

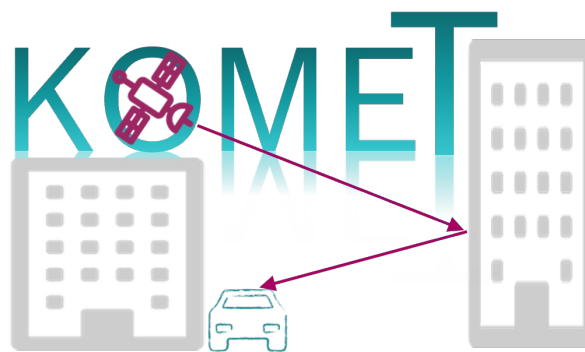
KOMET

Schlussbericht der Geo++ GmbH zum Verbundvorhaben

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

FKZ-Number: 19 A20002 B

Ren, L., O'Connor, M. und Wübbena T.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

11
102
1004

Leibniz
Universität
Hannover

KOMET

Schlussbericht der Geo++ GmbH 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 B 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

Geo++ GmbH
Steinriede 8
30827 Garbsen

Projektleitung

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

Autoren

– Geo++ GmbH
Temmo Wübbena
Le Ren
Marcus O'Connor 

Gestaltung und Satz

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

Version

July 2024

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Veröffentlichung (Publikation)
3. Titel Schlussbericht der Geo++ GmbH zum Verbundvorhaben Korrektur von GNSS-Mehrwegeffekten für die zuverlässige Eigenlokalisierung von hochautomatisierten Fahrzeugen in innerstädtischen Bereichen (KOMET)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] O'Connor, Marcus; Ren, Le; Wübbena, Temmo	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) Geo++ GmbH Steinriede 8 30827 Garbsen	9. Ber.-Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 19A20002B
	11. Seitenzahl 46
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 35
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 20
16. DOI (Digital Object Identifier) 10.15488/17407	
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 der Geo++ GmbH 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 der Geo+++ GmbH 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)) O'Connor, Marcus; Ren, Le; Wübbena, Temmo	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 Geo++ GmbH Steinriede 8 30827 Garbsen	9. originators report no.		
	10. reference no. 19A20002B		
	11. no. of pages 46		
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	13. no. of references 35		
	14. no. of tables 1		
	15. no. of figures 20		
16. DOI (Digital Object Identifier) 10.15488/17407			
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 Geo++ GmbH 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	14
2.5	AP4: Charakterisierung des GNSS-Signals im urbanen Raum	15
2.6	AP5: Modellierung von GNSS-Signalcharakteristiken und Korrekturdatenkonzeption	19
2.7	AP6: Entwicklung und Bewertung von Korrekturverfahren	22
3	Zahlenmäßiger Nachweis	27
3.1	Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises	27
3.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	27
3.3	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	28
3.4	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte bei Dritten	28
3.5	Veröffentlichungen und Abschlussarbeiten	29
3.5.1	Begutachtete Veröffentlichungen	29
3.5.2	Nicht begutachtete Veröffentlichungen	29
3.5.3	Präsentationen und Poster	30
	Literatur	31

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.

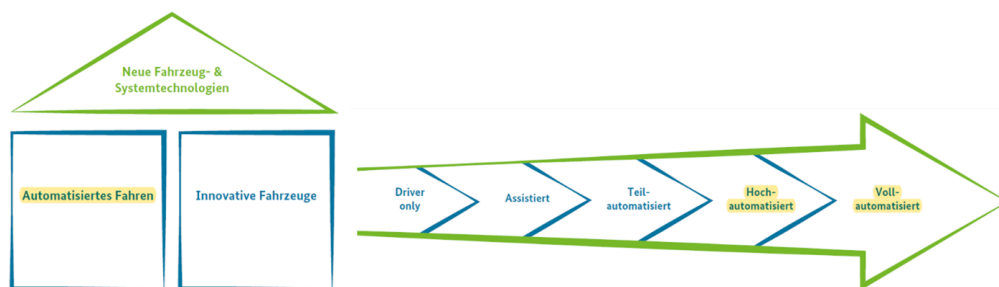


Abbildung 1.1: Die Programmsäulen und Automatisierungsgrade (nach BAST-Definition (Gasser u. a., 2012; BMWI, 2015)) und Integration von KOMET in den Gesamtkontext

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.

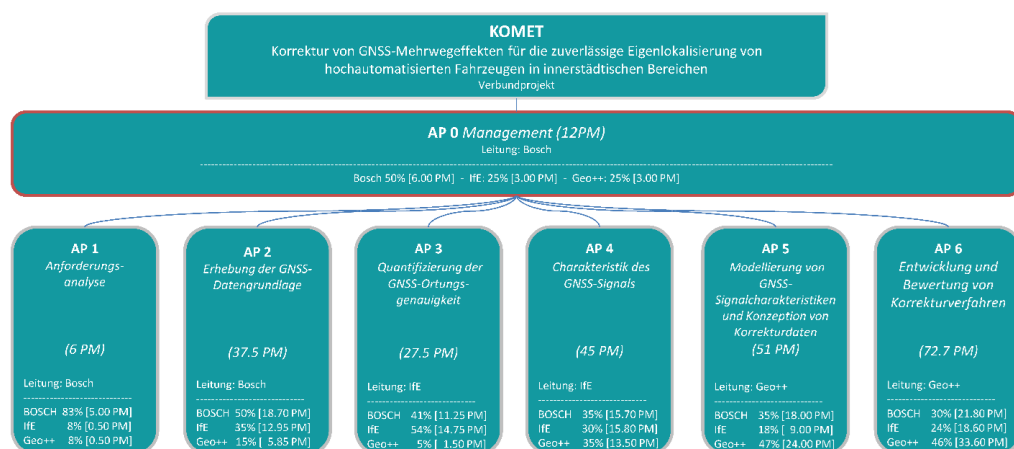


Abbildung 1.2: Übersicht der Arbeitspaketstruktur

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 Fahrzeugen 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 empfangernabhängigen 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 Signalabbrissen 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.

Zusammen mit Bosch und IfE wurden Straßenschluchten zunächst in Klassen eingeteilt und dann exemplarische Beispielstraßen im hannoverschen Stadtbereich zugeordnet:

- ▶ Einseitige Bebauung, andere Seite Freifläche
- ▶ Einseitige Bebauung, andere Seite Waldfläche
- ▶ Beidseitig Waldfläche
- ▶ Beidseitig bebaut, lückenhaft
- ▶ Beidseitig bebaut, große Straßenbreite

- ▶ Beidseitig Bebaut, enge Straßenbreite
- ▶ Besondere Gebäude (Höhe oder Form)

Ein alternativer Ansatz ist die Klassifikation nach Gebäudegeometrie basierend auf dem Gebäudemodell LoD2. Alle Straßen in Hannover wurden im Rahmen einer Simulation virtuell abgefahren (Schrittweite 1m). Der Simulator enthält einen Raytracer, ein Gebäudemodelle LoD2 (Quelle: www.hannover.de) und ein Fahrspurmodell (Quelle: overpass-turbo.eu). Bei diesem Ansatz wird von einer festen Antennenhöhe (z.B. Fahrzeughöhe) aus der Elevationswinkel der sichtbaren Gebäudedachoberseiten nach rechts und links bestimmt.

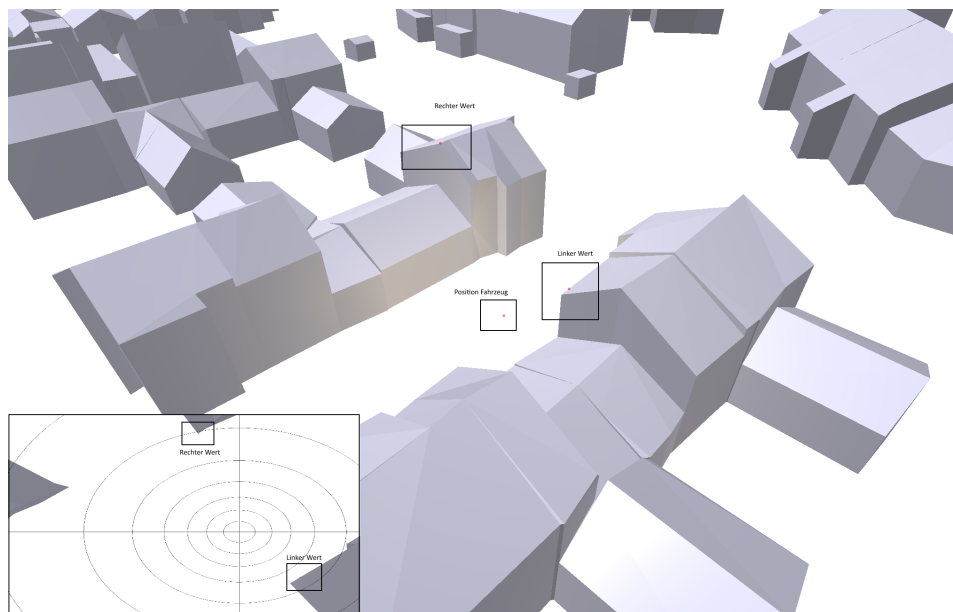


Abbildung 2.1: Exemplarische Bestimmung der Gebäudeelevationswinkel

Ein weiterer Ansatz ist die Klassifikation nach Anzahl line of sight (LOS) Satelliten. Basierend auf obigem Simulator werden Satelliten-Ephemeridendaten (Quelle: cddis.gsfc.nasa.gov) verwendet um zu jeder vollen Stunde einen Tag lang die Anzahl der LOS Satelliten zu bestimmen. Die Klassifikation erfolgt auf basis statistischer Auswertungen (Mittelwert, Standardabweichung, Ausreißer, etc.).

Ein vierter Klassifikationsansatz baut auf dem vorherigen Ansatz auf. Hier werden die LOS Satelliten aber nicht gleich bewertet, sondern die LOS Satellitengeometrie bewertet. Hierfür werden verschiedene DOP-Werte (Dilution of Precision) statistisch ausgewertet.

Neben der Klassifikation von Straßen bzw. Straßenteilstücken ist auch eine Klassifikation von Routen (Kandidaten für experimentelle Fahrten) möglich. Dazu wurde der oben genannte Simulator mit einem Verkehrssimulator SUMO (Quelle: eclipse.dev) verknüpft. Der Verkehrssimulator ermöglicht es, dass sich die virtuelle Antenne realistisch im Straßennetz der Simulation bewegt (Staus, Ampeln, etc.). Auf diese Weise sind Rückschlüsse auf die zu erwartende Positionsgenauigkeit einer abzufahrenden Route schon vor der eigentlichen Fahrt möglich.

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:



Abbildung 2.2: Simulierte Testfahrt. (a) SUMO-Ansicht (b) Raytracer-Ansicht

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.

Abstimmung und Inbetriebnahme von GNSS-Messequipment

Unsere GNSS Messequipment wurden zur Messkampagne zur Verfügung gestellt und alle benötigte Beobachtungen und Korrekturen waren für die Post-Prozessierung geloggt.

Auswahl der Messorte und Analyse der Umgebungssituationen

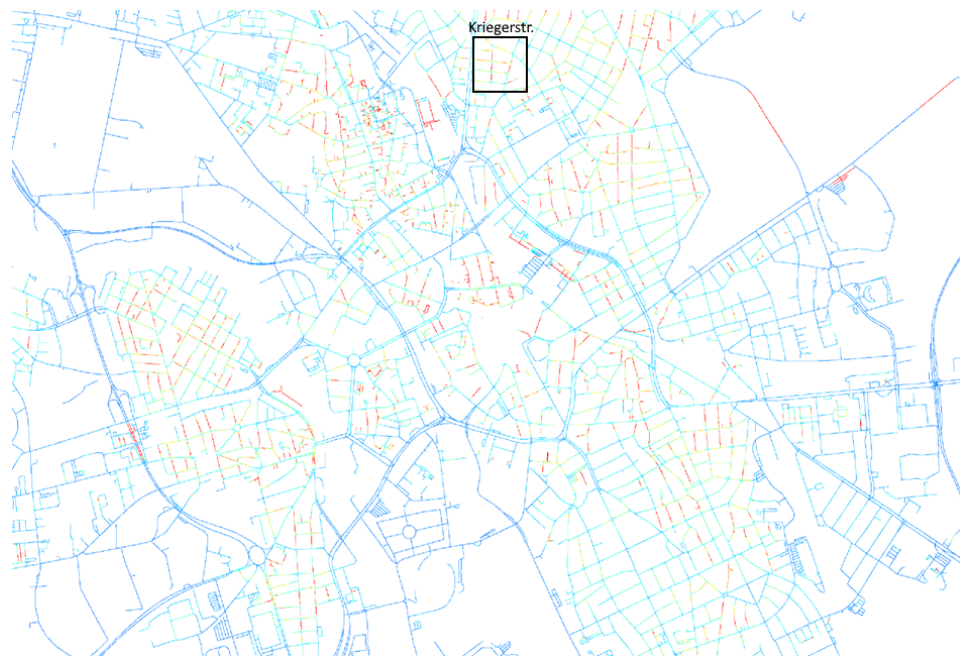


Abbildung 2.3: Auswahl eines Messortes (Kriegerstraße) auf Basis von GDOP-Werten aus der Simulation

Mit Hilfe des von Geo++ entwickelten Simulators zur Klassifizierung von Straßenschluchten wurden Karten der Stadt Hannover erzeugt, welche es ermöglichen, gezielt Messorte auszuwählen. In Abb. 2.3 ist beispielsweise der zu erwartende GDOP-Wert fahrspurgenau für den Innenstadtbereich von Hannover dargestellt. Im schwarzen Kasten der Abbildung befindet sich der Rundkurs Kriegerstraße, welcher in den Testfahrten mehrfach durchfahren wurde. Im Rundkurs befinden sich günstige (blau) und ungünstige (rot) Straßenabschnitte im Bezug auf die zu erwarteten LOS Satellitengeometrien.

Mehrere Messorte wurden im Bereich der Hannover-Nordstadt ausgewählt. In diesem Stadtteil sind schwierige GNSS Bedingungen zu erwarten und es befindet sich die Referenzstation der Experimente auf dem Dach des IfE-Gebäudes in der Nordstadt. Daher wurde der Simulator für die hannoversche Nordstadt verbessert. Es wurde zum Beispiel das 3D-LoD2 Modell des IfE-Dachs durch ein genaueres Modell ersetzt. Außerdem wurden die Scandaten der Überfliegung in den Simulator integriert, so dass Rückschlüsse seitens der LoD2-Modellgenauigkeit und der örtliche Vegetation an den Testorten getroffen werden können. In Abb. 2.4 ist diese verbesserte Version des Simulators dargestellt.

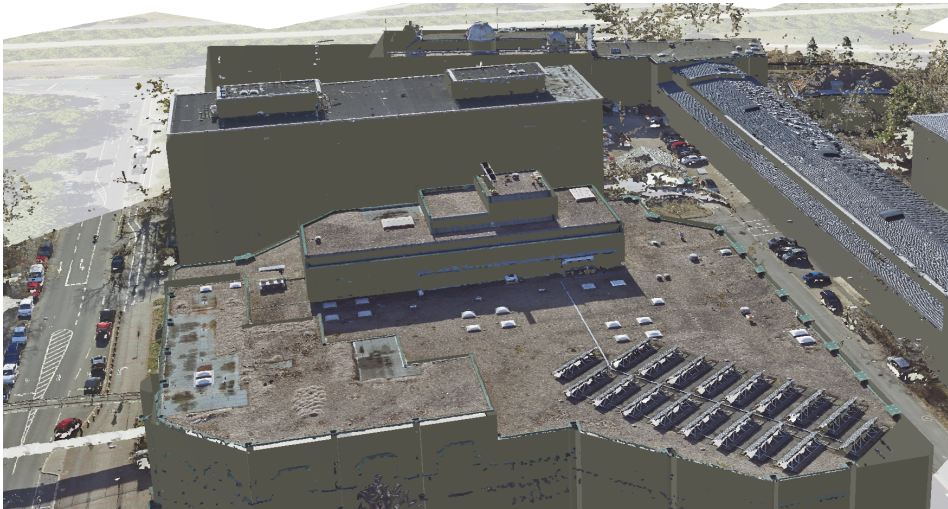


Abbildung 2.4: Verbesserung der Simulatorgenauigkeit im Bereich Hannover Nordstadt (IfE-Dach im Hintergrund)

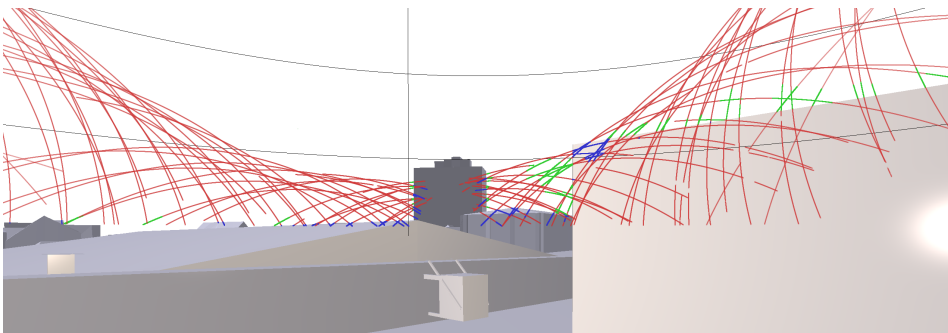


Abbildung 2.5: Detektion von Gebäuden mittels CNO-Messwerte (rot: korrekt detektiert, blau: Fehler 1. Art, grün: Fehler 2. Art)

Zusätzlich zum Raytracer sind weitere Verfahren untersucht worden, um LOS von NLOS Satelliten unterscheiden zu können. So lässt sich beispielsweise mittels CN0-Analyse feststellen, ob ein Satellit LOS ist. Es wurde analysiert in wieweit CNO-Messwerte sich eignen, Gebäude zu detektieren und somit als Ersatz oder Ergänzung zum Raytracer herangezogen werden sollten. Andererseits wurde mit diesem alternativen Ansatz der Raytracer validiert. In Abb. 2.5 sind die Resultate für eine Messung auf dem IfE-Dach (mit verbesserter Raytracer-Genauigkeit) gezeigt. Man erkennt, dass sich das CN0-Verfahren grundsätzlich für LOS/NLOS-Klassifizierungen eignet, aber zwei Arten von Fehlerquellen auftreten können:

- ▶ Fehlerquelle 1. Art (blau): CN0-Werte sind sehr hoch, obwohl NLOS
- ▶ Fehlerquelle 2. Art (grün): CN0-Werte sind sehr niedrig, obwohl LOS

Kalibrierung der GNSS Fahrzeug-Antenne

Um eine bessere Trennung der Mehrwegeeffekte durch Nahfeld (Fahrzeug und Sensorik) und Fernfeld (Urbane Umgebung, Gebäude, usw.) zu ermöglichen, ist es notwendig die GNSS Fahrzeug-Antenne zu kalibrieren.

Das Konzept der Kalibrierung wird in Abb. 2.6(a) angezeigt. Das Auto ist auf einer 360°-drehbaren Drehscheibe geparkt, um die Signale von unterschiedlichen Richtungen zu empfangen. Neben der Drehscheibe ist eine Referenz Antenne aufgebaut, damit die satelliten- und atmosphärenabhängigen Fehler eliminiert werden können. Die kalibrierte PCV-Karte von GPS L1C ist in Abb. 2.6(b) als ein

Beispiel zu sehen. Im Vergleich zur typischen PCV Karte eines Messpfeils sind hier größere Residuen aus Zenit Richtung zu beobachten. Dies sind Mehrwegeeffekte vom Autodach.

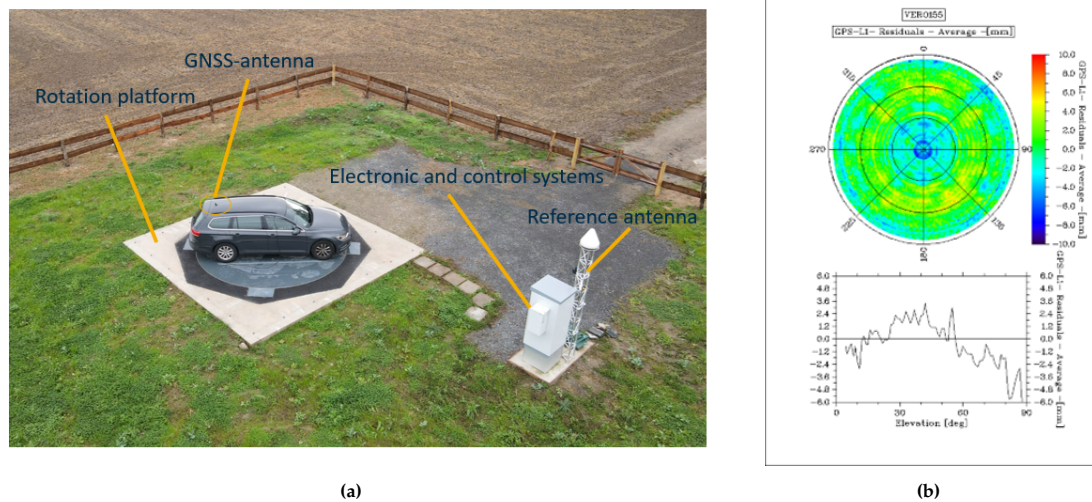


Abbildung 2.6: Kalibrierung (a) Konzept (b) PCV

Bestimmung einer unabhängigen Referenztrajektorie mittels Tachymetrie für kinematische Szenarien

Die Referenzkoordinaten des Autos wurden mittels Tachymeter für die Pseudo-kinematische Messung bestimmt.

Die Referenztrajektorie der kinematischen Szenarien wurde mit GNSS und IMU bestimmt.

RTCM-Datenstrom und Virtual RINEX

Ein VRS (virtual reference station) Datenstrom ist von einigen Referenzstationen in der Nähe von Hannover in Abb. 2.7 generiert und für die kinematische Messkampagne in Echtzeit zur Verfügung gestellt. Die entsprechenden Virtual RINEX Dateien werden auch für die post-processing Auswertung geloggt.

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 aufgenommenen 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.

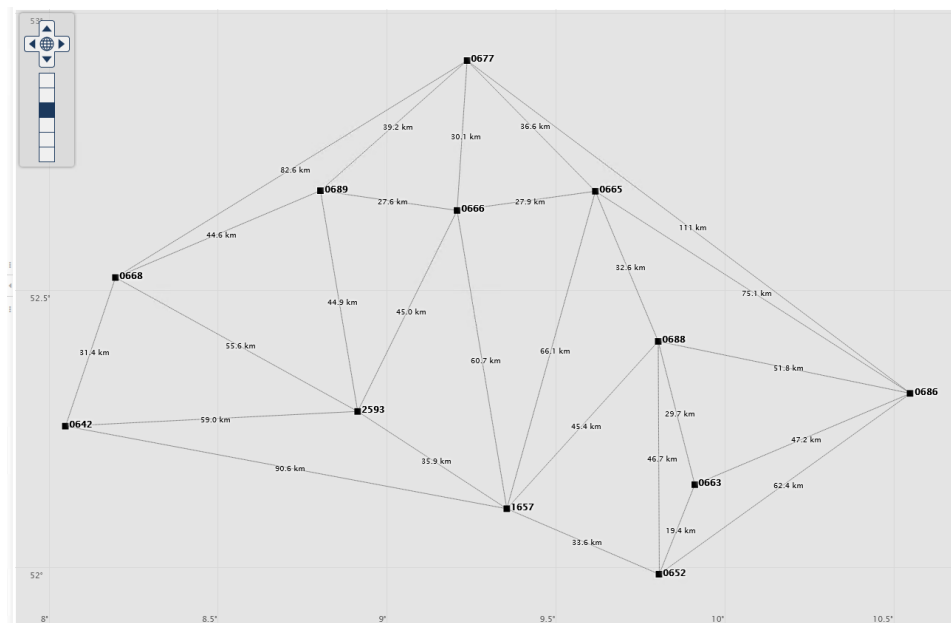


Abbildung 2.7: Referenzstationen in der Nähe von Hannover

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.

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).

Ableitung der durch den Mehrwegeffekt entstandenen Residuen in der Pseudo-kinmatischen Messkampagne

Die 10-tätigen Positionen des Autos werden mit der Single-Differenz Methode in GPPNET bestimmt. Um den Einfluss der von Mehrwegeffekte starken gestörten Signale zu vermeiden, ist die Bestimmung unter strenger Ausreißerdetektion und mit Monitoringoptionen durchgeführt. Die Abweichungen der geschätzten Koordinaten zwischen Geo++ und IfE sind innerhalb 1 cm in horizontaler Richtung und 2 cm in vertikaler Richtung.

In der zweiten Iteration werden die geschätzte Koordinaten als bekannte Parameter angewendet und nur die Mehrdeutigkeiten geschätzt. Da das Ziel die Beobachtungsresiduen von NLOS und gebeugten Signalen ist, sind die Ausreißerdetektion und die Monitoringoptionen deaktiviert. In Abb. 2.8 werden die Code-Residuen unterschiedlicher Satelliten dargestellt. Jedem Satelliten wurde eine Farbe zugeordnet. Man kann in der Abbildung erkennen, dass unterschiedliche Residuen auftreten, wobei große Residuenwerte durch Mehrwegeeffekte verursacht werden.

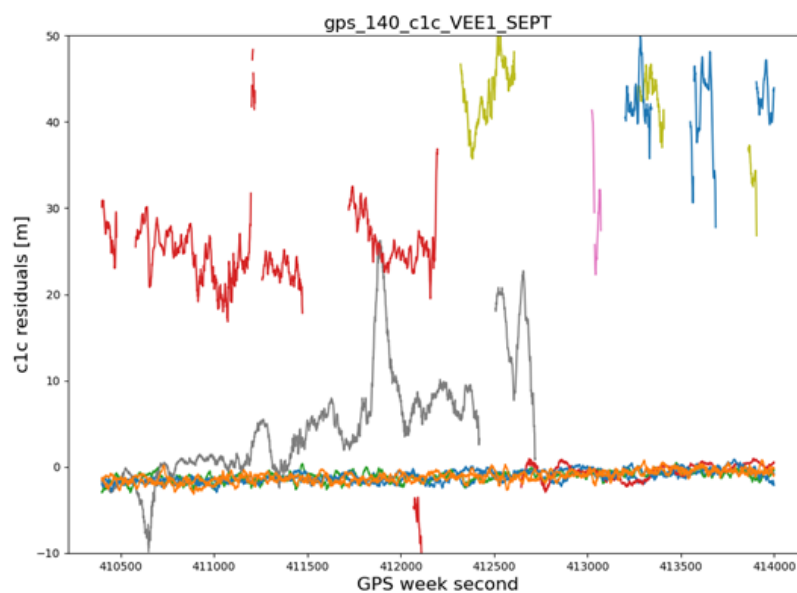


Abbildung 2.8: C1C Residuen von unterschiedlichen GPS Satelliten

Die abgeleitete Residuen stimmen gut mit den vom 3D Model berechneten Umwegen überein. Hierbei sind die Code Residuen etwa 30m, was gut zur Umweglänge passt (Abb. 2.9). Die erzeugte Code und Phase Residuen werden für die weitere räumliche und zeitliche Analyse zur Verfügung gestellt. Ferner lässt sich erkennen, dass eine Signalkontinuität auch für Code-Messungen nicht durchweg gegeben ist. Wesentlich dramatischer verhält sich die Kontinuität der Phasenmessungen, insbesondere im kinematischen urbanen Umfeld, siehe im folgenden Abschnitt.

Ableitung der durch den Mehrwegeffekt entstandenen Residuen in der kinmatischen Messkampagne

Wegen der starken Mehrwegeeffekte und vieler Unterbrechungen der Signale werden einige Mehrdeutigkeiten falsch oder nicht gefixt. Deshalb werden die Doppeldifferenz Residuen, die von IfE bestimmt wurden, als Korrekturen statt die Singledifferenzresiduen für die Positionsbestimmung verwendet. In der vorherigen pseudo-kinematischen Tests wurde schon bewiesen, dass die Doppeldifferenz Residuen hoch korreliert mit den Singledifferenz Residuen sind, die in GPPNET berechnet werden.

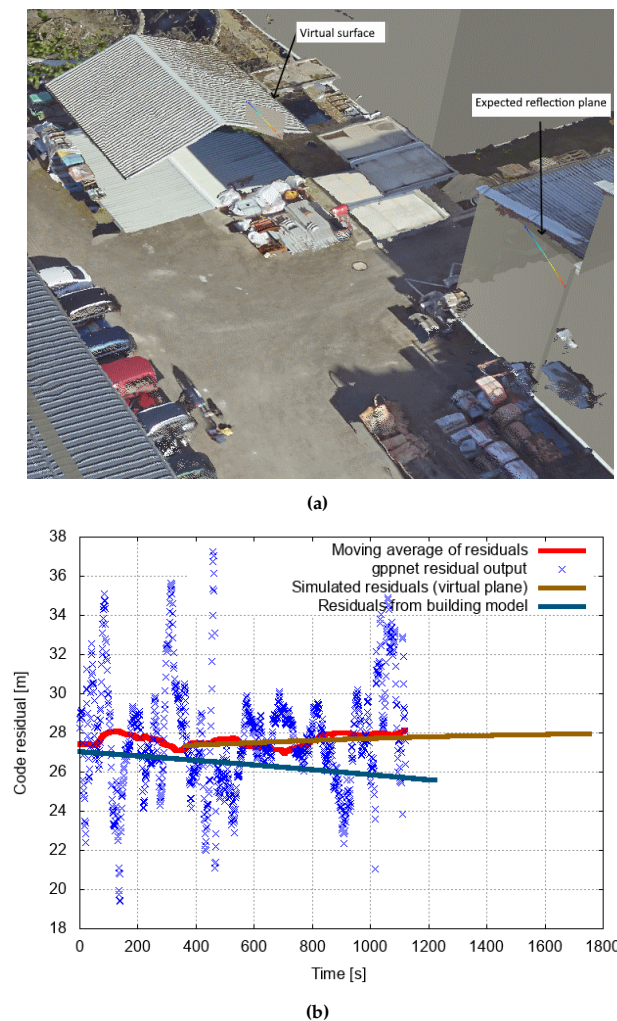


Abbildung 2.9: C1C Residuen eines parkenden Autos (a): Reflexionsebenen im 3D Gebäude Modell für den NLOS Satellit G10 (b) Vergleich der C1C Residuen von G10 mit den abgeleiteten Residuen aus dem Gebäudemodell

Die Anzahl der verfolgten Satelliten von allen Systemen während einer kinematischen Messung wird in Abb. 2.10(a) angezeigt. Darin kann man sehen, dass die Anzahl der Satelliten wegen der Gebäude im Stadtteil stark begrenzt wird, in vielen Gebieten konnten nur 2 GLO und GAL Satelliten verfolgt werden. Das Tracking der Signale ist auch nicht stabil. GPS G17 ist als ein typisches Beispiel in Abb. 2.10(b) dargestellt. Viele Unterbrechungen und das schlechte Fixing kann beobachtet werden.

Dies erklärt auch den mangelnden Anteil fixierter Basislinien für die Ergebnisse in AP3 (vgl. Ruwisch u. a. (2024)).

Kommunikationsstrategie zur Übertragung der Residuen

Die ermittelten Residuen werden in eine PostgreSQL-Datenbank eingetragen. Hierbei ermöglicht die SQL-Syntax einen einfachen und effizienten Zugang.

Fehlerbehaftete Residuen identifizieren und von der Weiterverarbeitung auszuschließen

Fehlerhafte Residuen sind zu erwarten und können einen erheblichen negativen Einfluss auf die Positionsgenauigkeit haben. Das Verfahren zur Detektierung und Korrektur fehlerbehafteter Residuen

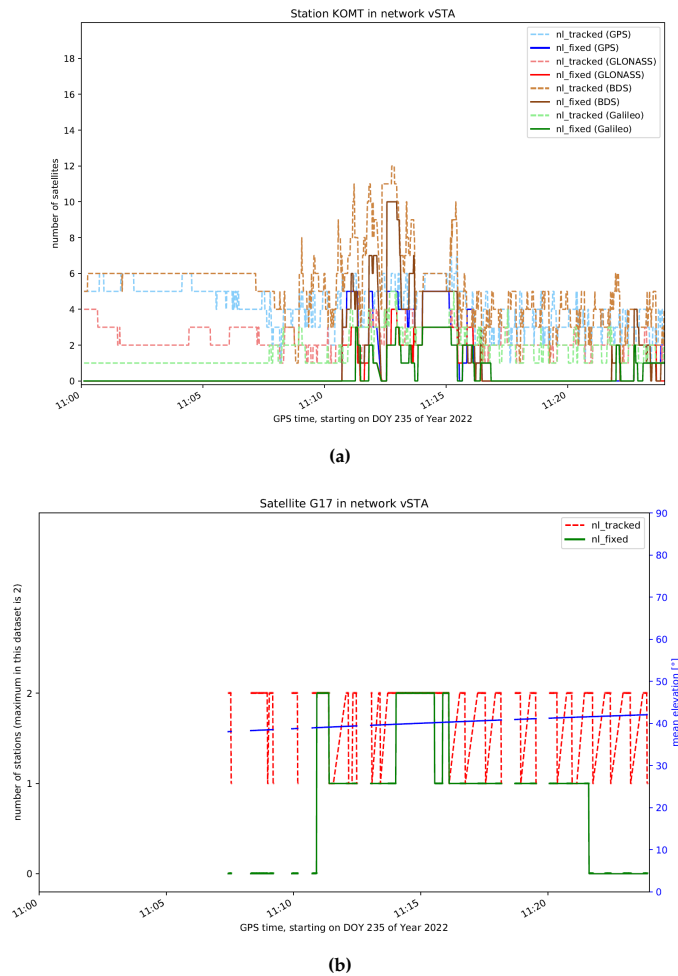


Abbildung 2.10: Track und Fix von Signalen (a): alle Signale (b) G17

ist exemplarisch in Abb. 2.11 dargestellt. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, von den 20 Code-Residuen die dem Messort am nächsten sind, 12 Residuen zu verwerfen (6 Ausreißer nach oben und 6 Ausreißer nach unten). Auf diese Weise lässt sich durch Mittelwertbildung der verbleibenden Residuen eines Messortes eine relativ gute Residuenqualität sicherstellen.

Datenbankstruktur zur Ablage und Weiterverarbeitung der Residuen

In Abb. 2.12 ist der Datenbankaufbau beschrieben. Der Datenbankaufbau kapselt die Daten nach zeitlicher Verfügbarkeit von links nach rechts. Ganz links sind Informationen, die schon während der Versuchsplanung bekannt sind. Beispiele hierfür sind die verwendeten GNSS-Systeme und Frequenzen oder die verwendete Empfängerhardware. Eine Stufe weiter rechts im Diagramm sind die eigentlichen Messungen (code ranges, phase ranges, doppler, cno). Diese Daten werden während oder direkt nach der Fahrt in die Datenbank eingepflegt. In der dritten Stufe sind die abgeleiteten Daten, welche von der Positioning Engine nach Auswertung der Messungen berechnet werden (z.B. Residueninformation). In der letzten Stufe, ganz rechts im Diagramm wird die jeweilige Situation einer Klasse zugeordnet.

Unterstützung bei der Entwicklung von Software-Werkzeugen

Für den Lese- und Schreibzugriff auf die Datenbank sind eine ganze Reihe an Tools entwickelt worden. Für die Projektpartner wurden Python-Skripte und Matlab-Skripte für den Datenbankzugriff erstellt.

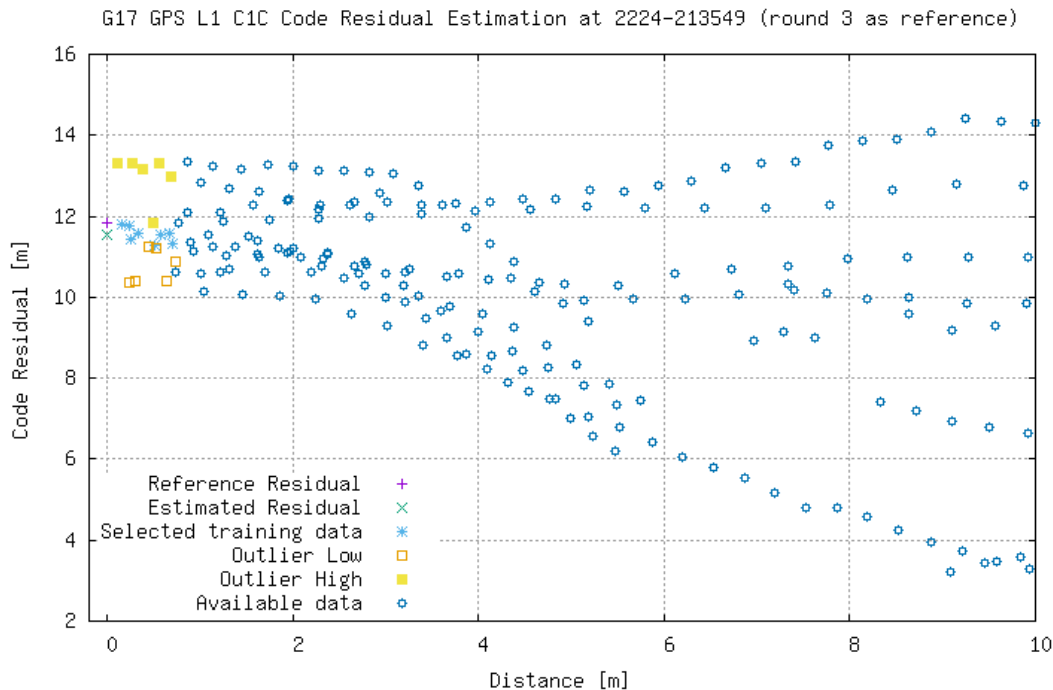


Abbildung 2.11: Fehlerbehaftete Residuen erkennen am Beispiel einer Messung von G17 im kinematischen Experiment

Weiterhin wurde eine Schnittstelle zur Datenbank für Geo++-Software in Form einer Dynamic Link Library (DLL) entwickelt.

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 Mehrwegebelastung beschrieben und korrigiert werden kann und

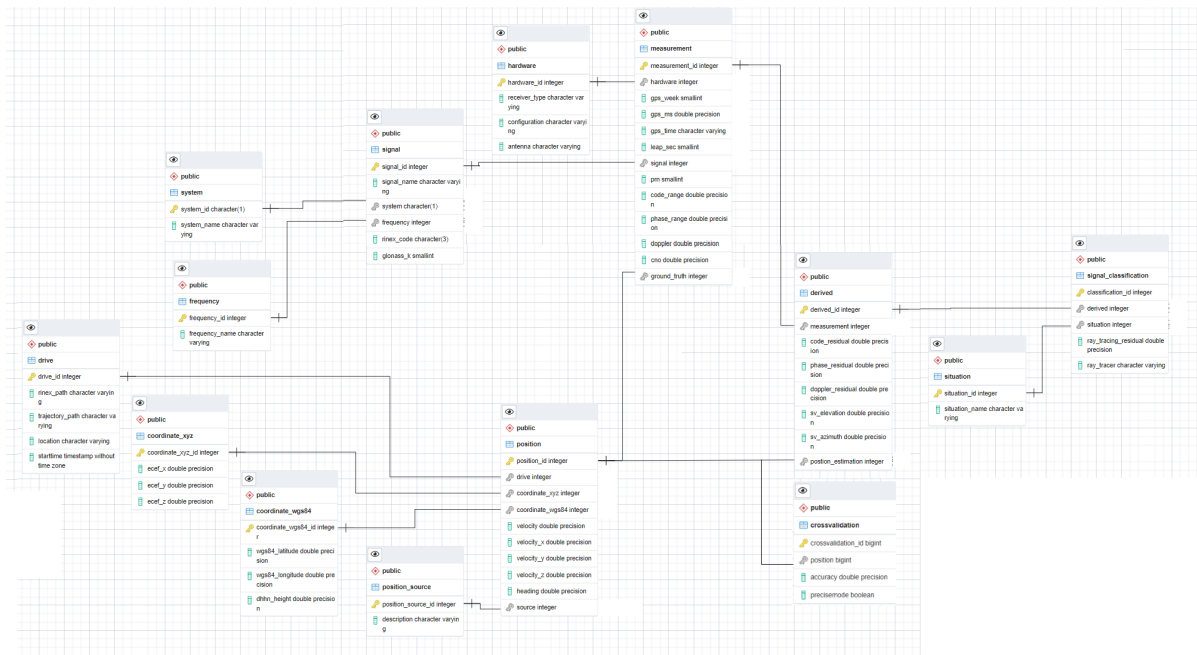


Abbildung 2.12: Entity-Relationship Diagram der Residuen Datenbank

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.

Wiederholbarkeit der Umgebungssituationen an den Messorten

Die Position der Satelliten relativ zu einem beliebigen Messort ist annäherungsweise wiederholbar für die meisten Satelliten. Das heißt, dass der Satellit aus Sicht des Messortes nach einem gewissen Zeitintervall wieder an einer sehr ähnlichen Elevations- und Azimutposition ist. Aus diesem Grund ist zu erwarten, dass sich Schwierigkeiten, wie z.B. Signalabschattung oder Mehrwegeeffekte in diesem Zeitintervall für den Satelliten wiederholen. Daneben ist es auch möglich, dass Satelliten auf einer ähnlichen Trajektorie (aus Sicht des Messpunktes) eben diese Schwierigkeiten auch haben (siehe Abb. 2.13 (a)).

Zur Untersuchung der Wiederholbarkeit der Umgebungssituationen wurde eine Analyse von Satelliten-Ephemeridendaten durchgeführt. Dabei wurden Bahnmanöver identifiziert, die dem Satellitendrift entgegenwirken. Es wurden die Zeitintervalle der Wiederholung der einzelnen Satelliten und dessen Schwankungen bestimmt. In Abb. 2.13 (b) ist die Spektralanalyse der Wiederholungsintervalllängen zu sehen. Es sind Perioden von etwa 13 Tagen zu sehen, welche durch Gezeiten und Aliasing Effekte in Bahnparametern erklärbar sind. Außerdem wurden Schwankungen mit Perioden von ca. 8 Tagen festgestellt. Für diese Schwankungen liegt keine Erklärung vor.

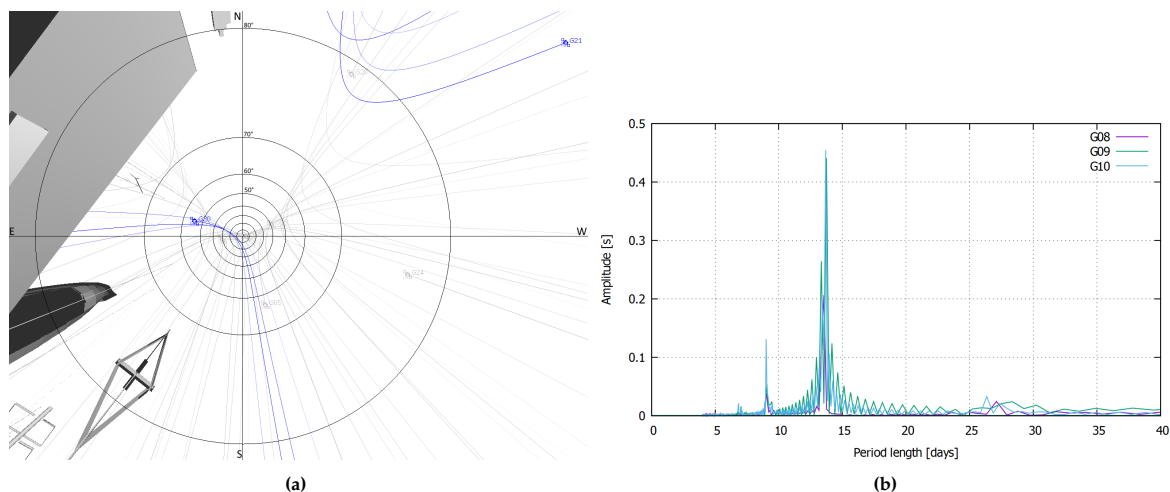


Abbildung 2.13: Wiederholbarkeit der Satellitenpositionen (a) Satelliten mit ähnlicher Trajektorie (b) Schwankungen der Wiederholbarkeit

Korrelationseigenschaften der Residuen bezüglich Zeit und Ort

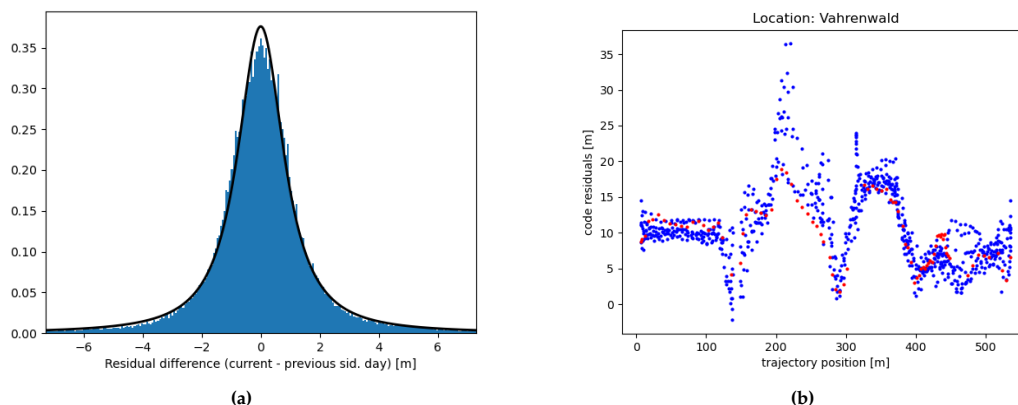


Abbildung 2.14: Korrelation der Code-Residuen bzgl. Zeit und Ort (a) Anwendung eines stochastischen Modells zur Beschreibung der zeitlichen Wiederholbarkeit von Code-Residuen (b) Code-Residuen bei B1 PRN 32.

Die Differenzen der Code-Residuen zu den Messungen am selben Ort am Vortag (siderischer Tag) werden durch t-Verteilung (Student) gut modelliert (siehe (a) aus Abb. 2.14). Der Vergleich basiert auf den für jeden Satelliten exakt bestimmten siderische Tag (subsekunden genau). Bei den Phasendifferenzen (l1c, l2w, l5q) ist eine solche Modellierbarkeit nicht gegeben.

Die Korrelation der Residuen bezüglich des Ortes konnte anhand einiger Beispiele nachgewiesen werden. In Abb. 2.14 (b) sind in blau die Residuenwerte aus einem Rundkurs für den Satelliten BDS 32 und dem Signal BEI B1 dargestellt. Exemplarisch ist eine Runde in rot gezeichnet. Es ist erkennbar, dass für den ausgewählten Satelliten eine starke Korrelation bzgl. des Ortes vorhanden ist. Die Korrelation ist für einige Satelliten weniger ausgeprägt. Trotzdem ist es möglich, anhand der Residuenwerte aller Signale und Satelliten einen Rückschluss auf die ungefähre Position im Rundkurs zu treffen.

Parametrisierbare Modelle für die Generierung von Korrekturdaten

Zwei unterschiedliche Ansätze zur Generierung von Korrekturdaten wurden entwickelt. Ein Ansatz verwendet ein 3D Gebäudemodell, um die Umweglängen der Signale zu bestimmen. Im zweiten Ansatz wird auf basis gesammelter Residuendaten eine Vorhersage für Residuenwerte getroffen.

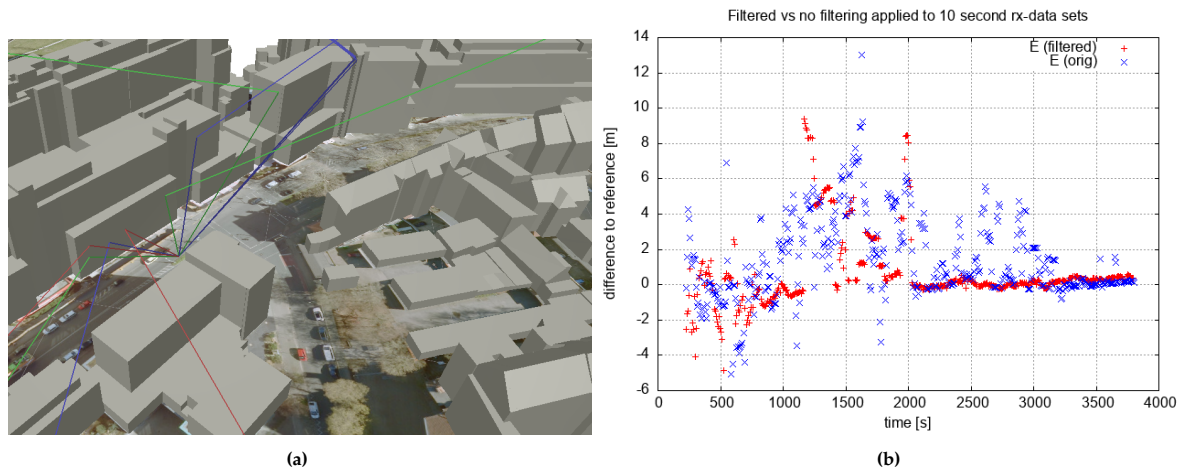


Abbildung 2.15: Anwendung des 3D Gebäudemodells zur Generierung von Korrekturdaten

Die Anwendung des Gebäudemodells zur Generierung von Korrekturdaten an einem anspruchsvollem Ort ist in Abb. 2.15 (a) dargestellt. Der Raytracer kann mögliche Signalwege gebeugter oder reflektierter Signale ermitteln. Die Differenz zwischen LOS-Distanz und Signalweg-Distanz zwischen Antenne und Satellit ist Basis für die Korrekturberechnung. In Abb. 2.15 (b) ist die Positionierungsgenauigkeit für einen statischen Rover an dem Ort aus (a) dargestellt. In blau sind die Abweichungen der Positionslösung ohne Korrektur von der hochgenauen Referenzposition dargestellt. In rot sind die Abweichungen dargestellt, wenn die vom Raytracer als NLOS klassifizierten Signale verworfen werden. Man kann erkennen, dass die Positionslösungen nach Herausnahme der NLOS Signale deutlich besser die hochgenaue Referenzposition treffen. Eine andere Variante der Korrekturberechnung für diesen Ansatz subtrahiert die Signalweg-Distanz von der Pseudorange. Eine Schwachstelle des Ansatzes ist die Verfügbarkeit und Genauigkeit der 3D Gebäudemodelle. Um dem entgegenzuwirken wurde ein Detektionsverfahren für Gebäudewände entwickelt, welches aus den Residuenwerten Gebäudewände erkennen kann. Auf diese Weise können Gebäudemodelle erweitert bzw. angepasst werden.

Der zweite Ansatz zur Generierung von Korrekturdaten basiert auf eine Analyse der Daten einer Residuendatenbank. Eine Variante vergleicht die aktuellen Residuen mit denen aus der Datenbank und ermittelt so Wahrscheinlichkeiten für die aktuelle Roverposition im Wegenetz. Diese Variante wurde exemplarisch am Rundkurs Vahrenwald angewendet und konnte dort die Roverposition mit wenigen Metern Genauigkeit schätzen. Eine andere Variante des Datenbank-Ansatzes ist die Verwendung umliegender Residuen zur Korrektur der Pseudoranges. Diese Variante hat sich als am vielversprechendsten erwiesen.

Entwicklungs- und Definitionsphase des Korrekturdatenformats zur Bereitstellung der Korrekturen an den GNSS-Empfänger

Die von der Datenbank abgeleiteten Korrekturen werden direkt an den Beobachtungen angebracht und die korrigierte Beobachtungen werden mit RTCM Message ausgesendet. Deshalb muss keine zusätzliche Message Type definiert werden.

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.

Bewertung der neuartigen Korrekturen

Die generierte DD Residuen werden in den Datenbank gespeichert und davon werden die Korrekturen für die Mehrwegeeffekte weiter abgeleitet. Die Korrekturen werden wie folgt bestimmt:

1. Aus den Trainingsdaten werden die 20 geometrisch nächstgelegenen Werte extrahiert.
2. Die 6 größten Residuen und 6 kleinsten Residuen werden aus der Liste entfernt.
3. Der Mittelwert der übriggebliebenen Residuen wird als Korrektur auf die Beobachtung angebracht.

Die Kinematische Messung in der Vahrenwalder Straße in Hannover wird als ein Beispiel zur Bewertung der Korrekturen angewendet. Das Auto ist auf der Straße 7 Runden um einen Häuserblock gefahren. In dem ersten Test wird die Runde 1 als Referenz und die Residuen von den anderen 6 Runden werden als Training benutzt, davon werden die geschätzten Residuen für Runde 1 abgeleitet. Ähnlich wie im ersten Test wird für den zweiten Test Runde 3 als Referenz benutzt und die Residuen werden von anderen 6 Runden abgeleitet. Die geschätzten Code Residuen von GPS L1 G17 und die Soll-Residuen die in der Datenbank gespeichert sind, werden in Abb. 2.16 angezeigt. Die Soll-Residuen, die von den NLOS-Signalen verursacht werden, sind zwischen 6 m und 12 m. Die geschätzten Residuen passen gut zu den Soll-Residuen.

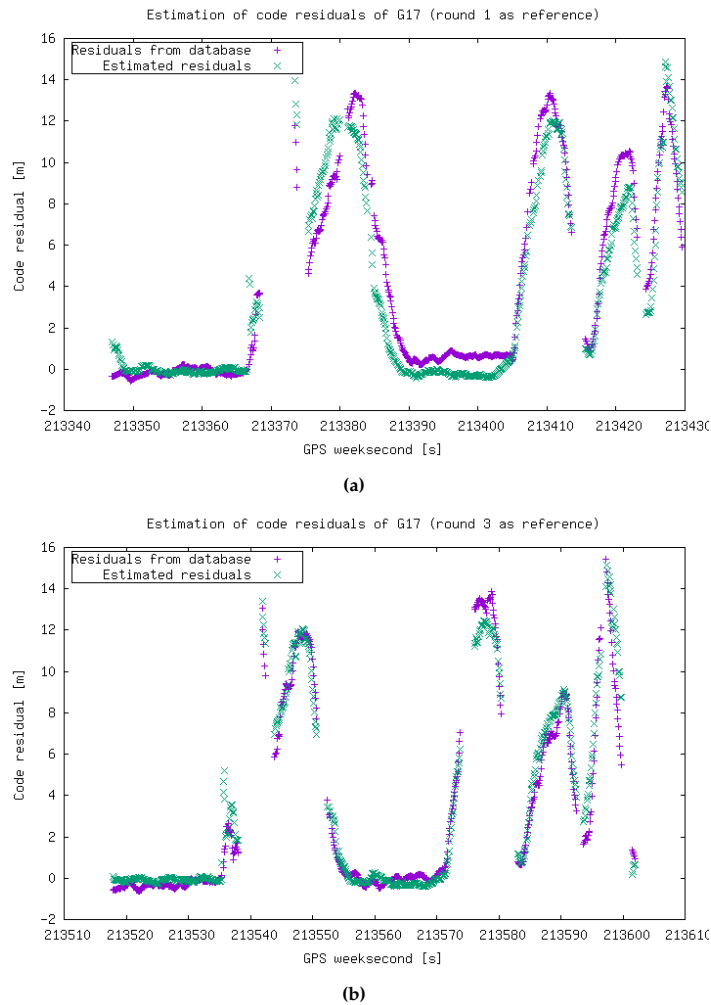


Abbildung 2.16: Vergleich der geschätzten Code Residuen und Soll-Residuen (a) Runde 1 (b) Runde 3

Nach dem Anbringen der Korrekturen auf allen Beobachtungen werden die Koordinaten des Autos mit GPPNET geschätzt. Um die Auswirkung der Korrekturen auf dem Koordinatenebene zu bewerten, werden die Koordinaten von den originalen Beobachtungen, mit Soll-Residuen korrigierten Beobachtungen und mit geschätzten Residuen korrigierten Beobachtungen jeweils in GPPNET geschätzt. Die Beobachtungen werden auch mit Code Residuen allein und Code/Phase Residuen zusammen jeweils korrigiert. Die 3D Abstände zwischen den geschätzten Koordinaten und den Ground-Truth Koordinaten werden in Abb. 2.17 angezeigt. Die Abweichungen liegen zwischen 4 m bis 10 m, wenn die NLOS-Signale nicht korrigierte werden. Nach dem Anbringen der geschätzten Korrekturen auf allen Beobachtungen werden die Abstände auf etwa 1m signifikant reduziert. Die Anwendung der Phasen Residuenkorrekturen bringen keine erkennbare Verbesserung oder Verschlechterung der Positionsgenauigkeit. Die Positionslösungen mit den geschätzten Residuen passen gut zu den Positionslösungen mit den Soll-Residuen. Die geschätzten Residuen können demnach die Positionslösungen signifikant verbessern. Wegen der schlechten Kontinuität der Signale im Stadtteil können die Mehrdeutigkeiten kaum fixiert werden. Deshalb ist die Zentimeter-Genauigkeit hier nicht erreichbar.

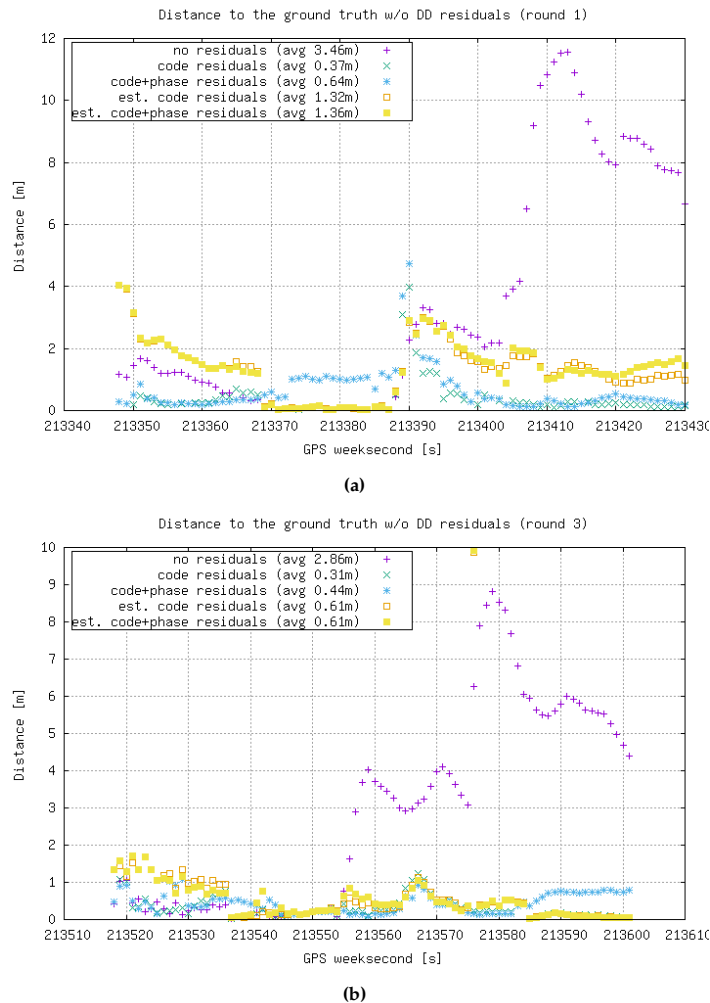


Abbildung 2.17: Vergleichen der geschätzten Koordinaten (a) Runde 1 (b) Runde 3

Migration von neuen kartierten Korrekturen mit verwendeten kommerziellen Korrekturdaten (SSR, RTCM)

Die Korrekturen werden direkt an die Beobachtungen angebracht und in den standardisierten RTCM/MSM durch unsere Module MSM_OUT ausgesendet. Deshalb ist kein neues Message Format oder spezielle hardwaretechnische Implementierung nötig.

Adaptionen im Empfänger

Keine Adaptionen im Empfänger sind erforderlich, da die Bearbeitung, Übertragung und Anbringung der Korrekturen auf Server-Seite prozessiert werden.

Entwicklung und Abstimmung von Architektur-Konzept zur Verwendung der neuen Korrekturdaten

Das Architektur-Konzept zur Verwendung der neuen Korrekturdaten wird in Abb. 2.18 dargestellt. Das Auto schickt die Näherungskoodinaten in NMEA GGA Datenformat zum Server. Basierend auf den Näherungskoodinaten sucht das KOMET Filter die entsprechenden Residuen in der Residuen Datenbank, wo die Residuen, Elevation- und Azimuth-Winkel aller früheren gemessenen Satelliten

gespeichert werden. Nach der Findung der geeigneten Residuen werden sie zurück zum KOMET Filter geschickt und weiter zum Modul geschickt, wo die Residuen als Mehrwegekorrekturen an die virtuellen Referenzstation (VRS) Beobachtungen angebracht werden. Die modifizierten VRS Beobachtungen werden durch das KOMET Filter in RTCM/MSM Format zum Auto geschickt, damit das Auto die genauere Position mit RTK berechnen kann.

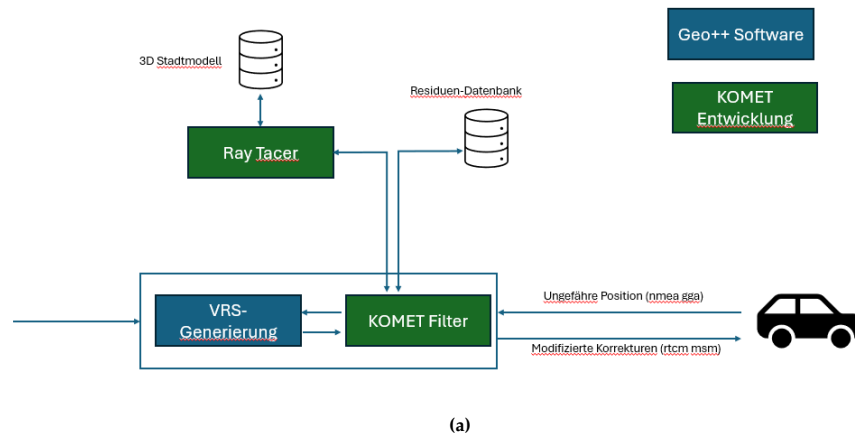


Abbildung 2.18: Architektur-Konzept zur Verwendung der neuen Korrekturdaten

SW-Entwicklung

Alle Module und DLL Dateien, die für die Realisierung des Architektur-Konzeptes benötigt werden, wurden im Verbundvorhaben entwickelt und implementiert, z.B. Modul für Rohdatenverarbeitung oder Interfaces zwischen unterschiedlichen Modulen.

Die Softwarekomponenten, die eigentlich für den Empfänger geplant sind, werden nicht mehr implementiert, da alle benötigte Prozesse auf Server-Seite durchgeführt werden und Empfänger-unabhängig sind.

3

Zahlenmäßiger Nachweis

3.1. Wichtigste Positionen des Zahlenmäßigen Nachweises

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

Personalmittel Das Personal konnte wie geplant eingesetzt werden.

Reisemittel Wegen des Lockdowns während der Covid-19 Pandemie waren die Reisen zu den nationalen und internationalen Konferenzen grundsätzlich nicht möglich. Nach der Pandemie wurden unsere Ergebnisse von den Partnern zusammen in den Konferenzen dargestellt. Der interne Austausch ist weitestgehend online durchgeführt worden. Im Ergebnis sind die eingeplanten Reisemittel daher nicht ausgeschöpft worden.

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.

Alle Arbeitspakete im Rahmen des Projekts sind notwendig und angemessen für den Erfolg.

In Arbeitspaket 2 werden die DOP-Werte basierend auf dem 3D-Stadtmodell genau analysiert, um geeignete Messorte zu finden, die unter unterschiedlichen Mehrwegeeffekten leiden. Vor den Messungen wurde die Antenne auf der Geo++-Drehplattform kalibriert, um die GDV/PCV (Group Delay Variation/Phase Center Variation) und die von der Karosserie des Autos reflektierten Mehrwegeeffekte von den durch Gebäude verursachten Mehrwegeeffekten zu trennen. Dies ist eine Voraussetzung für die Analyse und Modellierung der Mehrwegeeffekte.

Bevor wir die kinematische Messung im Stadtgebiet durchführten, haben wir zunächst eine 10-tägige statische Messung durchgeführt und die Ergebnisse analysiert, um alle Hardware- und Softwarekomponenten zu überprüfen und mögliche Probleme im Vorfeld zu erkennen. Nach der Verarbeitung

und Analyse der statischen Messungen wurde eine Datenbank für die Speicherung, Verarbeitung und Übertragung der Daten entwickelt. Schließlich wurde die kinematische Messung im ausgewählten Stadtteil durchgeführt. Der im Projekt entwickelte Algorithmus zur Reduzierung der Mehrwegeeffekte wurde erfolgreich auf die gemessenen Daten angewendet und mit den Ground-Truth-Koordinaten validiert.

Um die Arbeitspakete effizient zu erledigen, wurden die Aufgaben hauptsächlich in die Bereiche Programmierung und Datenauswertung aufgeteilt. Ein Informatiker ist für die Entwicklung und Implementierung der Algorithmen verantwortlich. Ein Geodät übernimmt die Arbeit für Datenauswertung und Interpretation.

3.3. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Der im Rahmen des Projekts entwickelte Mehrwegeeffekt-Detektor kann in Zukunft in unsere Produkte implementiert werden, um NLOS-Signale an der Rover-Site zu erkennen und auszuschließen. Das ebenfalls im Projekt entwickelte Datenbank-Konzept kann in Zukunft zur Speicherung, Verarbeitung und Übertragung der GNSS-Beobachtungen und zugehörigen Daten angewandt werden. Die im Projekt erhobenen Daten sind zudem wertvoll für zukünftige Forschungen im Bereich des autonomen Fahrens.

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

- 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).

3.5.2. Nicht begutachtete Veröffentlichungen

- Ruwisch, F., T. Kersten und S. Schön (2024). *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). Förderkennzeichen: 19 A20002 C. 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

- 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).

Literatur

- Adjrad, 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).