Echtzeitpositionierung und Post-Prozessierung mit GEPOS für kinematische Anwendungen

Real-time Positioning and Post-processing for Kinematic Applications using GEPOS

David Becker | Jürgen Graf

Zusammenfassung

Mit GEPOS des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SAPOS) steht erstmals ein amtlicher deutscher PPP-RTK-Dienst (Precise-Point-Positioning/Real-Time-Kinematics) zur Verfügung, der GNSS-Korrekturdaten in der sogenannten State-Space-Representation (SSR) im SSRZ-Format bundesweit bereitstellt. Der vorliegende Beitrag untersucht GEPOS für kinematische Anwendungen und vergleicht eine echtzeitäquivalente Auswertung mit Methoden der Post-Prozessierung. Betrachtet werden die zeitliche Interpolation der GEPOS-Korrekturen aus dem vollständigen SSRZ-Datenstrom sowie die Schätzung und Fixierung von Ambiguitäten auf Basis vollständiger Beobachtungsbögen. Validiert wird anhand eines statischen SAPOS-Datensatzes und einer 17,4 km langen Messfahrt. Die statische Auswertung zeigt eine Übereinstimmung im Millimeter- bis Zentimeterbereich. Bei der Messfahrt verbessert die Post-Prozessierung die Fixierungsverfügbarkeit deutlich gegenüber einer echtzeitäquivalenten Auswertung, bei etwa gleichbleibender Fixierungs-Fehlerrate.

Schlüsselwörter: GEPOS, PPP-RTK, SSRZ, Post-Prozessierung, Ambiguitätenfixierung, kinematische GNSS-Positionierung

Summary

GEPOS, provided by the Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SAPOS), is Germany's first public PPP-RTK service (Precise-Point-Positioning/Real-Time-Kinematics), providing nationwide State Space Representation (SSR) GNSS corrections in SSRZ format. This paper investigates GEPOS for kinematic applications and compares real-time-equivalent processing with post-processed strategies. The focus is on temporal interpolation of GEPOS corrections using the complete SSRZ data stream and on ambiguity estimation and fixing over complete observation arcs. Validation is based on a static SAPOS data set and a 17.4 km test drive. The static evaluation shows millimetre-to-centimetre agreement. For the test drive, post-processing improves ambiguity-fixing availability significantly compared to a real-time equivalent evaluation, while maintaining a similar ambiguity fixing error rate.

Keywords: *GEPOS, PPP-RTK, SSRZ, post-processing, ambiguity fixing, kinematic GNSS positioning*

1 Einführung und Stand der Technik

Hochgenaue GNSS-Positionierung (Global Navigation Satellite Systems) ist eine Schlüsselkomponente geodätischer Messverfahren und zunehmend auch mobiler, robotischer Anwendungen. Klassische zentimetergenaue Verfahren wie Real-Time-Kinematics (RTK) und Post-Processing-Kinematics (PPK) beziehen Rover-Beobachtungen auf eine Referenzstation oder ein Referenzstationsnetz und reduzieren wesentliche GNSS-Fehleranteile durch Differenzenbildung bzw. durch modellbasierte Korrekturen *im Beobachtungsraum* (Observation Space Representation, OSR). Ineffizienz entsteht in der Praxis durch das Erfordernis einer individuellen, nutzerbezogenen Datenverbindung.

Die erreichbare Präzision beruht wesentlich auf der Nutzung der Trägerphasen. Deren Mehrdeutigkeiten werden zunächst als Float-Parameter geschätzt und können anschließend, sofern Datenqualität und stochastische Absicherung dies zulassen, ganzzahlig fixiert werden. Verfahren wie LAMBDA bilden hierfür den methodischen Standard (Teunissen 1995). Gerade bei kinematischen Anwendungen unter Abschattung und Mehrwegeeinfluss ist das Verhältnis von Float- und Fixed-Anteilen deshalb ein zentraler Qualitätsindikator.

PPP-RTK verbindet die Grundideen von PPP mit schneller Konvergenz und Ambiguitätenfixierung (AF) regional verdichteter Netze. Anstelle nutzerbezogener Beobachtungskorrekturen werden die relevanten Fehlergrößen *im Zustandsraum* getrennt modelliert und als State Space Representation (SSR) übertragen, insbesondere Satellitenorbits und -uhren, Signal- und Hardware-Biase sowie ionosphärische und troposphärische Korrekturen (Wübbena et al. 2005, Riecken und Becker 2020). Mit SAPOS GEPOS steht seit 2025 ein amtlicher deutscher PPP-RTK-Dienst in der Optimierungsphase zur Verfügung (BKG 2026, Vennebusch et al. 2023). Die Korrekturen werden bundesweit als SSRZ-Datenstrom via NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) übertragen, und zusätzlich über einen Datenkanal des Digitalradios (DAB+) bereitgestellt (Vennebusch et al. 2024, BKG 2026). Erste Untersuchungen zeigen Genauigkeiten im Bereich der Spezifikation des Hochgenauen Echtzeit-Positionierungsdienstes (SAPOS HEPS), siehe Vennebusch et al. 2024.

Für kinematische Anwendungen wie z. B. autonome mobile Robotik ist vor allem die bundesweit einheitliche und potenziell autarke GNSS-Korrekturdatenversorgung

 © DVW e.V. DOI 10.12902/zfv-0572-2026

relevant. GNSS-Beobachtungen und GEPOS-Korrekturen können lokal aufgezeichnet und unmittelbar nach Abschluss einer Messfahrt oder Befliegung ohne nachträgliche Beschaffung landesspezifischer Referenzdaten ausgewertet werden. Der vorliegende Beitrag untersucht daher GEPOS anhand statischer und kinematischer Realdaten. Im Fokus stehen zwei Vorteile einer Post-Prozessierung gegenüber einer echtzeitäquivalenten Auswertung: die Nutzung des vollständigen SSRZ-Datenstroms bei der Berechnung der Beobachtungskorrekturen sowie die Schätzung und Fixierung von Ambiguitäten auf Basis des gesamten Beobachtungsbogens (Becker und von Hinüber 2023).

2 GEPOS in der Post-Prozessierung

2.1 Datenquellen und Korrekturmodell

Für die Testauswertungen wurde der SSRZ-Korrekturdatenstrom der Bundesinstanz von SAPOS GEPOS (Mountpoint »BKG-SSRZ-BRST-DE«) am 26. Februar 2026 über NTRIP mit dem BKG Ntrip Client (BNC) aufgezeichnet (Weber et al. 2016). Die Aufzeichnung erfolgte auf einem internetfähigen PC und nicht durch das kinematische Messsystem selbst. Das vollständige Tagesfile wurde anschließend für echtzeit*äquivalente* und post-prozessierte Auswertungen verwendet. Es wurden Broadcast-Ephemeriden verwendet, die bei der Nutzung von GEPOS zwingend erforderlich sind.

Das Tagesfile umfasste nur etwa 18 MB und verdeutlicht damit die hohe Effizienz des SSRZ-Datenstroms. Da die Bundesinstanz neben NTRIP auch über DAB+ verbreitet wird, entspricht der aufgezeichnete Inhalt grundsätzlich dem auch broadcastfähig nutzbaren Korrekturdatenstrom (Vennebusch et al. 2024, BKG 2026). GEPOS unterstützt nach Produktinformation GPS, GLONASS, Galileo und BeiDou; das SSRZ-Format ist darüber hinaus system-, frequenz- und signalübergreifend ausgelegt (Geo++ GmbH 2025, 2026). Die Rover-Beobachtungen und Referenzsysteme werden in späteren Abschnitten beschrieben.

Die Interpretation der SSRZ-Nachrichten und die Berechnung der nutzerbezogenen Korrekturgrößen erfolgten in einer an der Hochschule Trier entwickelten Software. Die native SSRZ-Verarbeitung ist aufwendig, da binäre Inhalte auf Bit-Ebene dekodiert, Metadaten den jeweiligen Satelliten-, Signal- und Gitterkorrekturen zugeordnet und zeitlich unterschiedlich aktualisierte Zustandsparameter konsistent zusammengesetzt werden müssen. Gerade diese direkte Auswertung erlaubt jedoch eine kontrollierte Gegenüberstellung echtzeitäquivalenter und post-prozessierter Korrekturberechnung.

2.2 Echtzeitäquivalente und post-prozessierte GEPOS-Korrekturen

Die nutzerseitige SSR-Berechnung bildet aus Orbit-, Uhren-, Bias- sowie ionosphärischen und troposphärischen Parametern die konkrete Korrektur für eine Code- oder Phasenbeobachtung eines Satelliten und Signals. Da diese Komponenten im SSRZ-Datenstrom mit unterschiedlichen Aktualisierungsraten und Metadatenstrukturen übertragen werden, existiert für eine Beobachtungsepoche t im Echtzeitfall nur die Information, die bis dahin empfangen wurde. Die echtzeitäquivalente Auswertung in der vorliegenden Arbeit bildet dies nach, indem sie nur die bis zum letzten relevanten Aktualisierungszeitpunkt t_{prev} bekannten Zustände verwendet (Wübbena et al. 2020). In GEPOS mitübertragene Driften einzelner Korrekturparameter, insbesondere Satellitenuhren, werden auf t fortgeschrieben; spätere Nachrichten aus dem Datenstrom bleiben unberücksichtigt.

Bei einer Post-Prozessierung liegt dagegen der vollständige Datenstrom vor. Eine getrennte Interpolation einzelner SSR-Komponenten wäre zwar naheliegend, kann jedoch wegen möglicher Kompensationseffekte zwischen Korrekturanteilen inkonsistente Übergänge erzeugen. Deshalb wird hier für jede Kombination aus Satellit, Signal und Beobachtungsgröße zunächst die vollständige Summe aller Korrekturbeiträge $\Delta\rho$ zum vorherigen Aktualisierungszeitpunkt t_{prev} und zum nächsten Aktualisierungszeitpunkt t_{next} berechnet. Diese Gesamtkorrekturen werden anschließend auf die Beobachtungsepoche t interpoliert. Dadurch bleibt die innere Konsistenz der beitragenden SSR-Parameter erhalten, während zugleich Information aus der Zukunft des Datenstroms genutzt wird. Wenn sich zwischen t_{prev} und t_{next} die Bezugs-Ephemeride (IODE) ändert, ist die Interpolation unzulässig und wird dann nicht verwendet.

$$\Delta\rho(t) = \Delta\rho\left(t_{\mathrm{prev}}\right) + \frac{t - t_{\mathrm{prev}}}{t_{\mathrm{next}} - t_{\mathrm{prev}}} \cdot \left(\Delta\rho\left(t_{\mathrm{next}}\right) - \Delta\rho\left(t_{\mathrm{prev}}\right)\right) \quad (1)$$

2.3 Echtzeitäquivalente und post-prozessierte Parameterschätzung

Nach der SSR-Korrekturberechnung erfolgt die nutzerseitige Parameterschätzung auf Basis von *Between-Satellite-Differences*: Für jedes GNSS wird der höchststehende Satellit als sogenannter »Pivot-Satellit« gewählt: Korrigierte Code- und Phasenbeobachtungen aller übrigen Satelliten eines GNSS werden gegen diesen Satelliten differenziert. Damit fallen, wie auch in RTK-/PPK-Ansätzen, empfängerabhängige Anteile wie Empfängeruhr und -biase aus den Beobachtungsgleichungen heraus (Odijk et al. 2011).

Der Vorteil der Post-Prozessierung liegt hier im größeren Informationszeitraum: In Echtzeit müssen Ambiguitäten nach Signalabrissen mit hoher Unsicherheit neu

© DVW e.V.

initialisiert werden. In der Post-Prozessierung kann jeder kontinuierliche Beobachtungsbogen eines Satelliten als Ganzes ausgewertet werden, sodass eine konsistente Float-Ambiguität als Grundlage der ganzzahligen Fixierung, etwa mit der LAMBDA-Methode (Teunissen 1995), entsteht. Auch weitere Parameter, wie die satellitenweise, residuale ionosphärische Verzögerung können basierend auf der Gesamtheit des Datensatzes geschätzt werden. Zusätzlich können Fixierungsinformationen aus Vorwärts-, Rückwärts- oder Mehrpass-Auswertungen in späteren Durchläufen wiederverwendet werden, vgl. Becker und von Hinüber (2023).

2.4 Qualitätsindikatoren

Die Qualitätsbewertung erfolgt auf zwei Ebenen. Ein statischer Datensatz einer SAPOS-Station dient zunächst der Plausibilisierung der Software, wird jedoch wie ein kinematischer Rover mit entsprechendem Prozessrauschen modelliert. Bewertet werden Mittelwertabweichung und die empirische 1-σ Standardabweichung der erhaltenen Koordinaten. Für den absoluten Vergleich müssen Marker-ARP-Offset, der epochenabhängige Übergang zwischen globalem ITRF/IGS20 und nationalem DREF-/ETRS-Bezug sowie die Tide-Konventionen konsistent berücksichtigt werden (Altamimi et al. 2023, Altamimi und Collilieux 2024, Petit und Luzum 2010, Mäkinen 2021).

Als kinematischer Datensatz dient eine Messfahrt mit einem PKW. Hier werden die geschätzten Positionen der GEPOS-Trajektorie p_{GEPOS} mit denen einer Referenztrajektorie p_{ref} verglichen. Neben den Koordinatendifferenzen werden auch normierte Abweichungen $\bar{e}$ betrachtet, deren Gesamtvarianz aus den beitragenden Varianzen beider Trajektorien, $\hat{\sigma}^2_{\mathrm{GEPOS}}$ und $\hat{\sigma}^2_{\mathrm{ref}}$, abgeleitet wird. Dadurch lassen sich Code-/Float-Abschnitte und Phasen mit fixierten Ambiguitäten einheitlich bewerten.

$$\bar{e} = \frac{\left| p_{\mathrm{GEPOS}} - p_{\mathrm{ref}} \right|}{\sqrt{\hat{\sigma}^2_{\mathrm{GEPOS}} + \hat{\sigma}^2_{\mathrm{ref}}}} \tag{2}$$

Zusätzlich werden Fixierungsraten und (vermutete) Falschfixierungen gemeinsam betrachtet, da die Wahl der Fixierungsparameter stets einen Kompromiss zwischen hoher Fixierungsrate und höherer Falschfixierungswahrscheinlichkeit darstellt. Eine fehlerhafte AF besteht normalerweise über mehrere Epochen fort, da sie oft nicht sofort als fehlerhaft durch Ausreißertests oder andere, fortlaufende Validierungen erkannt werden kann. Daher wird das obige Kriterium für jedes Fixierungs*ereignis* ausgewertet – also für jede Neufixierung mindestens eines zusätzlichen Satelliten durch die LAMBDA-Methode. Ein Fixierungsereignis wird in der vorliegenden Arbeit als »möglicherweise fehlerhaft« definiert, wenn mindestens fünf Satelliten fixiert sind und der normierte Positionsfehler $\bar{e}$ in einer oder mehreren Komponenten (Nord/Ost/Höhe) mindestens 5,0 beträgt. Dieser Schwellwert dient hier als Kompromiss: Höhere Werte führen zu vermehrten falsch-negativen Erkennungen (»nicht fehlerhaft«, obwohl tatsächlich fehlerhaft), kleinere Werte (z. B. 3,0) führen vermehrt zu falsch-positiven Erkennungen (»fehlerhaft«, obwohl tatsächlich korrekt), bei denen kurzzeitig beeinträchtigte Phasenbeobachtungen (z. B. durch Mehrwegeffekte) zu Fehlern im Bereich weniger Zentimeter führten, obwohl, ausweislich der vorherigen und nachfolgenden Epochen, die AF durchaus korrekt war. Diese Heuristik ist freilich kein scharfes Kriterium: Es kann dennoch falsch positive und falsch negative Erkennungen geben.

2.5 Methodik

Die Auswertungen fanden mit einer an der Hochschule Trier entwickelten Software statt. Basis ist ein Error-State Extended Kalman Filter (EKF; vgl. Teunissen und Montenbruck 2017), der Between-Satellite-Einfachdifferenzen von GEPOS-korrigierten Code- und Phasenbeobachtungen verarbeitet. Bei einem Wechsel des Pivot-Satelliten wird die Zustandsschätzung im EKF entsprechend transformiert, sodass die Information vollständig erhalten bleibt. Der EKF verwendet die folgenden Zustände (Dimension in Klammern):

- Positionsfehler (drei Dimensionen: Nord/Ost/Unten, Random Walk mit Prozessrauschen 30 m/$\sqrt{\mathrm{s}}$);
- Float-Ambiguität der Einfachdifferenzen, je Frequenz ($2 \cdot N_{\mathrm{sat}}$ Dimensionen, Random Constant mit Anfangsunsicherheit 100 m);
- residuale Ionosphärenverzögerung der Einfachdifferenzen (N_{sat} Dimensionen, Anfangsunsicherheit 0,5 TECU, Prozessrauschen 0,12 TECU/$\sqrt{\mathrm{h}}$).

Die Einheit TECU (Total Electron Content Unit) bezeichnet die ionosphärische Ladungsdichte: 1 TECU entspricht einer integrierten Elektronensäulendichte von 10^{16} Elektronen pro Quadratmeter. Es wurde keine Schätzung der residualen Troposphäre vorgenommen. Float-Ambiguitäten werden aus Effizienzgründen nach Bedarf ab- oder hinzugeschaltet sowie nach erkannten Cycle-Slips oder Signalabrissen neu initialisiert. Für die echtzeitäquivalente Auswertung läuft der EKF nur einmal in Vorwärtsrichtung. Für die Post-Prozessierung wurden zwei Durchgänge (vorwärts und rückwärts) berechnet, wobei die Schätzung am Ende des ersten Durchgangs als Startschätzung für den zweiten Durchlauf dient. Hilfreich ist dies für die hier untersuchte Auswertung insbesondere für die bessere Konvergenz der residualen Ionosphäre, aber auch für das Akkumulieren der diskreten Fixierungsinformation (Becker und von Hinüber 2023). Die Schätzwerte sämtlicher Parameter des zweiten EKF-Durchlaufs werden im Anschluss noch unter Verwendung eines Rauch-Tung-Striebel-Glätters (RTS; Rauch et al. 1965) prozessiert. Dies ist ein entscheidender Schritt der Post-Prozessierung, da erst hierdurch die Parameterschätzwerte jeder Epoche auf Basis

© DVW e.V.

aller Informationen des Datensatzes erfolgen. Hierdurch können insbesondere nicht-fixierte Ambiguitäten als konstant während eines Bogens berücksichtigt werden; zudem kann die Fixierungsinformation (soweit vorhanden) ebenfalls im gesamten Bogen berücksichtigt werden, indem sie als ganzzahlige Pseudobeobachtung mit einer Unsicherheit von 0,001 Zyklen in die Positionslösung eingeht. Für die AF kam die LAMBDA-Methode (Teunissen 1995) zum Einsatz, wobei die Methode iterativ bis zu zwei Satelliten aus der Menge der zu fixierenden Satelliten entfernen konnte. Die Summe aus bereits fixierten und in einem Fixierungsschritt neu hinzugekommenen Satelliten muss dabei, ggf. nach der möglichen Herausnahme von bis zu zwei Satelliten, mindestens fünf betragen. Diese Forderung ermöglicht eine Validierung nur auf fixierten Satelliten mit einer Redundanz von mindestens zwei. Bei der AF mit der LAMBDA-Methode wurde das μ-Kriterium nach Teunissen und Verhagen (2009) verwendet. In der darauffolgenden Validierung wird eine Passung aller fixierten Satelliten von < 25 mm (RMS über alle Verbesserungen) sowie eine normierte Passung von < 1,5 (RMS) gefordert. Die Messunsicherheit der einfach differenzierten Codebeobachtungen (im Zenit) wird mit 0,6 m (GPS und Galileo) und 1,0 m (GLONASS) modelliert; die der einfach differenzierten Phasenbeobachtungen (im Zenit) mit 4 mm (GPS), 3 mm (Galileo) und 8 mm (GLONASS). Diese Werte wurden empirisch auf den Testdaten ermittelt. Basierend auf dem Elevationswinkel E wurden die Zenit-Varianzen mit der Mapping-Funktion $1/\sin^2(E)$ skaliert, gleichermaßen für Code- und Phasenbeobachtungen. Es wurden nur Beobachtungen mit $E > 15°$ berücksichtigt; die AF erfolgte nur für Satelliten mit $E \geq 20°$.

3 Validierung mit statischen Daten

3.1 Datensatz (statisch)

Ausgewertet wurden statische Daten der SAPOS-Station 0450 (Darmstadt), betrieben durch das Hessische Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation (HLBG), im Zeitraum 12:30–14:30 (GPS-Zeit) am 26.2.2026, mit einer Datenrate von 1 Hz. Ausgewertet wurde jeweils auf zwei Frequenzen. Es werden im Folgenden Bezeichnungen nach RINEX-Konvention Version 3.05 verwendet (Romero 2020): GPS (C1C/L1C und C2W/L2W), Galileo (C1C/L1C und C5Q/L5Q) und GLONASS (C1C/L1C und C2P/L2P). Aufgrund der zusätzlichen Unsicherheiten des nur bei GLONASS verwendeten Verfahrens »Frequency Division Multiple Access« (FDMA) wurde auf die AF bei GLONASS vollständig verzichtet; Phasenbeobachtungen gehen hier nur mit Float-Ambiguitäten ein. Verwendet wurde ein Prozessrauschen für die Positionsschätzung von 30 m/√s, sodass die statische Eigenschaft der Testdaten effektiv nicht bei der Filterung ausgenutzt wurde. Phasenzentrum-Offsets (PCO) und -Variationen (PCV) wurden angebracht unter Verwendung der für diese Station von SAPOS Hessen veröffentlichten ANTEX-Datei (Empfänger: Leica GR50, Antenne: Leica AR20).

3.2 Ergebnisse (statisch)

Ab der ersten AF der echtzeitäquivalenten Lösung in Epoche Nummer 4 (von 7200) gab es in sämtlichen Epochen mindestens sechs fixierte Ambiguitäten, im Mittel waren es 10,8. In der Post-Prozessierung konnten *jederzeit* sechs oder mehr Ambiguitäten fixiert werden. Im Folgenden werden Diagramme und Statistiken immer für drei Auswertevarianten angegeben:

(1) Echtzeitäquivalente Auswertung;
(2) Post-Prozessierung mit zwei Iterationen (vorwärts-rückwärts) und RTS-Glättung (vgl. 2.5);
(3) wie (2), aber zusätzlich unter Verwendung *interpolierter* GEPOS-Korrekturen, vgl. 2.2.

Die mit GEPOS erhaltene Absolutposition wird mit der nominellen Stationsposition aus dem aktuellen Sitelog verglichen, das von SAPOS Hessen veröffentlicht wird. Dabei wurden berücksichtigt: (a) der Marker-ARP-Offset, (b) der epochenabhängige Übergang zwischen DREF91 in der Realisierung 2025 und ITRF2020/IGS20 (Altamimi et al. 2023, Altamimi und Collilieux 2024) sowie (c) die Umrechnung zwischen conventional tide-free (GEPOS) und mean-tide (SAPOS-Bezug) gemäß den Konventionen des International Earth Rotation Service (IERS) und permanenter Tide-Systematik (Petit und Luzum 2010, Mäkinen 2021). Hintergrund bei diesem Punkt (c) ist die Definition, wie und ob zeitlich konstante Anteile der Erdgezeiten berücksichtigt werden; sie können in Nord- und Vertikalkomponente einige Zentimeter ausmachen. Aus der GEPOS-Prozessierung wurde die Medianposition aller 7200 Positionslösungen gewählt, um eine Verfälschung durch Ausreißer zu vermeiden. Die Differenz »GEPOS-minus-Soll« betrug hiermit: Nord: –3,6 mm, Ost: –8,1 mm, Höhe: +8,4 mm. Die Größenordnung liegt damit im erwartbaren Bereich, zumal auch Stationsbewegungen in dieser Größenordnung nicht ausgeschlossen werden können (die Station befindet sich auf dem Dach eines 12-geschossigen Gebäudes).

Auch die empirische 1-σ Standardabweichung (Tab. 1) liegt deutlich innerhalb der GEPOS-Spezifikation von 10 bis 20 mm in der Lage und 30 mm in der Höhe. Es soll hier zunächst (1) (echtzeitäquivalent) gegen (2) und (3) (Post-Prozessierung) verglichen werden. Der relevante Unterschied ist hier, dass sowohl Phasenambiguitäten als auch residuale Ionosphärenverzögerungen in der Echtzeitlösung zunächst ausreichend konvergieren müssen, während die Post-Prozessierung beides auf der Gesamtheit der Messungen schätzen kann. In der vorliegenden Auswertung zeigte sich lediglich in der Vertikalkomponente eine erkennbare Verbesserung durch Post-Prozessierung; in der Lage sind die Unterschiede gering. Zur besseren Ein-

© DVW e.V.

Tab. 1: Empirische 1-σ Standardabweichung der GEPOS-basierten Positionsschätzungen

Ansatz	Nord (mm)	Ost (mm)	Höhe (mm)
(1)	5,2	5,6	18,2
(2)	5,4	5,0	12,3
(3)	5,3	4,4	11,8

Tab. 2: Empirische 1-σ Standardabweichung der GEPOS-basierten Positionsschätzungen nach Hochpass-Filterung

Ansatz	Nord (mm)	Ost (mm)	Höhe (mm)
(1)	4,0	3,7	8,5
(2)	3,7	3,6	8,1
(3)	3,1	3,0	7,0

ordnung der erzielten Genauigkeiten ist hier anzumerken, dass die Auswertung an einer SAPOS-Station erfolgte, die bei der Berechnung der GEPOS-Korrekturen selbst Verwendung fand. Daher sind die hier ermittelten Fehler nicht auf das gesamte GEPOS-Gebiet generalisierbar, da zu erwarten ist, dass die atmosphärischen GEPOS-Korrekturen (Troposphäre und Ionosphäre) bei größeren Rover-Abständen zu den verwendeten Referenzstationen mit höheren Unsicherheiten behaftet sind. Vielmehr sind die hier ermittelten Fehler als Untergrenze unter Optimalbedingungen zu verstehen.

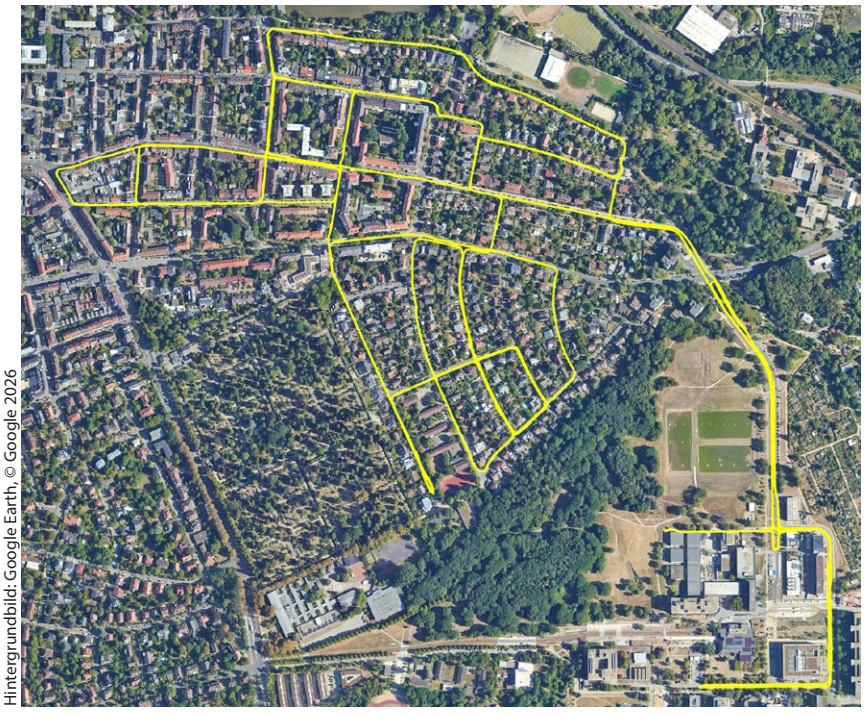
Der Unterschied (2) vs. (3) zeigt, dass das zeitliche Interpolieren der GEPOS-Korrekturen (vgl. Abschnitt 2.2) nur geringe Verbesserungen bringt. Dieses Interpolieren hat ausschließlich in kurzen Betrachtungsintervallen (< 30 s) einen Effekt, sodass die Fehlerstatistiken zusätzlich für eine hochpassgefilterte Positionslösung berechnet wurden, siehe Tab. 2. Verwendet wurde ein Butterworth-Filter dritter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 1/180 Hz (Butterworth 1930). Somit wurden kurzwellige Variationen über drei Minuten oder weniger extrahiert.

4 Kinematische Validierung mit einer Messfahrt

4.1 Datensatz (kinematisch)

Eine Testfahrt von 17,4 km über 81 Minuten (davon 54 Minuten in Bewegung) wurde am Campus Lichtwiese der TU Darmstadt und einem angrenzenden Wohngebiet durchgeführt, siehe Abb. 1. Im nordwestlichen Bereich der Trajektorie ist die Wohnbebauung etwas dichter (bis zu 5-stöckige Gebäude unmittelbar an den Straßen), in den übrigen Teilen offener mit moderaten Abschattungen. Die Fahrt fand am 26.2.2026 statt, sodass Laubbäume nur geringe Abschattungen verursachten. Als Rover-Empfänger für die GEPOS-Auswertung kam ein NovAtel OEM728 zum Einsatz (1 Hz; GPS, GLONASS, Galileo), betrieben mit einer Trimble AG25-Antenne. Als Referenzsystem diente eine Navigation-grade-IMU vom Typ iMAR RQH-1003 in Verbindung mit einem GNSS-Empfänger vom Typ Javad Sigma, verbunden (über einen Splitter) mit derselben AG25-Antenne. Die Referenztrajektorie wurde mit Hilfe von NovAtel Waypoint Inertial Explorer Version 8.90 (IE) im Modus »loosely coupled« post-prozessiert, unter Verwendung der SAPOS-Station 0450 (Darmstadt), ausgegeben am Antennenreferenzpunkt der verwendeten AG25-Antenne. Die von IE ausgegebene a-posteriori 1-σ Standardabweichung der Referenztrajektorie lag jederzeit < 26 mm in der Lage und < 22 mm in der Höhe, weitere Details finden sich in Tab. 3. Die Referenz ist demnach nicht völlig unabhängig, da GNSS-Signale derselben Antenne verwendet wurden. Diese Einschränkung kann zu einer leicht zu optimistischen Beurteilung beim Direktvergleich der beiden Trajektorien führen, da Fehler in beiden Trajektorien korreliert sein können. Die Verwendung der hochgenauen IMU reduziert diese Korrelation allerdings quantitativ.

Die Basislinie zur SAPOS-Station 0450 (Darmstadt) betrug zwischen 0,7 km (im Westen der Trajektorie) und 2,4 km (im Südosten). Die verwendeten GNSS-Signale waren identisch zu denen in Abschnitt 3.1.



Hintergrundbild: Google Earth, © Google 2026

Abb. 1: Trajektorie der Messfahrt

© DVW e.V.

4.2 Ergebnisse (kinematisch)

Verglichen werden wieder die in Abschnitt 3.2 eingeführten Auswertevarianten (1) bis (3). Kurz nach Beginn der Fahrt gab es eine Standphase mit Abschattungen durch Gebäude und Bäume, sodass hier in der echtzeitäquivalenten Lösung noch keine AF gelang (s. Abb. 2, um den Zeitpunkt 13:00–13:05 Uhr). In der Post-Prozessierung konnte hier eine AF erfolgen. Für beide Auswertevarianten ergaben sich erwartungsgemäß einzelne Abweichungen im Bereich von Dezimetern oder Metern, da in sehr kurzen Abschnitten zwischen zwei (fast) vollständigen GNSS-Abschattungen

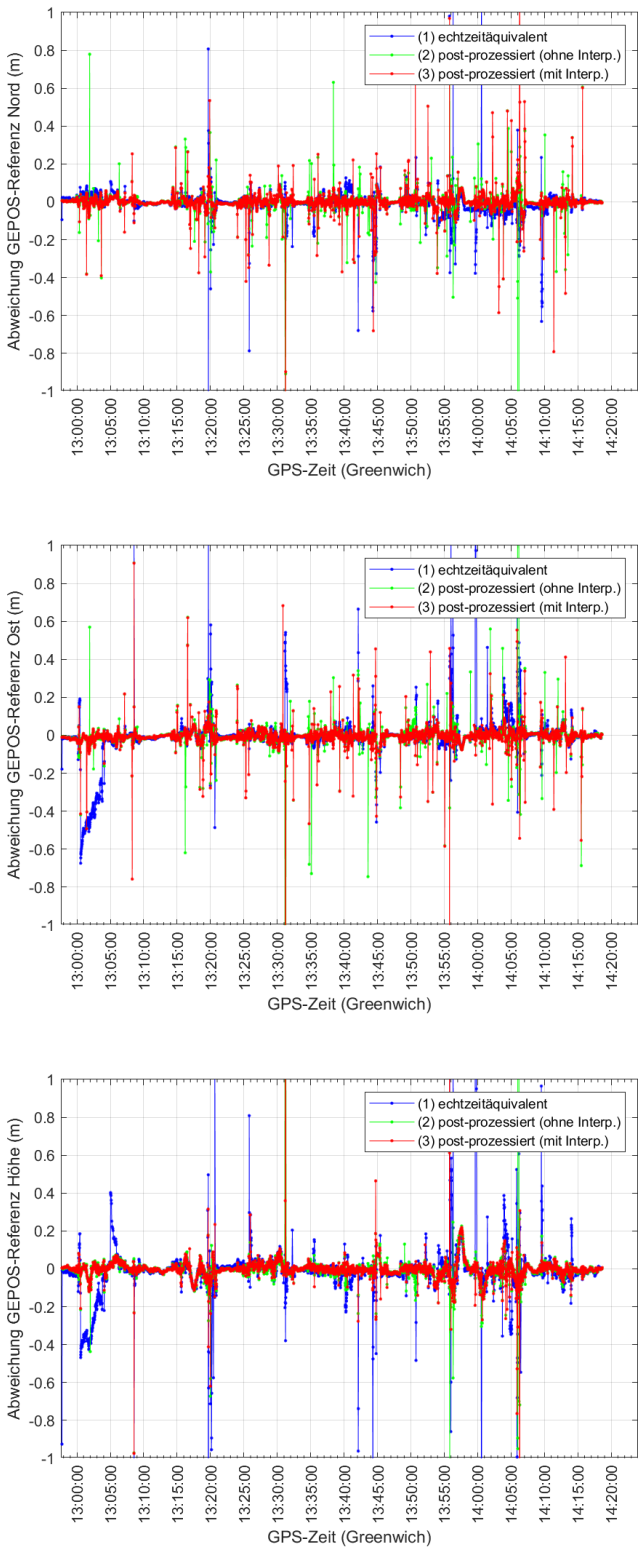


Abb. 2: Abweichungen in Nord/Ost/Höhe

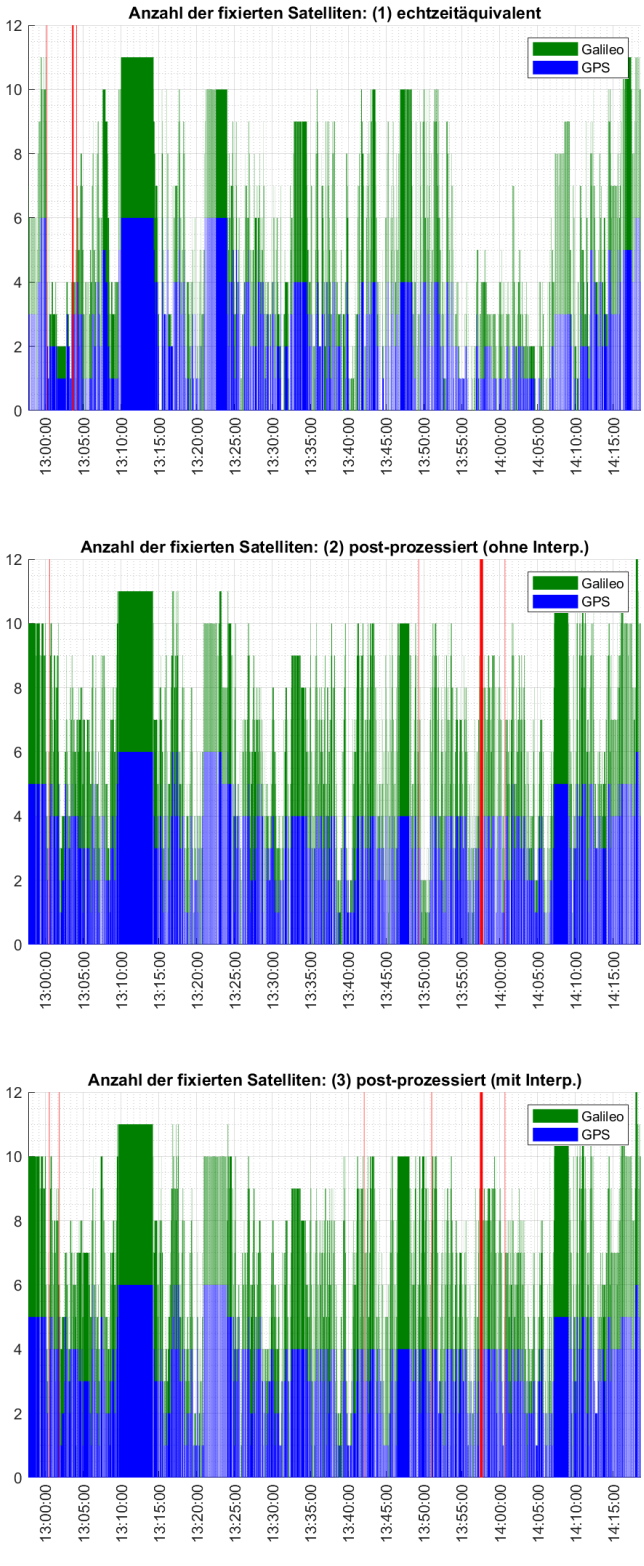


Abb. 3: Anzahl der Satelliten mit fixierter Ambiguität. Rot: vermutete Falschfixierungen (s. Text)

© DVW e.V.

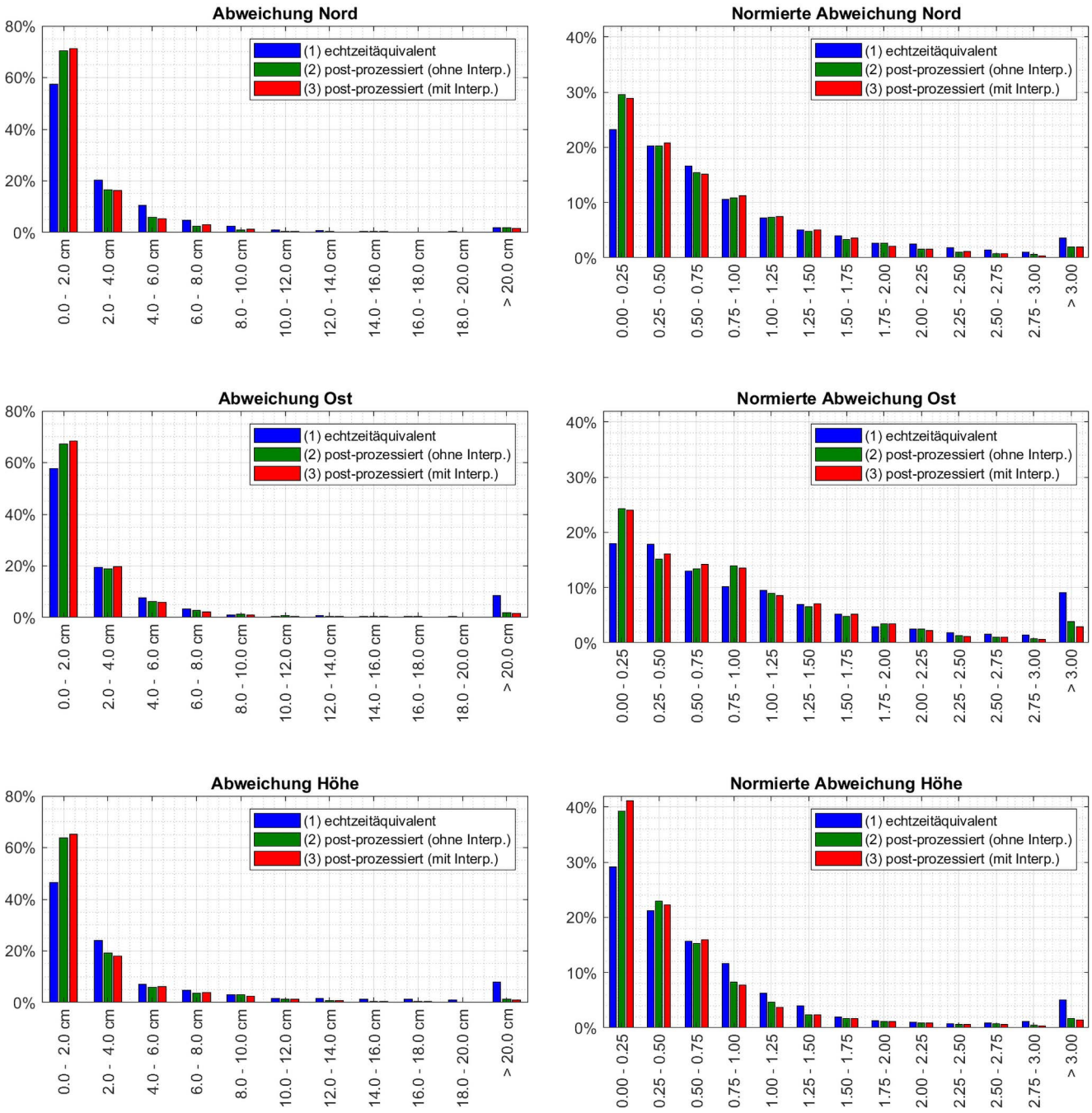


Abb. 4: Histogramme der Abweichungen zwischen GEPOS-Lösungen und Referenz, in Nord/Ost/Höhe. Links: betragsmäßige, metrische Abweichungen; rechts: normierte Abweichungen (vgl. Abschnitt 2.4)

die Genauigkeit im Wesentlichen auf die einer GEPOS-korrigierten Codebeobachtung zurückfällt. Diese kurzen Peaks in Abb. 2 deuten also nicht notwendigerweise auf Softwarefehler oder eine fehlerhafte AF hin. Abb. 3 zeigt die Zahl der fixierten Satelliten. Abb. 4 stellt sowohl die absoluten Abweichungen als auch die normierten Abweichungen in Histogrammen dar. Tab. 3 zeigt Statistiken zu den geschätzten Positionsunsicherheiten.

Die Erfolgsrate bei der AF kann als sehr gut angesehen werden: Bei ≤ 1,0 % der Fixierungsereignisse traf das Kriterium »möglicherweise fehlerhaft« wie in Abschnitt 2.4 definiert zu (siehe Tab. 4 sowie rote Markierungen in Abb. 3). Der Anteil der Epochen mit einem bzw. fünf fixierten Satelliten war in der Post-Prozessierung deutlich höher. Dies betrifft vor allem Bögen von kurzer Beobachtungsdauer, also in Bereichen mit Abschattungen und Mehrwegeffekten, was sich im sehr deutlichen Unterschied bei der Zahl der Fixierungsereignisse niederschlägt. In Auswertevariante (3) gab es verglichen mit (2) zusätzliche AF, aber auch etwas mehr als »möglicherweise fehlerhaft« eingestufte Fixierungsereignisse. Allerdings ist die Grundgesamtheit hier für eine allgemeingültige Aussage zu gering, der Unterschied (4 gegenüber 6) ist hierdurch nicht signifikant.

© DVW e.V.

Tab. 3: Geschätzte Unsicherheiten (1-σ) von Referenztrajektorie und GEPOS-prozessierten Trajektorien

jeweils Lage/Höhe in mm	Referenz	(1) GEPOS echtzeitäquivalent	(2) GEPOS post-prozessiert ohne Interp.	(3) GEPOS post-prozessiert mit Interp.
Minimum	2,7 / 3,6	10,4 / 15,7	9,9 / 14,0	9,8 / 14,0
Maximum	25,6 / 21,3	6400 / 6140	4510 / 4450	3300 / 4450
Quantil 50%	5,3 / 5,9	14,8 / 23,1	11,2 / 17,7	11,1 / 17,6
Quantil 95%	10,0 / 11,8	101,6 / 170,5	25,0 / 37,8	24,0 / 38,3
Quantil 99%	20,5 / 18,2	1600 / 2380	63,4 / 95,9	62,9 / 97,6

Tab. 4: Fixierungen und vermutete Falschfixierungen

	(1) GEPOS echtzeitäquivalent	(2) GEPOS post-prozessiert ohne Interp.	(3) GEPOS post-prozessiert mit Interp.
Epochen mit mindestens vier verwendeten Satelliten	3260	3530	3604
hiervon: Epochen mit mindestens einem fixierten Satelliten	3070 (94,2 %)	3496 (99,0 %)	3579 (99,3 %)
hiervon: Epochen mit mindestens fünf fixierten Satelliten	1748 (53,6 %)	2766 (78,4 %)	2957 (82,0 %)
Fixierungsereignisse gesamt	301	586	588
möglicherweise fehlerhafte Fixierungsereignisse (vgl. 2.4)	3 (1,0 %)	4 (0,7 %)	6 (1,0 %)

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die grundsätzliche Eignung von GEPOS sowohl für statische wie für kinematische Vermessungsaufgaben konnte im Rahmen einer Fallstudie gezeigt werden. Erwartungsgemäß kann eine post-prozessierte Lösung zu höheren Genauigkeiten führen, da eine AF ganzheitlich, basierend auf der Gesamtheit aller Messungen eines Bogens, stattfinden kann. Ein nur geringer Zugewinn bei Genauigkeit und Fixierungsrate ergab sich durch das zeitliche Interpolieren der GEPOS-Korrekturen.

Akkuratheit und Präzision einer statischen Punkteinmessung lagen im spezifizierten Genauigkeitsbereich des GEPOS-Dienstes, mit Abweichungen von < 1 cm in der Lage und im Bereich 12 cm in der Höhe. Bei einer kinematischen Messfahrt unter Realbedingungen im urbanen Umfeld, d. h. mit Abschattungen und Mehrwegeffekten, ergaben sich ebenfalls zufriedenstellende Ergebnisse – über 60 % der post-prozessiert geschätzten Positionen wiesen einen Nord-, Ost- und Höhenfehler von weniger als 2 cm bezogen auf die Referenztrajektorie auf (Abb. 4, links). Auch das Potenzial der kinematischen Echtzeitnutzung konnte anhand der echtzeitäquivalenten Auswertungen der Messfahrt gezeigt werden.

Nach Kenntnisstand der Autoren wird mit dieser Studie erstmals GEPOS im kinematischen Messeinsatz demonstriert und wissenschaftlich dokumentiert. Für allgemeingültige Aussagen zum möglichen Zugewinn durch eine Interpolation der GEPOS-Korrekturen (s. Abschnitt 2.2), aber auch zu Falschfixierungen, müssen weit größere Datenmengen und vielfältigere Anwendungsszenarien untersucht werden. Auch muss geprüft werden, inwieweit die hier gezeigten Ergebnisse qualitativ und quantitativ reproduzierbar sind, wenn der Rover deutlich weiter vom nächsten Gitterpunkt des Netzwerks der von GEPOS verwendeten Referenzstationen entfernt ist: Die Unsicherheit der troposphärischen und ionosphärischen GEPOS-Korrekturparameter fällt dort naturgemäß höher aus. Im GEPOS-SSRZ-Datenstrom ist nach Kenntnisstand der Autoren kein Unsicherheitsmaß enthalten, sodass hier im Nutzeralgorithmus eine entsprechende Modellierung selbst vorzunehmen ist.

© DVW e.V.

Danksagung

Die Messfahrt wurde durch die Bereitstellung von Messfahrzeug und Referenzsensorik der Arbeitsgruppe Physikalische Geodäsie und Satellitengeodäsie der Technischen Universität Darmstadt unterstützt.

Literatur

Altamimi, Z., Rebischung, P., Collilieux, X., Métivier, L., Chanard, K. (2023): ITRF2020: an augmented reference frame refining the modeling of nonlinear station motions. In: Journal of Geodesy, 97, 47. DOI: 10.1007/s00190-023-01738-w.

Altamimi, Z., Collilieux, X. (2024): EUREF Technical Note 1: Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems. EUREF Technical Note 1, Release 04.03.2024.

Becker, D., von Hinüber, E. (2023): Multi-pass phase-differential GNSS ambiguity fixing for post-processing applications. In: Proceedings of the 2023 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS), Braunschweig, Germany, 24-25 October 2023. DOI: 10.1109/ISS58390.2023.10361918.

BKG (2026): GEPOS – Der bundeseigene Satellitenpositionierungsdienst. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. https://bkg.bund.de/gepos, letzter Zugriff 07/2026.

Butterworth, S. (1930): On the Theory of Filter Amplifiers. In: Experimental Wireless & the Wireless Engineer, 7, 536–541.

Geo++ GmbH (2025): Geo++ State Space Representation Format (SSRZ). Document Version 1.1.3, 15.04.2025. https://www.geopp.de/wp-content/uploads/2025/04/gpp_ssrz_v1_1_3_release_20250415.pdf, letzter Zugriff 07/2026.

Geo++ GmbH (2026): SSRZ Format. https://www.geopp.de/ssrz/, letzter Zugriff 07/2026.

Mäkinen, J. (2021): The permanent tide and the International Height Reference Frame IHRF. In: Journal of Geodesy, 95, 106. DOI: 10.1007/s00190-021-01541-5.

Odijk, D., Teunissen, P. J. G., Zhang, B. (2011): PPP-RTK platform performance based on single-frequency GPS data. In: Proceedings of ACRS 2011. https://gnss.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/21/2016/04/Odijk2011PPP-RTK.pdf, letzter Zugriff 07/2026.

Petit, G., Luzum, B. (Hrsg.) (2010): IERS Conventions (2010). IERS Technical Note No. 36. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main. https://iers-conventions.obspm.fr/conventions_material.php, letzter Zugriff 07/2026.

Rauch, H. E., Tung, F., Striebel, C. T. (1965): Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems. In: AIAA Journal, 3(8), 1445–1450. DOI: 10.2514/3.3166.

Riecken, J., Becker, P. (2020): Ein neuer Satellitenpositionierungsdienst für Deutschland. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 4/2020, 145. Jg., 241–245. DOI: 10.12902/zfv-0304-2020.

Romero, I. (2020). RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 3.05. International GNSS Service (IGS) & RTCM Special Committee 104 Working Group on RINEX. https://igs.org/formats-and-standards/.

Teunissen, P. J. G. (1995): The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation. In: Journal of Geodesy, 70, 65–82. DOI: 10.1007/BF00863419.

Teunissen, P. J., Verhagen, S. (2009). The GNSS ambiguity ratio-test revisited: a better way of using it. Survey review, 41(312), 138–151.

Teunissen, P., Montenbruck, O. (Hrsg.) (2017): Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Cham.

Vennebusch, M., Albert, L., Freitag, M., Gerschwitz, A., Goetze, T., Goldan, H.-J., von Gösseln, I., Hartmann, F., Jahn, C.-H., Meißies, M., Reiling, R., Riecken, J., Riedel, F., Rülke, A., Schneider, V., Siebert, J., Stockhaus, T., Winter, V. (2023): Ein neuer amtlicher PPP-RTK-Positionierungsdienst für Deutschland. In: DVW e. V. (Hrsg.): GNSS 2023 – Zeit für ein Update?! DVW-Schriftenreihe, Band 106, Augsburg, 83–94. https://geodaesie.info/dvw-schriftenreihe/schriftenreihe-archiv/schriftenreihe-band-106.

Vennebusch, M., von Gösseln, I., Albert, L., Freitag, M., Gerschwitz, A., Goetze, T., Goldan, H.-J., Hartmann, F. Jahn, C.-H., Knöfel, C., Meißies, M., Reiling, R., Riedel, F., Rost, C., Rülke, A., Schneider, V., Siebert, J., Stockhaus, T., Wallat, C., Winter, V. (2024): Zwischenziel erreicht: Neuer amtlicher PPP-RTK-Dienst der AdV erreicht SAPOS®-HEPS-Genauigkeit. zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 2/2024, 149. Jg., 117–123. DOI: 10.12902/zfv-0460-2024.

Weber, G., Mervart, L., Stürze, A., Rülke, A., Stöcker, D. (2016): BKG Ntrip Client, Version 2.12. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 49, Frankfurt am Main.

Wübbena, G., Schmitz, M., Bagge, A. (2005): PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks. Presented at ION GNSS 2005, Long Beach, California.

Wübbena, G., Perschke, C., Wübbena, J., Wübbena, T., Schmitz, M. (2020): GNSS SSR Real-Time Correction: The Geo++ SSRZ Format and Applications. In: Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2020), 55–98. DOI: 10.33012/2020.17552.

Kontakt

Dr. David Becker
Hochschule Trier, Fachbereich Informatik
Schneidershof, 54293 Trier
d.becker@inf.hochschule-trier.de

Prof. Dr. Jürgen Graf
Hochschule Trier, Fachbereich Informatik
Schneidershof, 54293 Trier
j.graf@inf.hochschule-trier.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter https://geodaesie.info.

 © DVW e.V.