

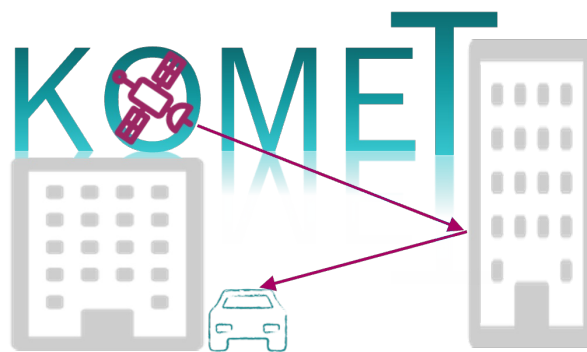
KOMET

Schlussbericht des Instituts für Erdmessung der Leibniz Universität Hannover zum Verbundvorhaben

Korrektur von GNSS-Mehrwegeffekten für die zuverlässige Eigenlokalisierung von hochautomatisierten Fahrzeugen in innerstädtischen Bereichen (KOMET)

FKZ-Number: 19 A20002 C

Ruwisch F., Kersten T. und Schön, S.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

KOMET

Schlussbericht des Instituts für Erdmessung der
Leibniz Universität Hannover zum
Verbundvorhaben

Korrektur von GNSS-Mehrwegeffekten für die
zuverlässige Eigenlokalisierung von
hochautomatisierten Fahrzeugen in
innerstädtischen Bereichen (KOMET)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter der Förderungsnummer 19 A20002 C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Förderkennzeichen (FKZ):	19 A20002 A–C
Fördername:	KOMET
Förderkategorie:	Verbundvorhaben
Konsortium:	Robert Bosch GmbH Institut für Erdmessung Geo++ GmbH
Laufzeit Verbundvorhaben:	Mai 2020 – Oktober 2023

Impressum


Editor

Leibniz Universität Hannover
Institut für Erdmessung (IfE)
Professur Positionierung und Navigation
30167 Hannover

Projektleitung

Dr. Christian Skupin
in Kooperation mit
Dr. Temmo Wübbena
Prof. Dr. Steffen Schön 
Dr. Tobias Kersten 

Autoren

– *Institut für Erdmessung*
Fabian Ruwisch 
Tobias Kersten 
Steffen Schön 

Gestaltung und Satz

Leibniz University Hannover Report Style, Institut für Erdmessung (IfE) by Dr. Tobias Kersten

Version

July 2024

Eine elektronische Version dieser Arbeit ist frei verfügbar unter:
URL: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/17977>
DOI: [10.15488/17843](https://doi.org/10.15488/17843)

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Veröffentlichung (Publikation)
3. Titel Schlussbericht des Instituts für Erdmessung (der Leibniz Universität Hannover) zum Verbundvorhaben Korrektur von GNSS-Mehrwegeffekten für die zuverlässige Eigenlokalisierung von hochautomatisierten Fahrzeugen in innerstädtischen Bereichen (KOMET)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Ruwisch, Fabian; Kersten, Tobias; Schön, Steffen;	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2023
	6. Veröffentlichungsdatum 30.07.2024
	7. Form der Publikation Document Control Sheet
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Leibniz Universität Hannover - Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie - Institut für Erdmessung Schneiderberg 50 30167 Hannover	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19A20002C
	11. Seitenzahl 64
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Scharnhorststraße 34-37, D-10115 Berlin, Deutschland Projekträger: TÜV-Rheinland, Am Grauen Stein, D-51105, Köln, Deutschland	13. Literaturangaben 30
	14. Tabellen 8
	15. Abbildungen 34
16. DOI (Digital Object Identifier) 10.15488/17843	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projekträger: TÜV-Rheinland, Am Grauen Stein, D-51105, Köln, Deutschland am 18.07.2024	
18. Kurzfassung Der vorliegende Schlussbericht fasst die Ergebnisse des dreieinhalbjährigen Verbundvorhabens KOMET zusammen, in dem skalierbare GNSS-Korrekturdaten für das autonome Fahren in innerstädtischen Bereichen entwickelt, analysiert und umgesetzt wurden. Der hier vorliegende Schlussbericht behandelt speziell die Forschungsanteile des Institut für Erdmessung im Kontext des Verbundvorhabens.	
19. Schlagwörter GNSS, Feature maps, GNSS Residuen, Autonomes Fahren, GNSS-Mehrwegeffekte	
20. Verlag Leibniz Universität Hannover	21. Preis

Entwurf

Document control sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Veröffentlichung (Publikation)	
3. title Schlussbericht des Instituts für Erdmessung (der Leibniz Universität Hannover) zum Verbundvorhaben Korrektur von GNSS-Mehrwegeffekten für die zuverlässige Eigenlokalisierung von hochautomatisierten Fahrzeugen in innerstädtischen Bereichen (KOMET)		
4. author(s) (family name, first name(s)) Ruwisch, Fabian; Kersten, Tobias; Schön, Steffen	5. end of project 31.10.2023	6. publication date 30.07.2024
	7. form of publication Document Control Sheet	
	8. performing organization(s) name, address Leibniz Universität Hannover - Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie - Institut für Erdmessung Schneiderberg 50 30167 Hannover	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Scharnhorststraße 34-37, D-10115 Berlin, Deutschland Projekträger: TÜV-Rheinland, Am Grauen Stein, D-51105, Köln, Deutschland	9. originators report no.	
	10. reference no. 19A20002C	
	11. no. of pages 64	
	13. no. of references 30	
	14. no. of tables 8	
15. no. of figures 34		
16. DOI (Digital Object Identifier) 10.15488/17843		
17. presented at (title, place, date) Projekträger: TÜV-Rheinland, Am Grauen Stein, D-51105, Köln, Deutschland am 18.07.2024		
18. abstract This final report summarises the results of the three-and-a-half-year joint project KOMET, in which scalable GNSS correction data for autonomous driving in inner-city areas was developed, analysed and implemented. This final report focuses specifically on the research conducted by the Institut für Erdmessung in the context of the joint project.		
19. keywords GNSS, Feature maps, GNSS residuals, autonomous driving, GNSS multipath effects		
20. publisher Leibniz Universität Hannover	21. price	

Entwurf

Kurzfassung

Die Eigenlokalisierung stellt eine hochrelevante Funktion für die Sicherheit des automatisierten Fahrens dar. Der GNSS (Global Navigation Satellite System)-Sensor nimmt hierbei eine Sonderstellung ein, da nur dieser zum einen eine globale Eigenlokalisierung in einem übergeordneten Koordinatensystem ermöglicht. Zum anderen weist er gegenüber anderen Sensoren, wie Video und Radar, wichtige komplementäre Eigenschaften für die Sensorfusion zur Absicherung der Ortung auf. Die notwendige Präzision im Subdezimeterbereich ist bei GNSS-Sensoren nur durch die Trägerphasenbeobachtung gewährleistet. Die im Fahrzeugbereich verwendete Code-Range (Codemessung) liefert aufgrund ihres hohen Messrauschens nicht die notwendige Auflösung der Ortung. Aufgrund der komplexen GNSS-Signalausbreitung (Signalabschwächung, Mehrwegeeffekte) in urbanen Umgebungen ist die Bestimmung einer genauen und robusten Positionslösung eine besondere Herausforderung - z.B. bei der Ortung in engen Straßenschluchten. Das Forschungsvorhaben fokussiert sich daher auf die Entwicklung und Anwendung innovativer Korrekturverfahren zur Reduktion auftretender Mehrwegeeffekte, um die trägerphasenbasierte GNSS-Ortung zu verbessern.

Nach heutigem Stand der Technik ist eine zuverlässige Ortung im innerstädtischen Umfeld für das hochautomatisierte Fahren nur durch eine umfassende Fusion eines GNSS-Sensors mit verschiedenen kostspieligen Sensoren (Radar, Video, Lidar) zu erreichen. Gelingt es, den ohnehin notwendigen GNSS-Sensor mit den zu entwickelnden Korrekturverfahren in seiner Genauigkeit und Robustheit zu steigern, kann die sichere Lokalisierung mit einem wesentlich geringeren Aufwand für weitere Sensoren realisiert werden. Das Vorhaben leistet einen Beitrag zum Ziel, dem hochautomatisierten Fahren im innerstädtischen Bereich zu wirtschaftlichem Erfolg zu verhelfen.

Das fahrerlose Fahren (wie Robo-Taxi und/oder -Shuttle) benötigt maximale Zuverlässigkeit der Ortung. Beim heutigen Stand der Technik ist u.a. eine Remote-Steuerung vorgesehen, welche im Bedarfsfall die manuelle Fernsteuerung des Fahrzeugs übernimmt. Mit dem hier zu entwickelnden Verfahren wird die Zuverlässigkeit der Ortung gesteigert, sodass das fahrerlose Fahren mit weniger Remote-Eingriffen effizienter realisiert werden kann.

Das Erreichen der im Vorhaben gefassten Ziele und die Bearbeitung der sechs definierten Pakete basiert auf den folgenden, wesentlichen Arbeitsschritten. Der erste Schritt besteht in der Definition und Erhebung der für das automatisierte Fahren relevanten Situationen und Anforderungen. Die Erhebung einer einzigartigen GNSS-Datenbasis für kinematische und statische Situationen bildet den zweiten Arbeitsschritt und stellt gleichzeitig die für das Vorhaben notwendigen Untersuchungsdaten bereit. Der dritte Schritt befasst sich mit der Quantifizierung der Fehlereinflüsse rein GNSS basierter, urbaner Ortung und liefert eine Vergleichslösung, die nach aktuellem Stand der Wissenschaft und Technik erreichbar ist und deren Qualität im Rahmen des Vorhabens gezielt verbessert wird.

Identifikation, Definition und Charakterisierung der hierzu notwendigen Parameter erfolgen im vierten Arbeitsschritt. Die dominierenden und als degradierend identifizierten Einflussfaktoren werden im fünften Arbeitsschritt in einer kompakten Form modelliert und Korrekturen für die Berücksichtigung abgeleitet sowie Schnittstellen und Formate zu deren Austausch entwickelt. Die Implementierung und Erprobung von geeigneten Verfahren zur Anwendung der neuen Korrekturen im GNSS-Empfänger erfolgt im sechsten Arbeitsschritt. Zu Abschluss des Verbundprojekts wird eine Demonstration des Gesamtkonzeptes bei Anwendung im realen Umfeld durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurze Darstellung zum Vorhaben	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Voraussetzungen zur Vorhabensdurchführung	2
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4	Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik zu Vorhabenbeginn	4
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2	Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse des Vorhabens	9
2.1	AP0: Projektmanagement	9
2.2	AP1: Anforderungsanalyse	9
2.3	AP2: Erhebung der GNSS-Datengrundlage	10
2.4	AP3: Quantifizierung der GNSS Ortungsgenauigkeit im urbanen Raum	15
2.5	AP4: Charakterisierung des GNSS-Signals im urbanen Raum	21
2.6	AP5: Modellierung von GNSS-Signalcharakteristiken und Korrekturdatenkonzeption	33
2.7	AP6: Entwicklung und Bewertung von Korrekturverfahren	39
3	Zahlenmäßiger Nachweis	43
3.1	Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises	43
3.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	44
3.3	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	44
3.4	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei Dritten	45
3.5	Veröffentlichungen und Abschlussarbeiten	46
3.5.1	Begutachtete Veröffentlichungen	46
3.5.2	Nicht begutachtete Veröffentlichungen	47
3.5.3	Präsentationen und Poster	47
3.5.4	Abschlussarbeiten	47
	Literatur	49

1

Kurze Darstellung zum Vorhaben

1.1. Aufgabenstellung

Das hochautomatisierte Fahren hat das Potential zukünftig die Mobilität in den Städten zu revolutionieren. Das städtische Umfeld stellt dabei sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit und Verfügbarkeit der Eigenlokalisierung von Fahrzeugen, beispielsweise für das Durchfahren von komplexen Kreuzungen oder die sichere Bewegung in engen Straßenschluchten (Gasser u. a., 2015). Dabei ist GNSS¹ der einzige Sensor, der eine absolute Lokalisierung für das hochautomatisierte Fahren erlaubt. GNSS weist darüber hinaus gegenüber der Lokalisierung mit anderen Sensoren wie Video und Radar unverzichtbare komplementäre Eigenschaften für die Sensorfusion zur Absicherung der Ortung auf.

Ein großes, heute weitgehend noch ungelöstes Problem stellt die Mehrwegeausbreitung in stark bebauten Regionen dar, d.h. die Reflexion und Beugung von GNSS-Signalen an Gebäuden oder anderen Fahrzeugen. Sie führt sowohl für die auf code- als auch für die trägerphasenbasierte Navigation zu einer signifikanten Verschlechterung der resultierenden Ortungsgenauigkeit. Während für die codebasierte GNSS-Ortung eine Vielzahl an Untersuchungen vorliegen, die Positionsfehler in der Größenordnung bis 100 m aufzeigen, fehlen durchgreifende Arbeiten und Untersuchungen für die trägerphasenbasierte Navigation im urbanen Umfeld. Trägerphasenbeobachtungen werden für das automatisierte Fahren auf Grund der hohen Genauigkeitsanforderungen (zuverlässige Ortung im Dezimeter-Bereich) allerdings unbedingt benötigt. Aufgrund der Mehrwegeeffekt-Problematik setzen derzeitige Konzepte² nach initialer Lokalisierung mittels GNSS zur hochgenauen Lokalisierung im städtischen Bereich primär auf bildgebende Sensorik (Video, Lidar³, Radar), mit dem Nachteil, dass diese zum einen um Größenordnungen kostspieliger sind als der GNSS-Sensor und zum anderen nur eine relative Positionslösung ermöglichen. Das Potential zur hochgenauen direkten und absoluten Lokalisierung mittels eines wirtschaftlichen Sensor-Setups, in welchem insbesondere die GNSS-Sensorik einen wesentlichen Beitrag leistet, ist damit noch nicht ausgeschöpft. Ansatz dieses Vorhabens ist deshalb die Entwicklung von wirtschaftlich-effizienten Korrekturverfahren für Mehrwegeeffekte. Dies steigert die Ortungsgenauigkeit und Robustheit der Eigenlokalisierung bei Verwendung von Code-Ranges und hochgenauer Trägerphasenbeobachtungen im urbanen Umfeld signifikant und qualifiziert somit den GNSS-Sensor für das automatisierte Fahren in der Stadt. Als Ergebnis steht ein verbessertes Verfahren zur Interpretation der Fahrumgebung zur Verfügung, mit dem die wirtschaftliche Realisierbarkeit von hoch- und vollautomatisierten Fahrfunktionen in städtischen Bereichen verbessert wird.

¹GNSS: Global Navigation Satellite System: zusammenfassender Begriff aller individuellen nationalen satellitenbasierten Ortungssysteme

²z.B. City - Automatisierte Fahrzeuge und Intelligenter Verkehr, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Online: https://www.atcity-online.de/project/_Projekt.html

³Lidar: light detection and ranging, eine radarbasierte Methode zur Abstands- und Geschwindigkeitsbestimmung

Hierzu muss zum einen der Fehlereinfluss der Mehrwegeausbreitung auf die Ortungsgenauigkeit quantifiziert werden. Zum anderen müssen die zugrundeliegenden Wirkzusammenhänge zwischen der GNSS-Signalcharakteristik unter Beeinflussung der Mehrwegeausbreitung und der resultierenden Ortungsgenauigkeit modelliert werden, um schließlich Korrekturverfahren bereitstellen zu können, die den Fehlereinfluss durch die GNSS-Mehrwegeausbreitung signifikant reduzieren.

1.2. Voraussetzungen zur Vorhabensdurchführung

Das Vorhaben KOMET zielt auf die Fördermaßnahme Automatisiertes Fahren innerhalb des Technologieförderprogrammes Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi/BMWK). Diese Fördermaßnahme vereint Ziele der Zukunftsaufgaben Intelligente Mobilität, Digitale Wirtschaft und Gesellschaft und der Hightech-Strategie – Innovationen für Deutschland der Bundesregierung bzw. deren ressortübergreifenden Forschungs- und Innovationsaktivitäten und setzt sich zusammen aus den Säulen Innovative Fahrzeuge und Automatisiertes Fahren.

Zentrales Ziel des Fachprogramms ist die Steigerung der Innovationskraft von Unternehmen in Deutschland durch stärkere Vernetzung innerhalb der Wirtschaft und Wissenschaft auf Grundlage anwendungsbezogener Projekte und Qualifizierung des akademischen Nachwuchses zur Optimierung des Technologie- und Erkenntnistransfers.

Im Einklang mit den förderpolitischen Zielen des Fachprogramms bezieht sich das Verbundprojekt KOMET auf die Programmsäule Automatisiertes Fahren und stellt die technologischen Entwicklungen - insbesondere der Schwerpunkte *Hochgenaue Lokalisation* sowie *Neuartige Verfahren zur Datenfusion und -verarbeitung* in den Fokus (siehe Abb.1.1). Das innovative Verbundprojekt KOMET setzt zur Bearbeitung und Beantwortung der aktuell offenen und wichtigen Fragestellungen hinsichtlich der hochpräzisen Eigenlokation unter urbanen Bedingungen gezielt auf die Kompetenz und Synergie eines Industriepartners, eines KMU und einer universitären Einrichtung mit dem Ziel, vorhandene Forschungs- und Entwicklungsgebiete sowie individuelle Fähigkeiten der einzelnen Partner in einem Gesamtvorhaben zu verknüpfen und eine nachhaltige Stärkung des Wissenschafts- und Innovationsstandortes Deutschlands zu gewährleisten. Zusätzlich werden im Rahmen von KOMET Grundlagen zur Standardisierung geschaffen, die die Anschlussfähigkeit und damit verbunden eine weitreichende Nutzung der Ergebnisse im Produktivbetrieb begünstigen sollen.

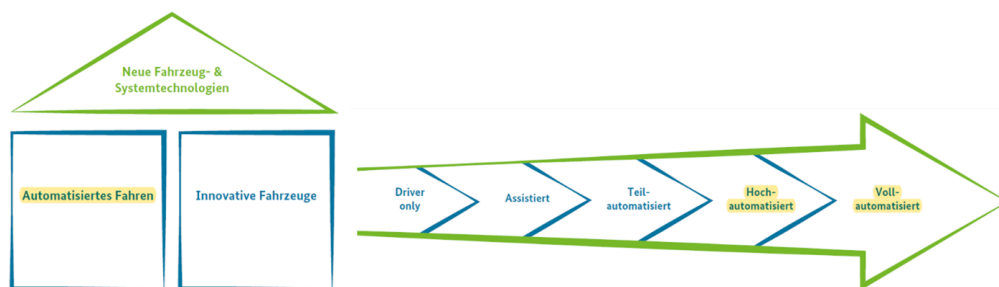


Abbildung 1.1: Die Programmsäulen und Automatisierungsgrade (nach BAST-Definition (Gasser u. a., 2012; BMWI, 2015)) und Integration von KOMET in den Gesamtkontext

Die gemeinsame Arbeitsgrundlage der Projektpartner ist hierbei die Charakterisierung des unter komplexen Beeinträchtigungen stehenden elektromagnetischen GNSS-Signals in innerstädtischen Bereichen mit dem Ziel, eine verbesserte Ortung in einen Prototypen zu implementieren.

Orientiert an den förderpolitischen Zielen weist das Projekt eine enge kooperative und synergetische Zusammenarbeit von Wissenschaft (IfE- Leibniz Universität Hannover) und Wirtschaft (Bosch GmbH) unter Einbeziehung eines KMU (Geo++) auf. Die wissenschaftliche Fragestellung ist in einen deutlichen Industriebezug eingebettet. Eine praxisnahe Qualifizierung des akademischen Nachwuchses ist durch

die Möglichkeit zum Erstellen einer Promotion gegeben. Dies wird durch den Verbundpartner IfE im Rahmen der Kooperation prinzipiell ermöglicht.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Arbeitsprogramm umfasste unter Berücksichtigung der in Abschnitt 1.1 und 1.2 beschriebenen Ziele die folgend dargelegten Aufgaben und erforderte die angegebene Methodik. Die Arbeiten waren auf einen Zeitraum von drei Jahren vorgesehen. Das Gesamtvorhaben verteilte sich auf insgesamt sechs große Arbeitspakete (vgl. Tab. 1.1), die entsprechend des Mengengerüstes auf die jeweiligen Partner Bosch/IfE/Geo++ verteilt sind. Nach der Übersichtsdarstellung wird die zu verwendende Methodik anhand der detaillierten Arbeitspläne beschrieben.

Die Handlungsschwerpunkte der einzelnen Arbeitspakete werden folgend zur Übersicht noch einmal zusammengefasst.

In AP1 wurden die Anforderungen an die Ortungskomponente durch verschiedene Zielanwendungen des automatisierten Fahrens dargelegt. Es wurden hinsichtlich der GNSS-Ortung im städtischen Umfeld relevante Situationen automatisierter Fahrfunktionen identifiziert, anhand derer im Projektverlauf die technischen Ergebnisse gespiegelt wurden.

In AP2 wurde die Erhebung von vorhabensspezifischen GNSS-Grunddaten und Referenzlösungen vorbereitet und durchgeführt. Hierzu zählen Aufbau und Inbetriebnahme des speziellen Messequipments, Planung und Durchführung der Messungen als auch das Datenmanagement.

In AP3 wurden die erhobenen Daten hinsichtlich der resultierenden Ortungsgenauigkeiten in spezifischen Situationen des städtischen Umfelds untersucht.

In AP4 wurden insbesondere für die als kritisch identifizierten Situationen die erhobenen Daten hinsichtlich der zugrundeliegenden GNSS-Signalcharakteristiken (d.h. die durch Mehrwegeeffekte beeinflussten GNSS-Signaleigenschaften) analysiert. Es wurden anhand der GNSS-Signalcharakteristiken die dominierenden signaltechnischen Einflussfaktoren identifiziert und charakterisiert, die zu einer Degradation der Ortungsgenauigkeit führen.

In AP5 wurde eine neuartige Methodik entwickelt, die GNSS-Signalcharakteristiken in einer kompakten Weise zu modellieren, so dass diese in Form eines kompakten einheitlichen Datensatzes unter Anwendung statistischer Methoden repräsentiert und kartiert werden können. Auf Grundlage dieser

Tabelle 1.1: Ressourcenplanung der Arbeitspakete verteilt auf die beteiligten Projektpartner

Aufgabe	Aufwand Personenmonate			
	Bosch	IfE	Geo++	Σ
AP0 Management	6,00	3,00	3,00	12,00
AP1 Anforderungsanalyse	5,00	0,50	0,50	6,00
AP2 Erhebung GNSS Datengrundlage	18,70	12,95	5,86	37,51
AP3 Quantifizierung der GNSS-Ortungsgenauigkeit	11,25	14,75	1,50	27,50
AP4 Charakterisierung des GNSS-Signals	15,70	15,80	13,50	45,00
AP5 Modellierung von GNSS-Signalcharakteristiken und Konzeption von Korrekturdaten	18,00	7,70	24,00	49,70
AP6 Entwicklung und Bewertung von Korrekturverfahren	21,80	17,30	33,60	72,70
Σ	96,45	72,00	81,95	250,40

modellierten GNSS-Mehrwegeffekte wurden die Korrekturen zur Kompensation der Mehrwegeffekte bei der GNSS-Lokalisation abgeleitet.

In AP6 wurden Korrekturverfahren zur Verwendung der modellierten GNSS-Signalcharakteristiken und Korrekturen im Empfänger entwickelt und erprobt. Hierzu zählten insbesondere die Ausarbeitung eines technischen Architekturkonzepts, die Entwicklung von Algorithmen zur Verarbeitung der Korrekturen als auch die prototypische Umsetzung zur Erprobung der neuen Verfahren.

1.4. Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik zu Vorhabenbeginn

Die Verwendung von GNSS zur Fahrzeug-Eigenlokalisierung unter Berücksichtigung erhöhter Anforderungen an die Ortungsgenauigkeit erfährt derzeit durch die Zielanwendung für das hochautomatisierte Fahren sowohl in der Industrie als auch im wissenschaftlichen Umfeld stark an Bedeutung.

In der Industrie hat Bosch eines der weltweit ersten Steuergeräte zur GNSS-Lokalisierung für das hochautomatisierte Fahren auf Autobahnen entwickelt, welches den für diesen Anwendungsfall erhöhten Anforderungen hinsichtlich Ortungsgenauigkeit, Integrität und Verfügbarkeit gerecht wird. Ein relevanter Baustein dabei ist die Anwendung von Korrekturdaten, die redundant sowohl über Satellit als auch über Mobilfunk bereitgestellt werden können. Mit Hilfe dieser Korrekturen werden die satellitenspezifischen und atmosphärischen Fehlereinflüsse (im wesentlichen Satellitenbahnfehler, Satellitenuhrfehler, Code- und Phasen-Biases, sowie ionosphärische und troposphärische Refraktionseffekte) ausgeglichen. Die Firma Geo++ hat für die Bereitstellung entsprechender Korrekturdaten herausragende Kompetenz. Das Kernprodukt Geo++ GNSMART nimmt die GNSS-Beobachtungsdaten von einem Netzwerk von Referenzstationen an und extrahiert mit Hilfe von mathematischen Modellen die entsprechenden Korrekturen, die dann wiederum in sowohl proprietären als auch standardisierten Formaten den Nutzern zur Verbesserung der Positionierung zur Verfügung gestellt werden. Ferner werden Informationen zur Verlässlichkeit der Korrekturen verarbeitet. Letzteres ist insbesondere erforderlich, um die Integrität der GNSS-basierten Ortung für die sicherheitskritische automatisierte Fahraufgabe zu ermöglichen. Die Anwendung der bestehenden GNSS-Technologie im urbanen Raum birgt jedoch Herausforderungen, die noch nicht ausreichend behandelt sind. Um in Zukunft die GNSS-Lokalisierung auch im innerstädtischen Bereich mit hinreichender Genauigkeit zu realisieren und damit die Ortung automatisierter Fahrzeuge durch Verwendung des GNSS-Sensors weiterhin wirtschaftlich abzubilden, sind Innovationen erforderlich. Insbesondere das Anbringen von Korrekturen zur Kompensation von Beobachtungsfehlern durch Umweg- und Mehrwegsignale verspricht hierbei deutliche Verbesserung in Genauigkeit und Verfügbarkeit der GNSS Positionierung.

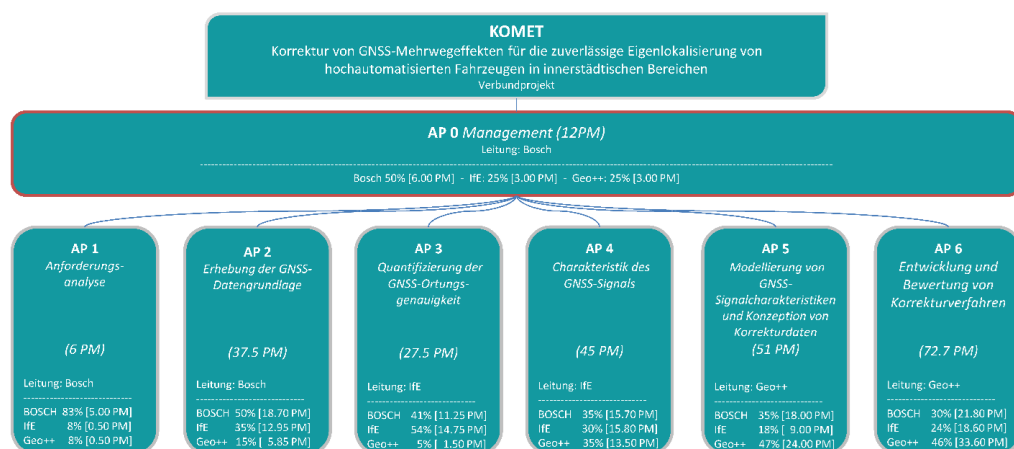


Abbildung 1.2: Übersicht der Arbeitspaketstruktur

Im wissenschaftlichen Umfeld laufen aktuell Arbeiten zum Thema rein GNSS-basierter Lokalisierung im städtischen Umfeld, die sich generell in zwei Konzepte untergliedern lassen:

1. Das erste Konzept zielt auf den Ausschluss von Satelliten ohne direkte Sichtverbindung (NLOS⁴) in der GNSS-Positionsrechnung (z.B. Meguro u. a. (2009)): wie z.B. auf der ION 2018 - der weltweit größten Konferenz zum Thema GNSS - zu sehen, verfolgen die Mehrzahl der publizierten wissenschaftlichen Arbeiten diesen Ansatz. Hierbei gilt es Satelliten zu ignorieren, die keine direkte Sichtverbindung zum Empfänger haben (z.B. Hsu u. a. (2017)). Dies hat jedoch den Nachteil, dass dadurch höhere DOP⁵ -Werte zu erwarten sind, sodass durch eine ungünstigere Geometrie der verbleibenden Satelliten die resultierende Genauigkeit reduziert wird. Zum anderen geht damit auch eine Reduktion der GNSS-Verfügbarkeit einher, wodurch die innere Zuverlässigkeit der Positionslösung minimiert und damit die Anforderungen an das hochautomatisierte Fahren nicht erfüllt werden.
2. Ansätze des zweiten Konzeptes verfolgen die Berücksichtigung von NLOS-Satelliten unter Verwendung von 3D-Stadtmodellen
 - ▶ Durch Anwendung von Raytracer (einem Strahlensuchverfahren) und einem Extended Kalmanfilter werden für Positionshypothesen die GNSS-Pseudorange prädiziert und mit den gemessenen verglichen. Die Positionshypothese mit der größten Übereinstimmung wird als aktuelle Position angenommen (Bourdeau u. a., 2012; Sahmoudi u. a., 2015; G. Zhang und Hsu, 2018)
 - ▶ Shadow-Matching: Ähnlich dem zuvor genannten Verfahren; das 3D-Stadtmodell dient hier der Klassifizierung von LOS⁶/NLOS-Satelliten über eine Schwellwert-Entscheidung der zugrundeliegenden Signalleistung des jeweiligen Satelliten. Die LOS/NLOS-Klassifikation dient als Kriterium zur Auswahl der wahrscheinlichsten Positionshypothese (Adjrad und P. D. Groves, 2018; Irish u. a., 2015)
 - ▶ Urban-Trench-Model: Unter Verwendung des 3D-Stadtmodells wird mittels heuristischer Modelle ein Pseudorange-Fehler prädiziert und als Korrektur herangezogen (z.B. Peyraud u. a. (2013) und Hsu u. a. (2016))

Nachteilig bei diesen Verfahren ist die vorausgesetzte Verfügbarkeit möglichst genauer 3D-Umfeldmodelle. Ferner beschränkt die Genauigkeit der Modelle die erreichbare Genauigkeit dieser Verfahren. Des Weiteren ist die Anwendung von Raytracing-Verfahren sehr aufwändig in der Berechnung, vgl. Lau und Cross (2007). Dies ist insbesondere auch deshalb ungünstig, da in diesem Fall der Berechnungsaufwand etwa proportional mit der Anzahl der zu positionierenden Fahrzeuge skaliert, wodurch die wirtschaftliche Verwendung von derartigen Ansätzen in größerem Rahmen nicht gewährleistet ist.

Beispielhaft sei auf folgende öffentlich geförderte Projekte im Kontext der Lokalisation zur Anwendung für das automatisierte Fahren unter Verwendung von GNSS eingegangen.

Ein aktuelles Projekt, bei der die Fusion von verschiedenen Kamerasystemen und Fern- sowie Nahradarsystemen in Kombination eines GNSS-Sensors eingesetzt werden, ist das Forschungsvorhaben „See-Meile“⁷. In diesem von der öffentlichen Hand und Unternehmen finanzierten Forschungsvorhaben werden autonom fahrende Kleinbusse unter realen Bedingungen, beginnend mit dem Sommer 2019, im öffentlichen Straßenraum erprobt. Das Konzept in diesem Vorhaben beinhaltet jedoch keine besonderen Maßnahmen zur Optimierung der GNSS-Beobachtungen (Korrekturen für Code-Ranges oder Trägerphasen). Ähnlich wie in anderen öffentlich geförderten Projekten im Kontext automatisierter Fahrfunktionen unter Verwendung von Umfoldsensoren zur Lokalisation (wie z.B. @City) dient der

⁴NLOS: non line-of-sight, beschreibt die indirekte Sichtverbindung zwischen GNSS-Satellit und Empfänger

⁵DOP: dilution of precision, beschreibt die Qualität der GNSS-Positionslösung anhand geometrischer Verhältnisse

⁶LOS: line-of-sight, beschreibt die direkte Sichtverbindung zwischen GNSS-Satellit und Empfänger

⁷See-Meile: Erprobung und Einsatz eines hochautomatisierten Kleinbusses auf im öffentlichen Berliner Straßenraum, finanziert durch die Senatsverwaltungen Wirtschaft, Energie und Betriebe sowie Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG), dem Bezirksamt Reinickendorf, den Berliner Wasserbetrieben und weiteren Unternehmen, Webseite: <https://www.see-meile.com/>

GNSS-Sensor im Vorhaben „See-Meile“ im Wesentlichen zur Relevanzfilterung bei Bereitstellung von Landmark-Daten zur Verwendung dieser in optischen sowie radarbasierten Nah- und Fernbereichssensoren. Das Fahrzeug wird mit einer max. Geschwindigkeit von 15km/h fahren. Die Partner des Projektes HEAT⁸ hingegen planen, einen autonomen Kleinbus mit einer regulären Geschwindigkeit von 50km/h auf innerstädtischen Bereichen (zunächst entlang einer vorgegebenen Einsatzroute) einzusetzen. Die Überwachung wird durch die Leitstelle der Hamburger Hochbahn übernommen und ist Teil der städtischen Strategie für Intelligente Verkehrssysteme im Kontext automatisiertes und vernetztes Fahren. Derzeit werden durch die öffentliche Hand auch in Frankfurt, Bayern, Mainz und Nordrhein-Westfalen ähnliche Konzepte gefördert. In Brandenburg fährt ebenfalls seit Mitte Juli 2019 ein autonomer Bus auf der Linie 708 über öffentlichen Straßen (durch Wusterhausen/Ostprignitz-Ruppin), der bis Ende Juni 2020 unter Testbetrieb laufen wird. Dieses Projekt ist u.a. mit rund zwei Millionen Euro vom Bundesverkehrsministerium mitfinanziert.

Ziel dieser Vorhaben ist es, die Lücke des öffentlichen Nahverkehrs für entlegene Gebiete zu schließen, indem – kombiniert mit einer App – die Shuttles bei Bedarf angefordert werden können. Allen bisher geförderten Konzepten und Vorhaben fehlt jedoch die gesonderte Betrachtung des GNSS-Sensors und die Aufbereitung bzw. Verbesserung der GNSS-Datenverarbeitung, wie dies im Vorhaben KOMET vorgesehen ist.

Das abgeschlossene, DLR-geförderte Vorhaben Ghosthunter⁹ zielt auf die Entwicklung und den Einsatz GNSS basierter Navigationsalgorithmen zur Ermittlung einer genauen Fahrzeugtrajektorie, um darauf basierend eine Geisterfahrer Detektionsalgorithmus bereit zu stellen. Inhalt ist die Analyse und Berechnung einer differentiellen GNSS Lösung und Verknüpfung mit digitalen Karten (Map-Matching) um eine Warnung und Kollisionsgefahr voraussagen zu können. Das Einsatzfeld begrenzt sich auf Autobahnen und anbaufreien Bundesstraßen mit guten GNSS-Sichtbedingungen.

Ein weiteres von der öffentlichen Hand finanziertes und bereits abgeschlossenes Vorhaben im Bereich des teilautonomen Fahrens und Steigerung der Zuverlässigkeit hinsichtlich Ortung und Kollisionsschutz ist das Projekt LAESSI¹⁰. Dort wurde für die GNSS-Komponente auf das klassische Verfahren der Netzwerk-RTK-Strategie zurückgegriffen, um eine cm-genaue Positionierung im maritimen Bereich zu ermöglichen. In diesem Vorhaben wurden zunächst Grundvoraussetzungen geschaffen, um zukünftiges und teilautomatisiertes Fahren auf Binnenschiffahrtsstraßen zu ermöglichen. Eine Berücksichtigung von Korrekturen der GNSS-Beobachtungen bzw. Charakterisierung der GNSS-Signalbeeinträchtigungen waren kein zentrales Element des Vorhabens und wurden daher nicht gesondert betrachtet. Letztere werden insbesondere erfordert, sobald eine zuverlässige Ortung mittels GNSS auch in signaltechnisch beeinträchtigten Gebieten erreicht werden soll.

Das im Vorhaben KOMET lancierte Konzept grenzt sich somit von den bestehenden Konzepten dahingehend ab, dass GNSS-Korrekturdaten für Code-Ranges und Trägerphasen auf der Grundlage vorhandener Beobachtungen und nicht auf der Grundlage eines zusätzlichen Expertenwissens in Form von 3D-Umgebungsmodellen oder bildgebender Sensoren bereitgestellt und explizit in herausfordernden städtischen Umgebungen studiert werden. Auf diese Art und Weise werden die signaltechnischen Beeinträchtigungen direkt adressiert und ausgeglichen. Die hier verfolgte Idee basiert auf der Bereitstellung von Korrekturen der mehrwegebeeinflussten GNSS-Signale, um diese der GNSS-Prozessierung unter Berücksichtigung der umgebungsspezifischen Signaleigenschaften zuzuführen und eine präzise Positionslösung unter Verwendung der optimalen und aktuell verfügbaren Beobachtungen zu erreichen. Die Bereitstellung der Korrekturen geschieht dabei im Status des zu entwickelnden Prototypen in Analogie zum klassischen Konzept der RTK-Vernetzung auf Basis einer Referenzstation. Hierbei sollen

⁸HEAT: Hamburg Electric Autonomous Transportation, gefördert durch die Hochbahn Hamburg und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit; Webseite:
https://www.hochbahn.de/hochbahn/hamburg/de/Home/Naechster_Halt/Ausbau_und_Projekte/projekt_heat

⁹Ghosthunter: Telematiksystem gegen Geisterfahrer mit Hilfe von GNSS und digitalen Karten, DLR-gefördert (FKZ: 50NA1523), Universität Stuttgart, Institut für Ingenieurgeodäsie (IIG) und Institut für Raumfahrttechnik und Weltraumnutzung (ISTA), Universität der Bundeswehr München.

¹⁰LAESSI: Leit- und Assistenzsysteme zur Erhöhung der Sicherheit der Schifffahrt auf Inlandwasserstraßen, BMWi und DLR finanziert (FKZ: 03SX402D); Webseite:
https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10260/370_read-26534/#/gallery/30051

die auf den Beobachtungen vorhandenen Signalcharakteristiken modelliert und als Korrekturen der Positionslösung zugeführt werden. Das in KOMET verfolgte Konzept stellt damit einen innovativen Ansatz zur Steigerung von Ortungsgenauigkeit und Robustheit der GNSS-basierten Navigation im innerstädtischen Umfeld dar. Durch diesen Ansatz soll der GNSS-Sensor so für automatisierte Fahrfunktionen unter herausfordernden Bedingungen (innerstädtische Kubatur) nachhaltig qualifiziert werden.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Konsortium besteht aus einem Wirtschaftspartner (Robert Bosch GmbH (Bosch)), einem KMU (Geo++ GmbH (Geo++)) und einem wissenschaftlichen Partner (Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover (IfE)).

Bosch ist als Systemanbieter für das hoch- und vollautomatisierte Fahren an der wirtschaftlichen Verwertung von Konzepten sowie der ganzheitlichen Betrachtung von Absicherungsansätzen zur präzisen Navigation und Eigenlokation interessiert. Der Partner Geo++ ist auf dem Gebiet der empfangernunabhängigen Implementierung und dem Vertrieb von GNSS-Produkten sowie Komplettsystemen zur netzwerkbasierter Bereitstellung von Korrekturdaten auf verschiedenen Branchen markt- und wettbewerbspräsent. Das IfE ist durch Entwicklungen und wissenschaftliche Arbeiten im Bereich der stochastischen Modellierung und Korrektur von GNSS-Beobachtungen, der Charakterisierung und Kalibrierung von GNSS-Ausrüstungen sowie Entwicklung alternativer Navigationskonzepte spezialisiert.

Die bisherigen und aktuellen Arbeiten der Antragssteller werden folgend ausführlicher dargestellt. Die Fördermaßnahme Neue Fahrzeug und Systemtechnologien ermöglichen den Verbundpartnern IfE und Geo++ ihre Kompetenzen im Bereich der GNSS-basierten Lokation zu verknüpfen und sowohl zu intensivieren als auch erstmalig an einer solchen Fördermaßnahme teilzunehmen.

Die Robert Bosch GmbH gehört zu den international führenden Unternehmen im Kraftfahrzeugbereich mit Hauptsitz in Deutschland. Der Unternehmensbereich Mobility Solutions – ehemals Kraftfahrzeugtechnik – ist der größte Bereich und umfasst ein umfangreiches Produktangebot an Komponenten, Systemen und Dienstleistungen, die dazu beitragen die Mobilität sicher, sauber und sparsam darzustellen.

Die **Robert Bosch GmbH** verfolgt die Strategie sich als Systemanbieter für das hoch- und vollautomatisierte Fahren zu entwickeln und hat dazu die ganzheitliche Sicht auf die relevanten Komponenten inkl. der Betrachtung von Absicherungskonzepten. Im Bereich Ortung entwickelt und nutzt Bosch ein umfassendes Portfolio an Sensorik zur Anwendung für das hoch- und vollautomatisierte Fahren, so kommen neben Video und Radar insbesondere der GNSS-Sensor zum Einsatz [[Link](#)]¹¹. Bosch ist damit heute weltweit einer der ersten Anbieter eines Produkts zur GNSS-basierten Lokalisierung, welches den für das automatisierte Fahren geltenden strengen Anforderungen hinsichtlich funktionaler Sicherheit gerecht wird.

Am **Institut für Erdmessung** liegen langjährige Erfahrungen im Bereich der hochpräzisen GNSS-Auswertung und Korrektur systematischer Effekte vor. Im laufenden DFG-Graduiertenkolleg (Integrität und Kollaboration in dynamischen Sensornetzen) werden aktuell alternative Methoden zur Beschreibung der Integrität auf Basis von Intervallmathematik untersucht, die Beobachtungsabweichungen durch Fehlerbänder beschreiben (Dbouk und Schön, 2018) sowie Filteransätze zur kollaborativen Positionierung und Navigation von vernetzten Fahrzeugen in Sensornetzen, die den Mehrwert der Kollaboration herausarbeiten (García Fernández und Schön, 2018). In Kube u. a. (2012) und Kube u. a. (2018) wurde ein virtueller Empfänger entwickelt, der die GNSS-Signalkontinuität bei präzisen gekurvten Landeanflügen garantiert. Basierend auf dem Konzept wurden erste Anwendungen für die Brückendurchfahrt bei

¹¹Link: <https://www.youtube.com/watch?v=pduJsJr2ntY>

Binnenschiffen zur Vermeidung von Auswirkungen von Signalabrissen auf die Navigation betrachtet (Kersten u. a., 2018).

Im Bereich der Untersuchungen zu Mehrwegeausbreitungen und Antennen wurde ein Verfahren zur Bestimmung von Antennen Group-Delay Variationen erfolgreich entwickelt und getestet; für die praktischen Anwendungen konnte die Bedeutung der Korrekturen beispielsweise bei der richtigen Festsetzung der Mehrdeutigkeiten mit der häufig verwendeten Melbourne-Wübbena-Linearkombination in Kersten und Schön (2016) gezeigt werden. Mehrwegeeffekte für Trägerphasenbeobachtungen auf GNSS-Referenzstationen wurden im Vorhaben BERTA mittels Raytracing und Software Receivern untersucht, vgl. Smyrnaiois u. a. (2012) und Smyrnaiois u. a. (2013). Die Bedeutung der Eigenschaften der Empfangsantenne für Mehrwegeeffekte wurde herausgearbeitet (Smyrnaiois und Schön, 2015). Außerdem ist ein erweitertes Beschreibungsmodell (Smyrnaiois, 2016) entwickelt worden.

Das Leistungsspektrum der Firma **Geo++ GmbH** beinhaltet alle Komponenten für eine Positionsbestimmung mit GNSS. Das anerkannt hohe Know-how von Geo++ auf diesem Gebiet fließt in weltweit verbreitete und vielfältige Softwareprodukte und Komplettsysteme ein.

Geo++ ist der Hersteller der führenden und zukunftsweisenden GNSS Korrekturdatensoftware Geo++ GNSMART, die zur Erzeugung und Verbreitung von Korrekturdaten für DGNSS-Anwendungen dient. Die Einsatzmöglichkeiten reichen von regionalen GNSS Korrekturdiensten (z.B. SAPOS) bis zu kontinentalen und globalen flächendeckenden und untereinander vernetzten PPP und SSR Diensten (z.B. QZSS CLAS).

In diesem Konsortium nutzten die drei Partner die kooperative Synergie der jeweils individuellen Spezialisierungen, um die im Vorhaben anvisierten Arbeiten kosteneffizient und umfassend durchzuführen. Das IfE und Geo++ haben aktuell und auch bereits seit einigen Jahren immer wieder erfolgreiche Kooperationen zusammen durchgeführt wie unter anderem Seeber und Böder (2002), Darugna u. a. (2020), Darugna u. a. (2021) und Darugna (2021). Im KOMET-Konsortium entstand eine optimale Verbindung räumlich nahe gelegener Partner, die ihre individuellen Spezialisierungen bestens zwischen der wissenschaftlichen Entwicklung eines Prototyps vor dem Hintergrund einer wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit verzahnen können. Weiterhin ermöglichte die Konstellation jungen Mitarbeitern aus der Wirtschaft und Wissenschaft eine persönliche Weiterentwicklung mit der Möglichkeit zur begleitenden Promotion im entsprechenden Arbeitsfeld.

2

Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse des Vorhabens

2.1. AP0: Projektmanagement

In AP0 stellen die Partner die Abstimmung der Aufgabenbearbeitung sicher. Hierzu organisierte Bosch als Verbundkoordinator monatliche Abstimmungsmeetings, in denen die relevanten Aufgabenschritte der Partner Bosch, Geo++ und IfE koordiniert, priorisiert und in einem gemeinsamen Backlog gepflegt bzw. getrackt wurden. Darüber hinaus wurden unter-monatliche Deep-Dive Meetings zur Diskussion von aktuell relevanten Themen auf tieferer technischer Ebene vereinbart und durchgeführt.

2.2. AP1: Anforderungsanalyse

Inhalt des AP1 ist die Identifikation und Beschreibung relevanter *Use-Cases* (Anwendungsfälle). Ziel in diesem Arbeitspaket ist es, repräsentative kritische Situationen zu identifizieren, die für das automatisierte und/oder kooperative Fahren herausfordernd sind. Diese Situationen dienen als Grundlage und Beispielfälle, an denen sich die Forschung, Modellierung und Entwicklung in diesem Vorhaben orientiert. Letztendlich sollen die hier entwickelten Verfahren zur Steigerung der Robustheit, Wiederholbarkeit und Sicherheit der Eigenlokation in urbanen Bereichen führen. Die in diesem Arbeitspaket identifizierten Anwendungsfälle werden im Rahmen der Entwicklung der Korrekturen für Code-Ranges und Trägerphasen in den weiteren Arbeitspaketen wiederholt herangezogen und stützen so die Modellierung und die Entwicklung des Gesamtkonzeptes, um die Anforderungen an die Ortung entsprechend zu verfeinern. Diese verfeinerten Anwendungsfälle dienen abschließend als Grundlage zur Evaluation der entwickelten Verfahren in AP6.

In Zusammenarbeit mit den Partnern Bosch und Geo++ wurde ein Katalog kritischer Szenarien erstellt. Als Metrik zur Detektion kritischer Szenarien dient die Positionsqualität, die mittels DOP-Analyse aus dem Raytracer durch ein heuristisches Modell prädiziert wird. In individuellen Gesprächen wurden die Performanz-Kriterien zusammen mit dem Partner Bosch diskutiert und definiert. Anhand des Katalogs kritischer Szenarien wurden die im Sinne der Projektziele relevanten Straßenabschnitte identifiziert und definiert. Fünf symptomatische Testrouten wurden zusammen mit den Kollegen von Bosch und Geo++ ausgewählt. Diese Auswahl an Straßen dient wiederum als Vorinformation für die Bestimmung der Trajektorien für geplante kinematische Messkampagnen, die für den Spätsommer 2021 in Hannover geplant sind. Ein gemeinsames Dokument mit der Zusammenfassung der verschiedenen Szenarien wurde erstellt.

2.3. AP2: Erhebung der GNSS-Datengrundlage

Drei Szenarien-Klassen (statisch, pseudo-kinematisch und kinematisch) mit Fahrzeugträger werden in der Nordstadt Hannover geplant und an mehreren Tagen (aufgrund siderischer Wiederholung der GPS-Satellitenkonstellation) gemessen, um die Ursachen der Mehrwegeeffekte besser zu trennen:

1. statisch: auf Basis von Messungen mit einem statischen GNSS-Empfänger unter optimalen Empfangsbedingungen werden die Antennen-/Empfängerkombinationen hinsichtlich des Rauschverhaltens untersucht und das Analyse-Tooling entwickelt,
2. pseudo-kinematisch: auf Basis von Messungen mit einem GNSS-Empfänger, dessen Antenne auf einem Fzg-Dach installiert ist werden tagesweise in definierten äquidistanten Schritten (von 2cm) Fzg-Bewegungen realisiert um die Einflüsse bei Interaktion der Satellitenbewegung mit ausgewählten städtischen Bebauungssituationen zu untersuchen
3. kinematisch: auf Basis von Messungen mit einem sich bewegenden GNSS-Empfänger werden die Einflüsse bei Interaktion der Fahrzeugbewegungen und Satellitenbewegung in dynamischer Antennenumgebung untersucht.

In AP2 werden geeignete reale Umgebungssituationen identifiziert und dazu für die Aufnahme der Messdaten verschiedene statische und kinematische Szenarien definiert mit dem Ziel, die besonders kritischen Bedingungen für die GNSS-basierte Ortung im urbanem Raum zu identifizieren. Diese realen Umgebungssituationen werden in AP1 rückgespiegelt, wodurch eine Konkretisierung der in AP1 definierten Use-Cases erreicht wird.

Die in AP2 gewonnenen Messdaten werden als Grundlage für die Bearbeitung der anschließenden Arbeitspakete benötigt. Öffentlich zugängliche Daten bzw. Daten, die für diese Art der Analyse herangezogen werden könnten, stehen in der notwendigen Qualität und dem benötigten Umfang auf Repositorien oder zugangsbeschränkten Datendiensten bisher nicht zur Verfügung.

Nach Identifikation besonders herausfordernder Situationen durch Auswertung der gewonnenen Messdaten hinsichtlich der Ortungsgenauigkeiten in AP3 erfolgt in einem zweiten Schritt in AP4 die Auswertung der Messdaten in den besonders herausfordernden Situationen hinsichtlich der zugrundeliegenden GNSS-Signalcharakteristiken, zwecks weiterer Untersuchung der Ursachen auf signaltechnischer Ebene. Hierzu sind dedizierte Messungen erforderlich, bei welchen die relevanten Situationen wiederholt eingefahren werden, um eine empirische Analyse der GNSS-Rohdaten zu ermöglichen. Die hier erfassten GNSS-Daten dienen zugleich als Grundlage zur Ableitung und Anwendung von Korrekturen in AP5 und AP6.

Das Testgebiet *Nordstadt Hannover* nahe des Universitätscampus mit engen Straßenschluchten und erheblichen Abschattungen ist für die Untersuchungen ideal geeignet. Ein LoD2-Gebäudemodell (Format CityGML des Untersuchungsgebietes steht in verschiedenen Dateiformaten zur Verfügung. Die Gebäudemodelle werden zum einen genutzt, um die Vorauswahl der Test-Szenarien zu unterstützen und zum anderen, um die resultierenden Mehrwegeeffekte auf Plausibilität zu prüfen. Die vom IfE betriebenen Referenzstationen auf dem Universitätscampus (LUH-GNSS-Netz) stehen für die relative Positionierung und Vergleiche zur Verfügung und die räumliche Nähe zum IfE erleichtert letztlich die Logistik der GNSS-Messungen.

Als Ergebnis entsteht ein bisher einzigartiger GNSS-Datensatz. Dieser dient als reale Datenbasis für die Bearbeitung der Forschungsschwerpunkte und enthält sowohl die Referenzlösung (*Ground Truth*) sowie die GNSS-Rohmessungen und zugehörige aufgezeichnete GNSS-Korrekturdaten. Im Sinne eines Record/Replay-Ansatzes können diese einmal aufgenommenen Daten wiederholt zur Bearbeitung mit verschiedenen Hardware-Empfängern unter veränderten Bedingungen verwendet werden.

Statische Datenerhebung – Open Sky

Um die Abläufe und die Empfänger im gesamten Ensemble optimal einzustellen wurde eine initiale Messkampagne gestartet. Diese dient als wesentliche Vorbereitung der Datenerhebung in der Stadt. Die Erfassung erfolgte unter optimalen Bedingungen, um das vorhandene Rauschen der Sensoren zu analysieren und zu dokumentieren. Die Initiale Messung war zudem notwendig für:

- ▶ Testen der Antennen-/Empfängerkombinationen und optimale Konfiguration der Antennen-Empfänger-Kette,
- ▶ Vorbereiten der Toolings (Doppeldifferenzberechnung zur Residuenbestimmung und Beobachtungsmodellierung),
- ▶ Abschätzung der Beobachtungsqualität unter optimalen Bedingungen, insbesondere Rauschverhalten und systematische Variationen.

Tabelle 2.1: Verwendete GNSS Ausrüstung während der statischen Datenerhebung. * GNSS-Empfänger nur phasenweise verwendet bzw. nicht durchgängig betrieben. ** Mit dem Spirent Empfänger wurden HF-Streams für 10 Minuten aufgezeichnet.

Station	Receiver	ID	Antenne	ID	Uhr	Systeme
MSD8	JAVAD Omega 6	47	LEIAR25.R3 LEIT	9330001	SRS725	GREC
EE01	Septentrio PolaRx5TR	2521	LEIAR20 LEIM	20251010	Externer H-Maser	GREC
MATL	Septentrio Mosaic X5	3058681	MAT743GNSS L	29550	Intern	GREC
MATR	Septentrio Mosaic X5	3058604	MAT743GNSS R	29550	Intern	GREC
	IfEN SX3*	R0001	MAT743GNSS R	29550	Intern	GREC
NOV1	Septentrio PolaRx5TR	1372	NOV850 NONE	25B	Intern	GREC
	u-blox ZED F9P	5331	NOV850 NONE	25B	Intern	GREC
NOV2	Septentrio PolaRx5TR	1345	NOV850 NONE	13M	Intern	GREC
	u-blox ZED F9P	5272	NOV850 NONE	13M	Intern	GREC
	IfEN SX3*	R0001	NOV850 NONE	13M	Intern	GREC
	Spirent**	GSS6450	NOV850 NONE	13M	Intern	GREC
TAL1	u-blox ZED F9P	BOSCH	TW7972	59	Intern	GREC
TAL2	u-blox ZED F9P	5341	TW7972	60	Intern	GREC

Während des Experimentes wurde die in Abb. 2.1 und Tab. 2.1 zusammengestellte Konstellation von Geräten und Empfängern verwendet. Hierbei wurden die Rohdaten als herstellerspezifische Binärdateien aufgezeichnet, um eine spätere Transformierung auf RINEX-Ebene durchführen zu können.

Die Messungen wurden in der Zeit vom 4. Bis 10. August 2020 (DOY 217-224, 2020) aufgenommen. Die Aufnahmesituation und die räumliche Überdeckung der GNSS-Sichtbarkeiten ist in Abb. 2.1 dargestellt. Die zur Analyse verwendeten Punkte MSD8, ASTR, MSD6 sowie MSD1 sind terrestrisch eingemessen, um präzise Referenzkoordinaten zu gewährleisten.

Statische Datenerhebung – Urban

Ein bereits vorhandener statischer Datensatz vom IfE – unter anderem vorgestellt in Icking u. a. (2022) und Ruwisch und Schön (2022b) – wird insbesondere zur Analyse der Reproduzierbarkeit von NLOS Signalen verwendet. Der Datensatz eignet sich dafür besonders aufgrund der sehr herausfordernden Bedingungen und damit großen Zahl an empfangenen NLOS Signalen.

Die Datenaufnahme fand in einem Wohngebiet in *Hannover Nordstadt* statt. Mehrere Versuchsfahrzeuge, auf welchen jeweils eine Antenne montiert wurde, haben während der Datenaufnahme in Straßenschluchten geparkt. Die Straßenbreite beträgt etwa 12 m (von Hauswand zu Hauswand) mit Häusern in der Umgebung, die etwa 20 m hoch sind. Die Distanz der Antenne zum nächsten Gebäude beträgt in etwa 2,5 m. Insgesamt wurden Daten an zwei aufeinander folgenden Tagen aufgezeichnet (2020, DOY 238 und DOY 239), wobei sich die Antennenposition um ca. 20 cm unterscheidet. Für die Analysen wurde ein geodätischer Septentrio PolaRx5TR Empfänger verwendet, der an eine NovAtel Antenne (NOV850 NONE) angeschlossen wurde. Die parkenden Fahrzeuge, sowie ein Skyplot der GPS Satelliten

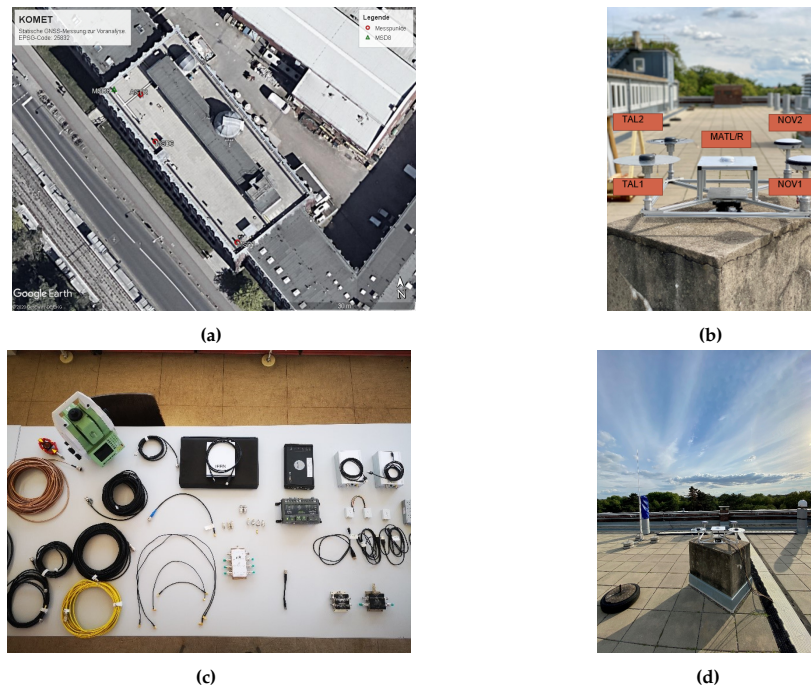


Abbildung 2.1: Statische Datenerhebung unter *open sky* Bedingungen. (a) zeigt einen Überblick der Messkonfiguration auf dem IfE-Versuchslabor, (b) zeigt den Antennenträger mit den verwendeten Antennen, (c) zeigt weitere Sensorik des Versuchs, (d) gibt einen Überblick über die Sichtbedingungen.

inklusive Abschattungsmaske durch die Gebäude in der Umgebung und beispielhafte Raytracing Klassifizierungsergebnisse sind in Abb. 2.2 zu sehen.

Pseudo-kinematische Datenerhebung – Urban

Um Mehrwegeeffekte insbesondere in Multipath-Bereichen (direkter Signalpfad plus indirekter Signalpfad) zu erlernen, wurde eine weitere Messkampagne gestartet. Die Datenerfassung erfolgte unter realistischen Bedingungen (zuvor kalibrierte Antenne auf dem Autodach, Umgebung ähnelt einer Straßenschlucht). Eine optimale Lokation mit möglichst vielen Mehrwegeeffekten wurde mittels Simulationen eines Raytracers von Seiten des IfE bestimmt und die Abschnitte zur Datenerhebung identifiziert. Die anschließende Messkampagne (Fahrzeug mit Antenne wird um vordefinierte Distanzen verschoben) wurde in einem pseudo-kinematischen Modus durchgeführt, um sowohl Einflüsse

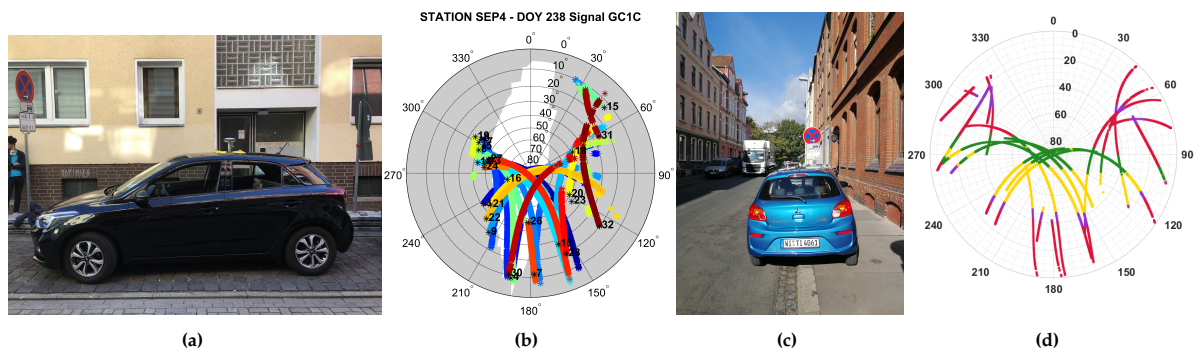


Abbildung 2.2: Statische Datenerhebung im urbanen Gebiet in Hannover Nordstadt. (a) und (c) zeigen die Testfahrzeuge mit montierten Antennen, (b) zeigt einen Skyplot der GPS Satelliten inklusive Abschattungsmaske, (d) zeigt Raytracing Klassifizierungsergebnisse (grün: LOS, gelb: MP, violett: NLOS, rot: blockiert).

von Positionsänderungen der Satelliten als auch Einflüsse durch Variation der Empfängerposition unter optimalen Bedingungen abschätzen zu können.

Da die Messungen über mehrere Tage in 24-Stunden-Intervallen durchgeführt werden, muss der Messort ein abgeschlossenes und gesichertes Gebiet sein. Die zweite Anforderung ist, dass es sich um ein realistisches Szenario für eine typische städtische Straße mit vielen potenziellen Mehrwege-Signalen handeln sollte. Daher wurde der Innenhof des IfE als optimaler Bereich für das Experiment ausgewählt (vgl. Abb. 2.3).



Abbildung 2.3: Übersicht der pseudo-kinematischen Messdatenerhebung. (a) und (b) zeigen Fotos der Umgebungssituation, (c) zeigt Informationen des 3D Stadtmodells für die Messumgebung.

Generell kann man sagen, je näher die Antenne an einer Gebäudewand ist, desto mehr potenzielle Mehrwege-Signale existieren. Simulationsstudien unter Verwendung eines Raytracing-Algorithmus wurden durchgeführt, um eine ideale Position für das Experiment zu finden.

Wenn die Antenne näher als 2,5 m an der Wand ist, ist nicht sichergestellt, dass eine fixierte Lösung möglich ist. Dieser Test wurde mit einer RTK-Messausrüstung durchgeführt. Deshalb haben wir uns auf einen Abstand von 2,5 m für den Antennenstandort geeinigt. Die folgenden Analysen wurden mit einer Antennenhöhe von 1,8 m durchgeführt, was einer typischen Höhe eines kleinen Autos entspricht.

Der simulierte Skyplot des ausgewählten Ortes unter Verwendung von 24 Stunden GPS-Orbit-Informationen ist in Abb. 2.4 dargestellt. Grüne Datenpunkte repräsentieren LOS-Satelliten, gelbe Datenpunkte repräsentieren Multipath (MP) Satelliten, violett gefärbte Satelliten haben keine direkte Sichtverbindung zur Antennenposition, sondern können ausschließlich über Einfachreflexionen empfangen werden und rote Datenpunkte sind von Gebäuden blockierte Satellitenpositionen.

Für die ausgewählte Antennenposition sind potentiell viele Satellitensignale verfügbar, die von Mehrwegeeffekten beeinflusst sind. Die meisten Umweglängen (Laufzeitverzögerung des reflektierten Signals im Vergleich zum direkten Signal) für diese potenziellen Multipath-Satelliten variieren zwischen 2 m und 5 m. Zusätzlich gibt es einen großen Bereich an LOS Satelliten, die für eine präzise und zuverlässige GNSS-Positionsbestimmung erforderlich ist.

Insgesamt wurden 1 Hz Multi-GNSS Rohdaten an 12 Tagen á 24 h aufgezeichnet. Dabei wurde die Position des Testfahrzeugs jeden Tag um genau 2 cm zum Reflektor (Gebäude) hin verschoben. Zusätzlich zum Testfahrzeug hat die IfE-Referenzstation EE01 Daten aufgenommen, um Doppeldifferenz-Residuen bestimmen zu können. Das verwendete Equipment ist in Tab. 2.2 zusammengefasst.

Kinematische Datenerhebung – Urban

Um Mehrwegeeffekte insbesondere unter kinematischen Bedingungen zu erlernen, wurde eine Messkampagne gestartet. Die Planung erfolgte in Absprache mit den Partnern und auf Basis des Katalogs kritischer Szenarien. Um eine realistische und statistisch aussagekräftige Charakterisierung (AP4), Modellierung (AP5) und Entwicklung von Korrekturdaten (AP6) zu ermöglichen, müssen Messdaten

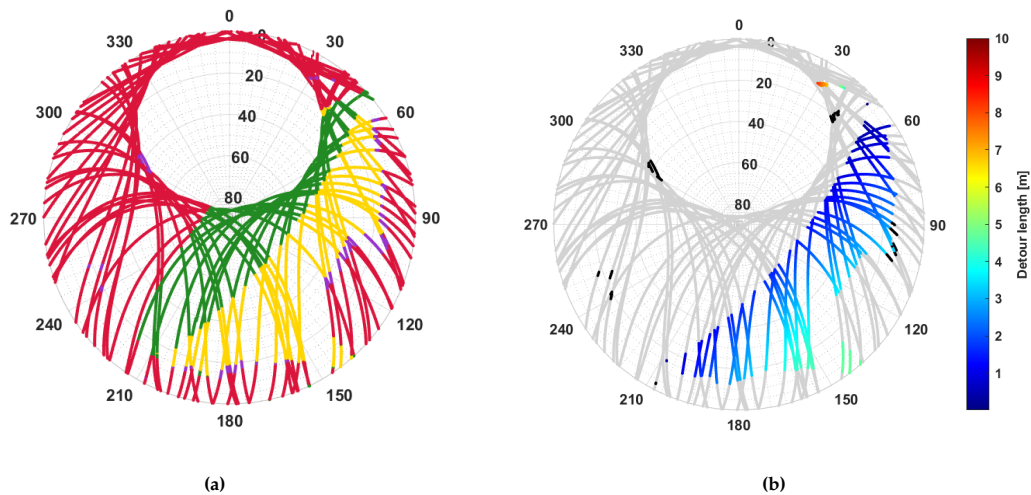


Abbildung 2.4: Simulationsstudie zur Standortauswahl der Antenne. (a) zeigt einen Skyplot mit Klassifikationsergebnissen, die mittels Raytracer bestimmt wurden. Unterschiedliche Farben geben jeweils eine unterschiedliche Klassifizierung an: LOS (grün), Multipath (gelb), NLOS Einfachreflexion (violett), blockiert (rot). (b) zeigt die simulierten Umweglängen für Satellitenpositionen, deren Signale über Reflexionen empfangen werden können.

Tabelle 2.2: Verwendete GNSS Ausrüstung während der pseudo-kinematischen Datenerhebung.

Station	Receiver	ID	Antenne	ID	Uhr	Systeme
EE01	Septentrio PolaRx5TR	2521	LEIAR20 LEIM	20251010	Externer H-Maser	GREC
	u-blox ZED-F9P	5341	LEIAR20 LEIM	20251010	Intern	GREC
CAR	Septentrio PolaRx5e	7474	TW7972	BOSCH	Intern	GREC
	u-blox ZED-F9P	2980	TW7972	BOSCH	Intern	GREC

der jeweiligen kritischen Szenarien zu deutlich unterschiedlichen Tages, Monats- und Jahreszeiten erhoben werden. Dies ist erforderlich, da sich Umgebungseigenschaften (Vegetation, Satellitengeometrie, etc.) ausreichend ändern müssen, um eine realistische Modellierung der Korrekturen zu ermöglichen. Eine möglichst große räumlich-zeitliche Abdeckung für die kritischen Szenarien ist für die erfolgreiche Durchführung des Vorhabens unbedingt notwendig. Daher wurden kinematische Messungen derselben Szenarien unter Berücksichtigung siderischer Wiederholungen mit gleicher Satellitenkonstellation und wechselnder Satellitengeometrie durchgeführt.

Zur effektiven Messdatenerfassung wurde zusätzlich IfE-Hardware in das Versuchsfahrzeug von Bosch integriert. GNSS Rohdaten wurden mittels geodätischen Empfängern (Septentrio PolaRx5e), angeschlossen an massenmarktaugliche Antennen (Tallysman TW7972), mit einer Datenrate von 10 Hz aufgezeichnet. Zusätzlich zu der im Versuchsfahrzeug eingesetzten Hardware, wurden GNSS Rohdaten auch an der IfE-Referenzstation *EE01* aufgezeichnet, um mittels Doppeldifferenzberechnung Residuen bestimmen zu können.

Referenztrajektorienbestimmung

Eine genaue und präzise Referenzlösung (*Ground Truth*) ist unbedingt notwendig, damit für die kinematischen Szenarien zuverlässige Residuen bestimmt werden können. Bei der Auswertung der ersten kinematischen Messdaten konnten Unzulänglichkeiten des bisherigen Referenzsystems in navigatorisch sehr schwierigen Innenstadtbereichen – insbesondere in Hannover Nordstadt – festgestellt und identifiziert werden. Unter diesen speziellen und schwierigen GNSS Empfangsbedingungen kann keine Referenzlösung in der notwendigen Genauigkeit, Präzision und Kontinuität ermöglicht werden.

Daher wurde es notwendig, das bisherige Referenzsystem im Versuchsfahrzeug mit dem IfE-Referenzsystem bestehend aus einer iMAR iNat-RQT-40034003/iPRENA-Sondermodell zu ergänzen. In diesem Sys-

tem ist eine deutlich höherwertige Inertiale Messeinheit (IMU) verbaut, sodass auch in schwierigen GNSS-Situationen eine stabile Lösung erwartbar ist. Die Referenztrajektorie des IfE-Systems wird im Nachgang (*Postprocessing*) zu den Messfahrten erzeugt. In der kommerziellen Software TerraPOS (Kjørsvik, N.S. u. a., 2009) wird eine aus GNSS und IMU Beobachtungen kombinierte *tightly-coupled* relative Positionierung berechnet. Da die IfE-Hardware zusätzlich in den Versuchsaufbau integriert wurde, stehen keine kalibrierten Hebelarme zwischen der IfE-IMU und der verwendeten GNSS Antenne zur Verfügung, weshalb der Hebelarm in der Software interaktiv mit geschätzt wird. Ein Foto der integrierten IMU in das Versuchsfahrzeug ist in Abb. 2.5 zu sehen.

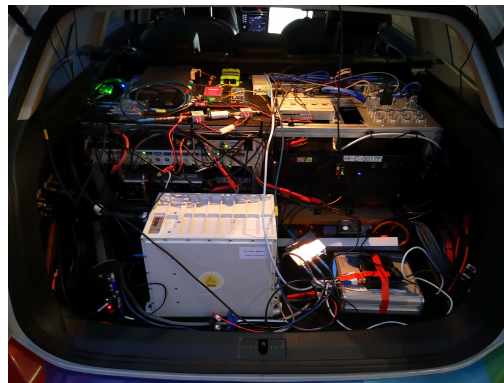


Abbildung 2.5: IfE-Referenzsystem bestehend aus einer iMAR iNat-RQT-40034003/iPRENA-Sondermodell eingebaut in das Versuchsfahrzeug.

Die Evaluation des existierenden Bosch Referenzsystems erfolgt über einen Vergleich mit der IfE-Referenzlösung. Durch den Einsatz des IfE-Referenzsystems, welches einer übergeordneten Genauigkeitsklasse entspricht, konnte die Evaluation abgeschlossen und das Bosch Referenzsystem erfolgreich validiert werden. Um für alle durchgeführten Testfahrten eine zuverlässige Referenzlösung nutzen zu können, wurde das IfE-Referenzsystem bei allen weiteren Datenerhebungen eingesetzt. Vor den entsprechenden Datenanalysen in AP4, AP5 und AP6 wurden die entsprechenden Referenzlösungen der beiden Systeme zunächst miteinander verglichen, um mögliche Unzulänglichkeiten ausschließen zu können.

Datenaustausch

Der Datenaustausch der generierten Daten (GNSS Rohdaten, RINEX Dateien, vorprozessierte Matlab Workspaces, Referenzlösungen und Metadaten) wird über den Universitätsdienst SeaFile koordiniert. Dabei wurde eine Datenstruktur definiert, die einen einheitlichen und vereinfachten Zugriff auf alle Daten ermöglicht.

2.4. AP3: Quantifizierung der GNSS Ortungsgenauigkeit im urbanen Raum

Das Arbeitspaket befasst sich mit der Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung und Quantifizierung der Positionsabweichungen von der Referenztrajektorie für die Ortungsdaten beider in AP2 aufgenommener Szenarien (statisch und kinematisch).

Dazu werden die in AP2 gewonnenen Messdaten in AP3 hinsichtlich der resultierenden Ortungsgenauigkeit für verschiedene spezifische städtische GNSS-Empfangsbedingungen untersucht, gemäß der in AP1 definierten Use-Cases. Dies beinhaltet ebenfalls die daraus abgeleitete Klassifizierung der verschiedenen urbanen Umgebungen hinsichtlich möglicher Mehrwege- und Abschattungseffekte (Anzahl und Geometrie von LOS und NLOS Satelliten) unter Verwendung eines 3D-Stadtmodells in CityGML.

Die Ergebnisse dienen als Input zur Fokussierung der weiteren Untersuchungen im anschließenden Paket AP4.

Klassifikation der empfangenen Signale mittels 3D-Stadtmodell

Um die empfangenen GNSS Signale hinsichtlich vorhandener Mehrwege- und Abschattungseffekte klassifizieren zu können, muss für das Untersuchungsgebiet ein 3D-Stadtmodell gegeben sein. Um Mehrwegfehler in hochdynamischen Anwendungen wie beispielsweise autonomes Fahren zu simulieren, zu modellieren und möglicherweise zu korrigieren, muss die Geometrie von Satellit, Empfänger und Reflektor in einem gemeinsamen Bezugssystem präzise bekannt sein. Inkonsistenzen in den Koordinatenrahmen, in denen die Satelliten- und Nutzerpositionen, sowie die Koordinaten der Gebäudemodelle vorliegen, führen zu falsch bestimmten Mehrwegefehlern und verringern somit die Genauigkeit des Klassifikationsalgorithmus.

In Baasch u. a. (2022) werden die erforderlichen Transformationsschritte, die berücksichtigt werden müssen, wenn 3D-Gebäudemodell-Daten, Nutzerpositionen und GNSS-Orbit-Informationen integriert werden, aufgeschlüsselt. Das vorhandene IfE-Tooling zur Klassifikation von GNSS Signalen wurde dahingehend optimiert, sodass keine Inkonsistenzen mehr auftreten und eine verbesserte Genauigkeit der Klassifizierung erreicht wird.

Als Ergebnisse stehen sowohl Abschattungsmasken, die eine Unterscheidung zwischen LOS und NLOS Signalen ermöglichen, zur Verfügung, als auch epochenweise Klassifizierungen in vier Klassen, die zusätzlich berechnete Reflexionspunkte inkludieren: LOS, MP (LOS plus Einfachreflexion), NLOS (Einfachreflexion bei keiner direkten Sichtverbindung) und blockiert. Die resultierenden Abschattungsmasken und Klassifizierungsergebnisse des Raytracing Algorithmus für eine Position des pseudo-kinematischen Experiments und des statisch urbanen Experiments sind in Abb. 2.6 zu sehen.

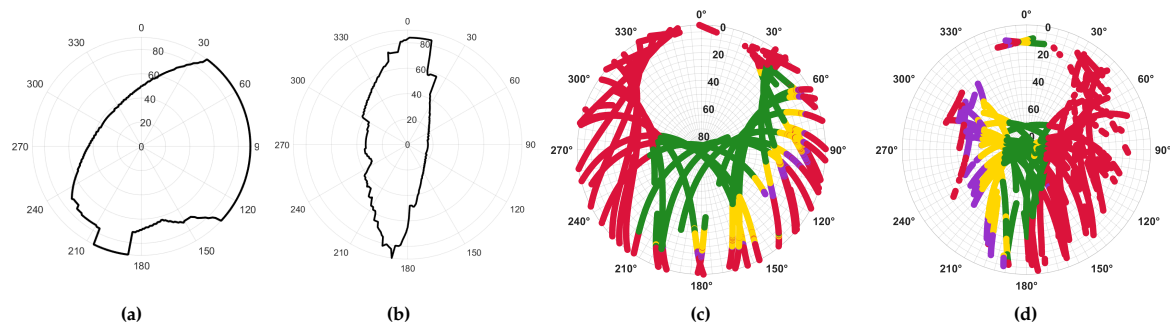


Abbildung 2.6: Mittels Raytracing Algorithmus generierte Abschattungsmasken und Klassifizierungsergebnisse. (a) und (c) für eine Position des pseudo-kinematischen Experiments, (b) und (d) für das statisch urbane Experiment.

Empirische Auswertung der statischen Messungen

Die empirische Auswertung erfolgt anhand der statisch urbanen Messung mittels eigens am Institut entwickelter RTK Positionierungssoftware (Ruwisch und Schön, 2022b). In dem wissenschaftlichen Beitrag wurde die Positionierungsperformance im Vergleich zur Referenzkoordinate analysiert. Dabei wurden zwei unterschiedliche Ansätze verglichen: i) GNSS RTK Positionierung mit implementierter Ausreißersuche, ii) Ausschluss von NLOS Satelliten mittels Raytracing Algorithmus.

In der oberen Reihe von Abb. 2.7 wird die horizontale Abweichung von den Referenzkoordinaten für beide Lösungsansätze dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Ergebnisse des Ansatzes von NLOS-Ausschluss die meiste Zeit genauer sind. Nach einer kurzen Konvergenzzeit des Filters verringert sich die horizontale Abweichung der Float Lösung auf weniger als 10 cm. Die Lösung der Methode mit Ausreißersuche konvergiert ebenfalls, benötigt jedoch etwa 30 Minuten länger und erreicht eine

insgesamt höhere Abweichung. Dies wird durch höhere quadratische Mittelwertabweichungen und Standardabweichungen unterstrichen, die im Vergleich zu den NLOS-Ausschluss Floatlösungen in Tab. 2.3 etwa doppelt so groß sind. Ein noch größerer Unterschied zwischen den beiden Ansätzen zeigt sich in den Ergebnissen der fixierten Lösungen. Die Methode zur Erkennung von Ausreißern hat eine Erfolgsrate der Mehrdeutigkeitsfixierungen von 7 %, während die Erfolgsrate der Mehrdeutigkeitsfixierung unter Verwendung des NLOS-Ausschluss-Ansatzes 88 % beträgt. Nach der kurzen Konvergenzzeit steht praktisch in jeder Epoche eine fixierte Lösung zur Verfügung mit einer Genauigkeit von 4 cm, 5 cm und 14 cm in Nord-, Ost- und Höhenrichtung, wie in Tab. 2.3 dargestellt. Die Werte in Tab. 2.3 für die fixierte Lösung mittels Ausreißersuche sind aufgrund der geringen Erfolgsrate der Mehrdeutigkeitsfixierung nicht aussagekräftig.

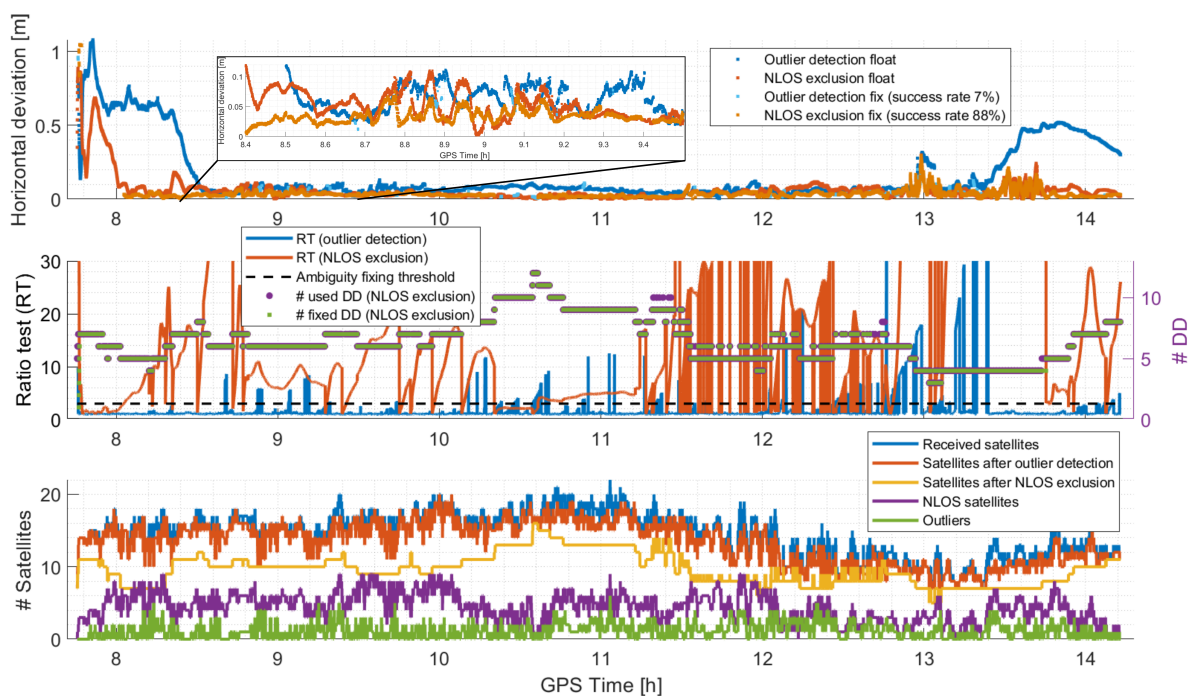


Abbildung 2.7: Multi-GNSS-RTK-Positionierungslösung und Vergleich von Ausreißersuche und NLOS Ausschluss unter Verwendung realer Daten, die an einer statischen Station in einer Straßenschlucht aufgezeichnet wurden. Obere Reihe: horizontale Abweichung der Float- und Fixed-Lösungen, mittlere Reihe: Ratio-Test-Werte (RT) zusammen mit der Anzahl der fixierten DD, untere Reihe: Anzahl der verfügbaren und verwendeten Satelliten.

Tabelle 2.3: Quadratische Mittelwertabweichungen (RMSE) und Standardabweichungen (STD) der beiden Positionierungslösungen für float und fixierte Nord/Ost/Up (N/E/U) Abweichungen. Die Werte für die fixierte Lösung mittels Ausreißersuche sind aufgrund der geringen Fixierungsrate (7 %) mit Vorsicht zu genießen.

	RMSE			STD		
	North [cm]	East [cm]	Up [cm]	North [cm]	East [cm]	Up [cm]
Ausreißersuche float	22	15	72	19	14	65
Ausreißersuche fixiert	5	6	13	5	5	12
NLOS Ausschluss float	9	6	17	8	6	16
NLOS Ausschluss fixiert	4	5	14	4	5	13

Die zweite Zeile zeigt die epochenweise berechneten Ratio-Testwerte beider Lösungen zusammen mit dem Schwellwert für die Fixierung von Mehrdeutigkeiten. Der Ratio-Testwert für die Lösung mittels Ausreißersuche liegt die meiste Zeit unter 3 und wenn R_{thres} überschritten wird, ist die Zeitreihe sehr instabil und nimmt schnell wieder ab. Das Gegenteil lässt sich aus den Zeitreihen der NLOS-Ausschluss

Lösung ablesen. Die Werte des Ratio-Tests sind stabiler und liegen fast durchgängig über 3, was eine erfolgreiche Fixierung eines Sets von Mehrdeutigkeiten bedeutet. Schwankungen in der Verfügbarkeit von DD-Beobachtungen (z.B. zwischen 11,5 h und 13 h) führen jedoch auch zu Sprüngen in den Ratio-Testwerten. Die grünen Punkte zeigen, dass, wenn eine Mehrdeutigkeitsfixierung möglich ist, die meiste Zeit der gesamte Satz von Mehrdeutigkeiten fixiert wird, obwohl eine partielle Fixierung angewendet wird.

Die letzte Zeile in Abb. 2.7 zeigt die Gesamtzahl der Satelliten (GPS, GLONASS, Galileo, Beidou) in blau, die Anzahl der genutzten Satelliten nach Ausreißererkenung in orange, die Anzahl der genutzten Satelliten nach NLOS-Ausschluss in gelb, die Anzahl der NLOS-klassifizierten Satelliten in violett und die Anzahl der erkannten Ausreißer in grün. Vergleicht man die Anzahl der genutzten Satelliten, so fällt auf, dass die Anzahl der LOS-Satelliten immer kleiner ist als die Anzahl der genutzten Satelliten nach der Ausreißererkenung. Viele Ausreißer – sogar mehrere Fehler in einer Epoche können detektiert werden - werden erkannt, aber viele NLOS-Satelliten bleiben bei der Ausreißererkenung unerkannt, was die Positionierungslösung verschlechtert. Die größere Streuung der horizontalen Abweichung um 13 Uhr bis 13.8 Uhr lässt sich durch die geringe Anzahl der verfügbaren Satelliten und die daraus resultierende schlechte Satellitengeometrie erklären.

Um zu untersuchen, warum der NLOS-Ausschluss-Ansatz die Ausreißererkenung überlegen ist, werden die verwendeten Beobachtungen und die erkannten und ausgeschlossenen Ausreißer analysiert. Abb. 2.8a zeigt die empfangenen NLOS-Signale aller vier GNSS in Bezug auf ihre PRN. Insgesamt werden 94824 Beobachtungen als NLOS klassifiziert, was 37 % der gesamten verfügbaren Beobachtungen entspricht (vgl. Tab. 2.4). In Kombination mit Abb. 2.8b, in der die erkannten Ausreißer in Bezug auf ihre Klassifizierung farblich gekennzeichnet sind, und Tab. 2.4, wird deutlich, dass nur ein Bruchteil (27 %) der NLOS-Empfänge als Ausreißer identifiziert werden konnte. Auch PRNs, die sich ständig im NLOS-Zustand befinden, werden nicht kontinuierlich als Ausreißer erkannt. Dies führt zu fragmentierten Satellitenbögen, was die Auflösung der Mehrdeutigkeit und damit die Qualität der Positionsbestimmung verschlechtert.

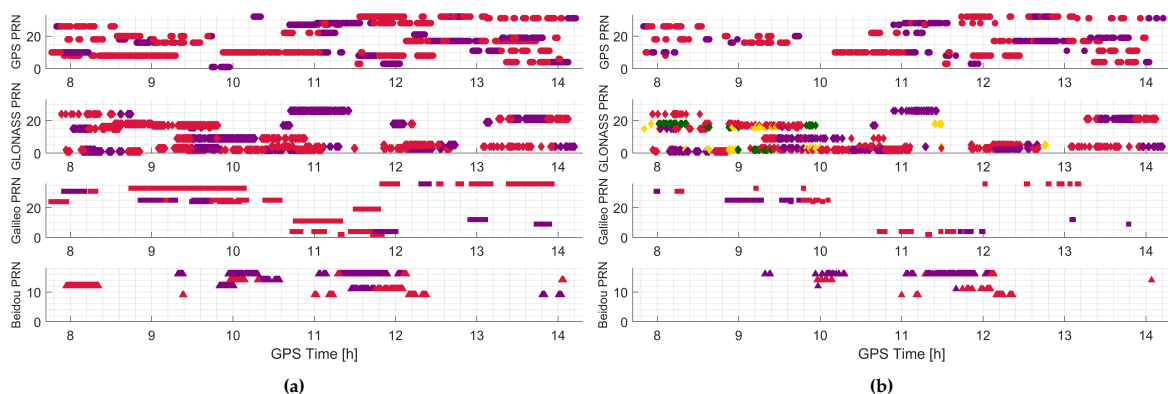


Abbildung 2.8: Satellitensignal-Klassifizierungen der aufgezeichneten Daten. (a) Empfang von NLOS (violett) und blockierten (rot) Beobachtungen in Bezug auf GNSS und PRN und (b) erkannte Ausreißer, farblich kodiert als LOS (grün), MP (gelb), NLOS (violett) und blockiert (rot).

Tabelle 2.4: NLOS Beobachtungen and Statistiken der Ausreißersuche. Die Prozentangaben beziehen sich immer auf die vorherige Spalte.

# Beobachtungen	# NLOS Beobachtungen	# detektierter Ausreißer	# detektierter NLOS Ausreißer
254352	94824 / 37 %	25226 / 27 %	23953 / 95 %

Abbildung 2.9 zeigt die Trägerphasen-DD-Beobachtungen, die für die GNSS-RTK-Prozessierung nach Ausreißersuche (Abb. 2.9a) und nach NLOS-Ausschluss (Abb. 2.9b) verwendet werden. Die vorherigen Ergebnisse werden durch diese Abbildungen unterstrichen. Während die Satellitenbögen nach dem NLOS-Ausschluss stabil und kontinuierlich sind, verbleiben nach der Ausreißersuche viele sehr kurze

Bögen. Da alle diese Bögen zur Auflösung der Mehrdeutigkeit und zur Positionsschätzung beitragen, ist offensichtlich, dass die Performance beeinträchtigt wird.

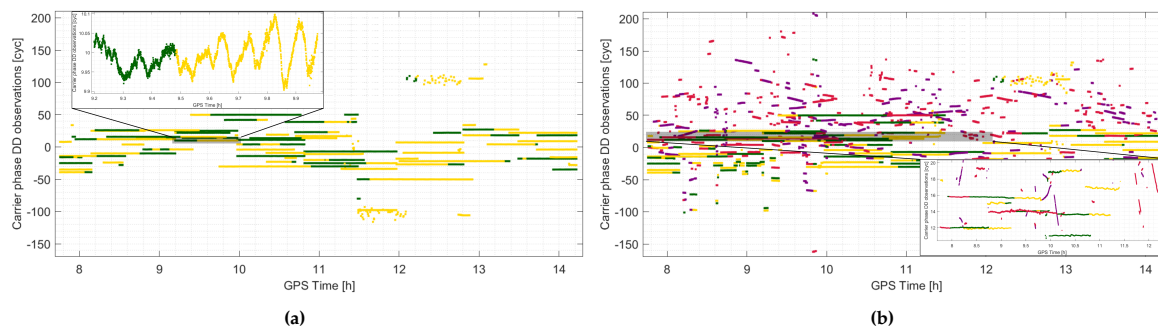


Abbildung 2.9: Trägerphasen-DD-Beobachtungen, die bei der GNSS-RTK-Positionierung verwendet werden. (a) Verwendete Trägerphasen-DD nach Erkennung und Ausschluss von Ausreißern und (b) Verwendete Trägerphasen-DD nach NLOS-Ausschluss.

Um zu sehen, welche Effekte in der Positionierungslösung verbleiben, sind die Pseudoentfernungs- und Trägerphasenresiduen in Abb. 2.10 dargestellt. Zusätzlich werden die DD-Pseudoentfernungsresiduen aller verfügbaren Beobachtungen angezeigt, um die Fehlerreduzierung durch die Ausreißersuche und NLOS-Ausschluss zu erkennen. Die größten Fehler konnten durch beide Methoden ausgeschlossen werden. Nach der Detektion von Ausreißern enthalten die Pseudoentfernungs- und Trägerphasenresiduen jedoch immer noch systematische Effekte aufgrund der verbleibenden NLOS-Beobachtungen. Die Pseudoentfernungsresiduen haben eine Größenordnung von bis zu 20 m, während 99,9% der Pseudoentfernungsresiduen nach NLOS-Ausschluss kleiner als 4 m sind. Wenn ein neuer Satellit hinzukommt, ist die Schätzung der instantanen Float-Mehrdeutigkeit ungenau und benötigt mindestens eine weitere Epoche, um zu konvergieren. Im Allgemeinen ist das Rauschen der Trägerphasenresiduen nach dem NLOS-Ausschluss geringer (99,9% kleiner als 3 cm), während nach der Erkennung von Ausreißern Drifts von bis zu mehr als 10 cm zu beobachten sind. Diese Effekte stammen möglicherweise von noch verbleibenden NLOS Satelliten.

Evaluation der Ortungsgenauigkeit mit *state-of-the-art* Positionierungsmethoden

Ziel dieses Abschnitts ist es, verschiedene mit der mobilen Plattform durchgeführte Trajektorien in jenen städtischen Gebieten zu bewerten, die als kritischste GNSS-Situationen hinsichtlich Satellitensichtbarkeit identifiziert wurden. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für den Entwicklungsprozess zur Definition der Metriken neuartiger Korrekturwerte für die GNSS-basierte Navigation in städtischen Gebieten. Darüber hinaus dient die Auswertung als Qualitätsstatus der derzeit verfügbaren Techniken und berichtet über die derzeit erreichbaren Metriken bei der Verwendung von rein GPS/GNSS-basierter Navigation in sehr kritischen Szenarien.

Daher werden verschiedene Verarbeitungsmethoden angewandt, um die Navigationslösung kinematischer Trajektorien durchzuführen, wie z.B. *Precise Point Positioning* (PPP) und differenzielle Positionierung (DGNSS). Um die Auswirkung verschiedener GNSS auf die Positionsgüte abzuschätzen wird sowohl eine Lösung für GPS allein oder als GNSS-Lösung unter Verwendung von GPS, Galileo, GLONASS und Beidou berechnet. Um eine *state-of-the-art* Bewertung zu gewährleisten, wird die kommerzielle Software TerraPOS (Kjørsvik, N.S. u. a., 2009) verwendet, um die Lösungen zu berechnen.

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der einzelnen Trajektorien, kategorisiert nach den einzelnen Szenarien, vorgestellt. Jede Trajektorie in den jeweils unterschiedlichen Umgebungsbedingungen wird als PPP und DGNSS Lösung unter Verwendung von GPS und einer Multi-GNSS Konstellation prozessiert. Zu Vergleichszwecken werden die Höhenunterschiede der unterschiedlichen Lösungen verglichen, um die erheblichen Auswirkungen von Multi-GNSS-Ansätzen in städtischen Umgebungen hervorzuheben.

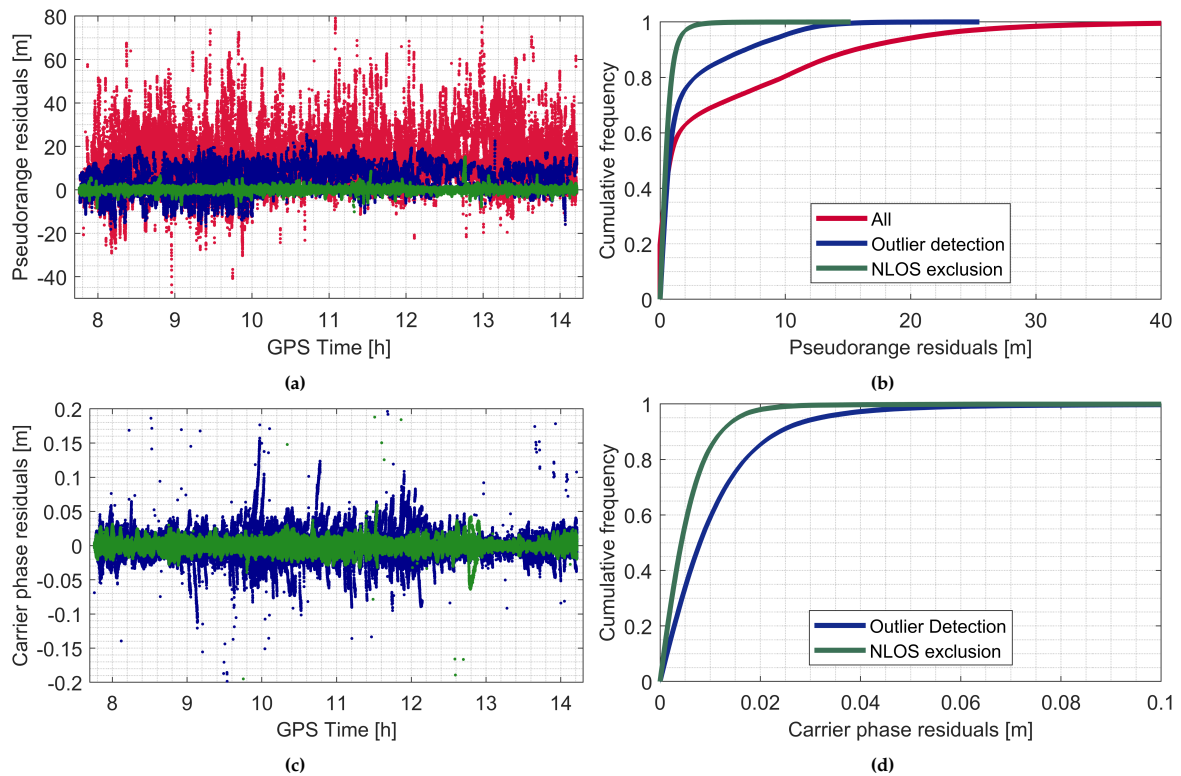


Abbildung 2.10: Multi-GNSS post-fit Residuen dazugehörige kumulative Histogramme für Pseudoentfernungen ((a) and (b)) und Trägerphasen ((c) and (d)).

Die Ergebnisse für drei verschiedene Trajektorien sind in Abb. 2.11 zusammengefasst. Dabei gibt die linke Spalte eine Übersicht über die jeweilige Trajektorie inklusive Informationen über die verfügbare Satellitengeometrie der Multi-GNSS Lösung. Die *horizontal dilution-of-precision* (HDOP) Werte verdeutlichen, dass insbesondere die Trajektorien 2 und 3 sehr herausfordernde Szenarien sind. In der rechten Spalte von Abb. 2.11 sind die geschätzten Höhen der GPS-Lösung in blau und die geschätzten Höhen der Multi-GNSS Lösung in rot dargestellt. Dabei wird für alle drei Trajektorien deutlich, dass die Ortungsgenauigkeit unter Verwendung eines einzelnen Satellitensystems rapide abnimmt, da die Höhen mit einer Größenordnung von 10 m bis 60 m hin- und herspringen. Unter Verwendung von Multi-GNSS Konstellationen ist das Ergebnis der Höhenbestimmung deutlich stabiler, wobei insbesondere an besonders kritischen Stellen, an denen die Geometrie trotz mehrerer Satellitensysteme herausfordernd ist, Sprünge auftreten können.

In Tab. 2.5 und Tab. 2.6 sind die Anteile fixierter Basislinien für die drei Trajektorien, sowie die Statistiken der Mehrdeutigkeitsfixierungen aufgetragen. Dabei wird erneut die Herausforderung für die Positionierung mittels GNSS deutlich. Nur ein sehr geringer Anteil der Basislinien für die Trajektorien 2 und 3 konnten fixiert werden, was sich dementsprechend auf die Ortungsgenauigkeit auswirkt. Das drückt sich ebenfalls in den Statistiken aus. Die Zeit, die benötigt wird, um die Position erneut zu fixieren beträgt mehrere Sekunden.

Tabelle 2.5: Evaluation der Ortungsgenauigkeit für verschiedene Trajektorien. Anteil fixierter Basislinien an der Gesamtlösung.

Trajektorie	Anteil fixierter Basislinien
1: Hannover Hanomag	33,1 %
2: Hannover Asternstr.	9,7 %
3: Hannover Kniestr.	6,5 %

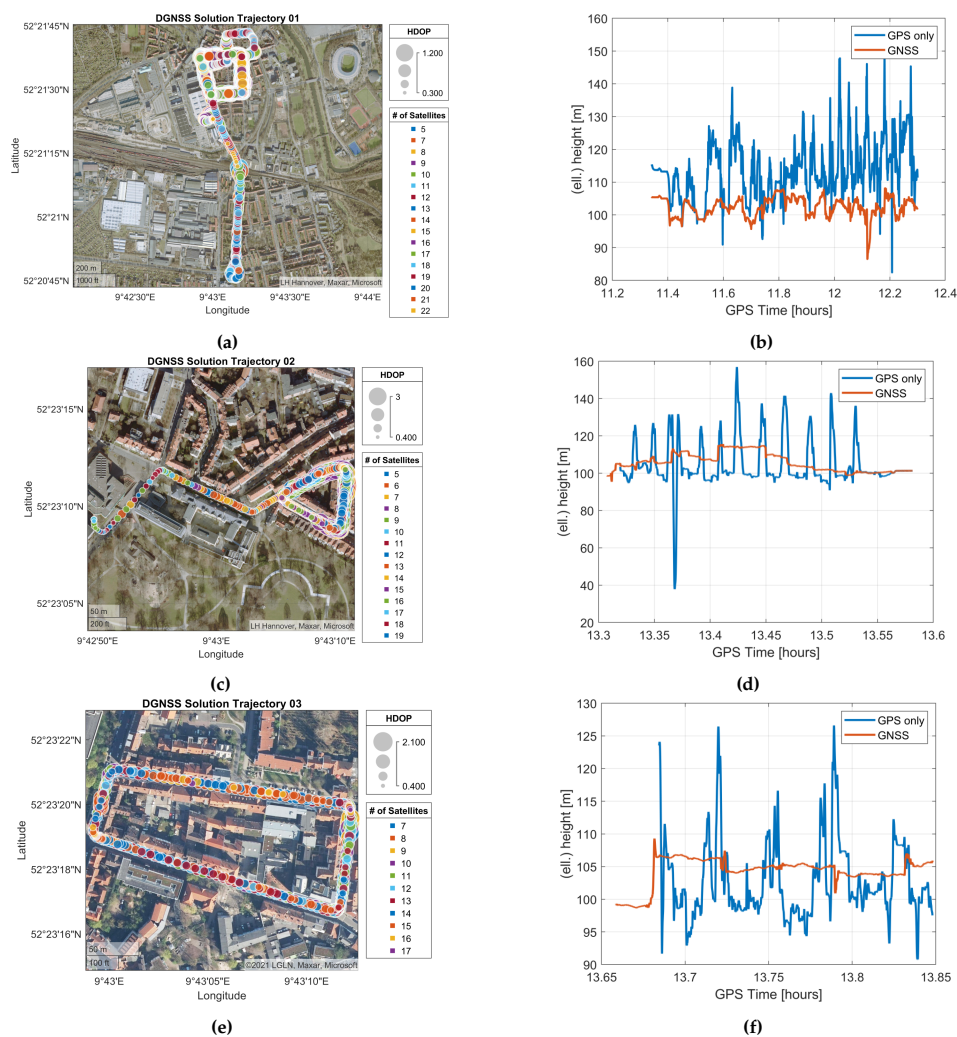


Abbildung 2.11: Evaluation der Ortungsgenauigkeit für verschiedene Trajektorien. Die linke Spalte zeigt die HDOP (*horizontal dilution-of-precision*) Werte und die rechte Spalte zeigt die geschätzten Höhen für GPS und Multi-GNSS Lösungen. Die farbliche Kodierung der Anzahl sichtbarer Satelliten entspricht der Summe aller sichtbaren Satelliten und lässt die individuelle Anzahl pro Satellitensystem unbeachtet.

Das hier dargelegte Ergebnis bestätigt die Auswahl der kritischen Szenarien in AP1, indem eine Auflösung der Phasenmehrdeutigkeit (vgl. Anteil fixierter Basislinien) für Precise-Point-Positioning (PPP) und auch Realtime Kinematik (RTK) kaum möglich ist.

2.5. AP4: Charakterisierung des GNSS-Signals im urbanen Raum

Das IfE befasst sich in diesem Arbeitspaket mit der Entwicklung eines automatisierbaren Auswertekonzeptes für die in AP2 gemessenen GNSS-Rohdaten (Code- und Trägerphase, Doppler, Signalstärke) und den in AP3 als kritisch identifizierten Situationen unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus AP1.

Ziel des Arbeitspaketes ist es, die GNSS-Signale und deren Propagation in urbanen Umgebungen zu verstehen und dominierende Einflussfaktoren zu identifizieren. Zielgrößen sind die Größe des Beobachtungsruschens und Biases in den Beobachtungsdaten, die Anzahl von Cycle Slips (oder anderen Sprüngen durch den Übergang von LOS zu NLOS Situationen), den Umfang von Signalunterbrechungen, die zu Problemen der Mehrdeutigkeitslösung führen könnten sowie die Variationen der Signalstärke. Diese analysierten Parameter beantworten die Frage, welche Qualität von Signalen im urbanen Umfeld erwartet werden kann.

Tabelle 2.6: Evaluation der Ortungsgenauigkeit für verschiedene Trajektorien. Statistiken der Mehrdeutigkeitsfixierungen.

Trajektorie	Closest fix			
	median [s]	upper 75 % [s]	upper 95 % [s]	upper 99 % [s]
1: Hannover Hanomag	1	7	45	70
2: Hannover A sternstr.	8	18	32	39
3: Hannover Kniestr.	20	42	76	83

Die Untersuchung stützt sich sowohl auf der von Geo++ entwickelten SW zur Berechnung der Beobachtungsresiduen nach der Positionierung als auch auf der vom IfE implementierten SW zur Untersuchung der Daten vor der Datenverarbeitung. Bosch konzentriert sich auf die gezielte Analyse der kinematischen erhobenen Szenarien um sie ebenfalls der automatisierten GNSS-Beobachtungsauswertung zuführen zu können. Zusammen mit IfE werden die dynamischen Signalcharakteristiken bei sich änderndem Ort bei den Analysen herausgestellt und das Verhalten der GNSS-Signale identifiziert.

Bei dem statischen Szenario liegt der Forschungsschwerpunkt auf der Untersuchung des Übergangs von LOS- und NLOS-Situationen für eintretende Abschattungen, die durch geänderte Satellitenkonstellation (Diffraktionseffekte, Sprünge, Cycle Slips) hervorgerufen werden. Dies beinhaltet die Analyse der Quasi-Stationarität von Signaleigenschaften in Abhängigkeit von der sich ändernden Satellitenkonstellation (Azimut, Elevationswinkel). Es ist geplant, zusätzlich Mehrantennensysteme zu verwenden, um die räumliche Ähnlichkeit der Signale im Bereich eines Fahrzeugs zu studieren.

Bei dem kinematischen Szenario liegt der Fokus auf der Untersuchung der Dynamik von GNSS-Signaleigenschaften bei einer sich ändernden Örtlichkeit (wichtig für örtliche Auflösung des GNSS-Signalcharakteristik-Modells in AP5).

Software zur Signalcharakterisierung

Die Signalanalyse-Toolchain wird in Matlab entwickelt. Als Vorverarbeitungsschritt müssen die Residuenzeitreihen zur Verfügung stehen.

Als Eingangsdaten können sowohl IfE-eigene `***.mat`-Dateien als auch Geo++-eigene `***.dat`-Dateien gewählt werden. Beide Datenformate enthalten die zu analysierenden Residuenzeitreihen für jeden Beobachtungstyp und jede Satelliten-PRN in Bezug auf die GPS-Zeit. Auch die jeweiligen Satellitenpositionen und Zeitstempel sind für verschiedene Analyseziele notwendig. Zusätzliche Metadaten, wie z.B. der Tag des Jahres, der Stationsname oder die Empfänger-ID, können zur besseren Unterscheidung der generierten Ergebnisse eingefügt werden. Da diese Informationen in den Geo++ `***.dat` Dateien nicht vorhanden sind, müssen sie mit der dazugehörigen IfE `***.mat` Datei eingelesen werden.

Innerhalb der Toolbox ist es möglich, entweder zeitabhängige Merkmale oder ortsabhängige Merkmale der Residuen zu analysieren. Daher ist entweder die Auswahl von zwei Dateien derselben Station aus verschiedenen Tagen/Zeiten möglich oder es können zwei Dateien desselben Tages, aber unterschiedlicher Stationen als Eingangsdaten dienen.

Statische Analyse von DD Residuen unter *open sky* Bedingungen

Es wurden statische GNSS-Daten für verschiedene Antennen-Empfänger-Kombinationen auf dem Dach des IfE vom 4. August 2020 bis zum 10. August 2020 (GPS-Woche 2117, DOY 217 bis GPS-Woche 2118, DOY 224) aufgezeichnet. Der Antennenträger und die Umgebung des Messortes sind durch eine freie Sicht auf den Himmel gekennzeichnet. Die wichtigsten Informationen dieses Datensatzes sind in Kap. 2.3 beschrieben. Der Übersichtlichkeit halber werden hier exemplarisch nur die Detailanalysen der Basislinie von der Referenzstation *MSD8* zu Station *TAL2* dargestellt.

Tabelle 2.7: Statistiken der Doppeldifferenzberechnung für alle Antennen-Empfänger-Kombinationen: Anzahl an LOS und NLOS Doppeldifferenz-Residuen für Code und Trägerphase, Anzahl an detektierter Cycle Slips, sowie halber Cycle Slips und Anzahl an aufgesetzter Mehrdeutigkeiten.

	# LOS		# NLOS		# Zyklensprünge	# Mehrdeutigkeiten
	Code	Trägerphase	Code	Trägerphase		
UBX BOSCH						
DOY 220	178637	174930	10086	1927	25 (50)	76
DOY 221	178147	174298	10301	1897	30 (54)	83
DOY 222	177989	173827	10293	1851	28 (45)	77
UBX 5341						
DOY 220	178100	174573	10769	2700	33 (27)	78
DOY 221	177647	173714	10351	2122	26 (46)	80
DOY 222	177396	173208	10771	2325	29 (38)	78
SEPT 1372						
DOY 220	172267	171351	8239	4506	13 (54)	37
DOY 221	172100	171320	8111	5135	9 (71)	34
DOY 222	171865	171038	7917	5084	18 (114)	34
UBX 5331						
DOY 220	179681	176222	8549	2197	34 (34)	87
DOY 221	179240	175854	8332	1977	34 (36)	86
DOY 222	178952	175576	8630	1945	25 (47)	95
SEPT 1345						
DOY 220	173894	173649	8507	4931	14 (90)	38
DOY 221	173392	173065	8772	5146	9 (97)	36
DOY 222	173149	172809	9070	5721	15 (138)	38
UBX 5272						
DOY 220	181395	179138	8094	2650	32 (20)	83
DOY 221	180932	178532	7438	2461	28 (42)	79
DOY 222	180463	178159	8632	2604	26 (52)	79

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Merkmale der DD-Berechnung für jede Antennen-Empfänger-Kombination zusammengefasst. Dazu gehören die Anzahl der LOS/NLOS-Satelliten, die Anzahl der Cycle Slips und die Anzahl der Trägerphasen Mehrdeutigkeiten. Diese Statistiken können einen ersten Eindruck von der Qualität des Datensatzes vermitteln. Unterschiede in der Ausrüstung können zur Charakterisierung der Qualität herangezogen werden.

Beim Blick auf Tab. 2.7 ist ersichtlich, dass der vorhandene Datensatz in einer für GNSS-Empfangeigenschaften nahezu optimalen Umgebung mit kaum Abschattungen erfasst wurde. Die Anzahl der LOS-Doppeldifferenzen ist um ein Vielfaches höher als die Anzahl der NLOS-Doppeldifferenzen. Dies ist bei allen Empfängern und an allen Tagen ähnlich. Generell lässt sich sagen, dass sich die GPS-Satellitenkonstellation innerhalb eines Tages nur minimal ändert, da 24-Stunden-Tagesdateien ausgewertet werden und die Umlaufzeit der GPS-Satelliten um etwa 4 Minuten von 24 Stunden abweicht. Daher ändert sich auch die Anzahl der aufgezeichneten Beobachtungen eines jeden Tages nur geringfügig.

Wie erwartet werden mit den hochsensitiven u-blox-Empfängern mehr Beobachtungen aufgezeichnet als mit den geodätischen Septentrio-Empfängern. Der Unterschied – gemessen an der Gesamtzahl der Beobachtungen – ist jedoch eher gering, was darauf zurückzuführen ist, dass die u-blox-Empfänger ihre Hochsensitivitätsmerkmale in einer Umgebung mit freier Sicht nicht optimal nutzen können. Der Einfluss der hochsensitiven Antenne scheint nicht so groß zu sein. Bei einem geringeren Abstand zum Gebäude und damit einer etwas stärkeren Abschattung werden im Vergleich zu den beiden anderen u-blox-Empfängern etwas weniger Beobachtungen empfangen.

An den beiden Stationen *TAL2* und *NOV2*, die weiter vom Ende des Gebäudes entfernt sind, werden mehr NLOS-Beobachtungen im Vergleich zu den identischen, parallel zum Gebäude angeschlossenen Geräten empfangen. Die Anzahl der NLOS-Trägerphasendoppeldifferenzen ist um ein Vielfaches geringer als die der NLOS-Pseudoentfernungsmessungen, was darauf hinweist, dass eine kontinuierliche Verfolgung der Trägerphasen unter NLOS-Bedingungen nicht möglich ist. Das Verhältnis bei u-blox-Empfängern beträgt etwa 5:1, während das Verhältnis bei Septentrio-Empfängern etwa 2:1 beträgt. Trotz der hohen Sensitivität von u-blox-Empfängern werden im Vergleich zu Septentrio-Empfängern etwa gleich viele NLOS-Code-DD berechnet, aber nur halb so viele NLOS-Trägerphasen-DD.

Ein Qualitätsmerkmal für Trägerphasen ist die Anzahl der Cycle Slips. Diese Anzahl ist bei allen u-blox-Empfängern etwa gleich hoch. Bei den Doppeldifferenzen der Septentrio-Empfänger werden nur halb so viele Cycle Slips erkannt.

Die Anzahl der aufgesetzten Mehrdeutigkeiten gibt Auskunft über die Kontinuität der Doppeldifferenzen. Je mehr Unterbrechungen es gibt, desto mehr Mehrdeutigkeiten müssen aufgesetzt werden. Die Anzahl der aufgesetzten Mehrdeutigkeiten ist bei den u-blox-Empfängern doppelt so hoch wie bei den Septentrio-Empfängern, was den Schluss zulässt, dass die Beobachtungen der geodätischen Empfänger kontinuierlicher sind.

In Abb. 2.12 sind die Standardabweichungen der Doppeldifferenz-Zeitreihen der exemplarischen Antennen-Empfänger-Konfiguration für alle drei Tage aufgetragen, die zur qualitativen Bewertung des jeweiligen Rauschniveaus herangezogen werden. Außerdem sind die Quantil-Quantil-Plots für drei repräsentative Satelliten sowohl für Code-DD als auch für Trägerphasen-DD dargestellt, mit deren Hilfe die statistische Verteilung der Residuen überprüft wird. Satellit PRN 06 ist immer bei einer Elevation von $< 30^\circ$ sichtbar, während sich die Satelliten PRN 17 und PRN 19 immer bei über 30° Elevation befinden. Die wichtigsten Erkenntnisse werden festgehalten:

- ▶ Das Rauschniveau der Code-DD liegt für die meisten Satelliten bei ca. 1 m, das Rauschniveau der Trägerphasen-DD bei etwas unterhalb 1 cm. Bei Code-DD gibt es mehr Ausreißer von einzelnen Satelliten verglichen mit Trägerphasen-DD.
- ▶ Die Rauschniveaus der verschiedenen Tage passen sehr gut zusammen. Die Standardabweichungen sind wiederholbar.
- ▶ Das vollständig hochsensitive Equipment (*TAL1*, *TAL2*) hat im Vergleich zu allen anderen Kombinationen ein etwas höheres Rauschen in den Code-DD. In den Trägerphasen-DD treten keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Empfängern auf.
- ▶ Die Code-DD der Satelliten in hoher Elevation (PRN 17 und PRN 19) sind bis auf wenige Ausreißer in den Datenpunkten normalverteilt. Nahezu alle Datenpunkte folgen der linearen Linie der Normalverteilung. Ähnliches gilt für die Trägerphasen-DD dieser Satelliten, jedoch sind hier etwas mehr Abweichungen von der Normalverteilung zu beobachten (insbesondere für die Stationen *TAL1* und *TAL2*).
- ▶ Für die Code-DD des Satelliten mit niedriger Elevation (PRN 06) sind in den Q-Q-Plots deutliche Ausuferungen zu sehen, was bedeutet, dass ein Großteil der Residuen nicht normalverteilt ist. Dies gilt für die vier u-blox Receiver, bei den Septentrio Receivern ist vergleichsweise kein so großer Unterschied zu den anderen Satelliten zu erkennen. Die Trägerphasen-DD folgen trotz niedriger Elevationen größtenteils der Normalverteilung.

Um die siderische Wiederholbarkeit der Doppeldifferenzen zu analysieren, werden die Residuen von drei aufeinander folgenden Tagen (DOY 220, 221, 222) berechnet und verglichen. Die Satelliten-individuelle Zeitverschiebung (Auflösung 1 Hz) der Zeitreihen wird durch Kreuzkorrelation berechnet und die Zeitreihen werden dann um diese Zeitabweichung verschoben. Die Kreuzkorrelationskoeffizienten, die Zeitverschiebungen und die sich daraus ergebenden Doppeldifferenzzeitreihen sind in Abb. 2.13, Abb. 2.14 und Abb. 2.15 für jede der ersten fünf Stunden (0:00 bis 5:00) für die exemplarische Antennen-Empfänger-Kombination dargestellt.

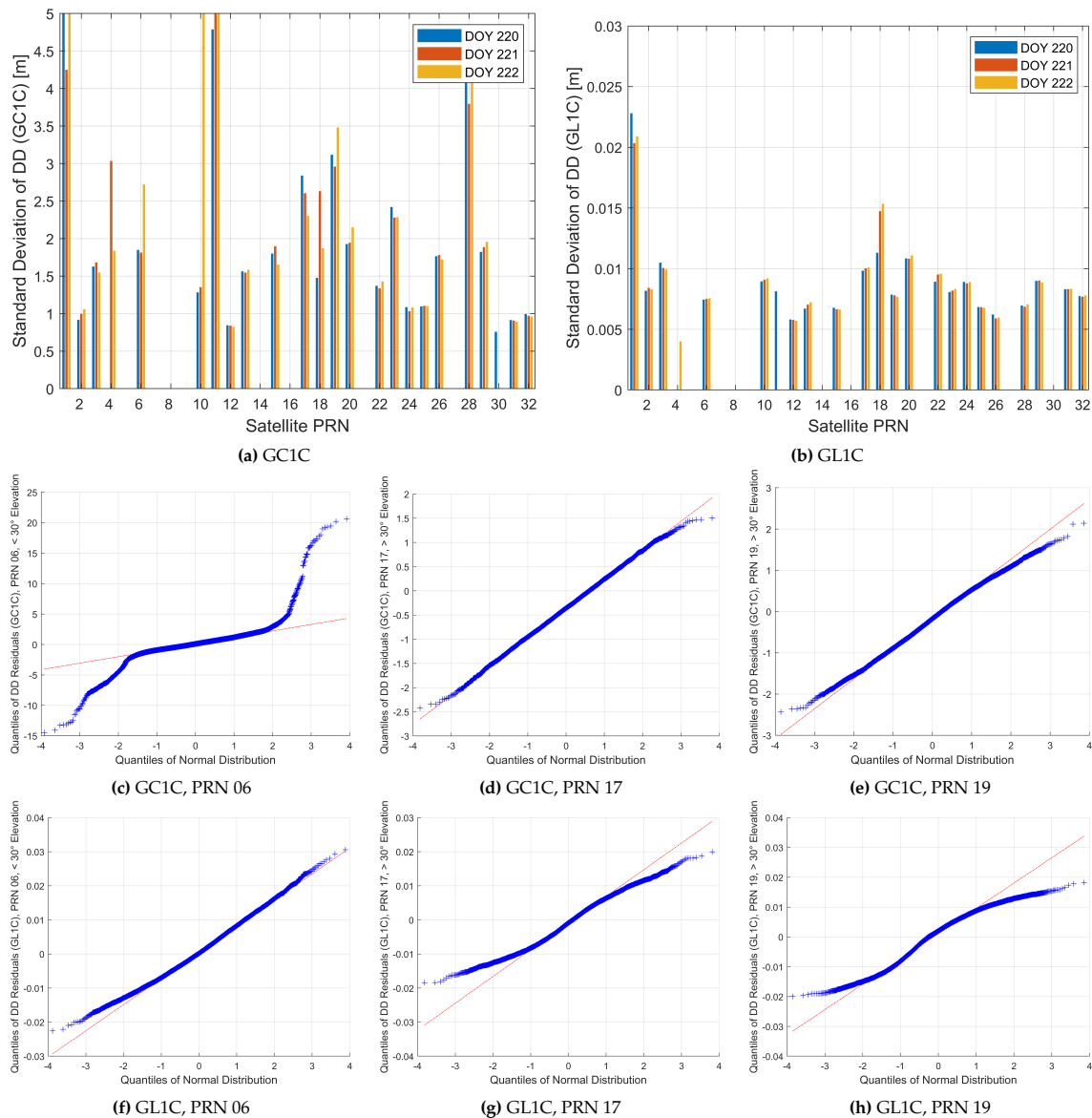


Abbildung 2.12: TAL2: Rauschniveau für alle GPS Satelliten und Quantil-Quantil-Plots der berechneten Doppeldifferenz-Zeitreihen (DOY 220 - 222) für ausgewählte GPS Satelliten.

Insgesamt ergeben sich sowohl für die Code-Doppeldifferenzen als auch für die Trägerphasen-Doppeldifferenzen hohe Korrelationen von über 0,8. Die Korrelationskoeffizienten für DD aus Trägerphasen sind etwas höher als die für Code-DD. Wenn der Korrelationskoeffizient von Zeitreihen niedrig ist, gibt es zwei Gründe: (i) die Eingangszeitreihen für die Korrelation sind von kurzer Dauer (z. B. PRN 11 und PRN 18, < 30 Minuten) innerhalb des gewählten Zeitraums, oder (ii) ein Ausreißer tritt in einer der Zeitreihen auf, der bei der DD-Berechnung nicht eliminiert wurde (z. B. UBX5341, PRN 10 und PRN 17, GC1C).

Bei Satelliten, deren Korrelationskoeffizient niedrig ist, sollte die daraus berechnete zeitliche Abweichung von 24 Stunden – also die individuelle Umlaufzeit eines Satelliten – zumindest mit Vorsicht betrachtet werden. Die ungefähre mittlere Umlaufzeit eines GPS Satelliten beträgt ≈ 24 h 56 min, so dass die hier vorgestellten Ergebnisse mit der Literatur übereinstimmen, da die meisten individuellen 24-Stunden-Abweichungen zwischen 240 Sekunden und 250 Sekunden liegen. Die hohen Korrelationskoeffizienten lassen darauf schließen, dass die Wiederholbarkeit der Doppeldifferenzen gewährleistet ist. Zur Überprüfung wurden die DD-Zeitreihen der drei Tage exemplarisch von drei verschiedenen Satelliten

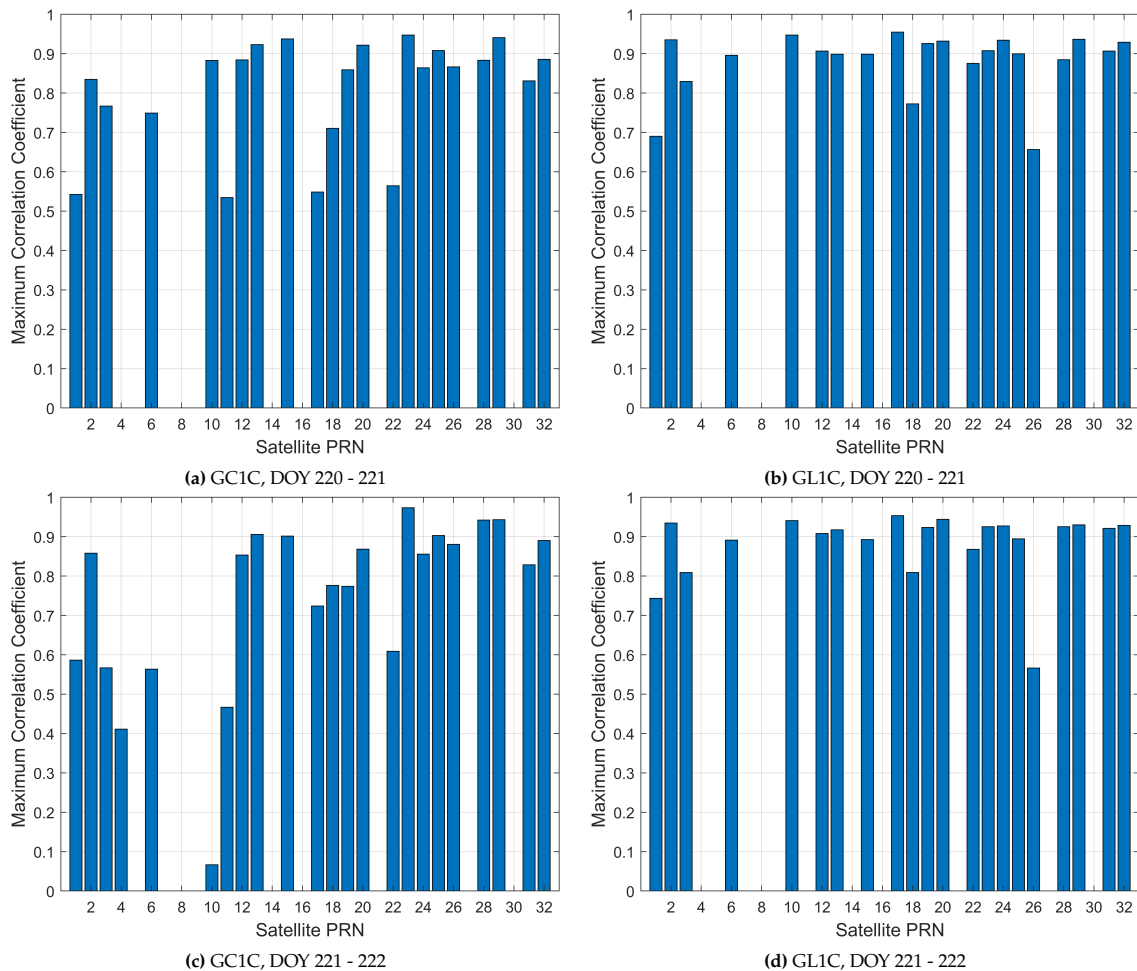


Abbildung 2.13: Maxima von Kreuzkorrelationskoeffizienten der Doppeldifferenz-Zeitreihen aller GPS Satelliten für Code ((a),(c)) und Trägerphase ((b),(d)).

überlagert. Insgesamt lässt sich sagen, dass Drifts, Sprünge und Oszillationen sowohl in Code- als auch in Trägerphasen-DD an allen drei Tagen ungefähr gleich sind. Bei Zeitreihen mit hoher Korrelation werden diese nahezu 1:1 abgebildet.

Zur Analyse der räumlichen Wiederholbarkeit von Doppeldifferenzen werden die Doppeldifferenzen der drei Tage (DOY 220 bis DOY 222) für alle Antennen-Empfänger-Kombinationen berechnet und miteinander verglichen. Die Ergebnisse von DOY 220 werden exemplarisch dargestellt, die Ergebnisse der anderen beiden Tage sind vergleichbar. Es werden die Kreuzkorrelationskoeffizienten für Doppeldifferenz-Zeitreihen von räumlich verschobenen Antennen berechnet. Das Equipment — Antenne und Empfänger — ist jeweils das baugleiche. Anschließend sind die Zeitreihen in einem Plot zusammen mit der Differenz der beiden Zeitreihen abgebildet, um die Ähnlichkeit zu analysieren.

Die maximalen Kreuzkorrelationskoeffizienten (siehe Abb. 2.16), die einen Hinweis für die räumliche Wiederholbarkeit der Doppeldifferenzen liefern, sind geringer als bei der Untersuchung der siderischen Wiederholbarkeit. Bei den Septentrio Receivern haben nur noch wenige Satelliten einen Wert über 0,8. Bei den u-blox Empfängern fällt die Korrelation noch schwächer aus.

Ein Grund für die nicht so hohe räumliche Korrelation könnte die unterschiedliche Sicht der jeweils untersuchten Stationen sein. Da die eine Station näher an der Gebäudecke installiert war, hat diese eine unterschiedliche Abschattung als die zum Vergleich verwendete Station und somit können die Doppeldifferenzen ein anderes Muster aufweisen und die Korrelation abschwächen. Optimal zur

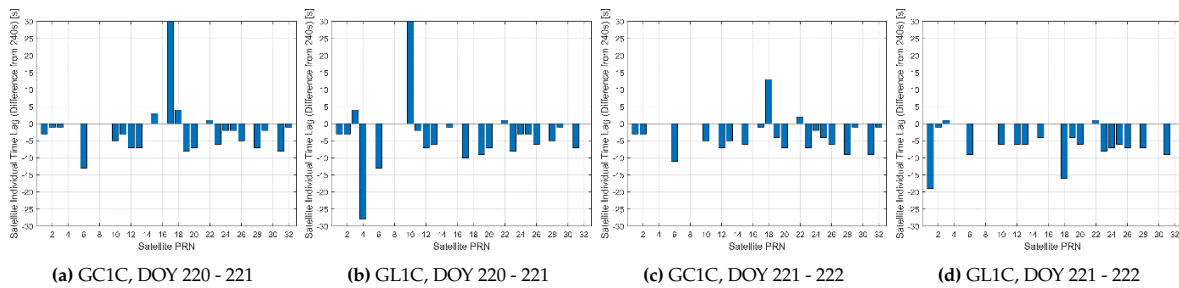


Abbildung 2.14: Mittels Kreuzkorrelation berechnete Abweichungen der Satellitenumlaufzeit von 24 Stunden für alle GPS-Satelliten für Code ((a),(c)) und Trägerphase ((b),(d)).

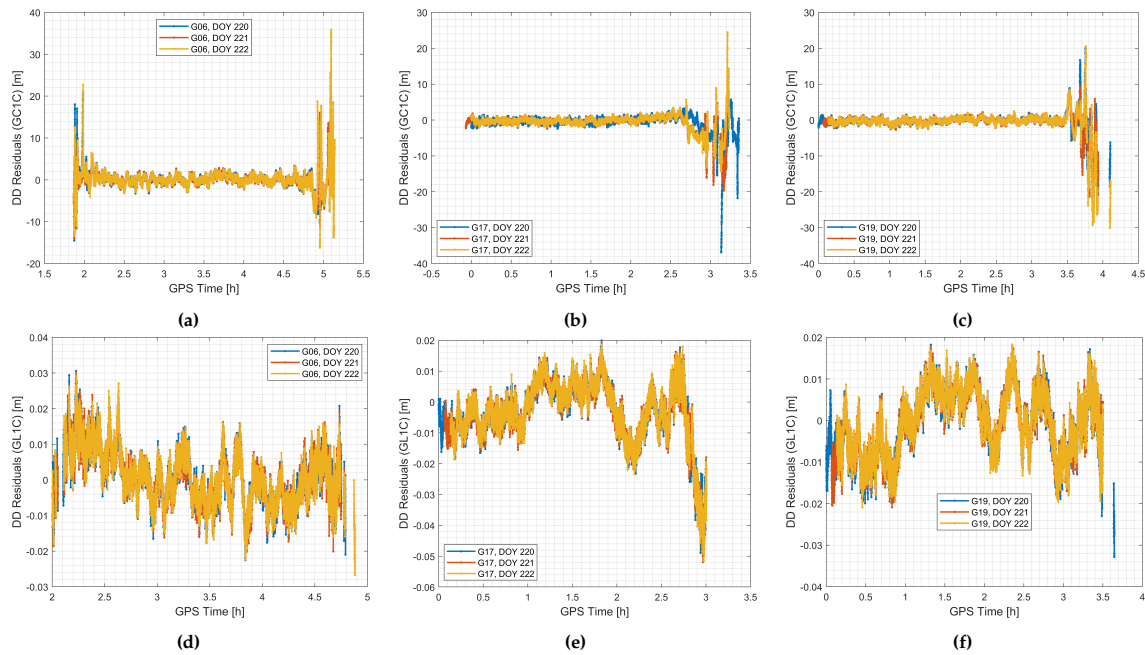


Abbildung 2.15: GPS L1 Doppeldifferenz-Residuen für Code ((a)-(c)) und Trägerphase ((d)-(f)) des GPS L1 Signals.

Untersuchung der räumlichen Wiederholbarkeit wäre, wenn die Gebäudeecke zumindest weiter entfernt wäre.

In Abb. 2.17 wird die räumliche Wiederholbarkeit direkt anhand der Zeitreihen der Doppeldifferenzen untersucht. Die Zeitreihen der beiden untersuchten Stationen und Empfänger werden zusammen mit ihrer Differenz in einem Plot dargestellt. Die niedrigeren Korrelationskoeffizienten haben bereits angedeutet, dass eine visuelle Verbesserung nicht immer direkt durch die Differenzbildung erreicht wird. Allerdings lassen sich Oszillationen und Drifts durch Differenzbildung - zumindest für einige Abschnitte der Zeitreihen - reduzieren.

In Tab. 2.7 wurde bereits die Anzahl an LOS und NLOS Doppeldifferenzen diskutiert. Im nächsten Schritt wird analysiert, wie sich die Doppeldifferenzen in LOS und NLOS Phasen und insbesondere in den Übergängen zwischen beiden Phasen verhalten.

Exemplarisch werden weiterhin die drei GPS-Satelliten PRN 6, 17 und 19 an Station *TAL2* betrachtet, da alle innerhalb des untersuchten Zeitraums mindestens einen Übergang von LOS zu NLOS haben (siehe Abb. 2.18). Zusätzlich zu den in grün (LOS) und rot (NLOS) eingefärbten DD werden die C/N_0 s der ausgewählten Satelliten dargestellt, um eine weitere Metrik zu haben, die das Signal charakterisiert.

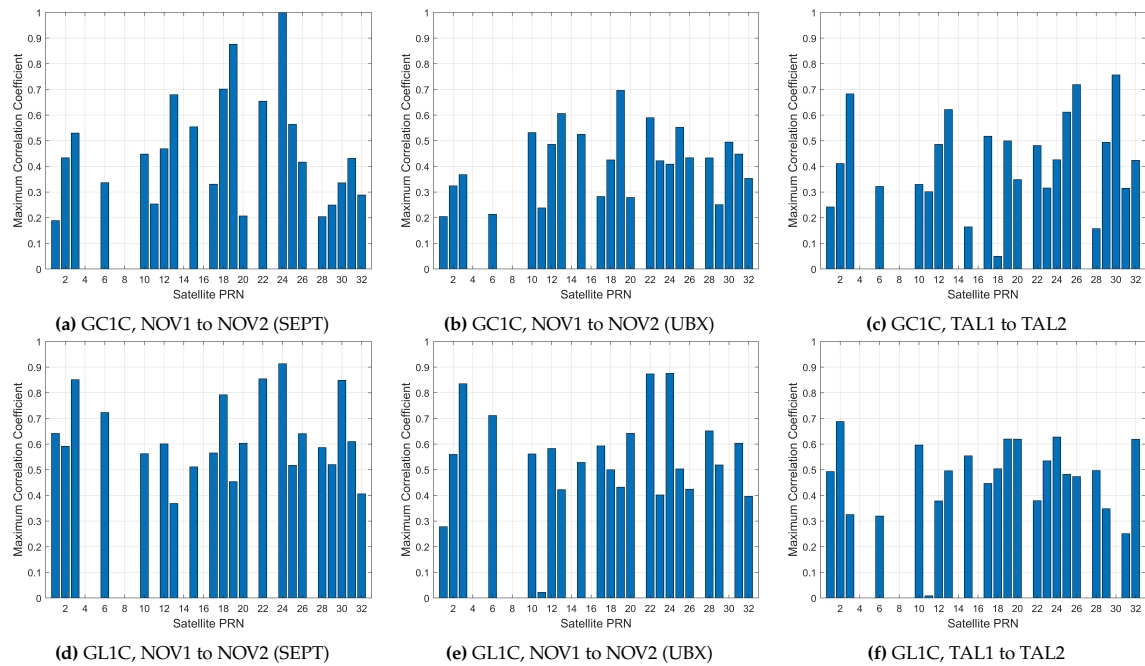


Abbildung 2.16: Maximale Kreuzkorrelationskoeffizienten von Zeitreihen des gleichen Tages unterschiedlicher Stationen.

Im Folgenden sind die wichtigsten Erkenntnisse aus allen Analysen der LOS/NLOS Klassifizierung zusammengetragen:

- ▶ Bei Betrachtung aller Zeitreihen fällt auf, dass die DD zu Zeiten von NLOS Phasen stark von Systematiken beeinflusst sind. Das Rauschen steigt an, die Amplituden der Oszillationen werden ebenfalls größer und zum Teil sind Offsets von einigen Metern (Code) bzw. einigen Zentimetern (Trägerphase) zu beobachten.
- ▶ Die Charakteristik aus Tab. 2.7, dass mehr NLOS Code Doppeldifferenzen vorhanden sind als NLOS Trägerphasen Doppeldifferenzen, wird hier bestätigt. Besonders Satellit PRN 19 zeigt dieses Verhalten: die Code DD ab Zeitpunkt 4 Uhr sind stärker verrauscht, driften und zum Teil ist ein großer Offset vorhanden. Das Trägerphasen-Signal reißt in allen Antennen-Empfänger-Kombinationen früher ab.
- ▶ Bei Oszillationen in den LOS Doppeldifferenzen ist in den meisten Fällen auch eine Oszillation in den C/N_0 Werten zu sehen.
- ▶ Bei Betrachtung der C/N_0 s fällt auf, dass die Signalstärke zum Ende einer LOS Phase bereits abfällt bevor der Satellit vom Gebäude vollständig verdeckt wird. Sobald der Satellit NLOS wird, treten in den Signalstärken größere Amplituden in den Oszillationen auf und ein noch größerer Abfall ist zu sehen. Dieser Diffraktionseffekt ist besonders gut bei PRN 17 zu beobachten.
- ▶ Alle auffälligen Charakteristiken lassen sich auf alle Tage und alle Antennen-Empfänger-Kombinationen übertragen, auch wenn sich die Doppeldifferenzen an sich natürlich etwas unterscheiden (siehe vorherige Analysen). Ebenfalls sind die analysierten Muster für alle Satelliten, die einen solchen LOS-NLOS-Verlauf haben, ähnlich.

Analyse von DD Residuen unter statisch urbanen Multipath Bedingungen

Das pseudo-kinematische Experiment (vgl. Kap. 2.3) dient als Grundlage, um die Residuen mit besonderem Fokus auf die Reproduzierbarkeit von Mehrwegeeffekten zu analysieren. Die Datengrundlage ist für diese Analyse besonders geeignet, da statische Messungen an aufeinander folgenden Tagen für leicht veränderte Antennenpositionen (2 cm Verschiebung pro Tag) durchgeführt wurden. Für die Analyse

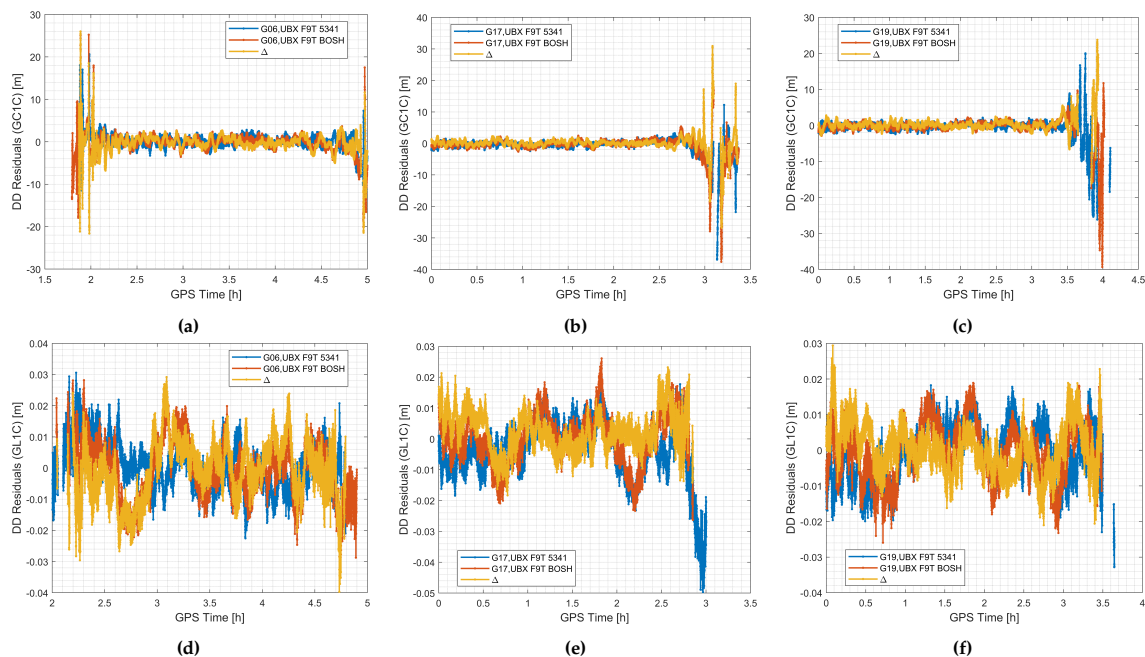


Abbildung 2.17: TALI zu TAL2: GPS L1 Doppeldifferenz-Residuen für Code ((a)-(c)) und Trägerphase ((d)-(f)) des GPS L1 Signals.

der Reproduzierbarkeit werden die GPS-Orbit Eigenschaften zunutze gemacht. Da GPS-Satelliten eine Umlaufzeit von etwa 23 und 56 min haben, können Residuen-Zeitreihen von unterschiedlichen Tagen miteinander verglichen werden, wenn die genaue Umlaufzeit bekannt ist. Da die Satellitenpositionen bereits bekannt sind, wird die Berechnung der zeitlichen Verschiebung für jeden Satelliten durch Minimierung der LOS-Vektor Differenz realisiert. Eine Validierung der Ergebnisse für die größtmögliche Verschiebung (Vergleich DOY 132 mit DOY 140) ist in Abb. 2.19 zu sehen. Dargestellt sind die Differenzen der Elevations- und Azimut-Zeitreihen zwischen DOY 132 und DOY 140 nach Korrektur der individuellen Zeitverschiebung. Die Unterschiede in den Satellitenpositionen sind sehr gering ($\pm 0, 1^\circ$ in Elevation und $\pm 0, 5^\circ$ in Azimut), weshalb im Folgenden mit diesen Satellitenverschiebungen gerechnet wird.

In Abb. 2.20 sind die DD Residuen eines exemplarischen Satelliten dargestellt. Die obere Reihe zeigt jeweils die Code- und Trägerphasen Residuen für zwei aufeinander folgende Tage (DOY 132 und DOY 133), sowie die Differenz der Zeitreihen. Das Ergebnis der Differenzbildung ist die Eliminierung von Mehrwegefehlern. Der Offset von ca. 25 m, der zu Beginn der Code Residuen Zeitreihe zu sehen ist und durch die NLOS Phase des Satelliten dominiert ist, kann durch Differenzbildung eliminiert werden. Zusätzlich können aber auch Oszillationen in der Zeitreihe, verursacht durch Multipath (LOS plus Reflexion) Bereiche, reduziert werden (siehe Abb. 2.20). Bei der Betrachtung der Trägerphasen Residuen fällt auf, dass sowohl die langperiodische Drift, als auch die höherfrequenten Oszillationen durch Multipath eliminiert werden können.

In der unteren Reihe von Abb. 2.20 sind die Zeitreihen für die größtmögliche Verschiebung der Antenne (20 cm) dargestellt. Der Offset in der Code Residuen Zeitreihe kann weiterhin eliminiert werden, da sich die Umweglänge des Signals durch die Antennenverschiebung nur geringfügig ändert. Für Bereiche, in denen Multipath auftritt, sehen die Ergebnisse allerdings anders aus. Die Antennenverschiebung sorgt für eine Veränderung der Phasenlage des reflektierten Signals und die Veränderung der Phasenlage wiederum resultiert in einer veränderten Amplitude des Mehrwegefehlers. In den Zeitreihen drückt sich das durch verschobene Maxima der Amplituden aus, was durch Differenzbildung zum Teil sogar zu einer Vergrößerung des eigentlichen Fehlers führt. Daher lässt sich abschließend sagen, dass eine Reproduzierbarkeit von Residuen in Multipath Bereichen durch Veränderungen der Antennenposition im cm-Bereich bereits nicht mehr gegeben ist.

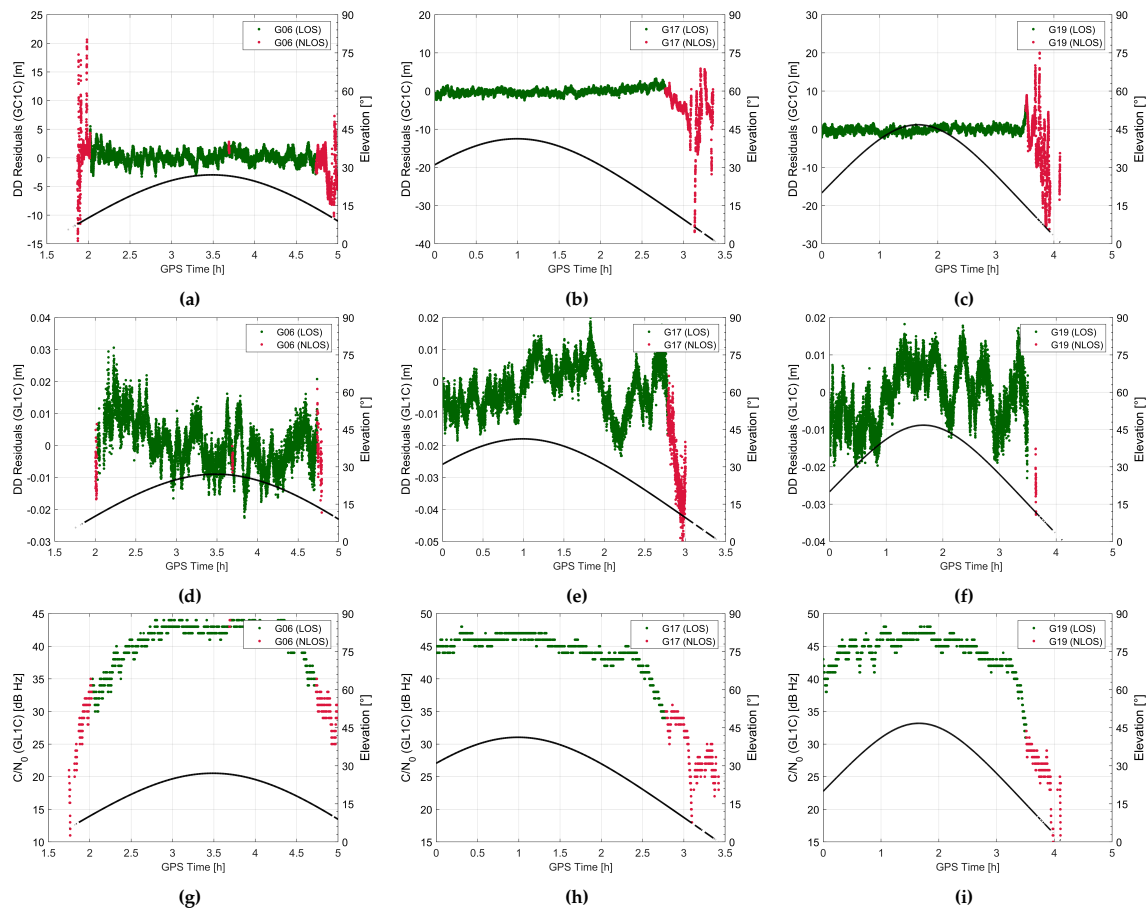


Abbildung 2.18: DOY 220, TAL2: GPS L1 Doppeldifferenz-Residuen für Code ((a)-(c)) und Trägerphase ((d)-(f)) und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis des GPS L1 Signals ((g)-(i)). Rote Datenpunkte sind mithilfe des 3D-Stadtmodells als Non-Line-Of-Sight (NLOS) klassifizierte Signale, grüne Datenpunkte entsprechend Line-Of-Sight (LOS) Signale.

Analyse von DD Residuen in statisch urbanen NLOS Situationen

Das vom IfE durchgeführte statische Experiment (siehe Kap. 2.3) dient als Datengrundlage für die Analyse (Messung an zwei Tagen, je 6 Stunden, Antennenverschiebung ca. 20cm) von DD Residuen in statisch urbanen NLOS Situationen. Erneut wird die Zeitreihe des zweiten Tages anhand der individuellen Satellitenumlaufzeit verschoben (vgl. Kap. 2.5) Im Folgenden sind die wichtigsten Erkenntnisse der Analyse anhand von Abb. 2.21 zusammengefasst:

- ▶ Exemplarisch werden die Zeitreihen eines GPS Satelliten gezeigt, der sich für lange Zeit in einer NLOS Situation befindet. Die Ergebnisse sind repräsentativ für andere Satelliten und andere Signale.
- ▶ Die Verfügbarkeit von NLOS Trägerphasen ist stark eingeschränkt. Es kommt zu vielen Signalabbrüchen und Diskontinuitäten im Beobachtungsraum.
- ▶ Trotz der Antennenverschiebung um ca. 20 cm sind die Fehler in den Code DD durch NLOS Signalempfang wiederholbar. Die Zeitreihen der beiden Tage zeigen dieselbe Größenordnung an Fehler von 15 m bis 25 m.
- ▶ Der Fehler für Code Beobachtungen unter NLOS Bedingung (Signal wird als Einfachreflexion empfangen) lässt sich geometrisch mit der Umweglänge des reflektierten Signals beschreiben. Die mittels Raytracing ermittelte Umweglänge liegt (abgesehen vom Beobachtungsrauschen) innerhalb der beobachteten Fehler.

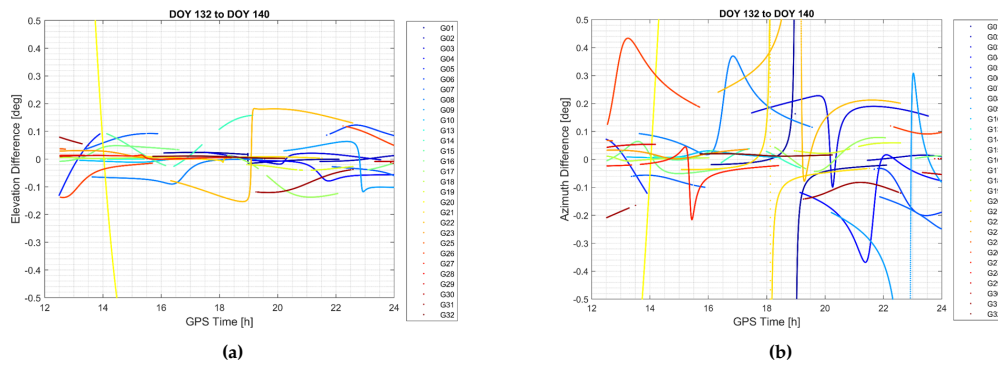


Abbildung 2.19: Validierung der zeitlichen Verschiebung für jeden GPS Satelliten durch Minimierung der LOS-Vektor Differenz. (a) zeigt die Elevationswinkel-, (b) die Azimutwinkel-Differenzen, jeweils nach Anbringung der zeitlichen Verschiebung.

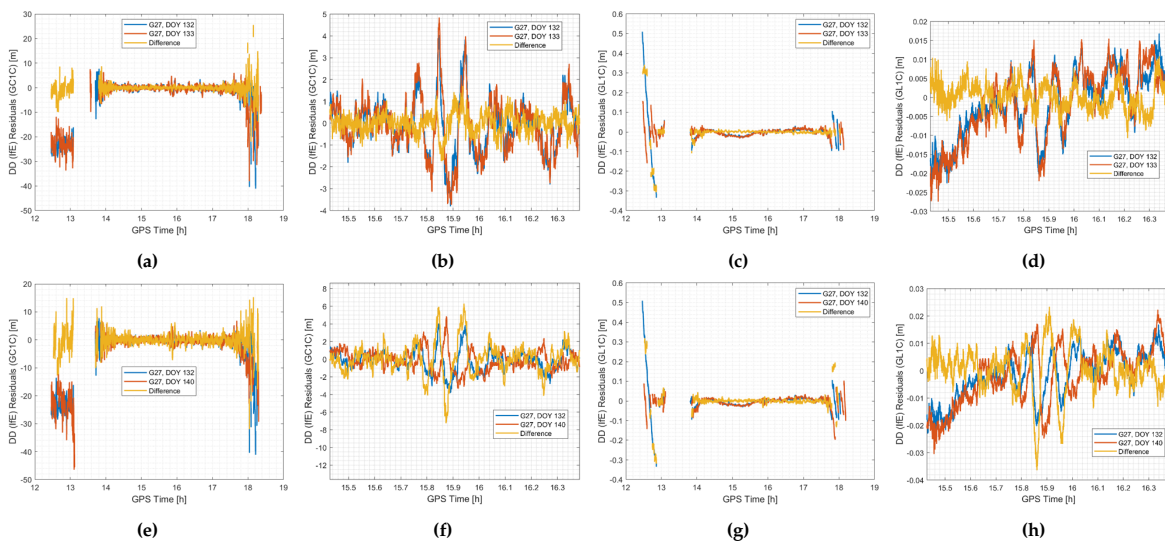


Abbildung 2.20: DOY 220, TAL2: GPS L1 Doppeldifferenz-Residuen für Code ((a)-(c)) und Trägerphase ((d)-(f)) und das Signal-zu-Rausch-Verhältnis des GPS L1 Signals ((g)-(i)). Rote Datenpunkte sind mithilfe des 3D-Stadtmodells als Non-Line-Of-Sight (NLOS) klassifizierte Signale, grüne Datenpunkte entsprechend Line-Of-Sight (LOS) Signale.

- ▶ Die verfügbaren Trägerphasen DD Residuen in statisch urbanen NLOS Situationen weisen starke Driften auf, die mehrere Dezimeter betragen.
- ▶ Durch die Antennenverschiebung ist keine klare Wiederholbarkeit der Trägerphasen DD zu erkennen, da Trägerphasen deutlich sensitiver (aufgrund des geringeren Rauschniveaus) gegenüber bereits kleinen geometrischen Veränderungen sind.
- ▶ Die Driften können näherungsweise geometrisch durch die zeitliche Veränderung der Umweglängen beschrieben werden. Jedoch ist kein klares Muster zu erkennen, ab welcher Größenordnung das Tracking unterbrochen wird.

Analyse von DD Residuen in kinematisch urbanen Szenarien

Um die GNSS-Signale und deren Propagationseigenschaften in kinematisch urbanen Bedingungen zu verstehen, wird eine der aufgenommenen Testfahrten (Hannover Vahrenwald, siehe Szenariobeschreibung in Abschnitt 2.3) genauer betrachtet. Bei den Daten handelt es sich um Multi-GNSS Beobachtungen mit einer Messfrequenz von 10 Hz. Dieselbe Trajektorie wurde insgesamt zehnmal wiederholt befahren. Um schwierige Empfangsbedingungen identifizieren zu können und Aussagen über die Reproduzierbarkeit von Residuen treffen zu können, sind zunächst die berechneten Code und Trägerphasen DD Residuen für je ein Signal der vier GNSS in Abb. 2.22 gegenüber der Distanz entlang

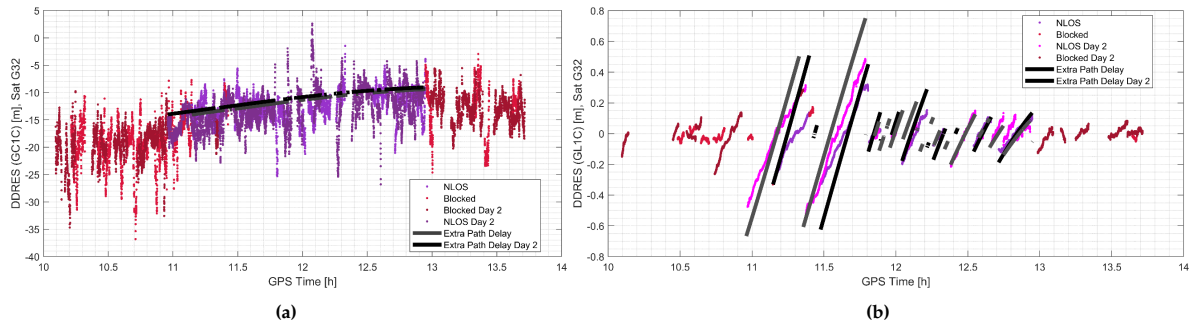


Abbildung 2.21: Analyse von DD Residuen in statisch urbanen NLOS Situationen. (a) zeigt die Code DD Residuen des GPS L1 Signals für einen ausgewählten Satelliten, (b) zeigt die Trägerphasen DD Residuen desselben Satelliten.

der Trajektorie (*distance along track*) dargestellt. Dabei entspricht ein Datenpunkt auf der X-Achse genau einem Ort entlang der Trajektorie. Für die jeweiligen Satelliten (farbkodiert nach ihrer PRN) treten große Abweichungen in den Code DD Residuen immer an den gleichen Punkten auf der X-Achse auf, was auf wiederholt auftretende kritische Situationen hindeutet. Obwohl sich die Satellitenpositionen in jeder Runde natürlich verändert, sind auch die Größenordnungen der Fehler in einem sehr ähnlichen Bereich. Auch für die Trägerphasen DD Residuen gilt, dass Abweichungen an denselben Stellen in der Trajektorie auftreten – in diesem Fall gekennzeichnet durch eine Drift in den Daten. Eine weitere Auffälligkeit ist, dass durch die kritischen Empfangsbedingungen die Mehrdeutigkeit nicht immer korrekt bestimmt werden kann (siehe vor allem Beidou). Zudem ist die Verfügbarkeit von Beobachtungen deutlich reduziert, was besonders auffällig für GLONASS Signale ist.

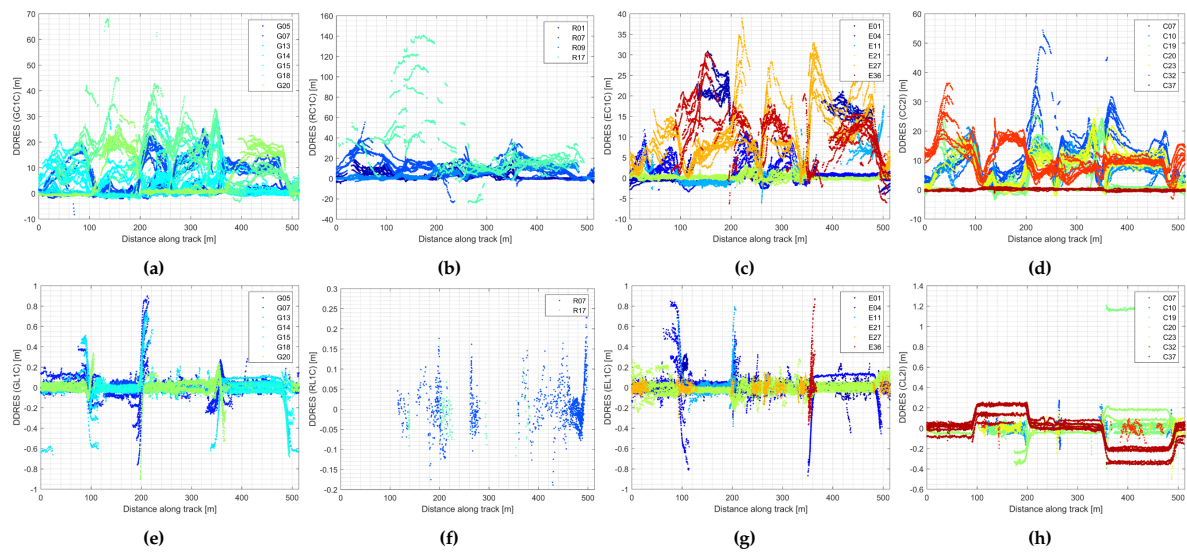


Abbildung 2.22: DD Residuen in Abhängigkeit der Distanz entlang der Route (*distance along track*). (a)-(d) zeigen die Code DD Residuen der vier GNSS, (e)-(h) zeigen die Trägerphasen DD Residuen der vier GNSS.

Um den Einfluss verschiedener Frequenzen auf die Empfangseigenschaften abzuschätzen, sind in Abb. 2.23 die Code DD Residuen der drei Galileo Signale *EC1C*, *EC5Q*, *EC7Q* von zwei Satelliten gegenüber der Distanz entlang der Trajektorie aufgetragen. Dabei ist erneut deutlich zu sehen, dass herausfordernde Empfangsbedingungen an denselben Stellen auftreten. Das gleiche gilt für die unterschiedlichen Signale mit verschiedenen Frequenzen. Die beobachteten Fehler in den Code DD Residuen sind nicht exakt dieselben, liegen aber die meiste Zeit in derselben Größenordnung. Das bedeutet, dass nicht nur eine gewisse Reproduzierbarkeit für empfangene Signale an denselben Orten mit denselben Satellitenpositionen gilt, sondern zusätzlich eine gewisse Reproduzierbarkeit für unterschiedliche Frequenzen gewährleistet ist.

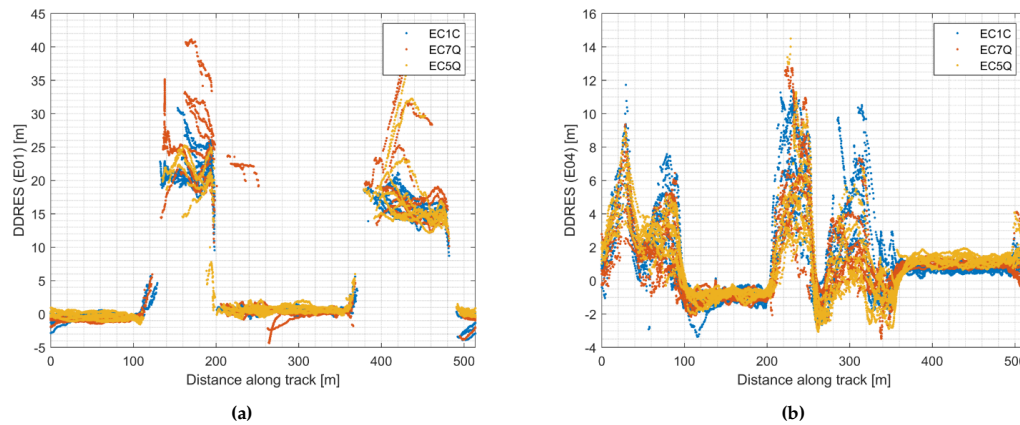


Abbildung 2.23: Code DD Residuen verschiedener Galileo Frequenzen (*EC1C*, *EC5Q*, *EC7Q*) von zwei Satelliten in Abhängigkeit der Distanz entlang der Route (*distance along track*).

2.6. AP5: Modellierung von GNSS-Signalcharakteristiken und Korrekturdatenkonzeption

Ziel des Arbeitspaketes ist die Untersuchung der Modellierbarkeit von GNSS-Signalcharakteristiken für Code-, Trägerphase und Doppler, aufbauend auf den Resultaten der AP3 und AP4. Dies umfasst folgende Analysen und Studien zur

- ▶ Dynamik der GNSS-Signaleigenschaften hinsichtlich Ort, und Zeit unter Berücksichtigung der Empfänger- und Satellitendynamik,
- ▶ siderischen Wiederholbarkeit, und kurzzeitigen Wiederholbarkeit (z.B. aufeinander folgender Fahrzeuge, wiederholtes Abfahren einer Trajektorie eines Fahrzeugs) zum Auffinden der Grenzen einer Ähnlichkeit der Signalcharakteristiken,
- ▶ methodischen Verarbeitung von Signalabrissen, Sprüngen und Cycle Slips hinsichtlich der Mehrdeutigkeitslösung.

Wesentlicher Punkt der durchzuführenden Arbeiten ist die Konzeption von Korrekturdaten für den Straßenbereich in Analogie zu klassischen RTK-Korrekturen, die beispielsweise als State-Space-Model, Flächenkorrekturdaten (zeitvariable Korrekturfläche pro Satellit), Kartierung der GNSS-Fehler (unter Anwendung der redundanzfreien Modellierung in Abhängigkeit von Azimut und Elevationswinkel) vorliegen. Grundlage hierfür ist die signaltechnische Modellierung der GNSS-Signalcharakteristiken für das städtische Umfeld.

Zwei wesentliche Ergebnisse wird dieses Arbeitspaket liefern. Das erste Ergebnis ist die Entwicklung eines geeigneten Modells, mit dem die Mehrwegebenlastung beschrieben und korrigiert werden kann und das in der Lage ist, die Kontinuität und Genauigkeit der urbanen GNSS-Beobachtungen zu verbessern. Die hier generierten Korrekturen werden in AP6 auf Verwertbarkeit geprüft. Diese Ergebnisse liefern Auskunft zur Entwicklung eines geeigneten Korrekturdatenformats.

Auf dieser Grundlage entsteht das zweite Ergebnis. Federführend durch Geo++ und in Kooperation mit Bosch wird gemeinsam ein Vorschlag zur Standardisierung des neuen Korrekturdatenformats erarbeitet.

Klassische Korrekturmodelle werden durch den Ist-Soll-Abgleich an Referenzstationen kalibriert, wobei Soll-Position und Geschwindigkeit bekannt und die Mehrdeutigkeiten gelöst sind. An dieser Stelle ist zu analysieren, ob Referenzstationen im innerstädtischen Bereich notwendig sind, welche Eigenschaften und Verteilungen diese aufweisen müssen und ob beispielsweise Daten geparkter Fahrzeuge verwendet werden können. Diese Arbeiten werden vom Partner IfE übernommen.

Modellierbarkeit von Trägerphasen Residuen in Multipath Situationen bei Ortsvariation

Der Trägerphasen Mehrwegefehler kann wie folgt ausgedrückt werden (Braasch, 2017):

$$\theta_c = \arctan \left(\frac{\alpha \sin \varphi_m}{1 + \alpha \cos \varphi_m} \right) \quad (2.1)$$

$$\varphi_m = \frac{2\pi\delta}{\lambda} \quad (2.2)$$

Die Umweglänge δ , parametrisiert durch den horizontalen Abstand zum Reflektor d_h , den Elevations- und Azimutwinkel zum Satelliten und den Normalenvektor des Reflektors, kann ausgedrückt werden als

$$\delta = 2d_h \cos(EL_{sat} - EL_n) \cos(Az_{sat} - Az_n) \quad (2.3)$$

In Ruwisch u. a. (2021) wurde analysiert, in wie weit der für die Größenordnung des Mehrwegefehlers maßgebliche Parameter, die relative Amplitude α bei bekannter Geometrie und zugrundeliegenden Trägerphasen Residuen geschätzt werden kann. Die durch das reflektierte Signal entstehende Phasenverschiebung φ_m wird mittels Raytracing berechnet und entsprechende Näherungswerte für die relative Amplitude werden mittels Materialeigenschaften des Reflektors ausgewählt (International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R), 2019).

Zur Analyse wurden die Daten des pseudokinematischen Experiments verwendet, da durch die statische Datenaufnahme und kontrolliert verschobene Antennenpositionen ideale Umgebungsbedingungen vorliegen. Zur Validierung der Ergebnisse wird ein GPS Satellit analysiert, der sich dauerhaft in MP Bedingungen befindet. Die geometrische Situation inklusive berechneter Reflexionspunkte und die für jede der zehn Antennenpositionen resultierenden Zeitreihen der Trägerphasenresiduen sind in Abb. 2.24 dargestellt. Diese Zeitreihen werden als Beobachtungen in der Schätzung der relativen Amplitude verwendet.

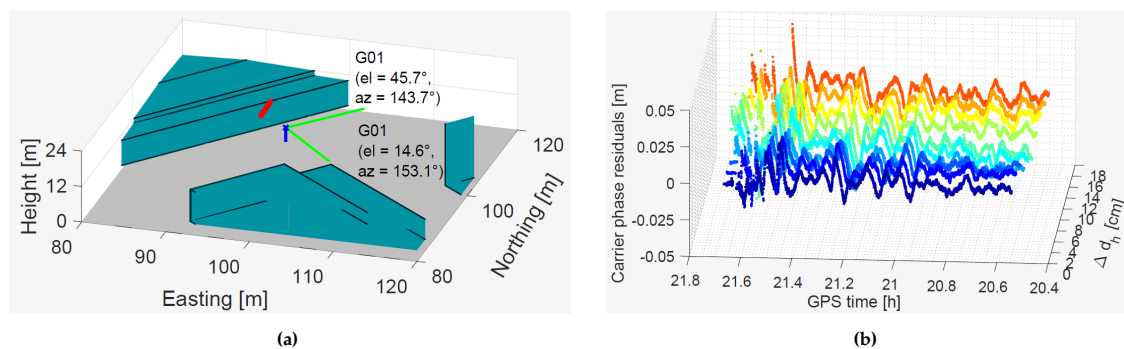


Abbildung 2.24: PRN 1: Geometrische Bedingungen zu Beginn und am Ende der MP-Zeitreihe mit allen ermittelten Reflexionspunkten (rote Punkte) an Antennenposition 1 (a). In (b) sind die verschobenen MP-Zeitreihen nach den einzelnen Standorten eingefärbt dargestellt.

In Abb. 2.25 sind die Ergebnisse der Schätzung für den GPS Satelliten PRN 1 dargestellt. Die erste Reihe zeigt die geschätzten relativen Amplituden, während die Reihen zwei bis sechs den beobachteten Mehrwegefehler (blau) zusammen mit dem geschätzten Mehrwegefehler (orange) zeigt. Die Zeitreihen von PRN 1 zeigen ähnliche Muster an gleichen Zeitpunkten. In der ersten Hälfte der Zeitreihe passen die geschätzten Fehler auch zu einigen beobachteten Amplituden der Mehrwegefehler. In der zweiten Hälfte jedoch kann die relative Amplitude nicht mehr zufällig geschätzt werden – vermutlich durch andere zusätzliche Effekte in den beobachteten Signalen – denn die geschätzten Werte sind nahe an Null.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Schätzung der Trägerphasen-Mehrwegeeffekte klare und kontrollierte Mehrwegeumgebungen voraussetzt, zum Beispiel eine volle Abdeckung des Fresnel Ellipsoids auf der

Reflexionsfläche. Zudem muss der horizontale Abstand zur Reflektorfläche sehr präzise bekannt sein, um die geschätzten Fehler mit den beobachteten Fehlern vergleichen zu können. Das liegt daran, dass der Mehrwegefehler hoch-dynamisch und komplex ist. Daher ist die Schätzung von vielen zusätzlichen Faktoren beeinflusst, zum Beispiel die Genauigkeit der Bestimmung der zeitlichen Satellitenverschiebung, Unregelmäßigkeiten der Reflexionsfläche, Ungenauigkeiten des Gebäudemodells oder aber auch durch das Rauschen und verbleibende andere Systematiken in den Trägerphasenresiduen.

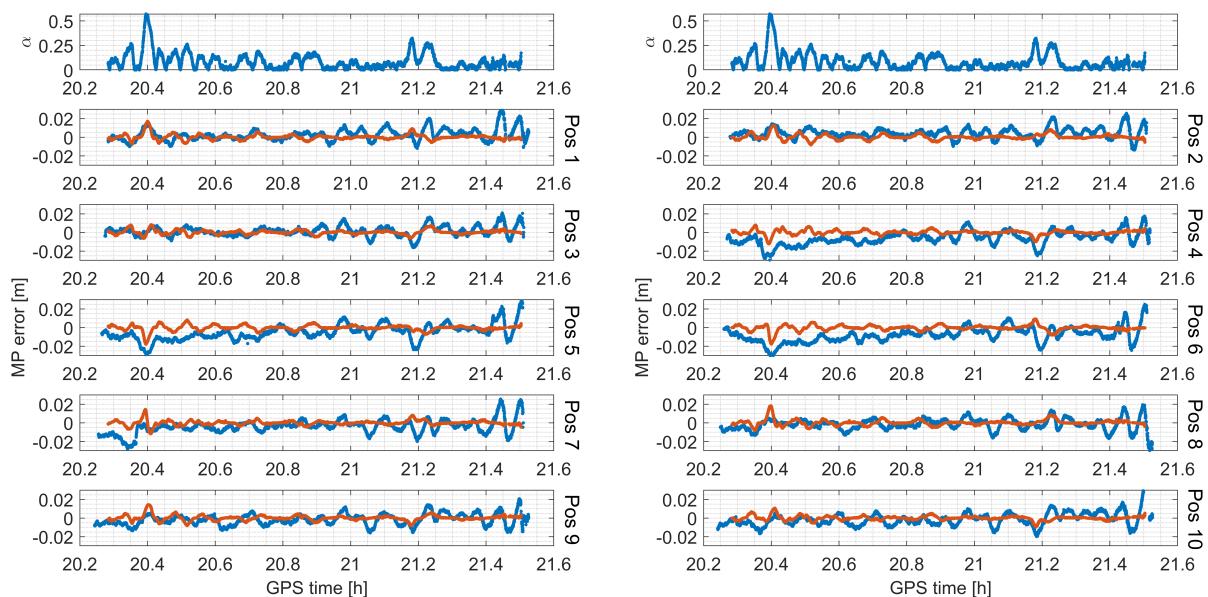


Abbildung 2.25: Ergebnisse der Schätzung für den Satelliten PRN 1: Die erste Zeile zeigt die relative Amplitude, in den Zeilen 2 bis 6 sind der beobachtete MP-Fehler (blau) zusammen mit dem geschätzten MP-Fehler (orange) abgebildet.

Ableitung und Qualitätsprüfung der aus Dopplermessungen integrierten Trägerphaseninformation

Die ersten Analysen der kinematisch urbanen Testfahrten zeigen eine deutlich reduzierte Verfügbarkeit von Trägerphasenbeobachtungen. Die zahlreich auftretenden Diskontinuitäten führen zu sehr kurzen kontinuierlichen Satellitenbögen und damit zu sehr schwierigen Bedingungen für eine zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung. Die Idee ist, dass die deutlich kontinuierlicher verfügbaren Dopplermessungen verwendet werden können, um Trägerphasenbeobachtungen wiederherstellen zu können. Das funktioniert durch eine zeitliche Integration der kontinuierlich verfügbaren Dopplermessungen. Das Ergebnis der Wiederherstellung der aus Dopplermessungen integrierten Trägerphaseninformationen ist in Abb. 2.26 beispielhaft für alle verfügbaren GPS L1 Satellitensignale während eines Szenarios der Vahrenwaldroute (siehe Szenario-Beschreibung in Abschnitt 2.3) dargestellt. Die Hypothese, dass durch die Integration des Dopplers die Verfügbarkeit erhöht wird, ist bestätigt: insgesamt lassen sich durch diese Methodik 28 % mehr Beobachtungen wiederherstellen als im Vergleich als reine Trägerphasenbeobachtungen vorliegen. Allerdings sind auch die Dopplermessungen in kinematisch urbanen Szenarien nicht sehr stabil. Durch fehlerhafte Empfangsbedingungen und erhöhtes Rauschniveau entstehen Trackingfehler der prädierten Trägerphasenbeobachtungen. Diese Trackingfehler befinden sich in der Größenordnung von wenigen Zyklen der Wellenlänge bis hin zu einigen Hundert Zyklen. Durch diese Erkenntnisse ist offensichtlich, dass zwar die Verfügbarkeit gesteigert wird, aber eine zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung bei Verwendung von prädierten Trägerphasenbeobachtungen bei Trackingfehlern von mehreren Zyklen der Wellenlänge nicht möglich ist.

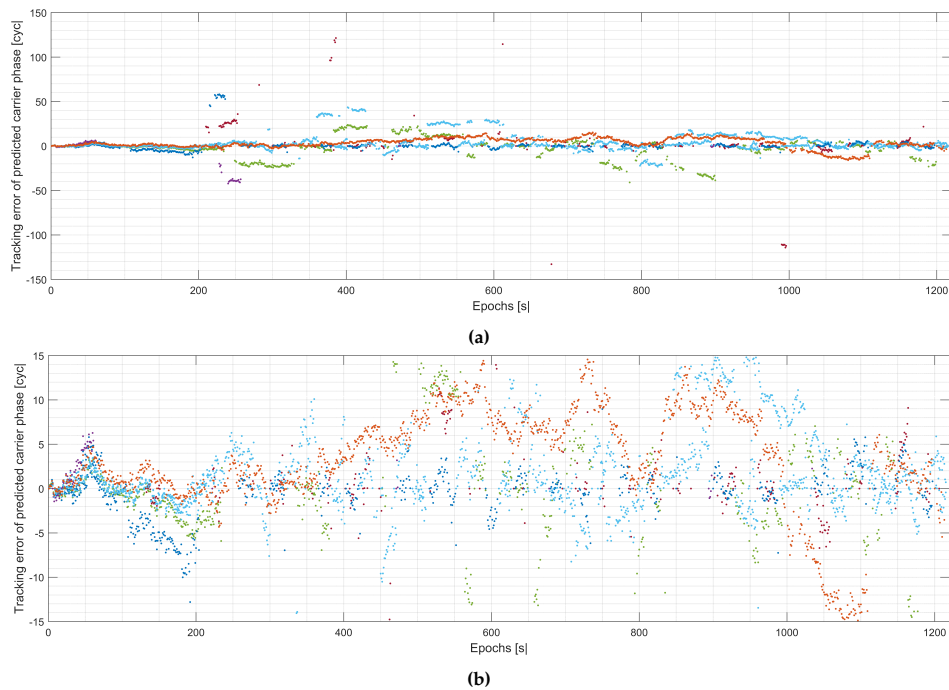


Abbildung 2.26: Aus Dopplermessungen integrierte Trägerphasenbeobachtungen einer kinematischen Testfahrt durch Hannover. (a) zeigt die Daten aller verfügbaren Signale, (b) ist ein Zoom auf die weniger großen Trackingfehler.

Konzept und Umsetzung der Kartierung von GNSS Daten

Zusammen mit den Partnern des Konsortiums wurden Vorschläge diskutiert, um die erhobenen Messdaten, sowie die bestimmten Residuen der GNSS-Beobachtungsdaten und potenzielle Korrekturen effizient und nutzerfreundlich zu speichern. Es wurde eine Datenbankstruktur gemeinsam konzeptioniert und notwendige Tabellenstrukturen und Relationen definiert. Diese SQL-Datenbankstruktur wurde von Geo++ auf einem Server aufgesetzt, auf den alle Partner gleichermaßen zugreifen können. Am IfE wurde ein Skript geschrieben, um mittels Matlab-Befehlen auf diese Datenbank zugreifen zu können und im nächsten Schritt diese definierten Tabellenstrukturen mit den erhobenen Daten befüllen zu können.

Beim Befüllen der Datenbank wurden diese Strukturen weiterentwickelt und an die Anforderungen der kinematischen Daten angepasst. Das IfE-Tooling zur Vorprozessierung der GNSS-Rohdaten wurde so erweitert, dass als Endprodukt ein Matlab-Workspace generiert wird, der alle notwendigen Informationen und Daten beinhaltet, um die Datenbank in einem Funktionsaufruf zu befüllen. Dazu gehören unter anderem die rohen Beobachtungsdaten, abgeleitete Range-Residuen, Positionsinformationen der Referenztrajektorie, Signalklassifikationen des Raytracers, aber auch Metadaten, wie zum Beispiel Antennen- und Empfänger-Typen, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Dieser Matlab-Workspace wird den Partnern von Bosch zur Verfügung gestellt, die diese Daten in die entsprechenden Tabellenstrukturen der Datenbank übertragen.

Im nächsten Schritt wird zusammen mit den Partnern des Konsortiums ein Konzept diskutiert und erarbeitet, wie die Datenbankstruktur genutzt werden kann, um die vorhandenen Daten mehrerer Testfahrten zu aggregieren und ein potentielles Korrekturmodell zu entwickeln. Durch die geleisteten Vorarbeiten in AP4 – die Reproduzierbarkeit insbesondere von Code Residuen an ähnlichem Ort bei gleicher Satellitenposition ist gegeben – konnte ein solches Konzept zur Datenaggregation erarbeitet werden. Anhand eines von Bosch zur Verfügung gestellten Fahrspurmodells, werden sogenannte Straßencluster mit einer vordefinierten Länge und Breite der Box generiert. Innerhalb eines solchen Straßenclusters werden alle verfügbaren Datenpunkte von wiederholt gefahrenen Trajektorien zusammengefasst. Eine weitere Aggregation der Daten findet auf Ebene der Satellitenpositionen statt, wo die verfügbaren Daten in einem Gitter (Grid) mit der Auflösung von 1° in Azimut und Elevation zusammengefasst

werden. Aus diesem Datenpool können dann wiederum statistische Kennzahlen, wie zum Beispiel mittlere Residuen oder Standardabweichungen berechnet werden.

Räumliche Analyse von GNSS-Signalcharakteristiken

Gemeinsam mit den Partnern von Bosch wurde ein Konzept entwickelt, wie aus der neuesten Messkampagne (drei baugleiche Massenmarktantennen wurden parallel (quer zur Fahrtrichtung) auf dem Autodach montiert) die örtliche Abhängigkeit von GNSS-Signalcharakteristiken abgeleitet werden kann. Nach der Festlegung eines Konzeptes wurden entsprechende Analysen durchgeführt und die Ergebnisse gemeinsam bewertet. Dabei wurde herausgearbeitet, dass auftretende Mehrwegefehler an allen drei Antennen eine ähnliche Größenordnung haben (Differenzen bewegen sich hauptsächlich innerhalb des Code-Rauschens von 3 m). Damit ist gewährleistet, dass sich das Testfahrzeug nicht exakt auf der Fahrspur bewegen muss, um entsprechende Korrekturen aus der Karte abzugreifen und anbringen zu können.

Validierung von aggregierten Signalcharakteristiken

In Ruwisch und Schön (2022a) wurden bereits wertvolle Vorarbeiten geleistet, um die Anwendbarkeit einer Karte zur Korrektur von Pseudoentfernungsbeobachtungen zu testen. In diesem konkreten Beispiel wurden mittels 3D-Gebäudemodell und Raytracing simulierte Umweglängen kartiert und auf Beobachtungsebene angebracht. Diese Ergebnisse zusammen mit den Erkenntnissen aus AP4 – die Reproduzierbarkeit von Residuen bei gleicher Antennen- und Satellitenposition – sind vielversprechend, um auch aggregierte bzw. kartierte Signalcharakteristiken aus realen Beobachtungsdaten als Korrekturdaten verwenden zu können.

Die Validierung der kartierten Signalcharakteristiken aus realen Beobachtungsdaten erfolgt im nächsten Schritt. Dazu werden die aggregierten Daten eines Szenarios (Vahrenwald, Szenario-Beschreibung siehe Abschnitt 2.3) aus der in Abschnitt 2.6 generierten Datenbank verwendet. Zunächst wird eine sehr feine Auflösung der Karte verwendet (die Clustergröße in der Straße beträgt 1 m in Fahrtrichtung und 5 m quer zur Fahrtrichtung). Die Analyse der aggregierten Residuen erfolgt anhand zwei exemplarischer Fahrspuren aus dem Fahrspurmodell von Bosch, die in Abb. 2.27 dargestellt sind. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass die Richtung der beiden Fahrspuren jeweils unterschiedlich ist, um verschiedene Satellitengeometrien evaluieren zu können. Die erste Fahrspur ist eine Nord-Süd ausgerichtete Straße, während die zweite Fahrspur Ost-West ausgerichtet ist.



Abbildung 2.27: Generierte Boxen der erstellten Karte mit Auflösung 1 m × 5 m für (a) Nord-Süd ausgerichtete Straße und (b) Ost-West ausgerichtete Straße.

Die visuelle Validierung der Charakteristiken der aggregierten Residuen entlang der Fahrspur erfolgt anhand der sogenannten GNSS Feature Map (Ruwisch und Schön, 2022a). Die Ergebnisse der beiden Fahrspuren sind in Abb. 2.28 als GNSS Feature Map dargestellt. Dabei sind gleiche Satellitenpositionen entlang der Route als vertikale Linien in den Abbildungen zu sehen. Aufgetragen sind jeweils die Code DD Residuen, farbkodiert anhand ihrer Größenordnung. Die X-Achse beschreibt die Satellitenpositionen, wobei 0° Norden bedeutet, 90° Osten, 180° Süden und 270° Westen. In den Abbildungen kann man erkennen, dass die Residuen bei variierendem Ort und gleicher Satellitenposition (vertikale Linien) in den meisten Fällen konstant sind – unabhängig von der Größenordnung der Residuen.

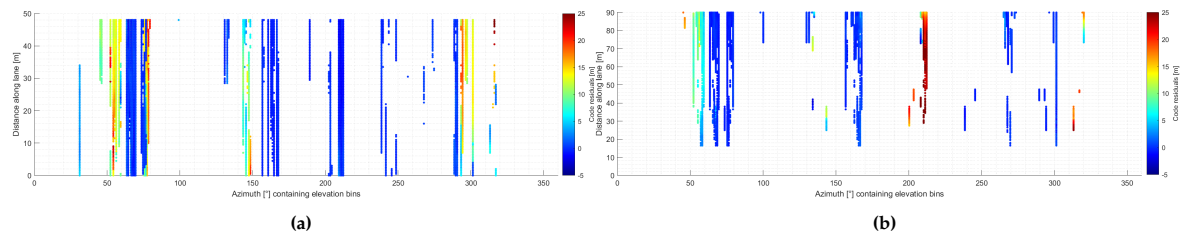


Abbildung 2.28: Generierte Boxen der erstellten Karte mit Auflösung $1\text{ m} \times 5\text{ m}$ für (a) Nord-Süd ausgerichtete Straße und (b) Ost-West ausgerichtete Straße.

Im nächsten Schritt werden die Differenzen der Residuen gebildet von Werten in gleichen Satellitenpositionscluster für jeweils aufeinanderfolgende Straßencluster. Das bedeutet, dass Differenzen entlang des Ortes bei gleichen Satellitenpositionen gebildet werden, was ein direktes Maß für die Residuenveränderungen ist. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.29 dargestellt. In den allermeisten Fällen sind die Datenpunkte grün gefärbt, was einem Wertebereich zwischen $\pm 1\text{ m}$ entspricht. Es existieren auch wenige Ausreißer, jedoch bewegt sich der Großteil der Residuendifferenzen innerhalb des zu erwartenden Messrauschens von $\pm 3\text{ m}$, das heißt, Veränderungen der Mehrwegefehler entlang der Route bei einer Straßenclustergröße von $1\text{ m} \times 5\text{ m}$ sind eher klein.

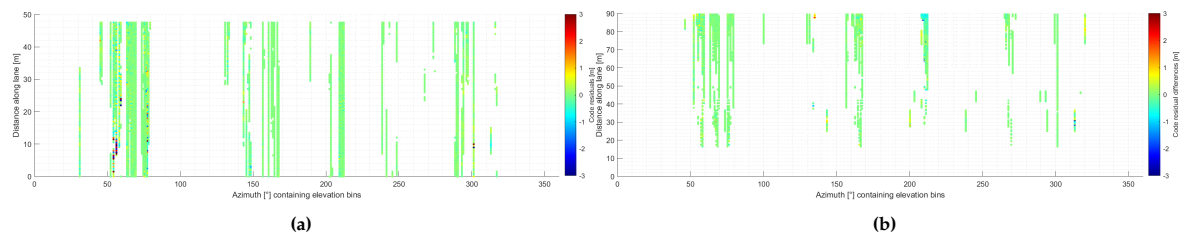


Abbildung 2.29: Generierte Boxen der erstellten Karte mit Auflösung $1\text{ m} \times 5\text{ m}$ für (a) Nord-Süd ausgerichtete Straße und (b) Ost-West ausgerichtete Straße.

Für die Anwendbarkeit ist eine Auswahl der Auflösung der Karte insbesondere für die Straßencluster von großer Bedeutung. Ist die Auflösung zu fein, kann die Folge eine falsche Zuweisung von Straßenclustern sein, da keine so präzise a priori Koordinate bestimmt werden kann. Ist die Auflösung zu grob, können die bereitgestellten Karteninformationen nicht genau genug oder fehlerhaft sein. Zur besseren Abwägung wird dieselbe Analyse erneut mit einer deutlich gröberen Auflösung der Straßencluster durchgeführt – die Größe der Straßencluster beträgt für diese Analyse $5\text{ m} \times 5\text{ m}$. Es wird die Nord-Süd ausgerichtete Fahrspur genauer betrachtet. Die generierten Straßencluster, die GNSS Feature Map der Code Residuen, sowie die GNSS Feature Map der Residuendifferenzen sind in Abb. 2.30 dargestellt. Auch hier sind weitestgehend konstante Größenordnungen der Residuen für gleiche Satellitenpositionen bei veränderter Position in der Straße zu beobachten. Die vertikalen Linien in der Abbildung sind nahezu gleichfarbig, unabhängig von dem absoluten Wertebereich der Residuen. Das spiegelt sich auch in den Residuendifferenzen wider, deren Datenpunkte größtenteils in grün farbkodiert sind, was sehr geringen Differenzen von $\pm 1\text{ m}$ entspricht. Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich der Großteil der Residuendifferenzen innerhalb des zu erwartenden Messrauschens von $\pm 3\text{ m}$ befinden, obwohl die Boxlänge von 1 m auf 5 m vergrößert wurde. Das heißt, dass selbst bei einer gröberen Auflösung der Karte für die Straßencluster, die Veränderungen der Mehrwegefehler entlang der Route eher klein sind. Damit kann das *Chicken-Egg* Problem umgangen werden, denn eine ungefähre a priori Position reicht bereits aus, um die Zusatzinformationen aus aggregierten Signalcharakteristiken zuverlässig verwenden zu können.

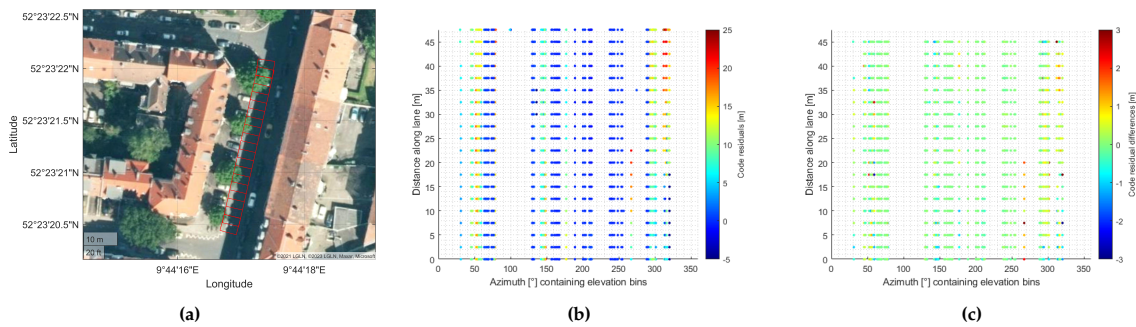


Abbildung 2.30: Validierung der Anwendbarkeit der kartierten Signalcharakteristiken bei gröberer Auflösung der Straßencluster (5 m × 5 m). (a) generierten Straßencluster, (b) die GNSS Feature Map der Code Residuen, (c) die GNSS Feature Map der Residuendifferenzen.

2.7. AP6: Entwicklung und Bewertung von Korrekturverfahren

In AP6 steht die Entwicklung, Implementierung und Bewertung von Korrekturverfahren bzw. Algorithmen im Fokus, welche die Verarbeitung der neuen Korrekturen im GNSS-Empfänger ermöglichen. Es besteht aus insgesamt fünf Schwerpunkten und fasst die Ergebnisse und entwickelten Modelle in einem Demonstrator (in Form einer prototypischen Implementierung der Korrekturverfahren) zusammen.

Im ersten Schwerpunkt steht die gemeinsame Entwicklung und Abstimmung eines grundlegenden Architekturkonzepts im Vordergrund, dazu eine Variante, die mit bestehenden kommerziellen GNSS-Empfängern kompatibel ist.

Der zweite und dritte Schwerpunkt behandelt die detaillierte Konzeption und Umsetzung von Algorithmen zur Verarbeitung der neuen Korrekturen im GNSS-Empfänger. Das im ersten Schwerpunkt von AP6 entwickelte Architekturkonzept soll hierbei schrittweise und ggf. iterativ verfeinert werden.

Im zweiten Schwerpunkt erfolgt die Entwicklung neuer Verfahren, die das volle Potential der Korrekturen ausschöpfen sollen (d.h. es liegen keine Restriktionen durch Abwärtskompatibilitäts-Anforderungen vor). Die Partner Bosch und Geo++ werden hierzu verschiedene Konzepte erarbeiten, wie die Korrekturen im Empfänger angebracht werden können. Nach Priorisierung der Alternativen werden Geo++ und IfE eine Auswahl implementieren und der Analyse zuführen.

Der dritten Schwerpunkt zielt auf die Verarbeitung der neuen Korrekturen in bestehenden kommerziellen Empfängern ab und stellt damit ein abwärtskompatibles Korrekturverfahren dar. Partner Geo++ forciert dazu die Entwicklung eines Korrekturdatenstroms im RTCM-Format sowie die Nachprozessierung der in AP2 aufgenommenen Beobachtungsdaten unter Nutzung des Record-Replay-Systems. Hierbei wird der Korrekturdatenstrom durch Geo++ als RTCM-Stream zur Verfügung gestellt, um kommerzielle empfängerinterne RTK-Lösungen zu berechnen und der Analyse zuzuführen. Mit Unterstützung durch die Partner Bosch und IfE wird Geo++ die Anwendung der Korrekturen implementieren und für verschiedene Empfänger innerhalb des Konzeptes validieren. Die Nachprozessierung konzentriert sich dabei auf die in AP1 ausgewählten kritischen Momente sowie klassifizierten Anforderungen, die entsprechend zu validieren sind.

Der vierten Schwerpunkt ist die anschließende Prüfung und Bewertung zur Steigerung der Ortungsgenauigkeit durch Anwendung der neuen Korrekturdaten unter Nutzung der in AP3 entwickelten Methodik. Die Quantifizierung des Performance-Gewinns sowie Aufzeigen kritischer Situationen und Grenzen des Verfahrens werden durch Bosch mit Unterstützung durch IfE und Geo++ vorgenommen.

Der fünfte und letzte Schwerpunkt dieses Arbeitspaketes ist der entwickelte Demonstrator, der mit dem Ansatz und entwickelten Konzepten getestet wird. Als Ergebnis wird die gegenwärtige Schätzung der urbanen GNSS-Trajektorie der verbesserten Trajektorie visuell gegenübergestellt.

Um eine zuverlässige Anwendbarkeit der entwickelten Korrekturverfahren zu gewährleisten, muss die gesteigerte Ortungsgenauigkeit entsprechend evaluiert werden.

Simulation

Dazu wird eine Trajektorie simuliert, die Teil der kritischen Szenarien von AP1 ist. Ein Punktabstand von 80 cm ergibt 250 Orte auf der Straße für dieses ausgewählte Szenario. Die Trajektorie ist in Abb. 2.31a mit roten Punkten dargestellt. Eine weitere Trajektorie mit einem größeren Punktabstand (4 m) ist mit blauen Kreisen dargestellt.

Für die Simulationsstudie werden reale Satellitenbahndaten mit einem Abtastintervall von 10 Hz während einer Zeitspanne von 2 Stunden verwendet. Die 250 Messpunkte werden durch Simulation einer dynamischen Hin- und Herfahrt wiederholt durchfahren. Zur Bestimmung potenzieller Umweglängen der Satellitensignale wird der Raytracing Algorithmus angewendet. Die berechneten Umweglängen sind in Abb. 2.31b in Form einer GNSS Feature Map dargestellt. Aus dieser Trajektorie mit hoher Auflösung geht hervor, dass die Umweglänge bei gleichen Satellitenpositionen nahezu konstant ist, wenn sich der Benutzer in der Straße in Fahrtrichtung bewegt und die Umgebung sich nicht verändert.

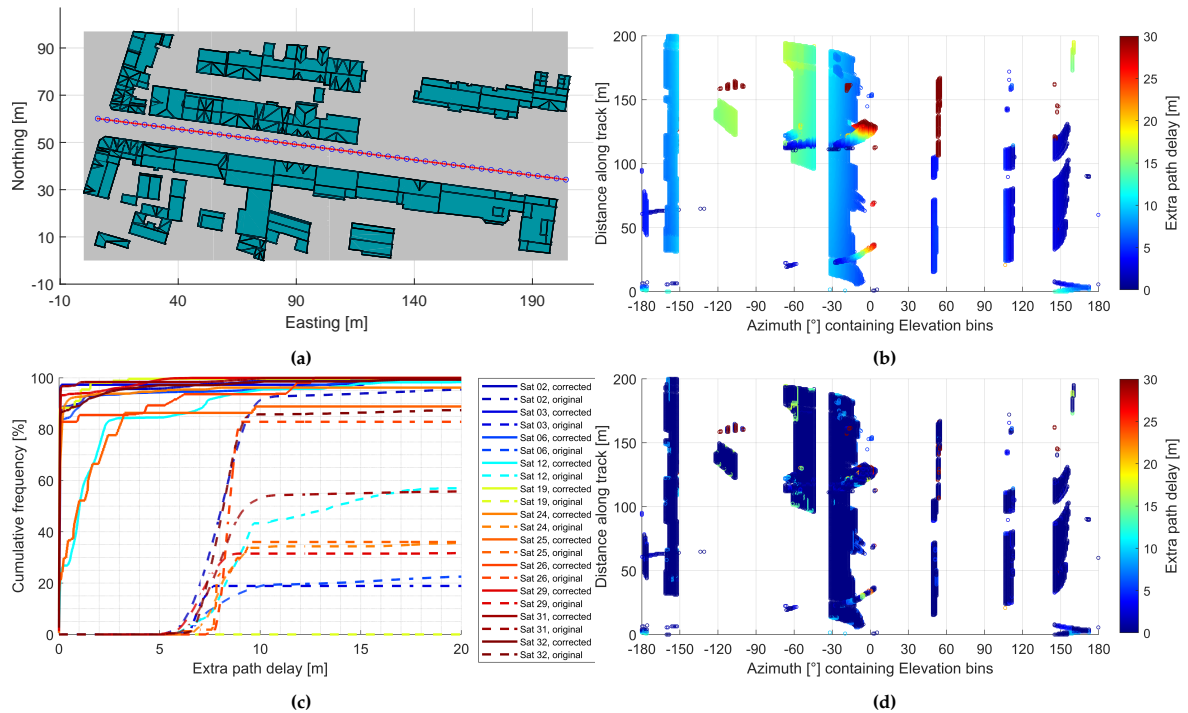


Abbildung 2.31: Simulationsaufbau und Ergebnisse der Korrektur unter Verwendung simulierter Daten. (a) Simulationsaufbau mit Referenzstandorten in blauen Kreisen und Rover-Standorten in roten Punkten, (b) GNSS Feature Map der Umweglängen an den Rover-Standorten, (c) Reduzierung der Umweglängen-Fehler bei Anwendung der Reflexionskorrektur in einem kumulativen Histogramm, (d) GNSS Feature Map der verbleibenden Umweglängenfehler nach der Korrektur.

Zur Bewertung des Ansatzes zur Korrektur der NLOS-Verzerrung werden die simulierten Umweglängen der Referenztrajektorie als Korrekturwerte verwendet, um die simulierten Umweglängen der Benutzertrajektorie (Rover) zu reduzieren. Zur Auswahl der Korrekturwerte werden zunächst die beiden benachbarten Referenzpositionen in der GNSS Feature Map durch Berechnung des euklidischen Abstands bestimmt. Zweitens werden die Umweglängen des nächstgelegenen Referenzpunktes von den berechneten Umweglängen am Benutzerstandort abgezogen.

In Abb. 2.31c ist die kumulative Häufigkeit der Umweglängen für die Nutzertrajektorie vor (gestrichelte Linien) und nach (durchgezogene Linien) Subtraktion der entsprechenden Umweglängen von der

Referenztrajektorie dargestellt. Die signifikante Reduktion der Umweglängen auf der Rover-Trajektorie ist deutlich sichtbar. Insgesamt werden die durchschnittlichen Abweichungen pro Satellit um 89% reduziert. Selbst an Orten, an denen die umgebenden Gebäudehöhen nicht konstant sind und sich die Umgebung schnell ändert, z.B. in 110 m Entfernung entlang der Straße, können die Umweglängen bei Anwendung der vorgeschlagenen Methode reduziert werden (vgl. Abb. 2.31d). Die Mehrzahl der Umweglängen nach Abzug der Korrekturwerte in der GNSS Feature Map ist dunkelblau dargestellt, was Werte nahe Null bedeutet. Es kann auch keine Häufung von verbleibenden Verzerrungen festgestellt werden.

Diese Ergebnisse führen zu der Schlussfolgerung, dass die geometrischen Beziehungen zwischen den Antennenstandorten der Nutzer und den Satellitenpositionen für kleine Entfernungen (in diesem Fall <4 m) in Längsrichtung der Straße als konstant angenommen werden können.

Reale Daten

Im nächsten Schritt wird die Anwendbarkeit des entwickelten Verfahrens auf Beobachtungsebene anhand von Doppeldifferenzen verifiziert. Dazu werden reale Daten eines kinematischen Experimentes verwendet. Während der 4,5 stündigen Testfahrt wird das ausgewählte Straßensegment aus dem vorherigen Abschnitt 23 mal passiert, was eine ausreichende Anzahl von NLOS DD-Beobachtungen mit wechselnder Satellitengeometrie liefert, um die Anwendbarkeit der potentiellen Korrekturen zu bewerten.

In dem ausgewählten Straßenabschnitt wurden insgesamt 8179 DD-Beobachtungen berechnet. Von diesen DD-Beobachtungen werden insgesamt 1130 durch unseren Korrekturansatz als NLOS klassifiziert. Diese NLOS-DD-Beobachtungen werden anschließend korrigiert.

In Abb. 2.32 sind die Ergebnisse dargestellt. Zu beachten ist, dass in diesen Abbildungen nur die als NLOS klassifizierten Signale dargestellt und analysiert werden. Abb. 2.32a visualisiert die beobachteten NLOS DD in der GNSS Feature Map. Die Grenzen des Farbbalkens sind bei 20 m abgeschnitten, um eine bessere Auflösung für Fehler um 5 m zu gewährleisten. Es können jedoch auch große Abweichungen von mehr als 20 m beobachtet werden. Die korrigierten NLOS DD sind in Abb. 2.32b dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Farben in der GNSS Feature Map von gelb (ca. 5 m) auf grün (ca. 0 m) ändern, was bedeutet, dass die Korrektur für die meisten der beobachteten Abweichungen erfolgreich ist. Dies kann auch aus Abb. 2.32c geschlossen werden, wo die beobachtete und die korrigierte DD direkt miteinander verglichen werden. Es ist deutlich zu erkennen, dass die korrigierten Datenpunkte (grün) näher am Mittelwert Null liegen als die unkorrigierten Datenpunkte (rot). Allerdings treten auch Fehlkorrekturen auf, die sich durch große negative Abweichungen nach der angewandten Korrektur äußern. Insgesamt überschreiten 0,7% der korrigierten DD -10 m.

Die absoluten Abweichungen werden in einem kumulativen Histogramm dargestellt (vgl. Abb. 2.32d), das einen klaren Überblick über die verbesserten Abweichungen gibt, wenn die NLOS-Verzerrungen korrigiert werden. Insgesamt liegen 68% der beobachteten NLOS DD unter 6,6 m, während im Falle der korrigierten NLOS DD 68% der Datenpunkte unter 3,3 m liegen, was eine Verbesserung von 50% bedeutet. Die optimale erwartete Genauigkeit der GPS L1 C/A Code DD ist in blau dargestellt, indem statische Daten mit ähnlichen Geräten unter freiem Himmel ausgewertet wurden. Unter diesen Bedingungen liegen 68% der DD unter 0,9 m. Diese optimale Genauigkeit kann für korrigierte NLOS-DD aufgrund des höheren Rauschens der reflektierten Signale nicht erreicht werden.

Ein weiteres umfassendes Ergebnis der Analyse ist die Überprüfung der Ergebnisse anhand der Entfernung zum ausgewählten Referenzpunkt der Karte, die in Abb. 2.32e dargestellt ist. Für die simulierten Daten haben wir bereits festgestellt, dass die Umweglängen für gleiche Satellitenpositionen und unterschiedliche Nutzerstandorte nahezu konstant sind. Obwohl die Trajektorien nun auch in der Querrichtung der Straße verschoben sind - die meisten orthogonalen Abstände zur Referenztrajektorie liegen unter 2 m - wirkt sich der Abstand zum Referenzwegpunkt aufgrund der Unsicherheit beim wiederholten Fahren der exakt gleichen Trajektorie nicht auf das Korrekturergebnis in unserem Ansatz

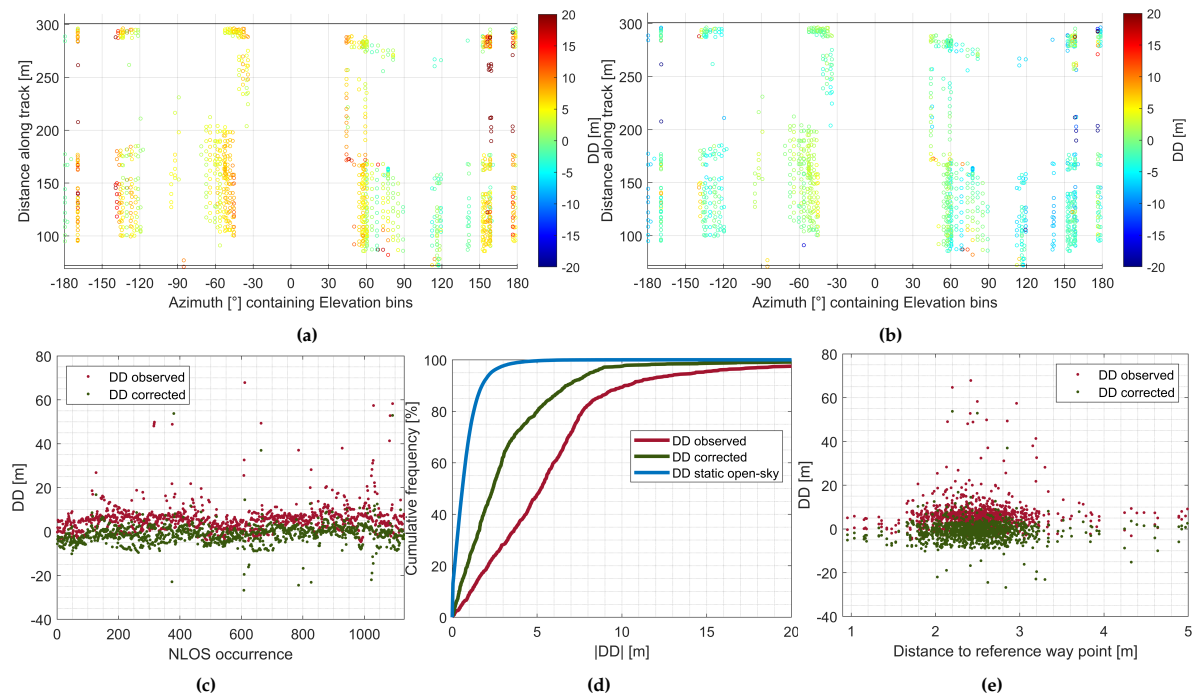


Abbildung 2.32: Ergebnisse der NLOS-Verzerrungskorrektur mit realen Daten. (a) und (b) GNSS Feature Map, die mit NLOS-DDs vor bzw. nach Anwendung der Korrekturen erstellt wurde, (c) und (d) Vergleich der beobachteten und korrigierten DD, (e) Analyse in Bezug auf die Referenzwegpunktentfernung.

aus. Die gleiche Streuung kann für kleinere Entfernungen, z.B. 2 m, und größere Entfernungen von bis zu 5 m beobachtet werden, was die Annahme, die wir auf der Grundlage der simulierten Daten gemacht haben, bestätigt.

Die Verfügbarkeit von Korrekturen bei einer gleichzeitig niedrigen Anforderung an die Genauigkeit der Näherungsposition des Nutzer, um Korrekturen anwenden zu können, sorgt letztendlich für eine verbesserte Ortungsgenauigkeit des Nutzers. Das liegt an der Tatsache, dass die Näherungsposition des Nutzers mit den Zusatzinformationen aus der Korrekturkarte geupdated und entsprechend verbessert werden kann.

Die Verwertung der Korrekturen wird anhand Integration dieser in ein bestehendes Kalman-Filter für RTK-Positioning demonstriert. Als Korrekturverfahren zur Verarbeitung der KOMET-Korrekturen kommt hier die Wichtung von GNSS-Messungen zum Einsatz, welche in der prototypischen Implementierung die bisherige Wichtung bzw. Selektion der Messungen auf Basis von sogenannten CN/0-Messungen ergänzt. Im Rahmen der Evaluation konnte gezeigt werden, dass die neuartigen KOMET-Korrekturen eine bedeutende Steigerung der Ortungsgenauigkeit in kritischen Straßenschlucht-Situationen des automatisierten Fahrens bewirken und damit zu einer höheren Verfügbarkeit der Fahrfunktion beitragen.

3

Zahlenmäßiger Nachweis

3.1. Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises

Die beantragten Mittel wurden im Verlauf des Verbundvorhabens wie folgt eingesetzt.

Personalmittel Bereits zum Start des Vorhabens kam es international zum Lockdown. Einstellungen waren daher zunächst für externe nicht möglich. Dennoch konnte entsprechendes Personal aus dem eigenen Hause eingesetzt werden. Entgegen der ursprünglichen Planung, konnte daher zunächst nur eine Stelle voll besetzt werden, jedoch nicht die zweite. Dies wurde durch Unterstützung mit erfahrener Personal aus der eigenen Arbeitsgruppe kompensiert, wodurch die Arbeitspakete gegenüber dem Zeitplan eingehalten werden konnten.

Durch die hohe Flexibilität der Fernarbeit bzw. Homeoffice und dem geregelten Zugang zu Gebäuden der Universität, ließen sich viele Unzulänglichkeiten während der SARS-Covid19 Pandemie gut abfedern. Treffen fanden stets online statt. Bei der Durchführung der Experimente war - unter Berücksichtigung der geltenden Hygienekonzepte - eine ergebnisorientierte Arbeit möglich.

Gegenüber dem Kostenplan ergeben sich Anpassungen der abgerufenen Mittel. Dennoch konnten die Personalmittel entsprechend den geplanten Aufgaben eingesetzt und vollständig verwendet werden.

Reisemittel Reisen waren zu Beginn der Covid-19 Pandemie grundsätzlich nicht möglich. In Rücksprache mit dem Fördergeber gab es entsprechende Umplanungen. Im Hinblick zum weiteren Verlauf des Vorhabens konnten aber geplante und für das Vorhaben wesentliche Konferenzen besucht und Fachvorträge und Publikationen realisiert werden. So waren die Teilnahmen seitens des IfE an der ION ITM 2021 der IAG 2021 in Beijing und der Navigation Conference in Edinburgh (meist online). Weiterhin wurden die Forschungsarbeiten auf der IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2022 sowie 2023 vorgestellt und das Forum der renomierten ION GNSS+ 2022 genutzt, um die Arbeiten zu präsentieren. Somit konnten die Reisemittel zweckgebunden für die Präsentation der Thematik und den wissenschaftlichen Austausch in diesem Bereich eingesetzt werden.

Verbrauchsmaterial Die geplanten Kosten für Verbrauchsmaterial wurden im Rahmen der Vor- und Nachbereitung der kinematischen Experimente unbedingt benötigt. Die geplanten Mittel konnten entsprechend der Planung eingesetzt und verwendet werden.

Investitionskosten bzw. Gerätekosten Die im Vorhaben geplante Beschaffung eines GNSS-Empfängers (Septentrio PolaRx5e) und einer Dual-polarisierten GNSS-Antenne (Matterwaves) konnte erfolg-

reich durchgeführt und für den Berichtszeitraum eingesetzt werden. Die Instrumente wurden für die Erstellung der Referenztrajektorie eingesetzt und auch weiterhin für kinematische hoch-genaue Bezugslösungen verwendet. Ebenfalls sind die Geräte fest in der Lehre und Forschung integriert und werden stetig eingesetzt.

Die Ergebnisse des Vorhabens konnten auf nationalen und internationalen Konferenzen und in Publikationen dem Fachpublikum zur Verfügung gestellt werden. Hierzu wird auch auf die ausführliche Liste der erfolgten Publikationen und Vorträge verwiesen (siehe Abschnitt 3.5)

3.2. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Insgesamt stellten diese gemeinschaftlichen Entwicklungen für alle Partner eine erhebliche Steigerung der eigenen Expertise in einer wichtigen Zukunftstechnologie - der urbanen Navigation - dar. Folgend werden die partnerspezifischen Notwendigkeiten und Angemessenheiten der geleisteten Arbeit zusammengefasst.

Im Rahmen des Vorhabens konnten am IfE weitreichende Erfolge erzielt werden, die nur mit dem Einsatz des geplanten und eingesetzten Personals erfolgen konnte. Dies sichert der Arbeitsgruppe den Vorsprung im internationalen Wettbewerb. Innerhalb des Vorhabens wurde Seitens des IfE die Feature-Map zur Speicherung von aus GNSS abgeleiteten Daten entwickelt, die anhand der Umgebung Signalcharakteristiken im Navigationsalgorithmus integrieren und berücksichtigen kann. Das Wissen über urbane Signalcharakteristiken konnte deutlich erweitert werden. Damit einher ging auch die Entwicklung eines eigenen RTK-Algorithmus, der unter Einbeziehung der neuen Erkenntnisse zu einer Genauigkeitssteigerung von 90 % des mittleren quadratischen Fehlers der horizontalen Positionsabweichungen führte, womit durchaus eine Fahrspurgenauigkeit erreicht werden konnte. Darüber hinaus war es notwendig, umfangreiche Experimente unter innerstädtischen Bedingungen (enge bis mittlere Bebauung, Hildesheim, Hannover, Frankfurt/Main) sowie auf Autobahnen unter verschiedenen Geschwindigkeiten durchzuführen und entsprechende Datensätze zu erheben, um die Signalanalyse und Forschung in diesem Bereich entsprechend voranzutreiben. Dies erforderte auch die Erstellung umfangreicher Solltrajektorien (Ground Truth). Hierzu wurde als Beitrag des IfE auch ein von der DFG finanziertes Großgerät eingesetzt, das intensiv genutzt werden konnte.

Dem Vorhabenkonzept folgend wurden neue Konzepte zur Charakterisierung und Prozessierung von GNSS-Signalen in signaltechnisch schwierigen Umgebungen entwickelt und umgesetzt. Darüber hinaus wurden die Prozesse mit umfangreichen realen Datensätzen validiert, um den Erfolg der entwickelten Ansätze nachzuweisen. Beiträge konnten Seitens des IfE auf verschiedenen Fachkonferenzen vorgestellt werden. Präsentationsmöglichkeiten ergaben sich im Bereich der Positionierung und Navigation durch den Austausch auf Anwenderforen. International ist hier die ION GNSS (USA) zu nennen, die für das Vorhaben ein sehr guten Einfluss bringen konnte. Ebenfalls konnten sehr gute Rückmeldungen durch die Teilnahme an der IEEE ITSC (Intelligent Transport Systems Conference) und der IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) erhalten werden. Weiterhin konnten Ergebnisse auf der Navigation Conference 2021 in Edinburgh vorgestellt und die Teilnahme als Erfolg verbucht werden.

Nach Ablauf des Vorhabens und der Veröffentlichung der Ergebnisse stehen diese den interessierten Nutzern aus der Wissenschaft und Wirtschaft zur Verfügung. Veröffentlichungen sind frei zugänglich für Publikationsmedien wie Poster und Vorträge. Einige begutachtete Veröffentlichungen ist aufgrund Publikationsrechten (SAGE, ITSC, etc.) nur begrenzt frei zugänglich (O'Connor et al., 2023). Größere Bibliotheken können aber einen Zugriff auf die Publikationen gewähren.

3.3. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind im Masterstudiengang *Geodäsie und Geoinformatik* sowie für Veranstaltungen für Studierende der Mechatronik und Robotik eingeflossen.

Das Vorhaben bietet bereits während der Laufzeit sehr gute Voraussetzungen für das Erstellen von Masterarbeiten und für die wissenschaftliche Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern in Form von wiss. Hilfskräften (vgl. auch Abschnitt 3.5.4). Durch die in diesem Vorhaben erweiterte Expertise ist das Institut für Erdmessung hervorragend für die in weiterer Zukunft an Bedeutung gewinnenden Bereichen der Navigation und Ortung auch in signaltechnisch schwierigen Umgebungen sehr gut aufgestellt. Nach Ablauf des Vorhabens und der Veröffentlichung der Ergebnisse stehen diese den interessierten Nutzern aus der Wissenschaft und Wirtschaft zur Verfügung. Letztlich erlaubt es dem Institut für Erdmessung seine Expertise im Bereich der Navigation zu stärken und dient als Basis für weitere Vorhaben in diesem Bereich.

3.4. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei Dritten

- Hsu, L.-T., F. Huang, H.-F. Ng, G. Zhang, Y. Zhong, X. Bai und W. Wen (2023). „Hong Kong UrbanNav: An Open-Source Multisensory Dataset for Benchmarking Urban Navigation Algorithms“. In: *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation* 70.4, navi.602. doi: [10.33012/navi.602](https://doi.org/10.33012/navi.602).
- Hsu, L.-T., N. Kubo, W. Wen, W. Chen, Z. Liu, T. Suzuki und J. Meguro (2021). „UrbanNav: An Open-Sourced Multisensory Dataset for Benchmarking Positioning Algorithms Designed for Urban Areas“. In: *Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021)*. doi: [10.33012/2021.17895](https://doi.org/10.33012/2021.17895).
- Lee, Y., P. Wang und B. Park (2023). „Nonlinear Regression-Based GNSS Multipath Dynamic Map Construction and Its Application in Deep Urban Areas“. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, S. 1–12. doi: [10.1109/tits.2023.3246493](https://doi.org/10.1109/tits.2023.3246493).
- Li, X., X. Li, J. Huang, Z. Shen, B. Wang, Y. Yuan und K. Zhang (2021). „Improving PPP-RTK in urban environment by tightly coupled integration of GNSS and INS“. In: *Journal of Geodesy* 95.12. doi: [10.1007/s00190-021-01578-6](https://doi.org/10.1007/s00190-021-01578-6).
- Mohanty, A. und G. Gao (2022). „Learning GNSS Positioning Corrections for Smartphones using Graph Convolution Neural Networks“. In: *Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022)*. doi: [10.33012/2022.18372](https://doi.org/10.33012/2022.18372).
- Nagai, K., M. Spenko, R. Henderson und B. Pervan (2021). „Evaluating INS/GNSS Availability for Self-Driving Cars in Urban Environments“. In: *Proceedings of the 2021 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*. doi: [10.33012/2021.17830](https://doi.org/10.33012/2021.17830).
- No, H. und C. Milner (2021). „Machine Learning Based Overbound Modeling of Multipath Error for Safety Critical Urban Environment“. In: *Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021)*. doi: [10.33012/2021.17874](https://doi.org/10.33012/2021.17874).
- Siebert, C., A. Konovaltsev und M. Meurer (2021). „Multipath Rejection Using Multicorrelator Based GNSS Receiver With an Extended Kalman Filter“. In: *Proceedings of the 2021 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*. doi: [10.33012/2021.17832](https://doi.org/10.33012/2021.17832).
- Siemuri, A., M. Elsanhoury, P. Välisuo, H. Kuusniemi und M. S. Elmusrati (2022). „Application of Machine Learning to GNSS/IMU Integration for High Precision Positioning on Smartphones“. In: *Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022)*. doi: [10.33012/2022.18375](https://doi.org/10.33012/2022.18375).
- Sun, R., M. Qiu, F. Liu, Z. Wang und W. Y. Ochieng (2022). „A Dual w-Test Based Quality Control Algorithm for Integrated IMU/GNSS Navigation in Urban Areas“. In: *Remote Sensing* 14.9, S. 2132. doi: [10.3390/rs14092132](https://doi.org/10.3390/rs14092132).
- Wen, W. und L.-T. Hsu (2022). „Factor Graph Optimization for Tightly-Coupled GNSS Pseudorange/Doppler/Carrier Phase/INS Integration: Performance in Urban Canyons of Hong Kong“. In: *Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022)*. doi: [10.33012/2022.18337](https://doi.org/10.33012/2022.18337).
- Xin, S., J. Geng, G. Zhang, H.-F. Ng, J. Guo und L.-T. Hsu (2022). „3D-mapping-aided PPP-RTK aiming at deep urban canyons“. In: *Journal of Geodesy* 96.10. doi: [10.1007/s00190-022-01666-1](https://doi.org/10.1007/s00190-022-01666-1).
- Yan, P., J. Jiang, Y. Tang, F. Zhang, D. Xie, J. Wu, J. Liu und J. Liu (2021). „Dynamic Adaptive Low Power Adjustment Scheme for Single-Frequency GNSS/MEMS-IMU/Odometer Integrated Navigation in the Complex Urban Environment“. In: *Remote Sensing* 13.16, S. 3236. doi: [10.3390/rs13163236](https://doi.org/10.3390/rs13163236).

- Zhang, G., H.-F. Ng, L.-T. Hsu, H. Gao und D. Yao (2021a). „Scalability and Latency Analysis of the Centralized 3D Mapping Aided GNSS-Based Collaborative Positioning“. In: *Proceedings of the 2021 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*. doi: [10.33012/2021.17835](https://doi.org/10.33012/2021.17835).
- Zhang, G., B. Xu, H.-F. Ng und L.-T. Hsu (2021b). „GNSS RUMS: GNSS Realistic Urban Multiagent Simulator for Collaborative Positioning Research“. In: *Remote Sensing* 13.4, S. 544. doi: [10.3390/rs13040544](https://doi.org/10.3390/rs13040544).
- Zhang, J. (2022). „Lidar-aided Instantaneous GNSS Ambiguity Resolution in Challenging Environments: Theoretical Assessment and Numerical Results“. In: *Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022)*. doi: [10.33012/2022.18328](https://doi.org/10.33012/2022.18328).
- Zhong, Q. und P. Groves (2022). „Outlier Detection for 3D-Mapping-Aided GNSS Positioning“. In: *Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022)*. doi: [10.33012/2022.18332](https://doi.org/10.33012/2022.18332).
- Zhong, Q. und P. D. Groves (2021). „Multi-Epoch 3D-Mapping-Aided Positioning using Bayesian Filtering Techniques“. In: *Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2021)*. doi: [10.33012/2021.17894](https://doi.org/10.33012/2021.17894).

3.5. Veröffentlichungen und Abschlussarbeiten

Im Rahmen des Verbundvorhabens KOMET erfolgte eine Vielzahl von Publikationen und wissenschaftlichen Arbeiten, sowohl als Abschlussarbeiten, Vorträgen bzw. Präsentationen als auch Veröffentlichungen in begutachteten Journalen. Diese sind folgend zusammengestellt.

Weiterhin erfolgten im Verbund monatliche Treffen zur Koordinierung der Arbeiten, die Seitens von Bosch durch Dr. Skupin, oder in Vertretung des IfE durch Dr. Kersten geleitet wurden. Durch diesen regen Austausch konnten alle Teilnehmer ihren Erfolg zu dem Gesamtergebnis einbringen.

3.5.1. Begutachtete Veröffentlichungen

- Baasch, K.-N., L. Icking, F. Ruwisch und S. Schön (2022). „Coordinate Frames and Transformations in GNSS Ray-Tracing for Autonomous Driving in Urban Areas“. In: *Remote Sensing* 15.1, S. 180. doi: [10.3390/rs15010180](https://doi.org/10.3390/rs15010180).
- Icking, L., F. Ruwisch und S. Schön (2020). „Doppler as a Quality Indicator for GNSS-Based Urban Navigation - An Evaluation with Different Receivers and Clocks“. In: *2020 European Navigation Conference (ENC)*. IEEE. doi: [10.23919/enc48637.2020.9317327](https://doi.org/10.23919/enc48637.2020.9317327).
- Icking, L., F. Ruwisch und S. Schön (2022). „Multipath Characterization using Ray-Tracing in Urban Trenches“. In: *Geodesy for a Sustainable Earth. International Association of Geodesy Symposia*. Hrsg. von J. T. Freymueller und L. Sánchez. Bd. 154. Springer, S. 359–365. doi: [10.1007/1345_2022_166](https://doi.org/10.1007/1345_2022_166).
- O'Connor, M., T. Kersten, C. Skupin, F. Ruwisch, L. Ren, T. Wübbena und S. Schön (2023). „Low-latency GNSS multipath simulation and building wall detection in urban environments“. In: *SIMULATION* 0.0, S. 003754972211456. doi: [10.1177/00375497221145601](https://doi.org/10.1177/00375497221145601).
- O'Connor, M., F. Ruwisch, T. Kersten, C. Skupin, L. Ren, T. Wübbena und S. Schön (2021). „Low-latency GNSS multipath simulator for real-time applications in autonomous driving“. In: *2021 IEEE/ACM 25th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*. IEEE, S. 1–9. doi: [10.1109/ds-rt52167.2021.9576146](https://doi.org/10.1109/ds-rt52167.2021.9576146).
- Ruwisch, F., A. Jain und S. Schön (2020). „Characterisation of GNSS Carrier Phase Data on a Moving Zero-Baseline in Urban and Aerial Navigation“. In: *Sensors* 20.14, S. 4046. doi: [10.3390/s20144046](https://doi.org/10.3390/s20144046).
- Ruwisch, F. und S. Schön (2022b). „Performance Assessment of GNSS RTK Positioning in Urban Environments: Outlier Detection versus 3DMA-FDE“. In: *Proceedings of the 35th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2022)*. Institute of Navigation, S. 2649–2663. doi: [10.33012/2022.18510](https://doi.org/10.33012/2022.18510).
- Ruwisch, F. und S. Schön (2023). „GNSS Feature Map Aided RTK Positioning in Urban Trenches“. In: *26th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE.

Schön, S., K.-N. Baasch, L. Icking, A. Karimidoona, Q. Lin, F. Ruwisch, A. Schaper und J. Su (2022). „Towards Integrity for GNSS-based urban navigation – challenges and lessons learned“. In: *2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE, S. 1774–1781. doi: [10.1109/iv51971.2022.9827402](https://doi.org/10.1109/iv51971.2022.9827402).

3.5.2. Nicht begutachtete Veröffentlichungen

Karimidoona, A., L. Icking, F. Ruwisch und S. Schön (2022). „On the Prediction of Network RTK Integrity Performance in Urban Environments“. In: *10th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC)*, April 6-7, Noordwijk, The Netherlands.

Ren, L., M. O'Connor und T. Wübbena (2024). *Schlussbericht der Geo++ GmbH zum Verbundvorhaben Korrektur von GNSS-Mehrwegeffekten für die zuverlässige Eigenlokalisierung von hochautomatisierten Fahrzeugen in innerstädtischen Bereichen (KOMET)*. Förderkennzeichen: 19 20002 B. Schlussbericht. Leibniz Universität Hannover.

Skupin, C., Y. Liu und A. Hinrichs (2024). *Schlussbericht der Robert Bosch GmbH zum Verbundvorhaben Korrektur von GNSS-Mehrwegeffekten für die zuverlässige Eigenlokalisierung von hochautomatisierten Fahrzeugen in innerstädtischen Bereichen (KOMET)*. Förderkennzeichen: 19 20002 A. Schlussbericht. Leibniz Universität Hannover.

3.5.3. Präsentationen und Poster

Kersten, T., K. Dawidowicz, G. Krzan, J. Kröger und S. Schön (2022a). „On the design of robust and consistent metrics for the stability of receiver antenna calibration sets“. In: *IAG Commission 4 Symposium*, Sept. 5-8, Potsdam, Germany. Copernicus GmbH. doi: <https://doi.org/10.5194/iag-comm4-2022-25>.

Kersten, T., J. Kröger, S. Schön und Y. Brevva (2022b). „GNSS Antenna Calibration Values as Bottleneck for Reliable Atmospheric Parameters“. In: *Virtual Meeting of the American Geophysical Union (AGU)*, virtual and on-site meeting Dec. 12-16, Chicago, IL, USA.

Ruwisch, F., L. Ren, C. Skupin, T. Kersten, M. O'Connor, S. Schön und T. Wübbena (2021). „Analysis of the Carrier Phase Multipath Error in the Context of Correction Maps for Urban Navigation“. In: *Navigation 2021*, November 15-18, Edinburgh, UK. Poster. Edinburgh : Royal Institute of Navigation. doi: [10.15488/11471](https://doi.org/10.15488/11471).

Ruwisch, F., L. Ren, C. Skupin, T. Kersten, M. O'Connor, S. Schön und T. Wübbena (2022). „Intelligent Database Architecture for High-Integrity Urban Navigation“. In: *33rd IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV2022*, June 5-9, 2022 Aachen, Germany. Poster. Hannover : Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover. doi: [10.15488/12110](https://doi.org/10.15488/12110).

3.5.4. Abschlussarbeiten

Berkel, J. (2021). „Carrier Phase-based GNSS-Positioning under the Influence of a Truck as a Reflector“. In: *Master Thesis, Geodäsie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover (unpublished)*.

Mußnug, D. (2023). „Robust GNSS Position-Velocity-Time Estimation in Dense Urban Environments“. In: *Master Thesis, Geodäsie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover (unpublished)*.

Zhang, W. (2024). „Performance analysis of triple-frequency PPP-RTK from the user perspective“. In: *Master Thesis, Geodäsie und Geoinformatik, Leibniz Universität Hannover (unpublished)*.

Literatur

- Adjrard, M. und P. D. Groves (2018). „Intelligent Urban Positioning: Integration of Shadow Matching with 3D-Mapping-Aided GNSS Ranging“. In: *Journal of Navigation* 71.1, S. 1–20. DOI: [10.1017/S0373463317000509](https://doi.org/10.1017/S0373463317000509).
- BMW, Hrsg. (2015). *Neue Fahrzeug und Systemtechnologien, Fachprogramm*. Bd. F83. F83. Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, Deutschland.
- Bourdeau, A., M. Sahmoudi und J.-Y. Tourneret (2012). „Tight Integration of GNSS and a 3D City Model for Robust Positioning in Urban Canyons“. In: *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, Nashville, TN, USA, S. 1263–1269. URL: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=10339>.
- Braasch, M. S. (2017). „Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems“. In: Hrsg. von P. J. G. Teunissen und O. Montenbruck. Springer International Publishing. Kap. 15. Multipath, S. 443–468.
- Darugna, F. (2021). „Improving smartphone-based GNSS positioning using state space augmentation techniques“. English. Gleichzeitig veröffentlicht in: *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Leibniz Universität Hannover*; No. 368. Diss. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C, Nr. 864. 169 S. URL: <https://kxp.k10plus.de/DB=2.1/PPNSET?PPN=1753998271>.
- Darugna, F., K. H. A. Bolmgren, M. Schmitz, S. Schön, J. B. Wübbena, G. Wübbena, J. Bruno und C. N. Mitchell (Sep. 2021). „Mitigation of severe weather events and TID impact on the interpolation of SSR atmospheric parameters“. In: *Advances in Space Research* 68.6, S. 2401–2420. DOI: [10.1016/j.asr.2021.04.038](https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.04.038).
- Darugna, F., J. B. Wübbena, G. Wübbena, M. Schmitz, S. Schön und A. Warneke (Nov. 2020). „Impact of robot antenna calibration on dual-frequency smartphone-based high-accuracy positioning: a case study using the Huawei Mate20X“. In: *GPS Solutions* 25.1. DOI: [10.1007/s10291-020-01048-0](https://doi.org/10.1007/s10291-020-01048-0).
- Dbouk, H. und S. Schön (2018). „Comparison of different bounding methods for providing GPS integrity information“. In: *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, S. 355–366. DOI: [10.1109/PLANS.2018.8373401](https://doi.org/10.1109/PLANS.2018.8373401).
- Fu, M., M. Khider und F. van Diggelen (2020). „Android Raw GNSS Measurement Datasets for Precise Positioning“. In: *Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2020)*. DOI: [10.33012/2020.17628](https://doi.org/10.33012/2020.17628).
- Fuhrmann, T., X. Luo, A. Knöpfler und M. Mayer (Feb. 2014). „Generating statistically robust multipath stacking maps using congruent cells“. In: *GPS Solutions* 19.1, S. 83–92. DOI: [10.1007/s10291-014-0367-7](https://doi.org/10.1007/s10291-014-0367-7).
- García Fernández, N. und S. Schön (2018). „Evaluating a LKF simulation tool for collaborative navigation systems“. In: *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, S. 1455–1464. DOI: [10.1109/PLANS.2018.8373539](https://doi.org/10.1109/PLANS.2018.8373539).
- Gasser, T. M., C. Arzt, M. Ayoubi, A. Bartels, J. Eier, F. Flemisch, D. Häcker, T. Hesse, W. Huber, C. Lotz, M. Maurer, S. Ruth-Schumacher, J. Schwarz und W. Vogt (9. Aug. 2012). *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung : gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*. Techn. Ber. Projektgruppe "Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung", S. 124.
- Gasser, T. M., E. A. Schmidt, K. Bengler und U. C. et al. (2015). *Bericht zum Forschungsbedarf. Runder Tisch Automatisiertes Fahren - AG Forschung*. Forschungsber. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Berlin, Germany.
- HosseiniArani, A., B. Tennstedt, M. Schilling, A. Knabe, H. Wu, S. Schön und J. Müller (2022). „Kalman-Filter Based Hybridization of Classic and Cold Atom Interferometry Accelerometers for Future Satellite Gravity Missions“. In: *International Association of Geodesy Symposia*. Springer Berlin Heidelberg. DOI: [10.1007/1345_2022_172](https://doi.org/10.1007/1345_2022_172).
- Hsu, L.-T., Y. Gu und S. Kamijo (2016). „Sensor integration of 3D map aided GNSS and smartphone PDR in urban canyon with dense foliage“. In: *2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. IEEE. DOI: [10.1109/plans.2016.7479686](https://doi.org/10.1109/plans.2016.7479686).

- Hsu, L.-T., H. Tokura, N. Kubo, Y. Gu und S. Kamijo (2017). „Multiple Faulty GNSS Measurement Exclusion Based on Consistency Check in Urban Canyons“. In: *IEEE Sensors Journal* 17.6, S. 1909–1917. doi: [10.1109/JSEN.2017.2654359](https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2654359).
- International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (ITU-R) (2019). *Recommendation ITU-R P.527-5 Electrical characteristics of the surface of the Earth*. Techn. Ber. P.527-5.
- Irish, A., D. Iland und U. Madhow (Sep. 2015). „Urban Localization and 3D Mapping using GNSS Shadows“. In: *InsideGNSS*, S. 60–66.
- Kersten, T., L. Ren und S. Schön (2018). „A Virtual Receiver Concept for Continuous GNSS based Navigation of Inland Vessels“. en. In: *Proceedings of Navitec*. Noordwijk, The Netherlands. doi: [10.15488/4142](https://doi.org/10.15488/4142).
- Kersten, T. und S. Schön (Dez. 2016). „GPS code phase variations (CPV) for GNSS receiver antennas and their effect on geodetic parameters and ambiguity resolution“. In: *Journal of Geodesy* 91.6, S. 579–596. doi: [10.1007/s00190-016-0984-8](https://doi.org/10.1007/s00190-016-0984-8).
- Kjørsvik, N.S., Øvstedal, O. und Gjevestad, J.G.O. (2009). „Observing our Changing Earth. International Association of Geodesy Symposia“. In: Hrsg. von M. G. Sideris. 133. Springer, Berlin, Heidelberg. Kap. Kinematic Precise Point Positioning During Marginal Satellite Availability, S. 691–699.
- Kube, F., C. Bischof, P. Alpers, C. Wallat und S. Schön (Feb. 2018). „A virtual receiver concept and its application to curved aircraft-landing procedures and advanced LEO positioning“. In: *GPS Solutions* 22.2. doi: [10.1007/s10291-018-0709-y](https://doi.org/10.1007/s10291-018-0709-y).
- Kube, F., S. Schön und T. Feuerle (2012). „GNSS-based curved landing approaches with a virtual receiver“. In: *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*, S. 188–196. doi: [10.1109/PLANS.2012.6236880](https://doi.org/10.1109/PLANS.2012.6236880).
- Lau, L. und P. Cross (2007). „Development and testing of a new ray-tracing approach to GNSS carrier-phase multipath modelling“. In: *Journal of Geodesy* 81.11, S. 713–732. doi: [10.1007/s00190-007-0139-z](https://doi.org/10.1007/s00190-007-0139-z).
- Meguro, J.-i., T. Murata, J.-i. Takiguchi, Y. Amano und T. Hashizume (2009). „GPS Multipath Mitigation for Urban Area Using Omnidirectional Infrared Camera“. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 10.1, S. 22–30. doi: [10.1109/TITS.2008.2011688](https://doi.org/10.1109/TITS.2008.2011688).
- Peyraud, S., D. Bétaille, S. Renault, M. Ortiz, F. Mougél, D. Meizel und F. Peyret (2013). „About Non-Line-Of-Sight Satellite Detection and Exclusion in a 3D Map-Aided Localization Algorithm“. In: *Sensors* 13.1, S. 829–847. doi: [10.3390/s130100829](https://doi.org/10.3390/s130100829).
- Sahmoudi, M., M. Sahmoudi, M. Sahmoudi und M. Sahmoudi (2015). „Multipath and NLOS Bias Characterization and Constructive Use in Urban Environments for Robust GNSS Positioning“. In: *IPC Workshop, UCL London, UK, 04 November*.
- Seeber, G. und V. Böder (2002). *Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur hochpräzisen Kalibrierung von GPS Antennenaufstellungen - Schlussbericht zum BMBF/DLR Vorhaben 50NA9809/8*. Forschungsber. Institut für Erdmessung, Leibniz Universität Hannover. URL: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb02/359009840.pdf>.
- Smyrnaio, M. und S. Schön (2015). „GNSS Antenna Impact on the Resulting Multipath Effects in Carrier-Phase and Signal Amplitude“. In: *IAG 150 Years*. Springer International Publishing, S. 735–742. doi: [10.1007/1345_2015_169](https://doi.org/10.1007/1345_2015_169).
- Smyrnaio, M. (2016). „Carrier-phase Multipath in Satellite-based Positioning“. Diss. Leibniz University Hanover.
- Smyrnaio, M., S. Schön und M. L. Nicolàs (2013). „Multipath Propagation, Characterization and Modeling in GNSS“. In: *Geodetic Sciences - Observations, Modeling and Applications*. Hrsg. von S. Jin. Earth and Planetary Sciences. DOI: [10.5772/54567](https://doi.org/10.5772/54567). InTech, Rijeka, Croatia, License: CC BY 3.0 - open access. Kap. 2, S. 99–125. doi: [10.5772/54567](https://doi.org/10.5772/54567).
- Smyrnaio, M., S. Schön, M. L. Nicolás und T. Kürner (2012). „Ray-tracing approach versus double difference, multipath characterization in a multiple ray scenario“. In: *6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec 2012) & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing*. Noordwijk, The Netherlands, S. 1–8. doi: [10.1109/NAVITEC.2012.6423089](https://doi.org/10.1109/NAVITEC.2012.6423089).
- Tennstedt, B., C. Schubert, D. Schlippert, S. Schon und E. Rasel (2019). „Impact of Uncertainties in Atom Interferometry on Strapdown Navigation Solutions“. In: *2019 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*. IEEE. doi: [10.1109/iss46986.2019.8943632](https://doi.org/10.1109/iss46986.2019.8943632).
- Zhang, G. und L.-T. Hsu (2018). „A New Path Planning Algorithm Using a GNSS Localization Error Map for UAVs in an Urban Area“. In: *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 94.1, S. 219–235. doi: [10.1007/s10846-018-0894-5](https://doi.org/10.1007/s10846-018-0894-5).