

# Strategien zur Selektion von Satelliten in kinematischen GNSS-Anwendungen auf Basis von 3D-Umgebungsmodellen

## Strategies for Satellite Selection in Kinematic GNSS Applications Based on 3D Environment Models

Ansgar Dreier, Florian Zimmermann, Lasse Klingbeil, Christoph Holst, Heiner Kuhlmann

Im Bereich der GNSS-Positionierung zählen stationsspezifische Abweichungen, welche aufgrund der Antennenumgebung entstehen, zu den genauigkeitsbegrenzenden Faktoren. In diesem Beitrag wird eine Strategie zur Satellitenselektion vorgestellt, die stationsabhängige Einflüsse, wie die Signalbeugung, den Empfang von Signalen nicht direkt sichtbarer Satelliten (non-line-of-sight, NLOS-Empfang) und die Fernfeld-Mehrwegeeffekte, berücksichtigt. Die geometriebasierte Bestimmung und der darauf folgende Ausschluss von beeinflussten Signalen erfolgt mithilfe von georeferenzierten 3D-Punktwolken und LoD2-Stadtmodellen. Dabei zeigt zunächst die Anwendung auf eine statische GNSS-Messung das grundsätzliche Potenzial der Positionierung mit Satellitenselektion, welche sich insbesondere durch eine Steigerung der fixierten Phasenmehrdeutigkeiten widerspiegelt. Daraufhin folgt die kinematische GNSS-Anwendung mit einem zusätzlichen Vergleich zwischen den Umgebungsmodellen aus einer TLS-Aufnahme und einem LoD2-Stadtmodell. Im direkten Vergleich der Auswirkung auf die GNSS-Positionierung erreichen beide Ansätze das nahezu identische Ergebnis, wodurch keines der Verfahren als wesentlich besser eingeschätzt werden kann. Der essenzielle Unterschied ist daher in der Datenerfassung zu sehen, welche für georeferenzierte Punktwolken größerer Messgebiete mit einem vergleichsweise hohen Aufwand einhergeht. Die Anwendung beider Ansätze auf die GNSS-Positionierung bietet eine signifikante Verbesserung der Trajektorienschätzung, welche sich mit einem RMS von unter 5 cm im Vergleich zur Referenztrajektorie quantifizieren lässt. Zuletzt wurde eine zusätzliche Selektion der von Mehrwegeeffekten beeinflussten Signale mithilfe der Fresnel-Zonen durchgeführt, wodurch eine weitere Verbesserung der geschätzten Trajektorie ermöglicht wird.

**Schlüsselwörter:** GNSS, Mehrwegeeffekte, Signalbeugung, NLOS-Empfang, LoD-Modell, Mehrdeutigkeitsfixierung

*In the area of GNSS positioning, site-dependent errors, which are caused by the antenna environment, are one of the accuracy limiting factors. In this paper a strategy for satellite selection is presented, which considers site-dependent effects like signal diffraction, Non-line-of-sight (non-line-of-sight, NLOS) reception and far-field multipath. The geometry-based determination and the subsequent exclusion of influenced signals is performed using georeferenced 3D point clouds and LoD2 city models. First of all, the application to a static GNSS measurement shows the general potential of positioning with satellite selection, which was particularly noticeable by an increase of the fixed carrier phase ambiguities. This is followed by the kinematic GNSS application with an additional comparison between the environment models from a TLS survey and a LoD2 city model. In a direct comparison of the impact on GNSS positioning, both approaches achieve the almost identical result, so that none of the methods can be considered to be significantly better. Therefore, the essential difference is the data acquisition, which for georeferenced TLS*

*point clouds of larger measurement areas is associated with a comparatively high effort. The application of both approaches to GNSS positioning offers a significant improvement in trajectory estimation, which can be quantified with an RMS of less than 5 cm compared to the reference trajectory. Furthermore, an additional selection of signals influenced by multipath effects was performed using Fresnel zones, which allows a further improvement of the estimated trajectory.*

*Keywords: GNSS, multipath, signal diffraction, NLOS reception, LoD model, ambiguity resolution*

## 1 EINLEITUNG

Die satellitengestützte Positionsbestimmung hat sich in den letzten Jahren in vielen Anwendungsbereichen zu einem unverzichtbaren Verfahren entwickelt, wenn absolute Positionsinformationen mit hoher Genauigkeit gefordert sind. Obwohl eine Vielzahl an potenziellen Abweichungsquellen für GNSS-Signale existiert und in Jahrzehnten der Forschung zahlreiche effektive Minimierungsmethoden für verschiedene Abweichungsquellen entwickelt wurden, sind auch weiterhin die stationsspezifischen Abweichungen als einer der genauigkeitsbegrenzenden Faktoren zu nennen /Smyrniaios et al. 2013/. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die Effekte in ihrer Entstehung und Auswirkung sehr stark von der individuell vorliegenden Antennenumgebung abhängig sind. Durch den in den letzten Jahren ständig vorangetriebenen Übergang von statischen zu kinematischen Vermessungsaufgaben, wie beispielsweise die kinematische Objekterfassung mit mobilen Multisensorsystemen /Kuhlmann et al. 2014/, kommt es zu einer ständigen Variation der Antennenumgebung, was die Minimierung stationsspezifischer Abweichungen in solchen Anwendungsfällen zusätzlich erschwert.

Mehrwegeeffekten, welche die Überlagerung von direkten und reflektierten Signalen beschreiben, kann prinzipiell durch eine sorgfältige Stationsauswahl vorgebeugt werden /Teunissen & Montenbruck 2017/. Allerdings sind die Antennenposition und damit auch die Umgebung nicht immer frei wählbar und gerade in kinematischen Anwendungen ist die Meidung von potenziellen Störgegenständen nur schwer realisierbar. In statischen Anwendungen kann die Auswirkung von Mehrwegeeffekten durch Mittelbildung über einen ausreichend langen Beobachtungszeitraum gemindert werden /Hofmann-Wellenhopf et al. 2008/. Ändert sich die Antennenumgebung allerdings, so wie es beispielsweise bei bewegten Plattformen der Fall ist, oder müssen hochfrequente Positionslösungen einer statischen Antenne bereitgestellt werden, greift dieser Ansatz nicht mehr /Wübbena et al. 2001/. Methoden wie die siderische Filterung /Lau 2012/, Multipath-Stacking-Maps /Fuhrmann et al. 2015/ oder Antennen-Arrays /Zhang & Schwieger 2016/ sind weitere Beispiele für effektive Minimierungsansätze, welche zwar eine erhebliche Genauigkeitssteigerung ermöglichen können, allerdings nicht immer für alle Anwendungsfälle geeignet sind.

Neben den Mehrwegeeffekten zählen auch die Effekte der Signalbeugung und des NLOS-Empfangs (NLOS – non-light-of-sight) zu den stationsspezifischen Abweichungen. Diese liegen immer dann vor, wenn der direkte Signalweg geblockt ist und die Antenne die Signale nur auf indirektem Weg empfängt. Bei Positionsbestimmungen im urbanen Bereich mit Genauigkeitsanforderungen im Meterbereich können Kamerasysteme genutzt werden, um geblockte

Satelliten zu identifizieren /Moreau et al. 2017/. Da Beugungseffekte im Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) der Signale sichtbar werden, können SNR-Werte in spezielle Methoden zur Beobachtungsgewichtung integriert werden /Wieser 2002/. Ein weiteres wirksames Verfahren auf Basis der SNR-Werte stellen daraus abgeleitete dynamische Elevationsmasken dar, welche Satellitensignale über einen Vergleich der vorliegenden SNR-Werte und zu erwartenden SNR-Werten auf Grundlage der verwendeten Antennen vorselektieren /Kersten & Schön 2017/.

In diesem Beitrag wird ein ähnlicher Ansatz verfolgt, wobei die Satellitenselektion nicht auf Basis von SNR-Werten, sondern durch Integration von 3D-Umgebungsinformationen in Form von Punktwolken oder Gebäudemodellen erfolgt. Im Fokus der hier vorgestellten Untersuchungen zur Selektion von potenziell durch stationsspezifische Abweichungen betroffener Satellitensignale stehen drei Fragestellungen:

1. Welche Genauigkeitssteigerung kann im statischen und kinematischen Anwendungsfall durch die Minimierung von NLOS-Empfang und Signalbeugung durch eine Selektion von Satelliten auf Basis geometrischer Sichtbarkeitsprüfungen erreicht werden?
2. Wie groß sind die Leistungsunterschiede zwischen Sichtbarkeitsprüfungen, basierend auf terrestrischen Punktwolken und auf LoD2-Gebäudemodellen?
3. Lassen sich auch klassische Mehrwegeeffekte durch eine Satellitenselektion auf Basis von Fresnel-Zonen minimieren?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen werden zunächst in Abschnitt 2 kurz die theoretischen Grundlagen zu den stationsspezifischen Abweichungen dargelegt. In Abschnitt 3 werden die unterschiedlichen Strategien zur Satellitenselektion beschrieben und in Abschnitt 4 erfolgt die Evaluierung der Methoden anhand eines statischen und eines kinematischen Testdatensatzes. Abschnitt 5 fasst die wesentlichen Erkenntnisse der Untersuchungen nochmals zusammen und gibt einen kurzen Ausblick auf weiterführende Vorhaben.

## 2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

GNSS-Signale unterliegen während ihres Wegs von der Satelliten- zur Empfangsantenne einer Vielzahl an systematischen Beobachtungsabweichungen. Im Fall einer relativen Basislinienauswertung, also der Verwendung von gleichzeitig an zwei Antennen beobachteten Signalen, kann jedoch ein Großteil der Abweichungen durch

Bildung von Einfach- und Doppeldifferenzen der Beobachtungen eliminiert oder zumindest weitgehend minimiert werden. Dies gilt insbesondere für Abweichungen in den Satellitenorbits und Satellitenuhren, für ionosphärische und troposphärische Laufzeitverzögerungen sowie für die Abweichung der Empfängeruhr /Teunissen & Montenbruck 2017/. Nach der Differenzbildung verbleiben stationsspezifische Effekte als einer der wesentlichen genauigkeitsbegrenzenden Einflüsse, welche im Folgenden in enger Anlehnung an /Zimmermann 2019/ kurz erläutert werden.

### 2.1 Stationsspezifische Abweichungen

Stationsspezifische Abweichungen werden häufig unter dem Begriff Mehrwegeeffekte (engl. Multipath) zusammengefasst und als Überlagerung von Signalen, welche auf direktem und nach Reflexion auf indirektem Weg die Antenne erreichen, beschrieben. Streng genommen ist dieser Effekt, der Mehrwegeeffekt aus dem Fernfeld, allerdings nur ein Teilaspekt der stationsspezifischen Abweichungen und aufgrund ihrer unterschiedlichen Entstehung und Auswirkung ist eine Abgrenzung zwischen einzelnen Effekten notwendig. Hierbei handelt es sich um die Signalbeugung, den sogenannten NLOS-Empfang, und Effekte aus dem Antennennahfeld. Da der Fokus der Untersuchungen in diesem Beitrag auf der Signalbeugung, dem NLOS-Empfang und den Mehrwegeeffekten aus dem Fernfeld liegt, werden die Antennennahfeldeffekte an dieser Stelle nicht weiter betrachtet und es wird auf die einschlägige Literatur verwiesen /Balanis 2005/, /Dilbner 2007/. In Abb. 1 sind diese stationsspezifischen Abweichungen schematisch dargestellt.

Wie zuvor beschrieben, liegen Mehrwegeeffekte aus dem Fernfeld (im Weiteren als Mehrwegeeffekte bezeichnet) immer dann vor, wenn das Satellitensignal, zusätzlich zu dem direkten Signalweg, die Antenne auf einem oder mehreren indirekten Wegen erreicht (Abb. 1 links). Ist der direkte Signalweg durch ein Hindernis geblockt und die Antenne empfängt dennoch ein Signal, so liegt entweder eine Beugung des Satellitensignals oder NLOS-Empfang vor. Der Effekt der Signalbeugung basiert auf dem Huygenschen Prinzip /Vogel & Gerthsen 2013/ und liegt vor, wenn ein Satellitensignal beispielsweise an einer Dachkante in den vom Satelliten nicht sichtbaren Schattenraum hineingebeugt wird (Abb. 1 rechts). Der NLOS-

Empfang bezeichnet den Fall, wenn das direkte Signal geblockt ist und nur ein reflektiertes Signal die Antenne erreicht (Abb. 1 Mitte).

### 2.2 Fresnel-Zonen

Die schematischen Darstellungen der stationsspezifischen Abweichungen in Abb. 1 beinhalten die Annahme einer punkthaften Reflexion der Satellitensignale an Objekten. Da die Satellitensignale mit einem Öffnungswinkel von etwa 13,9° ausgestrahlt werden, trifft diese Annahme in der Realität allerdings nicht zu. Statt eines einzelnen Reflexionspunkts existieren vielmehr Bereiche auf der Reflektoroberfläche, welche zu dem Reflexionsprozess beitragen, indem sie die meiste Energie des Signals reflektieren /Rost 2011/. Diese Bereiche werden als Fresnel-Zonen bezeichnet und sind in Abb. 2 dargestellt.

Die Fresnel-Zone ergibt sich als elliptische Schnittfläche zwischen der Reflektorebene und einem Rotationsellipsoid, in dessen Brennpunkten sich der Satellit **S** und die an der Reflektorebene gespiegelte Antennenposition **A'** befindet. Zur Berechnung der Fresnel-Zone auf einem beliebig orientierten Reflektor wird zunächst der Reflexionspunkt **R** durch Schnitt der Verbindungsgerade von **A'** und **S** und der Reflektorfläche berechnet. Anschließend wird der Einfallswinkel  $\zeta$  des Satellitensignals bezüglich des Reflektors wie folgt berechnet:

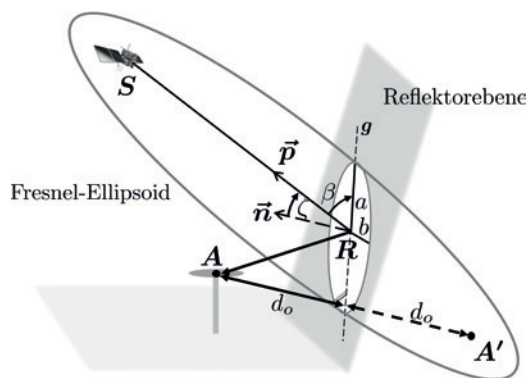


Abb. 2 | Fresnel-Zone auf einer beliebig orientierten Reflektorebene (modifiziert aus /Zimmermann 2019/)

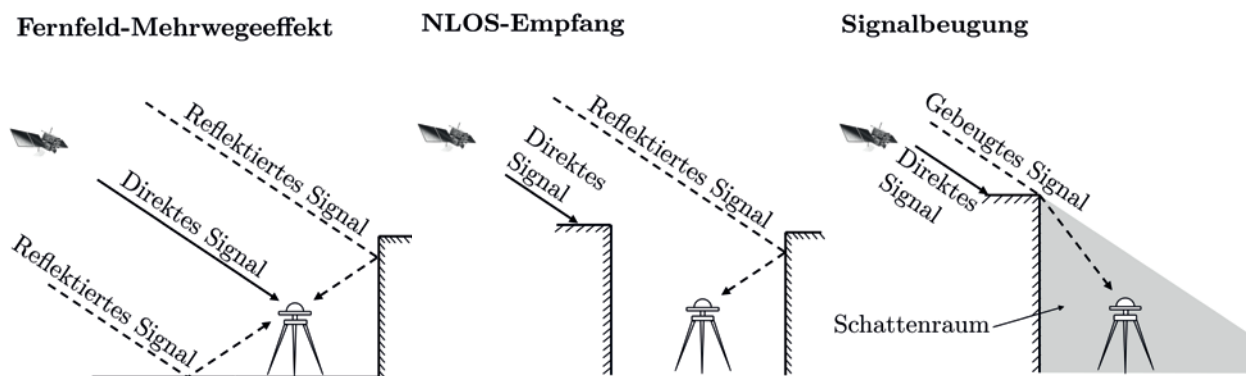


Abb. 1 | Stationsspezifische Abweichungen, unterteilt in Mehrwegeeffekte aus dem Fernfeld (links), NLOS-Empfang (Mitte) und Signalbeugung (rechts) (modifiziert aus /Zimmermann 2019/)

$$\zeta = \cos^{-1} \left( \frac{\vec{n} \cdot \vec{p}}{\|\vec{n}\| \cdot \|\vec{p}\|} \right), \quad (1)$$

wobei  $\vec{n}$  den Normalenvektor der Reflektorebene und  $\vec{p}$  den Sichtvektor zwischen dem Reflexionspunkt  $R$  und dem Satelliten  $S$  bezeichnet. Anschließend ergeben sich mit  $\beta = 90^\circ - \zeta$  die große und kleine Halbachse der Fresnel-Zone  $a$  und  $b$  zu

$$a = \frac{b}{\sin \beta}, \quad b = \sqrt{\frac{\lambda d_0}{\sin \beta} + \left( \frac{\lambda}{2 \sin \beta} \right)^2}, \quad (2)$$

wobei  $\lambda$  die Wellenlänge des Signals und  $d_0$  den orthogonalen Abstand der Antenne zu der Reflektorfläche bezeichnen. Eine ausführliche Beschreibung der notwendigen Rechenschritte kann /Zimmermann et al. 2019/ entnommen werden.

Eine ausreichende Überlappung zwischen der Fresnel-Zone und der Reflektoroberfläche ist eine der wesentlichen Voraussetzungen für das Entstehen von Mehrwegeeffekten. Untersuchungen diesbezüglich haben gezeigt, dass eine Überlappung von 50 % zwischen der Fresnel-Zone und dem Reflektor ausreichend ist, um eine signifikante Mehrwegebelastung des Signals hervorzurufen /Zimmermann et al. 2019/. Diese Erkenntnis wird in Abschnitt 3 als Entscheidungskriterium in die Selektionsstrategien integriert.

### 3 SELEKTIONSSTRATEGIEN

#### 3.1 Sichtbarkeitsprüfung über Umgebungsmodelle

Die Identifikation von Satellitensignalen, welche dem Effekt der Signalbeugung oder NLOS-Empfang unterliegen, kann über eine geometrische Sichtbarkeitsprüfung unter Verwendung von Umgebungsmodellen erfolgen. In diesem Beitrag werden zwei Arten von Umgebungsmodellen genutzt: (1) 3D-Punktwolken von terrestrischen Laserscannern (TLS) und (2) LoD2-Stadtmodelle im GML-Format. Die Sichtbarkeitsprüfung erfolgt für die unterschiedlichen Datengrundlagen durch zwei verschiedene Ansätze.

##### 3.1.1 Ansatz 1: Adaptive Elevationsmasken aus TLS-Punktwolken

Liegt eine georeferenzierte Punktwolke der Antennenumgebung vor, so kann für eine vorgegebene Antennenposition aus der Punktwolke eine Elevationsmaske abgeleitet werden, welche, im Gegensatz zu einer festen Maske (beispielsweise.  $5^\circ$  oder  $10^\circ$ ), adaptiv an die vorliegende Abschattungssituation angepasst ist /Zimmermann et al. 2017/. Im Folgenden werden diese adaptiven Elevationsmasken als OAEM (engl.: Obstruction Adaptive Elevation Mask) bezeichnet. Im ersten Berechnungsschritt der OAEM wird ausgehend von einer initialen Antennenposition  $X_A$  der Sichtvektor zu jedem Punkt  $X_P$ , berechnet und in ein topozentrisches Koordinatensystem (East, North, Up) transformiert. Anschließend können die jeweiligen Azimut- und Elevationswinkel  $\psi_i$  und  $\theta_i$  nach

$$\psi_i = \tan^{-1} \left( \frac{e_i}{n_i} \right), \quad \theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{u_i}{\sqrt{e_i^2 + n_i^2}} \right) \quad (3)$$

berechnet werden, wobei  $e_i$ ,  $n_i$  und  $u_i$  die jeweiligen Komponenten des Sichtvektors bezeichnen. Die berechneten Elevationswinkel werden nun entsprechend der zugehörigen Azimutwinkel einem azimutalen Gitter mit einer vorgegebenen Gitterweite (beispielsweise  $0,5^\circ$ ) zugewiesen und schließlich wird in jeder Gitterzelle  $c$  der höchste Elevationswinkel nach

$$\bar{\theta}_c = \begin{cases} \max \{ \theta_i \in c \}, & \text{Zelle } c \neq [ ] \\ 0^\circ, & \text{Zelle } c = [ ] \end{cases} \quad (4)$$

identifiziert, wobei in nicht besetzten Zellen  $\bar{\theta}_c$  auf  $0^\circ$  gesetzt wird.

Da die Berechnung der Elevationswinkel basierend auf der initialen Antennenposition  $X_A$  durch die eigentlich zu detektierenden Abweichungen verfälscht sein kann, wird die Unsicherheit der Elevationswinkel  $\sigma_{\bar{\theta}_c}$  mittels Varianzfortpflanzung bestimmt und jedem Elevationswinkel als Korrekturwert aufaddiert ( $\bar{\theta} = \bar{\theta}_c + \sigma_{\bar{\theta}_c}$ ). Letztlich wird die OAEM nun als vollbesetzter  $360^\circ$ -Vektor repräsentiert, welcher durch die Überprüfung der jeweiligen Einstrahlrichtung der Satellitensignale die Identifikation der von nicht sichtbaren Satelliten empfangenen Signale ermöglicht.

##### 3.1.2 Ansatz 2: Geradenschnitt mit LoD2-Modell

Grundlage für die Prüfung von Satellitenabschattungen mittels Geradenschnitt bildet das LoD2-Modell der näheren Antennenumgebung, welches durch Eckpunkte von Polygonen im CityGML-Format (Version No. 1.0.0 /Gröger et al. 2008/) repräsentiert wird. Die Koordinatendefinition bildet dabei das ETRS89 und zugehörige Höhenangaben im Deutschen Haupthöhennetz 2016 (DHHN2016) in Form der Normalhöhe. Damit sowohl Modell- als auch GNSS-Koordinaten in einem einheitlichen Koordinatensystem vorliegen, werden alle Koordinaten des Modells, nach Anbringung der Quasigeoidundulation aus dem GCG2016, in das WGS84 überführt. Um daraufhin die Sichtbarkeit von Satelliten für eine Antennenposition  $X_A$  zu bestimmen, erfolgen zwei aufeinanderfolgende Berechnungsschritte /Glassner 1990/. Im ersten Berechnungsschritt wird mithilfe von drei Polygonpunkten eine Ebene im Raum parametrisiert und mit der Geraden zwischen Satelliten und Antennenposition geschnitten (Abb. 3).

Die möglichen Resultate der Schnittberechnung begrenzen sich auf eine Gerade parallel zur Ebene, einem Schnittpunkt genau zwischen Antenne und Satellit oder einem Schnittpunkt hinter der

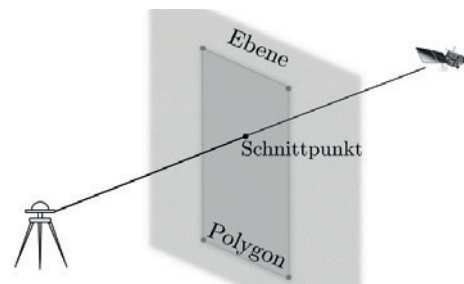


Abb. 3 | Schnittbeziehung zwischen Polygon und Geraden zwischen Satelliten und Antenne

Antenne und somit nicht zwischen Antenne und Satellit. Im darauf folgenden Berechnungsschritt wird geprüft, ob ein Schnittpunkt zwischen Antenne und Satellit innerhalb der Polygonfläche liegt und damit die Sichtverbindung zwischen Antenne und Satellit blockiert. Falls dies der Fall ist, wird der zugehörige Satellit als abgeschattet detektiert und aus der Positionierung entfernt. Zur Überprüfung von abgeschatteten Satelliten wird eine Schnittberechnung mit allen Polygonen des GML-Modells durchgeführt. Zur effizienteren Prozessierung erfolgt daher eine Vorsortierung der enthaltenen Polygone anhand der Höheninformation und Entfernung zur Antennenposition. Analog zur Sichtbarkeitsanalyse für Punktwolken besteht auch für GML-Modelle die Möglichkeit, diese in eine Punktwolke zu transformieren und selbige Methodik anzuwenden.

## 4 DATENSÄTZE/SZENARIEN

Die Leistungsfähigkeit der in Abschnitt 3 beschriebenen Selektionsstrategien zur Minimierung stationsspezifischer Abweichungen wird anhand zweier unterschiedlicher Szenarien evaluiert. Bei dem ersten Datensatz handelt es sich um eine statische GNSS-Messung im Bereich einer Talsperre (Abschnitt 4.1). Hier liegt der Fokus auf der Evaluierung der Satellitenselektion mittels abgeleiteter OAEMs aus terrestrischen Laserscans. Das zweite Szenario (Abschnitt 4.2) repräsentiert eine kinematische Anwendung im urbanen Bereich. Zum einen soll anhand dieser Daten ein Vergleich zwischen der Satellitenselektion auf Basis terrestrischer Laserscans und auf Basis von LoD2-Modellen vorgenommen werden. Zum anderen soll in diesem Szenario auch die Möglichkeit untersucht werden, Mehrwegeeffekte durch eine Satellitenselektion auf Basis von Fresnel-Zonen zu minimieren.

### 4.1 Statische GNSS-Messung Brucher-Talsperre

#### 4.1.1 Datenaufzeichnung und -vorbereitung

Bei der Brucher-Talsperre handelt es sich um eine Staumauer mit einer Kronenlänge von 200 Metern, einer Kronenbreite von 4,5 Metern und einer Höhe von etwa 25 Metern. Für regelmäßige Überwachungsmessungen ist ein terrestrisches Netz über acht sta-

bile Messpfeiler realisiert, für welche präzise Lagekoordinaten und Höheninformationen vorliegen (Abb. 4 links).

Für die Testmessung wurde eine Antenne auf der Staumauer (Rover) und eine Antenne auf der Luftseite (Master) vor der Staumauer, jeweils auf schweren Metallstativen, platziert. Um präzise Sollkoordinaten für die beiden frei gewählten Antennenstandpunkte zu generieren, wurden beide Stative in das terrestrische Netz der Messpfeiler eingebunden und die Antennenhöhen mittels Feinnivellement bestimmt. Anschließend wurden an beiden Standpunkten mit Antennen vom Typ Leica AS10 für etwa 4,5 Stunden Rohdaten von GPS- und GLONASS-Satelliten aufgezeichnet.

Für die Erzeugung einer georeferenzierten Punktwolke der Antennenumgebung wurden mit einer Leica ScanStation P50 von den beiden Antennenstandpunkten Einzelscans durchgeführt, wobei alle sichtbaren Messpfeiler mit BOTAS-Zielzeichen (Janßen et al. 2019) für die im Anschluss vorgenommene Registrierung und Georeferenzierung der Punktwolken besetzt wurden.

#### 4.1.2 Auswertung und Evaluierung

Entsprechend dem in Abschnitt 3.1 beschriebenen ersten Ansatz wurde aus der georeferenzierten TLS-Punktwolke an beiden Antennenstandpunkten die OAEM berechnet. Als initiale Antennenposition wurde hierbei das Ergebnis einer statischen Basislinienlösung mit allen verfügbaren Satellitensignalen genutzt. Abb. 5 zeigt die OAEMs für die Masterantenne (links) und die Roverantenne (rechts).

Durch den Vergleich der Satellitenspuren mit der jeweiligen OAEM können nun alle Satellitensignale identifiziert und eliminiert werden, welche nicht auf direktem Signalweg empfangen wurden. Da sich die Staumauer bezogen auf die Masterantenne in südöstlicher Richtung befindet, können die aus dieser Richtung empfangenen Signale eindeutig dem Effekt der Signalbeugung zugewiesen werden.

Im Fall der Roverantenne ist der durch die OAEM gekennzeichnete abgeschattete Bereich erwartungsgemäß wesentlich kleiner und wird hauptsächlich durch Vegetation bestimmt. Nach dem Anbringen der jeweiligen OAEM an die Beobachtungsdaten der beiden Antennen wird ein modifizierter Satz von Beobachtungen erzeugt. Daraufhin wurde eine kinematische (epochenweise) Basislinienauswertung für originäre und modifizierte Datensätze durchgeführt und die Differenzen zu der terrestrischen Referenzlösung bestimmt. Die

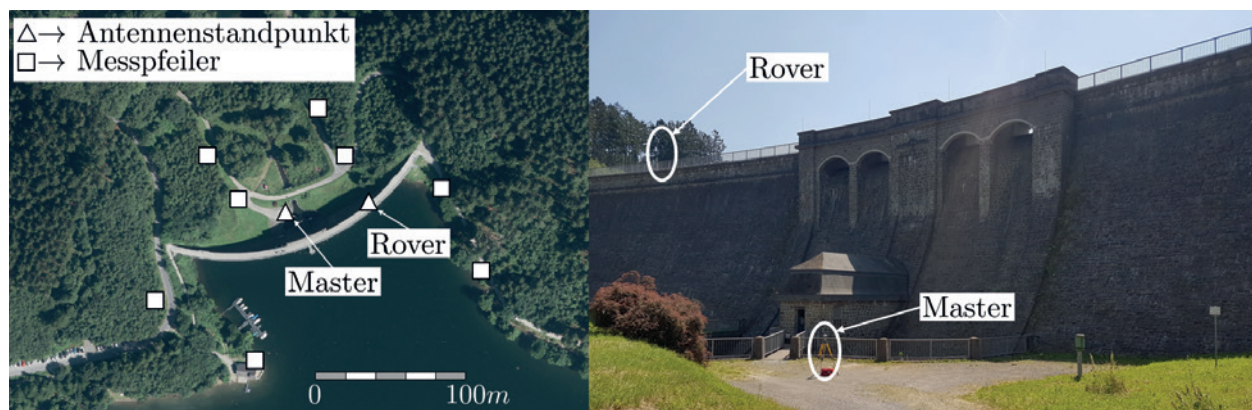


Abb. 4 | Messumgebung an der Brucher-Talsperre. Links: Luftbild der Talsperre mit Anordnung der Antennenstandpunkte und Messpfeiler, /www.tim-online.nrw.de/; rechts: Frontansicht der Staumauer und Lage der Antennenstandpunkte.

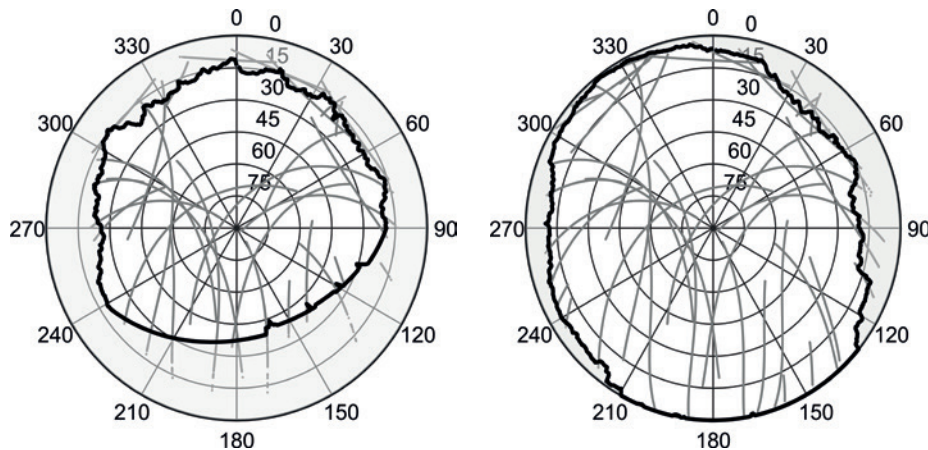


Abb. 5 | Skyplot mit OAEM für die Masterantenne (links) und die Roverantenne (rechts). Die durch die schwarze Linie eingefasste, hellgrau schattierte Fläche entspricht der jeweiligen OAEM. Die grauen Linien repräsentieren die Satellitenspuren der verwendeten GPS- und GLONASS-Satelliten.

Vorverarbeitung der Beobachtungsdaten erfolgt in einer eigenen Implementierung in MATLAB und die anschließende Berechnung der Basislinie mithilfe der Open-Source-Software RTKLib. Die Auswertung erfolgt mit Beobachtungen auf zwei Frequenzen (L1 und L2) für GPS und GLONASS, Broadcast Orbits und im Weiteren basierend auf den Standardeinstellungen von RTKLib.

In Abb. 6 ist exemplarisch die Zeitreihe der Positionsdifferenzen der Up-Komponente dargestellt. In Tab. 1 sind die minimalen und maximalen Differenzen, der Mittelwert und die Standardabweichung der Zeitreihen aller Komponenten sowie der Prozentsatz an Beobachtungsepochen mit fixierten Trägerphasenmehrdeutigkeiten aufgelistet.

Der Vergleich der dargestellten Zeitreihe und die zugehörigen Zahlenwerte zeigen eine deutliche Verbesserung der Positionsgenauigkeit durch die Satellitenselektion. Während in einigen Beobachtungsepochen nach der Prozessierung der originären Daten Abweichungen von einigen Dezimetern auftreten, liegen die Abweichungen nach der Selektion in allen drei Koordinatenkomponenten

zwischen  $-3,9$  cm und  $2,5$  cm. Die in Abb. 5 sichtbare geringere Streuung der Differenzen wird auch durch die geringere Standardabweichung der Zeitreihen bestätigt.

Die Verbesserung der Positionsgenauigkeit wird primär durch die Erhöhung der Anzahl an Epochen mit fixierten Mehrdeutigkeiten hervorgerufen. Während die ganzzahlige Fixierung im Falle der originären Beobachtungsepochen nur in 64 % der Fälle erfolgreich war, ist dies nach der Satellitenselektion in allen Beobachtungsepochen der Fall. Bei genauerer Betrachtung der Mittelwerte der beiden Zeitreihen fällt allerdings auf, dass die Verbesserung hier geringer ausfällt. Dies lässt den Schluss zu, dass speziell Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen an epochenweise Positionslösungen von dieser Art der Satellitenselektion profitieren können.

## 4.2 KINEMATISCHE GNSS-MESSUNG CAMPUS POPPELSDORF

### 4.2.1 Datenaufzeichnung und -vorbereitung

Die Auswertung einer kinematischen GNSS-Messung zur Evaluation der gezeigten Methodiken erfolgt anhand eines auf dem in Abb. 7 dargestellten Campus Poppelsdorf der Universität Bonn aufgezeichneten Datensatzes.

Die Rover-Trajektorie wurde mit dem in /Heinz et al. 2019a/ beschriebenen Multisensorsystem aufgezeichnet, bei dem die Auswertung auf einer Kombination aus differenziellen GNSS und den Daten einer inertialen Messeinheit (IMU) beruht. Die Berechnung durch differenzielles GNSS erfolgt mithilfe der Masterantenne (Abb. 7 links) und beinhaltet die Navigationssysteme GPS, Galileo und GLONASS. Die mit dem Multisensorsystem erzeugte Trajektorie dient im weiteren Verlauf als Referenzlösung und soll mit allein auf GNSS-

	Originale Daten			Modifizierte Daten		
	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta U$	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta U$
Min	-0,171 m	-0,370 m	-0,811 m	-0,008 m	-0,015 m	-0,039 m
Max	0,081 m	0,413 m	0,725 m	0,008 m	0,008 m	0,025 m
Mittel $\bar{\Delta}$	0,001 m	0,000 m	-0,011 m	0,000 m	0,001 m	-0,005 m
Std $\sigma_{\Delta}$	0,004 m	0,007 m	0,017 m	0,002 m	0,003 m	0,007 m
% fix	64 %	100 %				

Tab. 1 | Abweichungen der East-, North- und Up-Komponente ( $E, N, U$ ) und Prozentsatz an Beobachtungsepochen mit fixierten Trägerphasenmehrdeutigkeiten

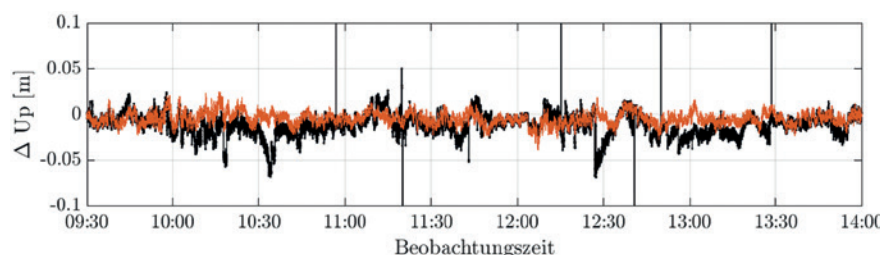


Abb. 6 | Abweichungen der Up-Komponente für die originären Beobachtungsdaten (schwarz) und die durch die OAEMs modifizierten Daten (orange)

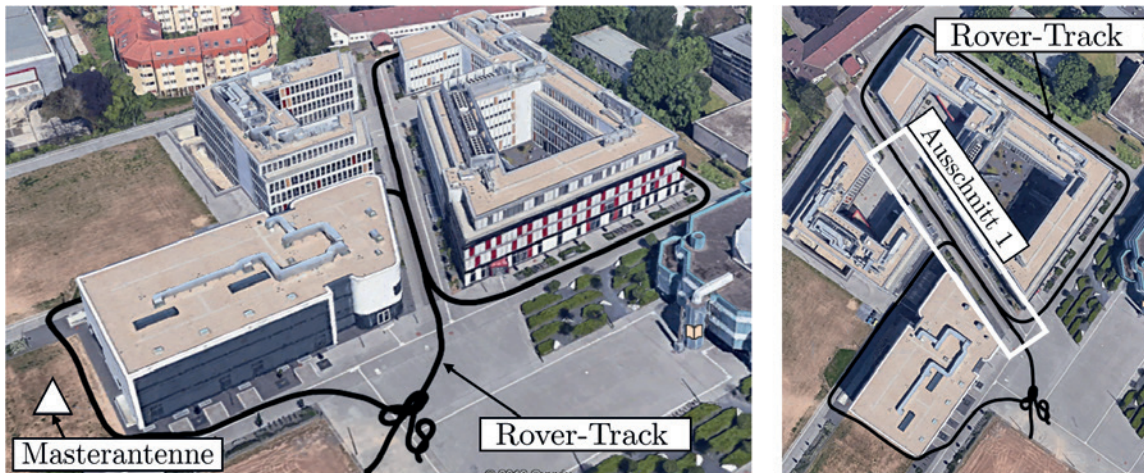


Abb. 7 | Kinematische GNSS-Messung auf dem Campus Poppelsdorf mit dargestellter Referenzlösung des Multisensorsystems (Rover-Track) und verwendeter Masterantenne (links) /https://www.google.de/maps/

basierten Lösungen mit zusätzlicher Satellitenselektion verglichen werden. Die Annahme als Referenz wird insbesondere durch die hochwertige IMU (iMAR iNAV-FJI-LSURV) und deren Verwendung in Bereichen mit schlechten GNSS-Bedingungen begründet. Neben der Trajektorienschätzung mittels Sensorfusion werden die Rohdaten der GNSS-Messung für Master und Rover aufgezeichnet und für die folgende Auswertung verwendet.

Neben der Referenztrajektorie werden 3D-Umgebungsmodelle aus terrestrischem Laserscanning und einem LoD2-Stadtmodell benötigt. Für das Messgebiet liegt aus früheren Untersuchungen eine präzise und georeferenzierte TLS-Punktwolke vor /Zimmermann et al. 2018/. Das als Vergleich verwendete LoD2-Stadtmodell gehört zu den digitalen Geobasisdaten, welche durch die Landesvermessung NRW kostenfrei zur Verfügung gestellt werden<sup>1</sup>. Die Datengrundlage für diese Gebäudemodelle beruht auf unterschiedlichen Messmethoden, wie dem Airborne Laserscanning, und kann im Einzelnen nachgeschlagen werden.

#### 4.2.2 Auswertung und Evaluierung

Die Auswertung der kinematischen GNSS-Messung besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Stufen. Im ersten Teil wird ein Vergleich der Sichtbarkeitsüberprüfungen aus Abschnitt 3.1 basierend auf der TLS-Punktwolke (OAEM) und dem LoD2-Modell (GML) durchgeführt. Diese Satellitenselektion erfolgt sowohl für die Masterantenne als auch jede Position entlang des Rover-Tracks. Um das Potenzial des in diesem Beitrag verfolgten Ansatzes für die kinematische Anwendung zu evaluieren, wird eine möglichst ideale Selektion von Satelliten basierend auf den Positionen der Referenztrajektorie des Multisensorsystems verwendet. Im zweiten Teil dieser Evaluation wird die zusätzliche Auswertung nach Abschnitt 3.2 durch Berechnung der Fresnel-Zonen für die Masterantenne ange-

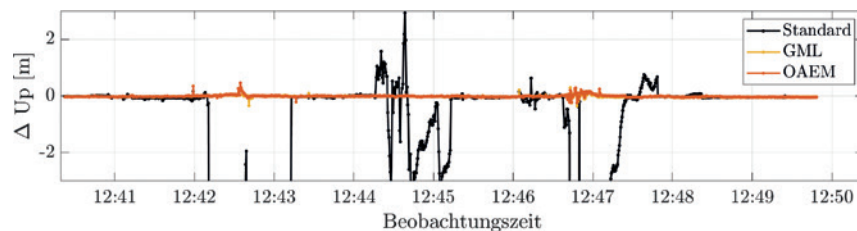


Abb. 8 | Zeitreihe der Höhendifferenzen zwischen Referenztrajektorie und unterschiedlichen Auswertungen basierend auf Satellitenselektion durch OAEM und GML

Rover	$\Delta U$		Mehrdeutigkeitsfixierung		
	RMS $\Delta U$	max $ \Delta U $	fixed	float	Code
Standard	7,390 m	38,769 m	57,6 %	29,4 %	13,0 %
GML	0,045 m	0,455 m	95,5 %	4,5 %	0,0 %
OAEM	0,044 m	0,462 m	96,3 %	3,6 %	0,0 %

Tab. 2 | Differenzen der Up-Komponente ( $U$ ) mit Satellitenselektion durch GML und OAEM zu Referenzlösung aus Multisensorsystem. Die Lösungstypen der Trägerphasenmehrdeutigkeiten (*fixed*, *float* oder *Code*) sind als Prozentsatz der Beobachtungsepochen angegeben.

wandt. Die Vorverarbeitung der Beobachtungsdaten erfolgt auch in diesem Abschnitt mittels eigener MATLAB-Implementierung und die darauffolgende GNSS-Auswertung mithilfe der Software GrafNav.

Die Auswertung des Vergleichs zwischen den Ergebnissen mit unterschiedlichen Umgebungsmodellen ist in *Abb. 8* durch die Differenzen der Up-Komponente zur Referenztrajektorie veranschaulicht. Neben den Lösungen mit Selektion, gekennzeichnet als GML und OAEM, enthält die Zeitreihe auch die ursprüngliche GNSS-Auswertung (Standard), berechnet mit den originären Messdaten.

Diese Zeitreihe verdeutlicht bereits visuell die Problematik der Standardlösung, welche insbesondere in den Abschnitten mit schwierigen GNSS-Bedingungen große Höhendifferenzen außerhalb der Skala aufweist. Eine Analyse der Abweichungen zur Referenzlösung ist in *Tab. 2* in Form des Root-Mean-Square Errors (RMS)

<sup>1</sup> [https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk\\_internet/geobasis/hoehenmodelle/3d\\_gebaeudemodelle/index.html](https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/hoehenmodelle/3d_gebaeudemodelle/index.html)

und der maximalen absoluten Höhendifferenz quantifiziert. Es zeigt sich eine Steigerung der Genauigkeit bei Betrachtung der RMS-Werte von 7 m der Standardlösung auf einen RMS um die 4 cm für beide Lösungen mit Satellitenselektion. Außerdem zeigt sich eine weitaus wichtigere Verbesserung der maximalen absoluten Differenz, welche von über 30 m auf ca. 46 cm mit Satellitenselektion verringert werden konnte. Die Verbesserung der Positionierung wird auch hier primär durch die höhere Anzahl an Epochen mit fixierten Mehrdeutigkeiten hervorgerufen. Die Anzahl an Epochen mit ganzzahligen Mehrdeutigkeiten liegt mit der Standardlösung bei etwa 57 % und steigert sich mit beiden Selektionsstrategien auf über 95 %. Neben der Verbesserung fixierter Positionslösungen kann außerdem die Anzahl von einfachen Codelösungen vollständig beseitigt werden, welche die große maximale Differenz der Standardlösung begründet haben.

Zusammenfassend zeigt sich eine erhebliche Genauigkeitssteigerung der kinematischen GNSS-Auswertung durch die Verwendung von Selektionsstrategien. Der direkte Vergleich zwischen den Umgebungsmodellen aus TLS-Messungen und LoD2-Modellen zeigt nur einen unwesentlichen Unterschied, welcher in diesem Fall zu einer leicht besseren Positionierung durch die OAEM-Selektion geführt hat. Eine Verallgemeinerung für diese Aussage geht aus dieser Auswertung nicht hervor, weshalb die Wahl des Umgebungsmodells der Situation angepasst werden muss.

Im darauf folgenden Evaluationsschritt erfolgt die zusätzliche Berechnung der Fresnel-Zonen aus Abschnitt 3.2 für die Masterantenne. Die Auswertung der Masterantenne beruht einerseits auf den unveränderten Messdaten (Standard), einer Selektion der Masterantenne durch die OAEM und einer Selektion mit OAEM und Fresnel-Zonen (OAEM+). Die verwendete Roverantenne wird für alle drei Auswertungen mit der Selektion basierend auf OAEMs verwendet. Die Bewertungskriterien, analog zur bisherigen kinematischen Auswertung, sind für die gesamte Trajektorie in Tab. 3 dargestellt.

Master	$\Delta U$		Mehrdeutigkeitsfixierung		
	RMS $_{\Delta U}$	max $ \Delta U $	fixed	float	Code
Standard	5,17 cm	60,03 cm	93,6%	6,5%	0,0%
OAEM	4,46 cm	46,21 cm	96,3%	3,6%	0,0%
OAEM+	4,05 cm	40,16 cm	95,8%	4,3%	0,0%

Tab. 3 | Differenzen der Up-Komponente ( $U$ ) mit erweiterter Satellitenselektion für die Masterstation. Die Lösungstypen der Trägerphasenmehrdeutigkeiten (*fixed*, *float* oder *Code*) sind als Prozentsatz der Beobachtungsepochen angegeben.

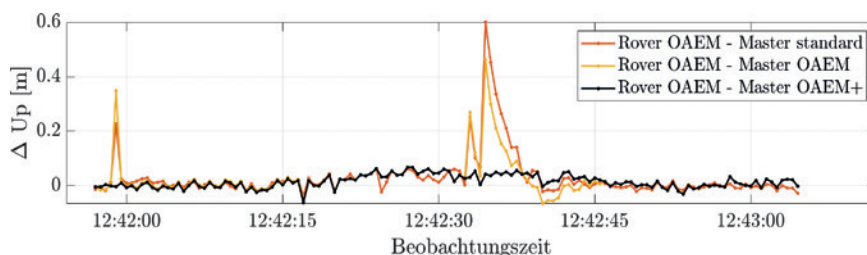


Abb. 9 | Zeitreihe der Höhendifferenzen zwischen Referenztrajektorie und unterschiedlichen GNSS-Auswertungen für den Ausschnitt 1 aus Abb. 6

Bei Beurteilung der drei dargestellten Lösungen zeigt sich eine Steigerung der Positionsgenauigkeit durch die unterschiedliche Selektion an der Masterantenne. Die absolute Abweichung sinkt von 60 cm ohne Selektion der Masterantenne auf 46 cm mit Anbringung der OAEM und auf 40 cm durch Verwendung der OAEM+. Eine analoge Systematik zeigt sich in den RMS-Werten, welche für die letzte Auswertungsstrategie zum besten Ergebnis in Relation zur Referenzlösung führt. Neben diesen Kriterien in Bezug auf die Referenztrajektorie zeigen sowohl die OAEM- als auch OAEM+-Lösung eine Steigerung der fixierten Mehrdeutigkeiten. Die Anzahl an Epochen mit Fixierungen steigt von 93,6 % ohne Selektion der Masterantenne auf 96,3 % bzw. 95,8 % durch die zusätzlichen Selektionsstrategien. Der leicht geringeren Anzahl fixierter Mehrdeutigkeiten für den OAEM+-Ansatz wird aufgrund des besseren Abschneidens in Bezug auf die Referenz keine zusätzliche Beachtung geschenkt.

Eine weitere Darstellung der Höhendifferenzen bezogen auf die Referenztrajektorie zeigt Abb. 9, welche den in Abb. 7 (rechts) eingezeichneten Ausschnitt der Trajektorie entspricht.

Die Masterantenne steht für die gesamte Messung in der Nähe eines relativ hohen Gebäudes (Abb. 7), das neben dem Boden den einen einzelnen dominanten Reflektor darstellt, wodurch das Potenzial der hier verwendeten Methodik veranschaulicht werden soll. In diesem Ausschnitt verringert sich die Höhendifferenz an den zwei kritischen Stellen bereits durch eine zusätzliche Verwendung der OAEM um einige Zentimeter. Durch die Einbringung der Fresnel-Zonen während der OAEM+-Lösung werden alle größeren Ausschläge beseitigt und die Abweichung zur Referenzlösung bewegt sich im einstelligen Zentimeterbereich oder niedriger. Durch diese Darstellung wird das Potenzial der zusätzlichen Satellitenselektion von Masterantennen verdeutlicht. Es zeigt sich sowohl mit OAEM als auch OAEM+ eine Verbesserung der Trajektorien-schätzung und damit eine Empfehlung zur Anwendung dieser Selektionsstrategien bei Auswertung präziser kinematischer Anwendungen.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die stationsspezifischen Abweichungen, kategorisiert in Signalbeugung, den NLOS-Empfang und die Fernfeld-Mehrwegeeffekte, zählen zu den genauigkeitsbegrenzenden Faktoren für die GNSS-Positionierung. Die in diesem Beitrag behandelte Satellitenselektion ermöglicht eine geometriebasierte Bestimmung und den darauf folgenden Ausschluss von beeinflussten Signalen mithilfe von georeferenzierten 3D-Punktwolken und LoD2-Stadtmodellen. Die Anwendung der OAEM auf eine statische GNSS-Messung zeigt

das grundsätzliche Potenzial der Positionierung mit Satellitenselektion, welche sich insbesondere durch eine Steigerung der fixierten Phasenmehrdeutigkeiten von 64 % auf 100 % widerspiegelte. Im Fall der kinematischen GNSS-Anwendung wurde der Vergleich zwischen den Umgebungsmodellen der georeferenzierten Punktwolke und dem LoD2-Stadtmodell in den Vordergrund gestellt.



Grundsätzlich bietet die TLS-basierte Punktwolke den Vorteil der besseren Genauigkeit, höheren Detailgrad und die Aufnahme von umliegender Vegetation. Im direkten Vergleich der Auswirkung auf die GNSS-Positionierung mit dem LoD2-Modell erreichen beide Ansätze das nahezu identische Ergebnis, wodurch keines der Verfahren als wesentlich besser eingeschätzt werden kann. Der essenzielle Unterschied ist daher in der Datenerfassung zu sehen, welche für georeferenzierte Punktwolken größerer Messgebiete mit einem vergleichsweise hohen Aufwand einhergeht. Andererseits erreicht dieses Verfahren einen wesentlich höheren Detailgrad und auch die Aufnahme der Vegetation, deren Einfluss auf die Positionierung beachtlich sein kann. Hierbei darf die saisonale Variation allerdings nicht unberücksichtigt bleiben und sollte für die Anwendung auf den Datensatz beachtet werden. Daneben bietet das frei verfügbare GML-Modell insbesondere für kinematische Anwendung über größere innerstädtische Bereiche die bessere Alternative. Die Anwendung beider Ansätze auf die GNSS-Positionierung bietet eine signifikante Verbesserung der Trajektorien-schätzung, welche sich mit einem RMS von unter 5 cm im Vergleich zur Referenztrajektorie quantifizieren lässt.

Als letzter Punkt wurde eine zusätzliche Selektion der von Mehrwegeeffekten beeinflussten Signale mithilfe der Fresnel-Zonen durchgeführt, wodurch eine weitere Verbesserung der geschätzten Trajektorie ermöglicht wird. Die Anwendung dieser Fresnel-Zonen wurde in diesem Beitrag lediglich auf die Masterantenne angewandt und muss im nächsten Schritt auf die kinematische Positionierung der Roverantenne übertragen werden. Ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang ist die zur Satellitenselektion des Rovers verwendete Referenztrajektorie, welche aus der Sensorfusion einer hochgenauen IMU und GNSS stammt. Da die Genauigkeit einer GNSS-basierten Position im urbanen Bereich als initiale Position der Selektionsstrategie nicht ausreicht, soll in weiterführenden Untersuchungen die Bestimmung der initialen Position mittels eines Multisensorsystems mit Low-Cost-IMU /Heinz et al. 2019b/ analysiert werden.

## FINANZIERUNG

„Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2070 – 390732324“

## LITERATUR

- Balanis, C. A. (2005): *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley-Interscience, New York.
- Dilßner, F. (2007): *Zum Einfluss des Antennenumfeldes auf die hochpräzise GNSS-Positionsbestimmung*. Dissertation. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik, Universität Hannover, 271.
- Fuhrmann, T.; Luo, X.; Knöpfler, A.; Mayer, M. (2015): *Generating statistically robust multipath stacking maps using congruent cells*. In: *GPS Solutions* 19(2015)1, 83–92.
- Glassner, A. S. (1990): *Graphics gems I*. Academic Press Professional, Inc., San Diego, 390–393.

Gröger, G.; Kolbe, T.; Czerwinski, A.; Nagel, C. (2008): *OpenGIS City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard*, 20.08.2008. <http://schemas.opengis.net/citygml/building/1.0/building.xsd>.

Groves, P. (2013): *GNSS solutions: Multipath vs. NLOS signals. How does Non-Line-of-Sight reception differ from multipath interference*. In: *Inside GNSS* 8(2013)6, 40–42.

Heinz, E.; Eling, C.; Klingbeil, L.; Kuhlmann, H. (2019a): *On the applicability of a scan-based mobile mapping system for monitoring the planarity and subsidence of road surfaces – Pilot study on the A44n motorway in Germany*. In: *Journal of Applied Geodesy* 14(2019)1, 39–54.

Heinz, E.; Klingbeil, L.; Kuhlmann, H. (2019b): *Aufbau einer Einrichtung zur Kalibrierung und Evaluierung von Mobile-Mapping-Systemen*. In: Wunderlich, T. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 20. Beiträge zum 19. Internationalen Ingenieurvermessungskurs*, München. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Hofmann-Wellenhopf, B.; Lichtenegger, H.; Wasle, E. (2008): *GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more*. Springer, Wien/New York.

Janßen, J.; Medic, T.; Kuhlmann, H.; Holst, C. (2019): *Decreasing the Uncertainty of the Target Center Estimation at Terrestrial Laser Scanning by Choosing the Best Algorithm and by Improving the Target Design*. In: *Remote Sensing* 11(2019)7, 845.

Kersten, T.; Schön, S. (2017): *GNSS-Monitoring of Surface Displacements in Urban Environments*. In: Lienhart, W. (Hrsg.): *Ingenieurvermessung 17. Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs*, Graz. Wichmann, Berlin/Offenbach, 415–426.

# HM

Hochschule  
München  
University of  
Applied Sciences

An der Hochschule München ist an der Fakultät für Geoinformation ab dem Wintersemester 2021/2022 folgende Stelle zu besetzen:

**W2-Professur für GeolT und Angewandte Geodäsie**

Kennziffer: BV 0828

Erfahren Sie mehr in der detaillierten Stellenausschreibung unter: <https://stellen.hm.edu/y69nr>

Bewerben Sie sich über unser Online-Portal bis zum 08.03.2021.

Wir freuen uns darauf, Sie kennenzulernen!



Kuhlmann, H.; Schwieger, V.; Wieser, A.; Niemeier, W. (2014): Engineering Geodesy – Definition and Core Competencies. In: Journal of Applied Geodesy 8(2014)4, 327–334.

Lau, L. (2012): Comparison of measurement and position domain multipath filtering techniques with the repeatable GPS orbits for static antennas. In: Survey Review 44(2012)324, 9–16.

Moreau, J.; Ambellouis, S.; Ruichek, Y. (2017): Fisheye-based method for GPS localization improvement in unknown semi-obstructed areas. In: Sensors 17(2017)1, 119.

Rost, C. (2011): Phasenmehrwegereduzierung basierend auf Signalqualitätsmessungen geodätischer GNSS-Empfänger. Dissertation, Technische Universität Dresden, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften.

Smyrniaos, M.; Schön, S.; Nicolás, M. L. (2013): Multipath Propagation, Characterization and Modeling in GNSS. In: Geodetic Sciences-Observations, Modeling and Applications. Shuanggen Jin, IntechOpen.

Teunissen, P.; Montenbruck, O. (2017): Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Springer, Wien/New York.

Vogel, H.; Gerthsen, C. (2013): Gerthsen Physik. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin/Heidelberg.

Wieser, A. (2002): Robust and fuzzy techniques for parameter estimation and quality assessment in GPS. Dissertation, TU Graz, Ingenieurgeodäsie. Shaker, Aachen.

Wübbena, G.; Bagge, A.; Boettcher, G.; Schmitz, M.; Andree, P. (2001): Permanent object monitoring with GPS with 1 millimeter accuracy. In: Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2001), 11.–14. September 2001, Salt Lake City, UT, 1000–1008.

Zhang, L.; Schwieger, V. (2016): Improving the Quality of Low-Cost GPS Receiver Data for Monitoring Using Spatial Correlations. In: Journal of Applied Geodesy 10(2016)2, 119–129.

Zimmermann, F. (2019): Analysis and mitigation of site-dependent effects in static and kinematic GNSS applications. Dissertation, Universitäts- und Landesbibliothek Bonn.

Zimmermann, F.; Eling, C.; Kuhlmann, H. (2017): Empirical assessment of obstruction adaptive elevation masks to mitigate site-dependent effects. In: GPS Solutions 21(2017)4, 1695–1706.

Zimmermann, F.; Holst, C.; Klingbeil, L.; Kuhlmann, H. (2018): Accurate georeferencing of TLS point clouds with short GNSS observation durations even under challenging measurement conditions. In: Journal of Applied Geodesy 12(2018)4.

Zimmermann, F.; Schmitz, B.; Klingbeil, L.; Kuhlmann, H. (2019): GPS Multipath Analysis using Fresnel Zones. In: Sensors 19(2019)1, 25.

## M. Sc. Ansgar Dreier

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT BONN – INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATION

Nussallee 17 | 53115 Bonn  
dreier@igg.uni-bonn.de



## Dr.-Ing. Florian Zimmermann

BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE REFERAT GEODÄSIE UND FERNERKUNDUNG (M5)

Am Mainzer Tor 1 | 56068 Koblenz  
zimmermann@bafg.de



## Dr. rer. nat. Lasse Klingbeil

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT BONN – INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATION

Nussallee 17 | 53115 Bonn  
klingbeil@igg.uni-bonn.de



## Dr.-Ing. Christoph Holst

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT BONN – INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATION

Nussallee 17 | 53115 Bonn  
c.holst@igg.uni-bonn.de



## Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heiner Kuhlmann

RHEINISCHE FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT BONN – INSTITUT FÜR GEODÄSIE UND GEOINFORMATION

Nussallee 17 | 53115 Bonn  
heiner.kuhlmann@uni-bonn.de



Manuskript eingereicht: 09. 10. 2020 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet