es lässt sich daher nicht feststellen, ob eine Systematik bezüglich der Richtung vorliegt. Eine Ergänzung der Auswertung um weitere statistische Maße kann daher sinnvoll sein, um ein umfassenderes Bild über die Verteilung der Abweichungen zu erhalten. Auch eine Klassifizierung auf Basis der Abweichungen des 50. und 95. Perzentils wie bei der GSDC ist sinnvoll.

Anschließend an die Auswertung der einzelnen Szenarien wurden die Lösungen bei der GSDC eingereicht und die Scores ermittelt. Mit dem Private Score wird die Platzierung bestimmt. Hier wurde der 235. Platz mit einem Score von 5,49 m und einer 2D-Abweichung von 3,29 m erreicht. An der GSDC 2023 haben 279 Teilnehmer teilgenommen. Der Erstplatzierte erreichte einen Score von 0,88 m. Dies entspricht einer 2D-Abweichung von 0,53 m. Da die GSDC auf maschinelles Lernen ausgerichtet ist, nutzen die meisten Teilnehmer einen solchen Lösungsansatz in Kombination mit weiteren Sensordaten der Smartphone-IMU. Im Unterschied zu diesen Ansätzen wurde bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Vorgehen so weit wie möglich auf eine potentielle Echtzeitfähigkeit geachtet. IMU-Daten wurden nicht verwendet. Die Prozessierungseinstellungen für die fünf untersuchten Methoden wurden auf Basis von drei Smartphone-Modellen der Hersteller Google, Samsung und Xiaomi erstellt und anschließend auf den gesamten Testdatensatz angewendet. Der Testdatensatz besteht jedoch aus vielen unterschiedlichen Smartphone-Modellen, für die nicht einzeln getestet werden konnte, wie sich die Methoden verhalten und wie sich diese auf den Score auswirken. RaPPid konnte nicht alle Dateien des Testdatensatzes einwandfrei prozessieren. Bei manchen Dateien ließen sich nur bestimmte Frequenzen und GNSS prozessieren. Bei anderen Dateien entstand eine abweichende Anzahl an Epochen, die nachträglich korrigiert werden musste. Durch diese Umstände konnten nicht die bestmöglichen Ergebnisse generiert werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die durchgeführten Untersuchungen kinematischer Smartphone-GNSS-Daten mit Hilfe von Precise Point Positioning interessante Erkenntnisse bezüglich der Leistungsfähigkeit verschiedener Prozessierungsmethoden und deren Anwendung auf unterschiedliche Smartphone-Modelle geliefert haben. Trotz der hohen Variabilität der Ergebnisse und den Herausforderungen, die durch unterschiedliche örtliche Bedingungen und Gerätevariationen entstanden sind, konnten Tendenzen und Empfehlungen abgeleitet werden. Für kinematische Smartphone-Beobachtungen konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe von PPP und einem gut angepassten Kalman-Filter in Kombination mit dem Uncombined Model Genauigkeiten von unter einem Meter, abhängig von den örtlichen Gegebenheiten, möglich sind. Im Hinblick auf klassische relative Positionierungsmethoden konnten mit den vorgestellten Ansätzen durchaus konkurrenzfähige Ergebnisse erzielt werden.

6 Ausblick

Aufgrund der Erkenntnisse dieser Arbeit ergeben sich weitere Fragestellungen und Ansätze für zukünftige Untersuchungen im Bereich der Smartphone-GNSS-Positionierung mittels Precise Point Positioning. Einige Ansätze werden im Folgenden vorgestellt:

Eine Möglichkeit, die Genauigkeit der Positionslösung zu steigern, ist die Einbindung weiterer Sensoren wie der IMU, welche aus Beschleunigungs- und Drehratensensoren besteht. Diese Sensoren sind in allen gängigen Smartphones enthalten und deren Messwerte können helfen kurzzeitige GNSS-Signalverluste auszugleichen, um neben der Genauigkeit auch die Zuverlässigkeit des Systems zu erhöhen.

Damit der gewählte Ansatz tatsächlich echtzeitfähig ist, muss auf hochgenaue echtzeitfähige Atmosphärenmodelle zurückgegriffen werden. Während dies für die Troposphäre ohne großen Aufwand möglich ist, sind präzise Ionosphärenmodelle herausfordernd und deren Einbindung ein mögliches Thema weiterer Untersuchungen.

Einen großen Einfluss auf die Qualität der Positionslösung hat die im Smartphone verbauete Hardware. In dieser Arbeit wurden in erster Linie drei Smartphone-Modelle untersucht. Um Empfehlungen für bestimmte Modelle oder Hersteller zu geben, wären weitere Untersuchungen mit einer größeren Bandbreite an Geräten und Szenarien sinnvoll.

Da von einer kontinuierlichen Verbesserung der Smartphone-Hardware auszugehen ist, ist es denkbar, dass in Zukunft vermehrt hochwertigere Empfänger wie beispielsweise Module der Firmen U-Blox oder SkyTraQ verbaut werden. Dies würde die Qualität der Beobachtungen steigern und Untersuchungen im Hinblick auf eine ganzzahlige Fixierung der Phasenmehrfachdeutigkeiten ermöglichen.

Im dritten untersuchten Szenario (Kapitel 4.3.2), dem Halt vor der Ampel, kam es bei bestimmten Smartphones zu einer fälschlichen Änderung der bestimmten Position entlang einer bestimmten Richtung, obwohl sich das Messfahrzeug nicht bewegt hat. Es wäre interessant, die Herkunft dieses Drifts zu untersuchen und mögliche Maßnahmen, um diesen abzumildern zu finden.

Da die Smartphone-Positionierung einem ständigen technischen Wandel unterworfen ist und kontinuierlich neue Anwendungsfelder für präzisere Positionslösungen erschlossen werden, werden in Zukunft zahlreiche weitere Fragestellungen auf diesem Gebiet zu beantworten sein.

Referenzen

- Askne, J., & Nordius, H. (1987). Estimation of Tropospheric Delay for Microwaves From Surface Weather Data. *Radio Science - RADIO SCI*, 22, 379–386. <https://doi.org/10.1029/RS022i003p00379>
- Chow, A., Gulati, V., Orendorff, D., Fuand, M., Dane, S., & Gulati, V. (2023). Google Smartphone Decimeter Challenge 2023. <https://kaggle.com/competitions/smartphone-decimeter-2023>
- Fu, M., Khider, M., van Diggelen, F., & Orendorff, D. (2023). Workshop for Google Smartphone Decimeter Challenge (SDC) 2023-2024.
- Glaner, M. F. (2022). *Towards instantaneous PPP convergence using multiple GNSS signals* [Dissertation]. Technische Universität Wien.
- Glaner, M. F., & Weber, R. (2023a). Breaking the One-Meter Accuracy Level with Smartphone GNSS Data. *Eng. Proc., 2023, ENC 2023*.
- Glaner, M. F., & Weber, R. (2023b). An open-source software package for Precise Point Positioning: raPPPid. *GPS Solutions*, 27(4), 174. <https://doi.org/10.1007/s10291-023-01488-4>
- ION - Smartphone Decimeter Challenge. (2023). <https://www.ion.org/gnss/googlecompetition.cfm>
- Jaduszliwer, B., & Camparo, J. C. (2021). Past, present and future of atomic clocks for GNSS. *GPS Solutions*, 25, 1–13. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:230285119>
- Kalman, R. E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems [_eprint: https://asmedigitalcollection.asme.org/fluidsengineering/article-pdf/82/1/35/5518977/35_1.pdf]. *Journal of Basic Engineering*, 82(1), 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
- 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>
- Nilsson, T., Böhm, J., Wijaya, D. D., Tresch, A., Nafisi, V., & Schuh, H. (2013). Path Delays in the Neutral Atmosphere. In J. Böhm & H. Schuh (Hrsg.), *Atmospheric Effects in Space Geodesy* (S. 73–136). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36932-2_3
- Paziewski, J. (2020). Recent advances and perspectives for positioning and applications with smartphone GNSS observations [Publisher: IOP Publishing]. *Measurement Science and Technology*, 31(9), 091001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab8a7d>
- Povero, G. (2019). GNSS Signals Introduction [Vortrag]. https://home.csis.u-tokyo.ac.jp/~dinesh/GNSS_Train_files/201901/LectureNotes/Gabriella/2-Galileo%20Signals.pdf
- Saastamoinen, J. (1973). Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, 107(1), 13–34. <https://doi.org/10.1007/BF02522083>

REFERENZEN

- Teunissen, P. J., & Montenbruck, O. (Hrsg.). (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>
- Zangenehjad, 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>
- Zhou, H., Li, Z., Liu, C., Xu, J., Li, S., & Zhou, K. (2020). Assessment of the performance of carrier-phase and Doppler smoothing code for low-cost GNSS receiver positioning. *Results in Physics*, 19, 103574. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103574>
- Zhou, Z., & Li, B. (2017). Optimal Doppler-aided smoothing strategy for GNSS navigation. *GPS Solutions*, 21. <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0512-y>
- Zumberge, J., Heflin, M., Jefferson, D., Watkins, M., & Webb, F. (1997). Precise Point Positioning for the Efficient And Robust Analysis of GPS Data from Large Networks. *Journal of Geophysical Research*, 102. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>