

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Abschlussbericht „ACCURAUTO“

Accurate prediction of GNSS antenna performance in automotive scenarios



Projektpartner: Geo++ GmbH, Institut für Erdmessung (IfE) der Leibniz Universität Hannover,  
DLR – Institut für Kommunikation und Navigation

## Inhaltsverzeichnis

Abschlussbericht „ACCURAUTO“ .....	1
1. Darstellung des Projekts (Geo++) .....	3
1.1 Geförderte Institutionen .....	3
1.2 Interessierte Partner – Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	3
1.3 Projektziele .....	3
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangspunkt .....	4
1.5 Bekanntgewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei Dritten (alle) .....	4
2. Projektverlauf (Alle).....	5
2.1 Überblick über den zeitlichen Ablauf (Geo++) .....	5
2.2 Beschreibung der Arbeitspakete .....	5
2.2.1 AP1: Freifeldkalibrierungen und Vergleich von Kalibrierergebnissen (Geo++).....	5
2.2.2 AP2: Charakterisierung des Empfangsverhaltens unterschiedlicher Empfänger während der Kalibrierung (IfE) .....	14
2.2.3 AP3: Digitaler Zwilling der Fahrzeugkalibrierung (DLR).....	22
2.3 Abweichungen vom ursprünglichen Plan (Alle) .....	31
3. Projektergebnisse (Alle) .....	32
3.1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen und anderer wesentlicher Ergebnisse.....	32
3.2 Bereitstellung der Daten für Dritte (Interessenten und Nutzer).....	33
3.3 Wissenschaftlich-technische Innovationen und Beiträge .....	33
3.4 Beiträge zu förderpolitischen Zielen .....	34
3.5 Veröffentlichung der Ergebnisse und Einbindung des wissenschaftlichen Nachwuchses..	34
4. Verwertbarkeit der Ergebnisse (Alle) .....	35
5. Offene Fragen und Ausblick (Alle) .....	36
5.1 Offene technische, wissenschaftliche oder praktische Fragestellungen .....	36
5.2 Empfehlungen für Folgeforschung oder Implementierung.....	37
Abbildungsverzeichnis.....	38
Tabellenverzeichnis .....	40
Literaturverzeichnis.....	41
Abkürzungsliste .....	42

# 1. Darstellung des Projekts

## 1.1 Geförderte Institutionen

Das Projekt **ACCURAUTO** wurde im Rahmen des mFUND-Programms gefördert. Beteiligte Projektpartner waren:

- **Geo++ GmbH** (Projektleitung, Kalibrierungen, Freifeldmessungen, technologische Umsetzung)
- **Institut für Erdmessung (IfE) der Leibniz Universität Hannover** (GNSS-Datenanalyse, Empfängercharakterisierung)
- **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Kommunikation und Navigation** (Antennencharakterisierung, digitaler Zwilling, Simulation).

Die Förderung ermöglichte eine Bündelung wissenschaftlicher und technologischer Expertise mit dem Ziel, präzise GNSS-Positionierung für Fahrzeuganwendungen nutzbar zu machen.

## 1.2 Interessierte Partner – Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Enge Kooperationen bestanden mit:

Landesvermessungsbehörden und dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) bezüglich der Nutzung von Open-Data SAPOS Korrekturdatendiensten.

Industriepartnern (u-blox, Hirschmann Car Communications, Bosch), die die Ergebnisse im Kontext von praktischen Anwendungen wie autonomen Fahren, V2X-Kommunikation und präziser Navigation bewertet haben.

## 1.3 Projektziele

Ziel von **ACCURAUTO** war die Untersuchung der Vorhersagbarkeit des Fahrzeugeinflusses auf GNSS-Antennenmessungen, um eine präzise Fahrzeuglokalisierung mithilfe offener Korrekturdatendienste zu ermöglichen.

Dazu wurde:

- ein hybrider Ansatz entwickelt, der digitale Zwillinge von Fahrzeugen mit realen Antennenmessungen kombiniert,
- eine Prozesskette zur Fahrzeugantennenkalibrierung mittels Realkalibrierung und digitalem Zwilling aufgebaut,
- die Auswirkung der Kalibrierung auf die Genauigkeit der Position analysiert,
- die Machbarkeit des Ansatzes für zukünftige Anwendungen und Folgeprojekte bewertet.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden folgende Fragen beantwortet:

- Wie stark beeinflusst die Installation einer GNSS-Antenne in Landfahrzeugen den antenneninduzierten GNSS-Fehler?
- Welchen Einfluss hat dieser Fehler auf die Fahrzeugverortung mittels offenen GNSS-Korrekturdatendiensten?
- Kann der Fehler mithilfe eines digitalen Zwillings modelliert werden, um die Auswirkungen verschiedener Antennenanordnungen und Empfängertypen im Voraus zu bestimmen?
- Mit welcher Genauigkeit muss die Kalibrierumgebung (Standort und Fahrzeug) im digitalen Zwilling modelliert werden, um Ergebnisse zu erzielen, die mit realen Messungen vergleichbar sind?
- Welchen Einfluss hat die Verwendung unterschiedlicher GNSS-Empfänger in der Kalibrierkette im Vergleich zum später im Fahrzeug eingesetzten Empfänger?

#### 1.4 Wissenschaftlicher und technischer Ausgangspunkt

Die präzise GNSS-Positionierung wird bislang durch fehlerhafte Einflüsse von Fahrzeugantennen und deren Installationsumgebung eingeschränkt. Dies kann zu Abweichungen im Meterbereich führen.

Während für hochwertige geodätische Antennen etablierte Kalibrierverfahren existieren, sind diese für kostengünstige Fahrzeugantennen und deren karosseriebedingte Beeinflussungen bislang nicht etabliert.

**ACCURAUTO** überträgt daher einen in der Luftfahrt bewährten hybriden Ansatz – die Kombination aus digitalen Zwillingen und realen Messungen – auf Fahrzeuganwendungen. Ziel ist es, den Einfluss der Fahrzeugumgebung sowie der Antennengeometrie auf GNSS-Messungen zu quantifizieren und zu korrigieren.

Die Projektpartner kombinieren ihre Expertise:

- **Geo++:** Freifeld- und Roboterkalibrierung von Fahrzeugantennen,
- **DLR:** Antennencharakterisierung, Simulation und digitaler Zwilling,
- **IfE:** GNSS-Datenanalyse und Empfängercharakterisierung.

#### 1.5 Bekanntgewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei Dritten

In "5GAA - Vehicular Antenna Test Methodology (VATM), Technical Report (04/2024)" wurden Verfahren zur Messung von Antennenamplituden/Patterns auf Fahrzeugen standardisiert und auch GNSS-Antennen werden aufgeführt. Eine Vermessung von Gruppenlaufzeitvariationen (GDV) oder Phasenzentrumsvariationen (PCV) wird allerdings nicht berücksichtigt.

In Cicconet, Silva, & Mendes (2023) und Cicconet et al. (2023) wurden GNSS Antennen auf Fahrzeugen simuliert, um die Platzierung der Antenne zu optimieren. Auch hier wurde nur die Antennenpatterns und nicht die GDV und PCV beachtet.

In Siebert et al (2023) wurden Mehrwegeeffekte auf die Fahrzeugverortung untersucht und neue algorithmische Verfahren zur Reduktion der Effekte vorgestellt. Die Technologie eignet sich allerdings nur zur Vermeidung von Fernfeld-Mehrwegeausbreitung und nicht für die in Accurato untersuchten Nahfeld-Effekte.

Schätzung von GDV aus einem globalen Netz an Referenzstationen wurde in Platz (2025) vorgestellt. Hier besteht allerdings keine mobile Anwendung.

## 2. Projektverlauf

### 2.1 Überblick über den zeitlichen Ablauf

Arbeitspakete (AP) und Projektmonat (PM)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	PM
1000	Freifeldkalibrierungen und Vergleich von Kalibrierergebnissen					M1							M5	6
2000	Charakterisierung des Empfangsverhaltens unterschiedlicher Empfänger						M2							5
3000	Digitaler Zwilling der Fahrzeugkalibrierung							M3				M4		11
	<b>PM Gesamt</b>													<b>22</b>

Das Projekt wurde in drei parallel bearbeiteten Arbeitspaketen (AP) durchgeführt. Die ursprüngliche Planung mit Meilensteinen ist im Projektzeitplan dargestellt. Im Verlauf ergaben sich lediglich geringfügige Anpassungen (Verlängerung der Gesamtlaufzeit um einen Monat und unwesentliche Verschiebungen einzelner Meilensteine).

### 2.2 Beschreibung der Arbeitspakete

#### 2.2.1 AP1: Freifeldkalibrierungen und Vergleich von Kalibrierergebnissen

##### Roboterkalibrierung

Eine auf einem Volkswagen Passat B8 Variant installierte Antenne wurde zunächst demontiert und auf einem Roboter kalibriert. Abbildung 1 zeigt die Ergebnisse im Vergleich zu einer Kalibrierung der gleichen Antenne in einer reflexionsarmen Kammer beim DLR (vgl. 2.2.3 AP3), wobei starke Übereinstimmungen zu erkennen sind.

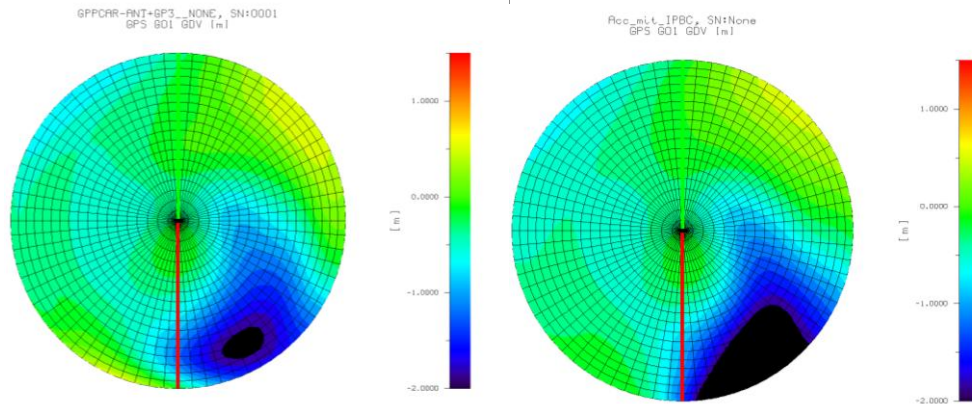


Abbildung 1: GDV von GPS L1; links: Geo++ Roboterkalibrierung, rechts: DLR Kammerkalibrierung

### Kalibrierung des Fahrzeuges auf dem Freifeldmessstand.

Zur Bestimmung von Nahfeldeffekten durch fahrzeuginduzierte Mehrwege wurde **eine in-situ-Kalibrierung** der GNSS-Antenne durchgeführt. Das Fahrzeug wurde hierzu auf einer von Geo++ entwickelten motorisierten Drehplattform (Wübbena et al., 2021) positioniert (Abbildung 2). Die Plattform absolvierte alle 90 s eine vollständige Rotation, sodass in kurzer Zeit GNSS-Signale aus allen Azimutrichtungen relativ zum Fahrzeug erfasst wurden. Eine vollständige Kalibriersitzung dauerte ca. 6 h, um eine hinreichende räumlich-zeitliche Abdeckung sicherzustellen.

In unmittelbarer Nähe wurde eine Referenzstation mit multifrequenter geodätischer Antenne (TWIVC6050) und Javad-GNSS-Empfänger (JAVAD OMEGA) installiert. Die GNSS-Beobachtungen der fahrzeugmontierten Antenne wurden gemeinsam mit den Referenzstationsdaten in einem kinematischen Modus für die kurze Basislinie verarbeitet. Diese Vorgehensweise eliminiert effektiv Bahn- und Uhrfehler der Satelliten sowie ionosphärische und troposphärische Verzögerungen. Nach Anwendung von Phasenwindungskorrekturen enthielten die verbleibenden Residuen überwiegend GDV, PCV und Mehrwegeeffekte.

Die resultierenden Code- und Trägerphasen-Residuen wurden in ein fahrzeugfestes Koordinatensystem transformiert und als Antennenkorrekturen in der Auswertung berücksichtigt. Nach etwa zehn Iterationen war eine Konvergenz der Residuen erreicht, was die Vollständigkeit der Kalibrierung und die Wirksamkeit des Korrekturmodells bestätigte.

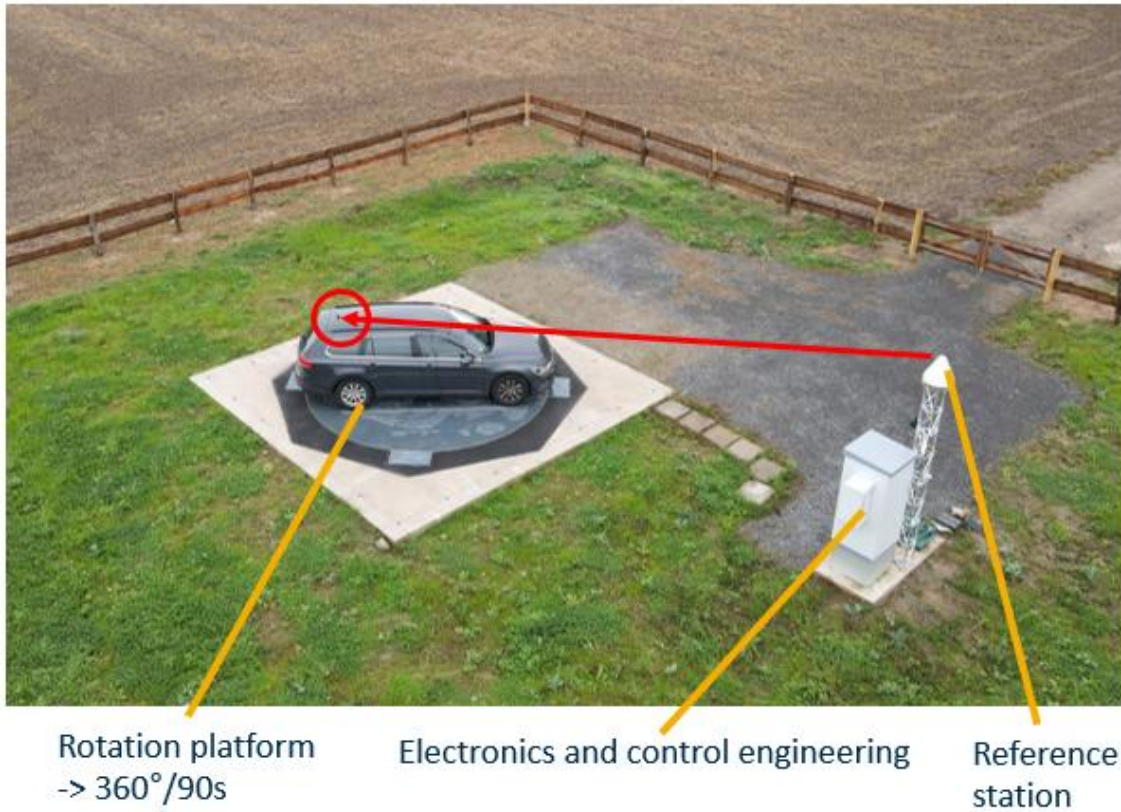


Abbildung 2: Antennenkalibrierung auf einem Drehplattform

Als Versuchsfahrzeug diente ein VW Passat B8 Variant mit serienmäßiger Shark-Fin-Antenne. Die Kalibrierung wurde an den Tagen DoY 048 (10:30–18:00 UTC) und DoY 052 (10:00–17:00 UTC) im Jahr 2025 jeweils einmal durchgeführt. Die Fahrzeugantenne und die Referenzstationsantenne wurden über einen Signalsplitter mit vier GNSS-Empfängern verbunden, um den Einfluss unterschiedlicher Empfängermodelle sowie verschiedener Tracking-Loop-Bandbreiten (DLL-BW) zu untersuchen, siehe Abbildung 3. Die Bandbreite der GNSS-Empfänger sind in Tabelle 1 dargestellt.



Abbildung 3: Experimentkonfiguration

	Fahrzeug DLL-BW [Hz]	Referenz DLL-BW [Hz]
Javad Omega	3	3
Javad DeltaS-3s 4300/4301	0.5	0.5
Javad TRE G3T 0081/0082	3	3
Septentrio 1372/1914	0.25	0.25
Tallysman	multifrequente; für Referenztrajektorie	

**Tabelle 1: Bandbreite der Empfänger**

Die am DoY 052 gemessenen GDV der auf dem Volkswagen Passat B8 montierten GNSS-Antenne für das GPS L1-Signal wird in Abbildung 4 gezeigt. Die GDV-Werte von den unterschiedlichen Empfängern und Tracking-Loop-Bandbreiten sind in Zentimetern angegeben und in Azimut ( $0^{\circ}$ – $360^{\circ}$ ) sowie Elevation ( $5^{\circ}$ – $90^{\circ}$ ) aufgetragen. Über alle Messungen hinweg zeigt sich ein ähnliches GDV-Muster. Der überwiegende Anteil der GDV liegt im Bereich  $\pm 60$  cm, wobei starke positive Abweichungen (bis ca. 2 m) aus Richtung rechts vorne und negative Abweichungen (bis ca. -2 m) aus Richtung rechts hinten auftreten. Die Empfänger DeltaS-3s (0.5 Hz) und Septentrio (0.25 Hz) zeigten ein ähnliches Muster wie die anderen Empfänger, jedoch mit leicht reduzierter Amplitude und homogenerer Verteilung im mittleren Elevationsbereich. Diese Unterschiede sind darauf zurückzuführen, dass eine geringere Bandbreite das Messrauschen reduziert. Andererseits kann eine zu enge Bandbreite bei stark dynamischen Signalen Tracking-Fehler verursachen. Die klare Asymmetrie zwischen rechter Front- und Heckrichtung deutet auf fahrzeugspezifische Mehrwegeeffekte hin, vermutlich verursacht durch Karosseriestrukturen, A-Säule und Dachkante.

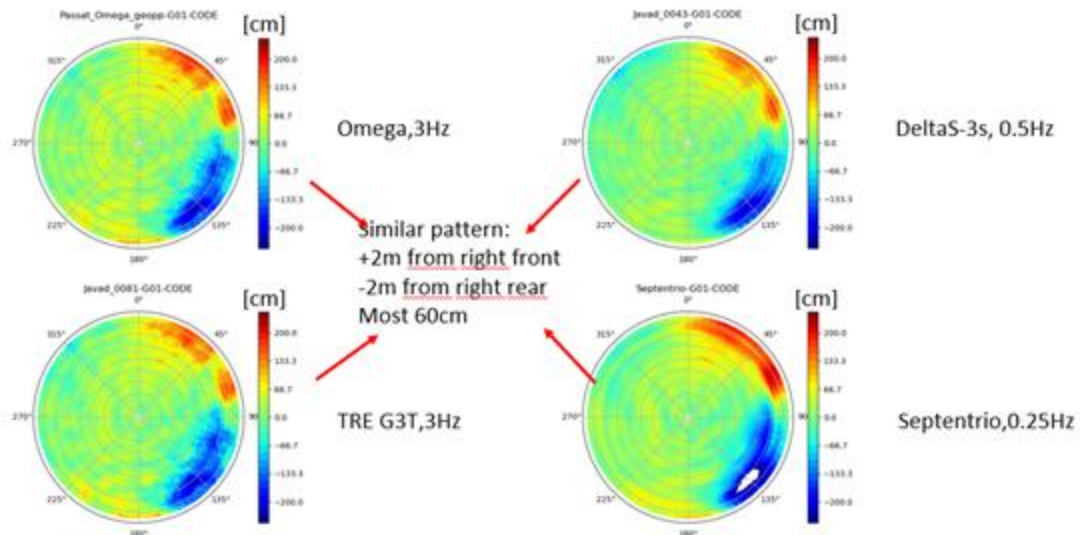


Abbildung 4: Auf der Drehplattform am DoY 052 kalibrierte GDV von GPS L1 von vier Empfängern

Die Antennenkalibrierung wurde am DoY 048 am Volkswagen Passat B8 unter identischem Versuchsaufbau durchgeführt, diesmal jedoch bei Frostbedingungen (dünne Eisschicht auf dem Fahrzeugdach). Die Daten sind wie zuvor in Zentimetern angegeben, aufgetragen in Azimut ( $0^{\circ}$ – $360^{\circ}$ ) und Elevation ( $5^{\circ}$ – $90^{\circ}$ ) und gezeigt in Abbildung 5.

Das bekannte GDV-Muster (positive Werte aus rechter Front-, negative Werte aus rechter Heckrichtung) tritt weiterhin bei allen Empfängern auf. Die Polaritätsverteilung (rechts vorne: bis ca. 2 m, rechts hinten: -2 m) bleibt konsistent mit den frostfreien Messungen. Der Großteil der Werte liegt weiterhin innerhalb  $\pm 60$  cm, jedoch mit leicht erhöhter Streuung in einzelnen Azimutsektoren. Die Frostschicht beeinflusst vermutlich die GDV-Messungen durch zusätzliche diffuse Reflexionen und Streuung an der unregelmäßigen Eisoberfläche. Dies führt zu einer geringfügigen Zunahme der Azimut- und Elevationsvariabilität, ohne jedoch das dominierende fahrzeugspezifische Muster grundlegend zu verändern.

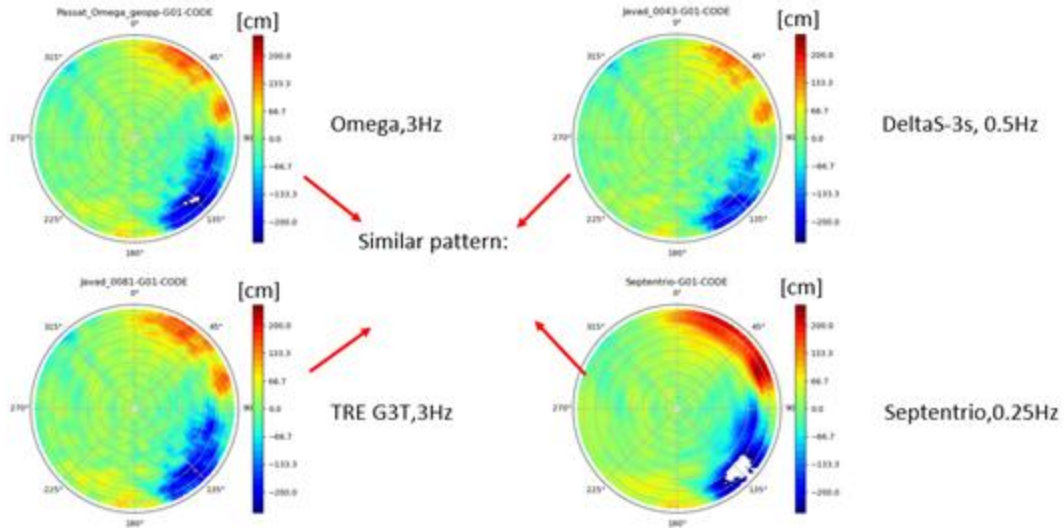


Abbildung 5: Auf der Drehplattform am DoY 048 kalibrierte GDV von GPS L1 von vier Empfängern

Die auf dem Drehplattform kalibrierte GDV wurde mit der vom DLR simulierten GDV (siehe 2.2.3 AP3) verglichen und ist in Abbildung 6 gezeigt. Die Simulation bildet das grundlegende richtungsabhängige GDV-Muster der gemessenen Daten gut ab, insbesondere die Polaritätsverteilung und Lage der Hauptmaxima/-minima.

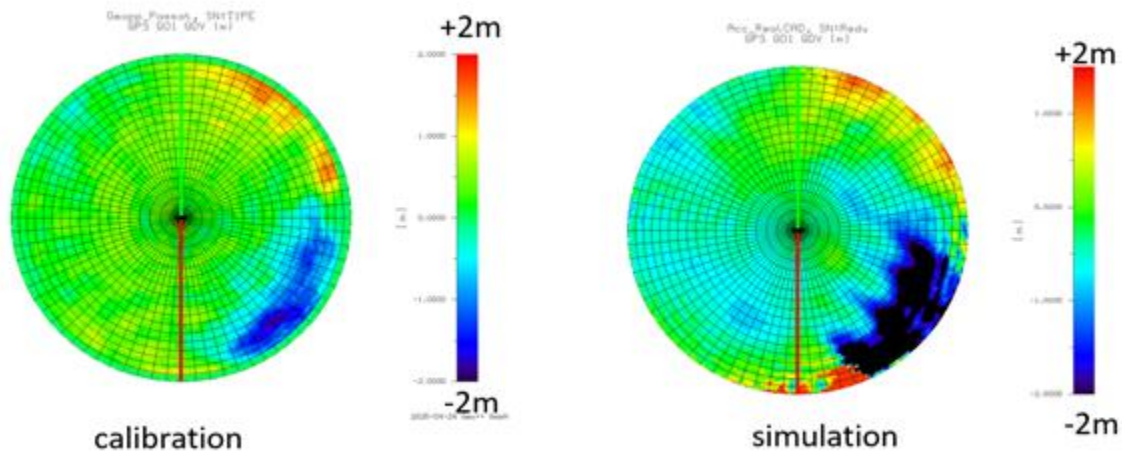


Abbildung 6: Kalibrierte (links: Geo++) und simulierte GDV (rechts: DLR) von GPS L1

### Kinematische Testfahrt

Zur Untersuchung des Einflusses der Antennenkalibrierung auf die Positionierungsgenauigkeit wurde am DoY 043 eine kinematische Testfahrt durchgeführt. Das Fahrzeug stand zunächst einige Minuten vor dem Geo++ Gebäude und absolvierte anschließend mehrere Fahrten entlang derselben Strecke. Die Gesamtdistanz umfasste etwa 50 km im Stadtgebiet, 120 km auf der Autobahn sowie 70 km auf einer von Bäumen gesäumten Landstraße (Abbildung 7).



Abbildung 7: Trajektorie der kinematischen Testfahrt

Da die am Volkswagen Passat B8 installierte Shark-Fin-Antenne lediglich L1-Signale empfangen kann, wurde zusätzlich eine multifrequente Tallysman-Antenne an der Frontscheibe montiert, in einem Abstand von etwa 1.95 m zur Shark-Fin-Antenne. Die Referenztrajektorie wurde mittels Dual-Frequenz-Multi-GNSS-Real-Time Kinematic (**RTK**) bestimmt. Abbildung 8 zeigt den Fixing-Status der Referenztrajektorie. Die rote Linie gibt die Anzahl der getrackten Satelliten an, während die grüne Linie die Anzahl der gefixten Satelliten darstellt. Aufgrund von Abschattungen durch Gebäude im Bereich des Parkplatzes sowie Baumhindernissen während der Landstraßenabschnitte war das Fixing in diesen Phasen eingeschränkt. Koordinaten, die unter diesen Bedingungen bestimmt wurden, gingen daher nicht in den Koordinatenvergleich ein.

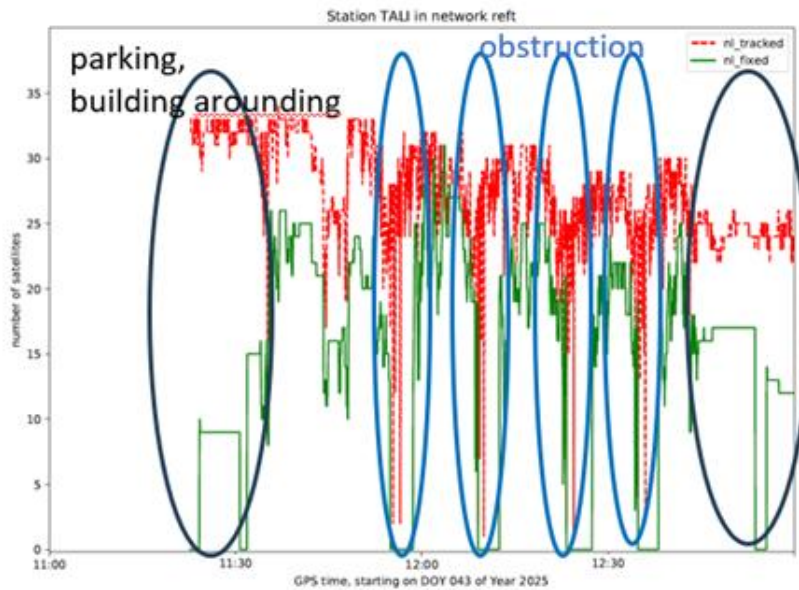


Abbildung 8: Fixing-Status der Referenztrajektorie

Die Koordinaten der Shark-Fin-Antenne wurden mittels differentieller GNSS-Auswertung (DGNSS) jeweils mit und ohne Anwendung der am DoY052 kalibrierten GDV berechnet. Abbildung 9 zeigt die Abweichungen gegenüber der Referenztrajektorie in Ost- (oben) und Nordrichtung (unten). Die rote Linie stellt die Abweichung unter Berücksichtigung der GDV dar, die blaue Linie jene ohne GDV.

Die Auswertung der mit DGNSS berechneten Koordinaten der Shark-Fin-Antenne zeigt, dass die Anwendung der kalibrierten GDV sowohl die systematische als auch die zufällige Komponente des Positionsfehlers deutlich reduziert. In der Ostrichtung wird der Mittelwert der Abweichung von +0.19 m ohne GDV auf 0.00 m mit GDV korrigiert, während die Präzision (RMS) von 0.38 m auf 0.27 m verbessert wird. In der Nordrichtung sinkt der Mittelwert von -0.08 m auf 0.02 m und der RMS-Wert von 0.57 m auf 0.38 m. Diese Verbesserungen – rund 29 % in Ost- und 33 % in Nordrichtung – spiegeln sich in einer insgesamt stabileren Trajektorie mit geringerer Streuung und weniger Ausreißern wider. Die Ergebnisse belegen, dass die GDV-Korrektur bei fahrzeuginstallierten GNSS-Antennen einen signifikanten Beitrag zur Erhöhung der Positionsgenauigkeit in präzisen Navigationsanwendungen leistet.

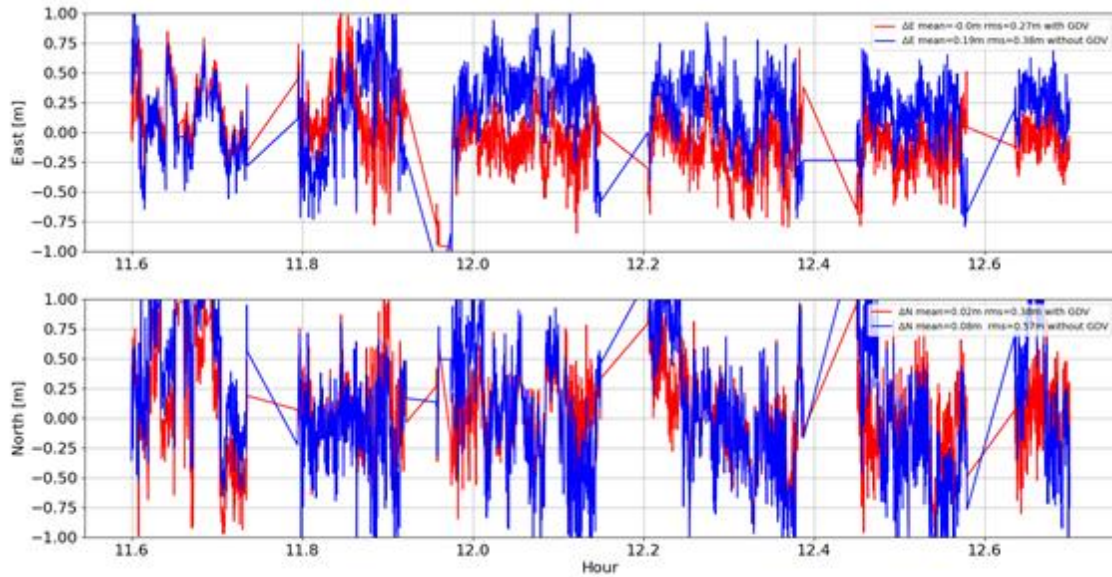


Abbildung 9: Abweichungen gegenüber der Referenztrajektorie in Ost- (oben) und Nordrichtung (unten) mit (rot) und ohne (blau) GDV von DoY 052

Abbildung 10 zeigt die Differenzen der berechneten Koordinaten in Ost- (rot) und Nordrichtung (grün) zwischen Lösungen mit und ohne Anwendung der kalibrierten GDV. Diese Darstellung isoliert den direkten Einfluss der GDV-Korrektur auf die Positionsbestimmung und verdeutlicht, dass durch GDV-Effekte Abweichungen von bis zu etwa 50 cm in beiden Richtungen auftreten können. Die Variationen sind sowohl systematisch als auch zeitlich schwankend, was den richtungs- und elevationsabhängigen Charakter der GDV widerspiegelt. Damit wird deutlich, dass GDV-Korrekturen bei präzisen GNSS-Anwendungen, insbesondere bei fahrzeuginstallierten Antennen, eine wesentliche Rolle für die Genauigkeit spielen.

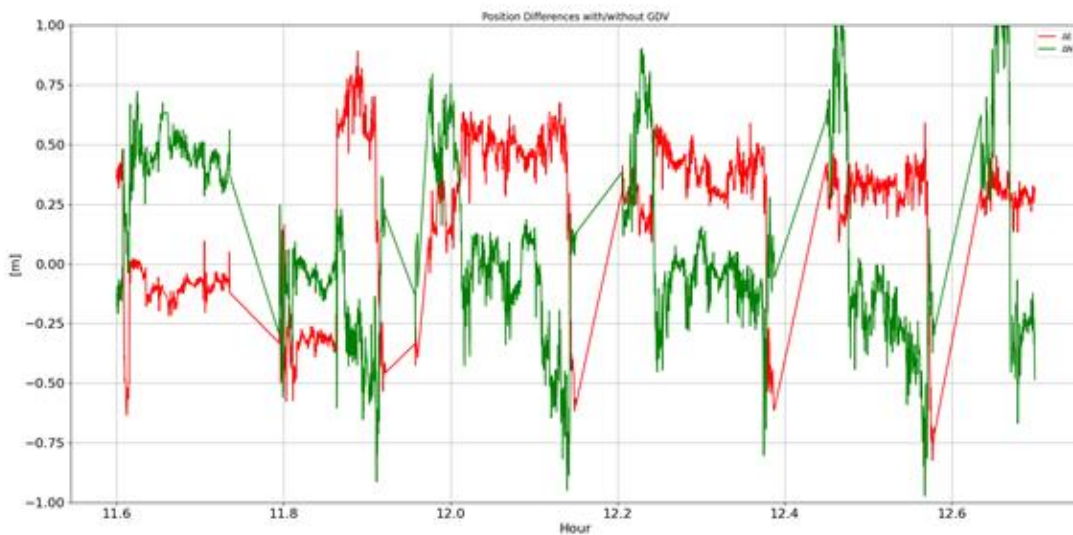


Abbildung 10: Differenzen in Ost- (rot) und Nordrichtung (grün) der Trajektorien mit und ohne GDV-Korrektur

Um den Einfluss der an unterschiedlichen Tagen kalibrierten GDV zu beurteilen, werden die Abweichungen der Koordinaten mit Anwendung der am DoY 048 bzw. 052 kalibrierten GDV in Abbildung 11 gezeigt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die an unterschiedlichen Tagen ermittelten GDV-Korrekturen nur zu sehr geringen Unterschieden in den Positionslösungen führen. Die Mittelwerte und RMS-Werte der Abweichungen unterscheiden sich lediglich im Millimeterbereich, wobei in beiden Fällen die Positionsgenauigkeit nahezu identisch bleibt. Dies zeigt, dass die GDV-Muster unter vergleichbaren Umgebungsbedingungen und Fahrzeugkonfigurationen stabil sind und somit eine einmalig ermittelte Kalibrierung längerfristig zuverlässig angewendet werden kann.

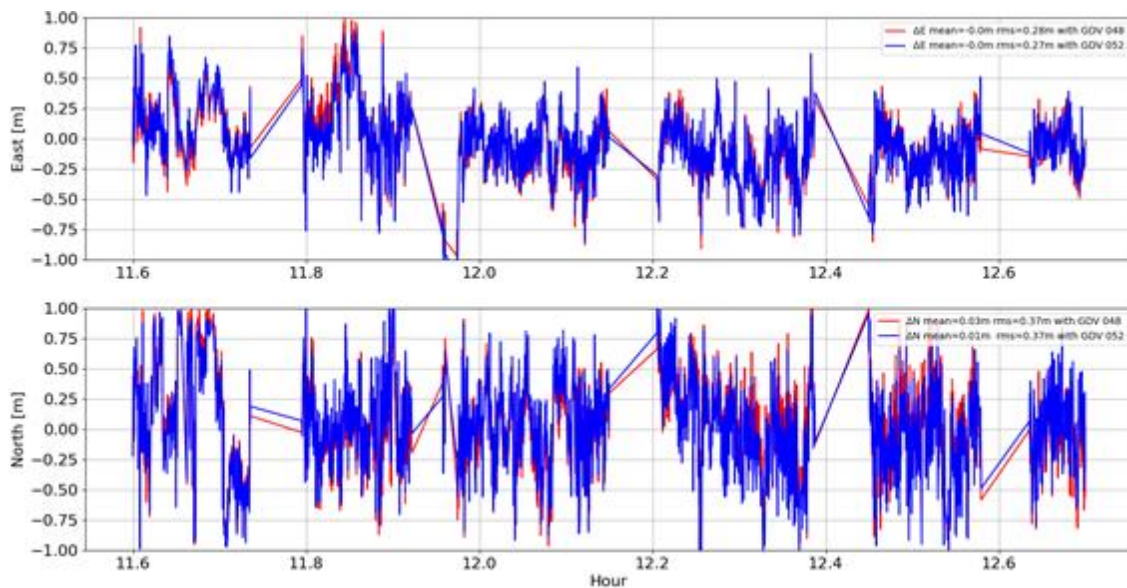


Abbildung 11: Abweichungen gegenüber der Referenztrajektorie in Ost- (oben) und Nordrichtung (unten) mit (rot) und ohne (blau) GDV von DoY 048

## 2.2.2 AP2: Charakterisierung des Empfangsverhaltens unterschiedlicher Empfänger während der Kalibrierung

Zur Charakterisierung des Empfangsverhaltens unterschiedlicher Empfänger wurden während der Kalibrierung im Jahr 2024 insgesamt sechs Empfänger vom IfE mit unterschiedlichen Trackingeinstellungen für die Delay Locked Loop (DLL) Bandwidth (BW) verwendet. Dabei wurden jeweils drei Empfänger mittels eines aktiven GNSS-Signalsplitters an die Referenzstationsantenne sowie an die Fahrzeugantenne angeschlossen. Somit ergeben sich zwei Nullbasislinien. Eine Zusammenstellung der Empfänger(einstellungen) ist in Tabelle 2 gegeben.

		Fahrzeug		Referenzstation	
Shortcut	Receiver name	SN	DLL BW [Hz]	SN	DLL BW [Hz]

S3S	Javad DeltaS-3S	4300	1	4301	3
Delta	Javad Delta TRE G3T	0081	3	0082	3
Sept	Septentrio PolaRx5TR	1372	0.25	1914	0.25

Tabelle 2: Verwendete Empfänger und deren Einstellungen für die Kalibrierung der Fahrzeugantenne im Jahr 2024

Zunächst wurde eine Signalanalyse für die aufgezeichneten GNSS-Rohdaten an der Referenzstation durchgeführt. Abbildung 12 stellt die GPS L1 Signalstärke (GS1C) über die GPS-Zeit für alle sichtbaren GPS-Satelliten und alle drei Empfänger dar. Insgesamt zeigt sich eine hohe Ähnlichkeit zwischen den Signalstärkekurven der unterschiedlichen Empfänger. Allerdings treten teilweise Unterschiede auf, die in Abbildung 12 exemplarisch hervorgehoben sind. So zeigt der Septentrio Empfänger beispielsweise stabilere Signalstärkekurven mit weniger starken Einbrüchen in den Signalstärkewerten.

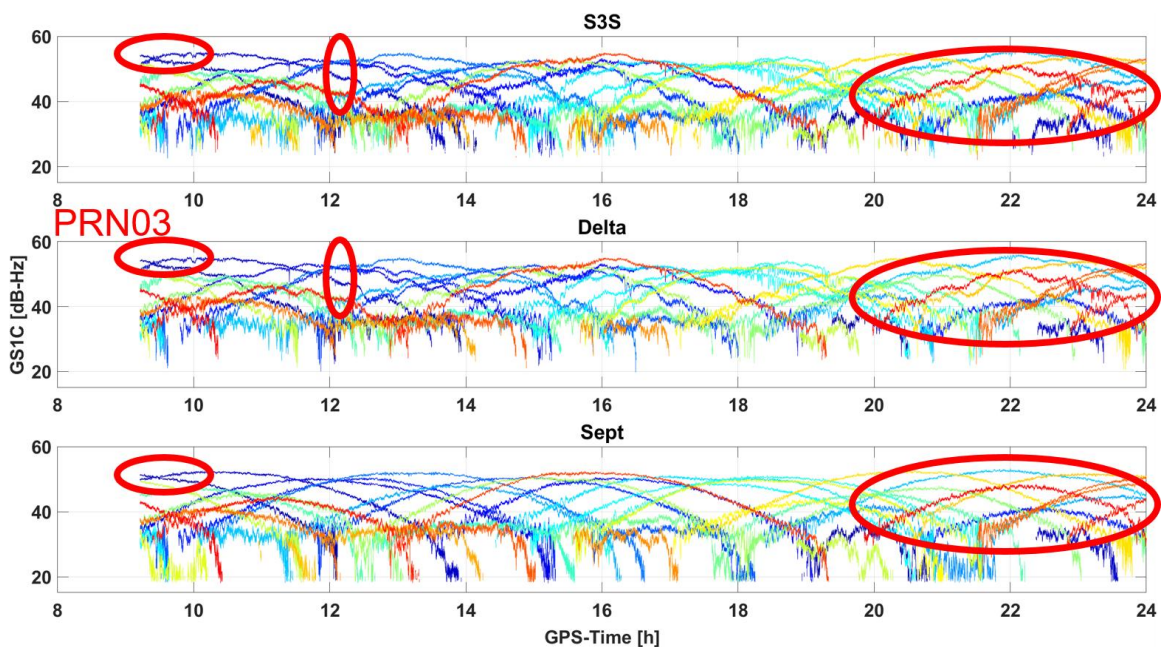


Abbildung 12: GPS L1 Signalstärke (GS1C) für alle drei Empfänger an der Referenzstation während der Kalibrierung 2024

Um diese Unterschiede deutlicher zu analysieren, stellt Abbildung 13 die GS1C Signalstärke für PRN03 sowie die Code-Minus-Carrier (CMC) Linearkombination zur Abschätzung des Mehrwegefehlers dar. Neben den bereits gewonnenen Erkenntnissen (weniger Signalstärkeeinbrüche beim Septentrio-Empfänger), ist ein starker Einbruch um kurz nach 13 Uhr GPS-Zeit ersichtlich. Dies ist auch in den CMC-Werten ersichtlich.

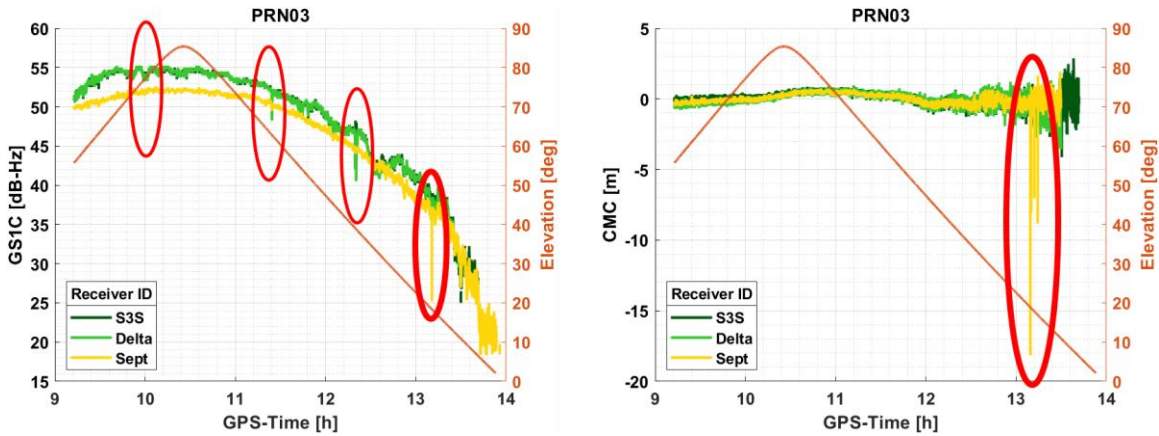


Abbildung 13: GS1C Signalstärke (links) und CMC-Linearkombination (rechts) für PRN03 an der Referenzstation während der Kalibrierung 2024

Wird nicht nur der entsprechende Elevationswinkel des Satelliten PRN03, sondern auch der Azimutwinkel betrachtet, wird ersichtlich, dass das Signal durch einen nahestehenden Baum beeinflusst wurde (siehe Abbildung 14). Da allerdings eine Signalstärkemaskerung für die Berechnung der GDV-Werte angebracht wird, ist mit einem geringen Einfluss auf das GDV-Pattern zu rechnen.

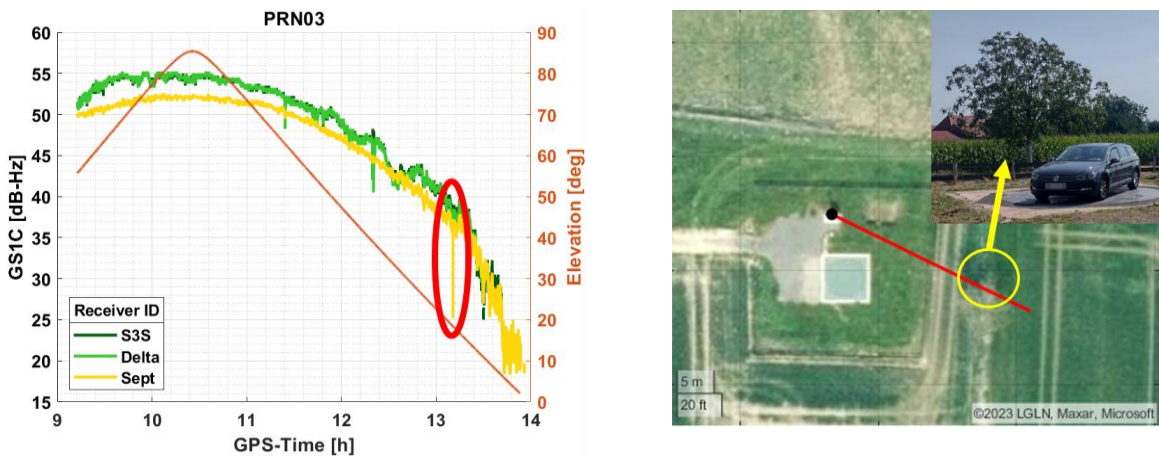


Abbildung 14: GS1C Detailanalyse für PRN03 (links) und der Baum als Ursache (rechts) für den Einbruch der Signalstärke um 13 Uhr GPS-Zeit

Diese Voruntersuchungen zeigen, dass die verwendeten Empfänger(einstellungen) bereits im statischen Fall einen Einfluss auf die GNSS-Signale haben.

Die GS1C Signalstärkekurven für die Fahrzeugantenne während der Kalibrierung sind in Abbildung 15 dargestellt. Hier ist direkt ersichtlich, dass teilweise hohe und wiederholbare Variationen auftreten. Allerdings gibt es auch Zeiträume, in denen sich ein ähnliches Bild wie für die Referenzstation ergibt. Da sich in diesen Phasen die Rotationsplattform nicht gedreht hat, sind die Variationen der Signalstärkekurven auf die Rotation während der Kalibrierung

zurückzuführen. So startete die Kalibrierung kurz nach 13 Uhr GPS-Zeit, hervorgehoben durch schwarze vertikale Linien in Abbildung 15. Ab diesem Zeitpunkt sind die Variationen durchgängig beobachtbar. Da die Analyse der GDV durch Geo++ ergab, dass eine erneute Kalibrierung durchzuführen ist (siehe Abschnitt 2.3), wurde dieses Muster in der Signalstärke detailliert mit den Daten der Kalibrierung aus dem Jahr 2025 durchgeführt.

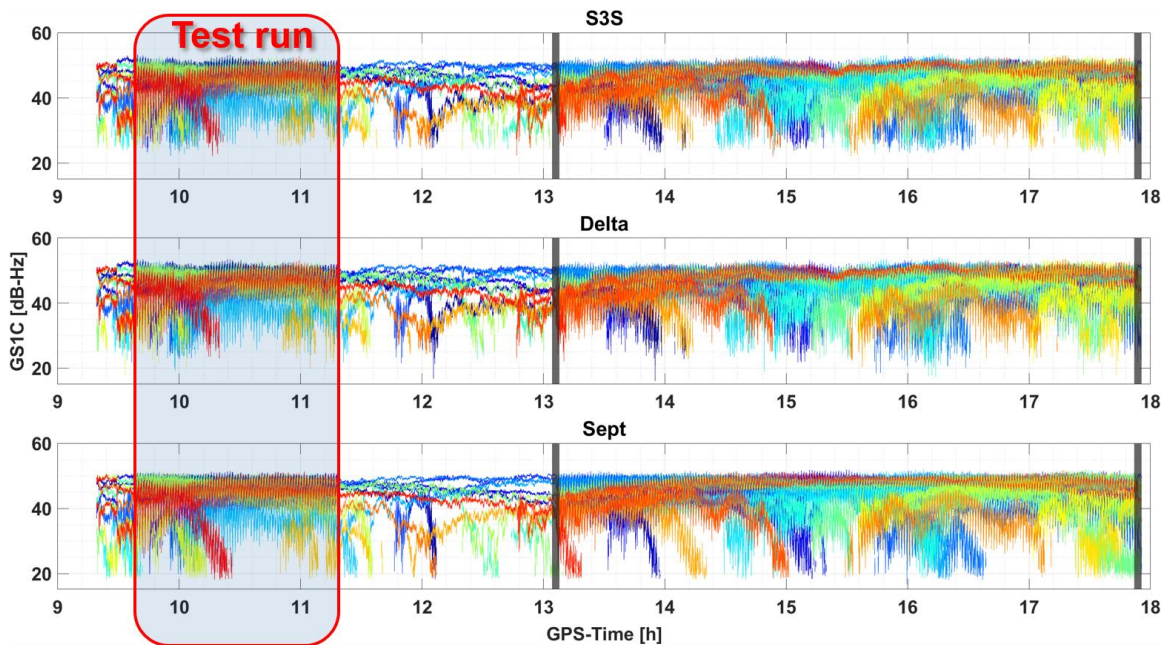


Abbildung 15: GS1C Signalstärke aller drei Empfänger für die Fahrzeugantenne während der Kalibrierung 2024

Tabelle 3 stellt die verwendeten Empfänger und deren Einstellungen für die Kalibrierungen aus dem Jahr 2025 zusammen. Für diese Kalibrierungen wurden zusätzlich die Daten eines weiteren Empfängers (Javad Omega) analysiert.

Shortcut	Receiver name	Vehicle		Reference station	
		SN	DLL BW [Hz]	SN	DLL BW [Hz]
S3S	Javad DeltaS-3S	4300	0.5	4301	0.5
Delta	Javad Delta TRE G3T	0081	3	0082	3
Sept	Septentrio PolaRx5TR	1372	0.25	1914	0.25
Omega	Javad Omega	0001	3	0002	3

Tabelle 3: Verwendete Empfänger und deren Einstellungen für die Kalibrierung der Fahrzeugantenne im Jahr 2025

Eine Übersicht über die GPS L1 Signalstärke (GS1C) gegenüber der Zeit während der Kalibrierung für alle vier verwendeten Empfänger, die an der Kfz-Antenne angeschlossen waren, ist in Abbildung 16 dargestellt. Auch hier können die wiederholbaren Signaturen in den Signalstärken erkannt werden.

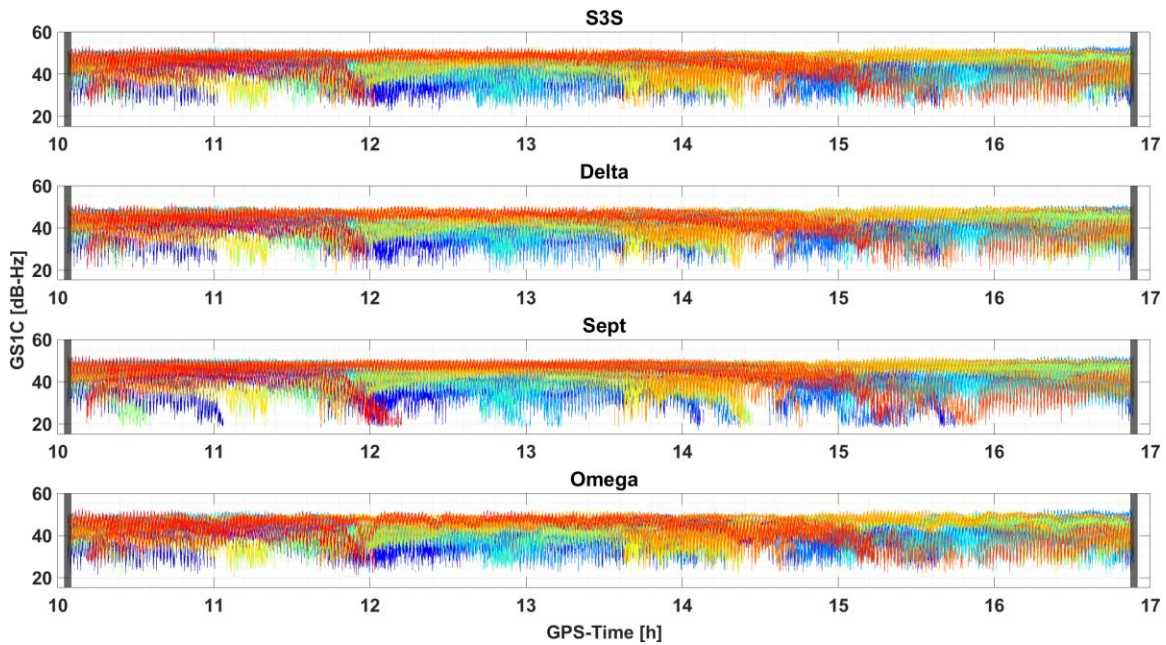


Abbildung 16: GPS L1 Signalstärke (GS1C) für alle vier Empfänger für die Fahrzeugantenne während der Kalibrierung 2025

Um auszuschließen, dass es zu Problemen beim Signaltracking kam, wurde zunächst die Kontinuität der Beobachtungen analysiert. Abbildung 17 stellt die Sichtbarkeit aller GPS-Satelliten für alle Empfänger gegenüber der Zeit dar. Insgesamt zeigt sich, dass alle Empfänger die Signale kontinuierlich, also ohne Signalunterbrechungen, tracken können. Lediglich an Anfängen und Enden der Satellitenbögen sind Unterbrechungen sichtbar. Dies liegt am geringeren Elevationswinkel der Satelliten, sodass die Signale beispielsweise durch Vegetation beeinträchtigt werden.

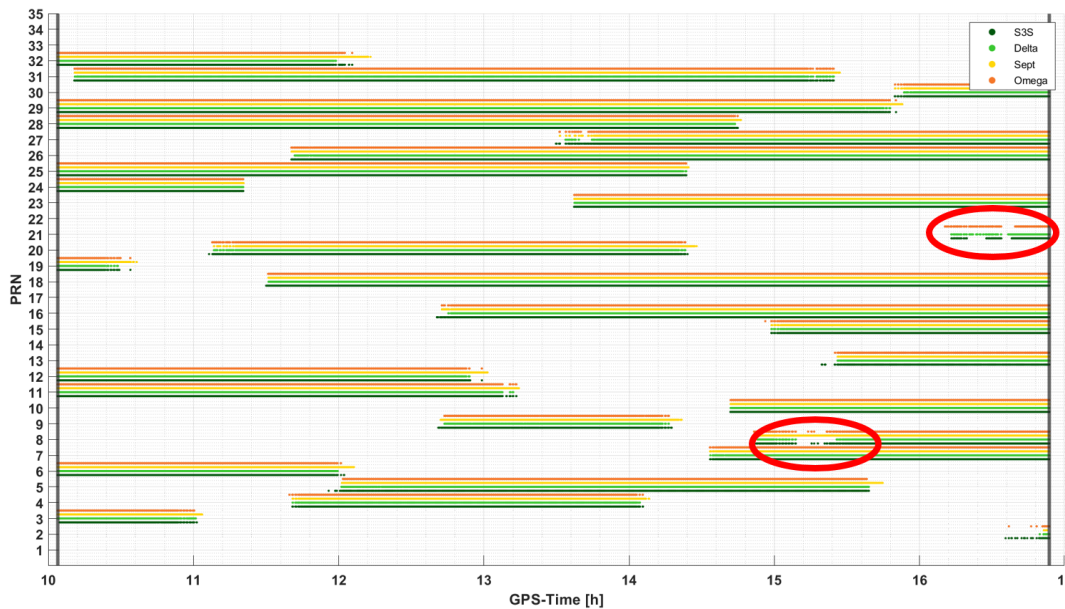


Abbildung 17: Kontinuität der GPS Codebeobachtungen für die Fahrzeugantenne während der Kalibrierung 2025

Bei Betrachtung der Abbildung 17 ist allerdings auch sichtbar, dass Unterschiede in der Kontinuität zwischen den Empfängern auftreten. Empfänger *Sept* trackt die Signale insgesamt kontinuierlicher (z.B. PRN08 oder PRN12), wenngleich es auch Satelliten(bögen) gibt (z.B. PRN21), bei dem das Signal von allen Empfängern außer dem *Sept* Empfänger empfangen werden kann.

Um die Mehrwegebelastung für die Fahrzeugantenne zu analysieren, wurde die CMC-Linear kombination berechnet. Das beispielhafte Ergebnis für PRN18 unter Verwendung der GPS L1 Code- und Phasenbeobachtungen ist gegenüber der Zeit für alle vier Empfänger samt Elevationswinkel in Abbildung 18 dargestellt. Es kann erkannt werden, dass die CMC-Werte bei niedrigen Elevationswinkeln eine Größenordnung von bis zu 17 m erreichen. Bei mittleren Elevationswinkeln ab 15° betragen die Werte  $\pm 2.5$  m. Aufgrund des Rauschens der Codebeobachtungen entsprechen die Größenordnungen den Erwartungen, und auch die Elevationsabhängigkeit ist erwartbar. Während gegen 11:30 GPS-Zeit größere Unterschiede zwischen den Empfängern ersichtlich sind, sind die Unterschiede im weiteren Kalibrierverlauf eher marginal.

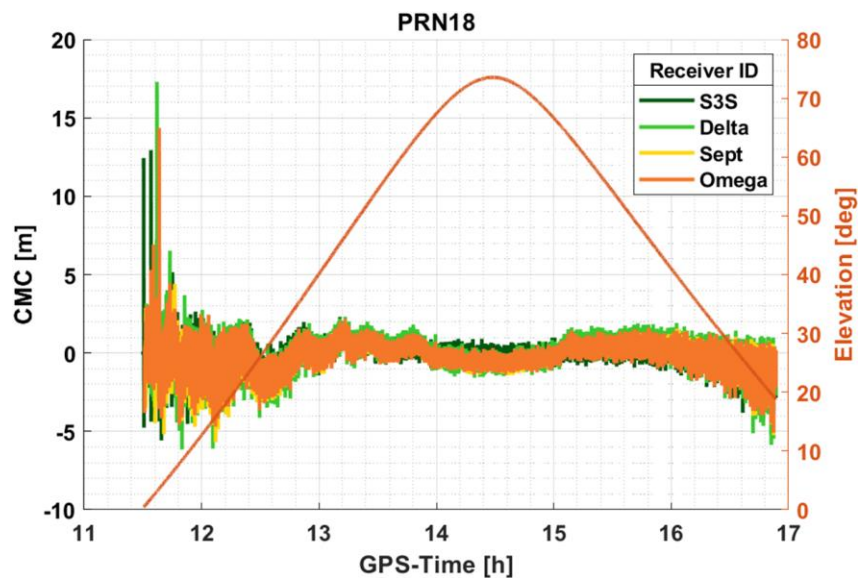


Abbildung 18: CMC-Linear kombination für die Fahrzeugantenne während der Kalibrierung 2025

Zur weiteren Analyse der Variationen der Signalstärkekurven, stellt Abbildung 19 einen Ausschnitt für die GS1C Signalstärke von PRN18 gegenüber der GPS-Zeit dar. Zusätzlich ist auf der rechten y-Achse der Elevationswinkel des Satelliten ersichtlich. Es zeigt sich deutlich, dass diese Variationen sehr gleichmäßig über die gesamte Kalibrierzeit bei allen Empfängern auftreten. Es ist allerdings ein Offset zwischen den Signalstärken der unterschiedlichen Empfängern ersichtlich. Dies ist erwartbar, da die Signalstärke empfängerintern berechnet wird und stets von der eingesetzten Antennen-Empfänger Kombination abhängt. Durch eine Zeitreihenanalyse konnte herausgefunden werden, dass die Wiederholfrequenz der Variationen

exakt der Rotationsdauer der Plattform entspricht. Daher liegt der Grund für diese Variationen an einer bestimmten relativen Satelliten-(Fahrzeug)-Antennen-Geometrie.

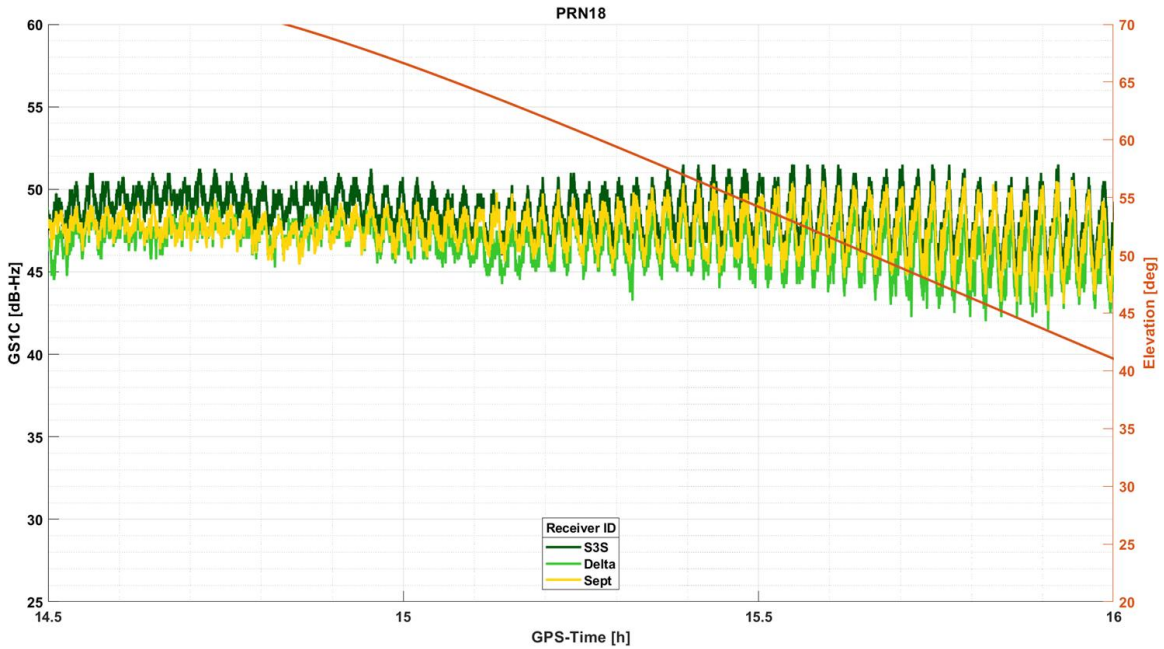


Abbildung 19: GS1C Signalstärke für PRN18 für die Fahrzeugantenne während der Kalibrierung 2025

Um dies weiter zu untersuchen, wurden die von Geo++ bereitgestellten Orientierungsdaten verwendet. Abbildung 20 zeigt eine Grafik für PRN18, in der die Orientierungswinkel gegenüber der GPS-Zeit während der Kalibrierung aufgetragen sind. Die Datenpunkte sind nach der Signalstärke eingefärbt. Zusätzlich kann im Skyplot die Signalstärke in Abhängigkeit der Azimut- und Elevationswinkel des Satelliten eingesehen werden.

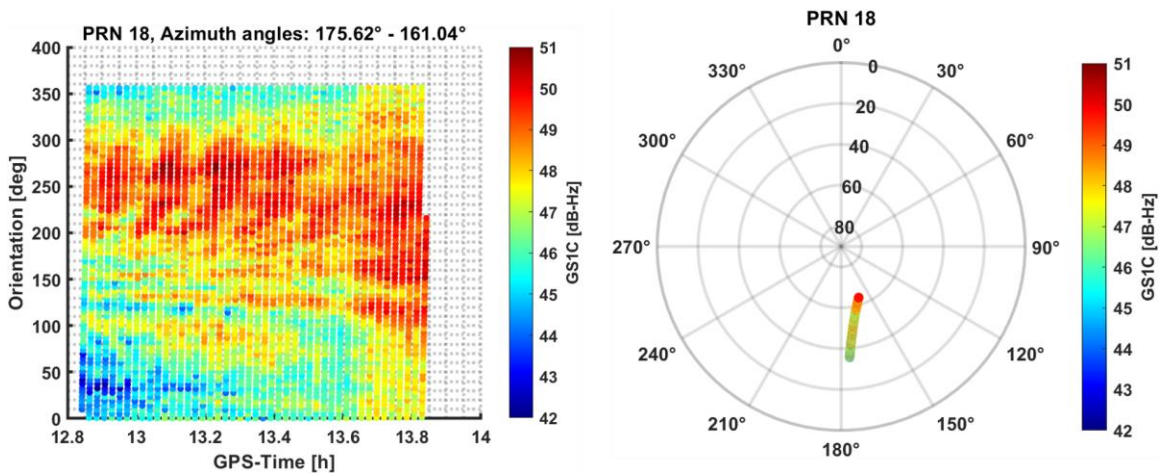


Abbildung 20: GS1C Signalstärke in Abhängigkeit der Orientierung der Fahrzeugantenne (links) und Skyplot (rechts) für PRN18 während der Kalibrierung 2025

Zunächst kann im Skyplot erkannt werden, dass die Signalstärke prinzipiell mit steigendem Elevationswinkel steigt. Dies ist auf das Antennengewinn zurückzuführen. Außerdem wird im linken Teil der Abbildung 21 ersichtlich, dass hohe Signalstärken bei Orientierungen zwischen etwa 100° und 300° auftreten. Wird der Azimutwinkel mit betrachtet, so trifft das Satellitensignal bei ungefähr 180° Azimutwinkel im Antennensystem auf die Antenne. Hat diese eine Orientierung von 0°, zeigt also Richtung Norden, so trifft das Signal auf einen Antennenbereich mit niedrigem Gain (siehe Abbildung 35), sodass die Signalstärke niedrig ist. Rotiert die Plattform weiter, so trifft das Signal dann auf einen Bereich der Antenne mit hohem Gain. Dies lässt sich entsprechend auch auf weitere PRN anwenden, siehe beispielsweise PRN25 in Abbildung 21.

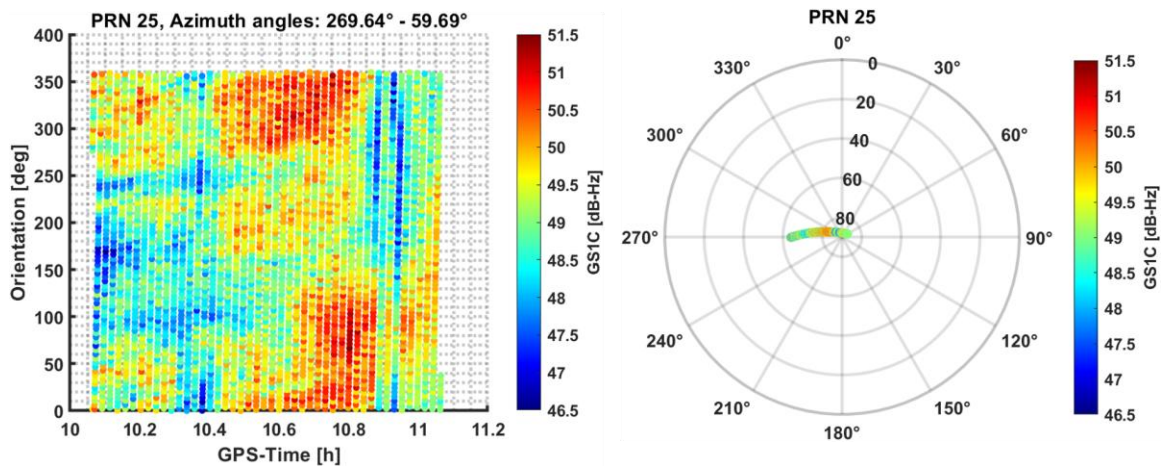


Abbildung 21: GS1C Signalstärke in Abhängigkeit der Orientierung der Fahrzeugantenne (links) und Skyplot (rechts) für PRN25 während der Kalibrierung 2025

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die beobachteten Variationen in den Signalstärkekurven nicht primär durch herausfordernde relative Satelliten-Fahrzeug-Antennen-Geometrien hervorgerufen werden, sondern überwiegend durch die reine Satelliten-Antennen-Geometrie. Dies bedeutet, dass das Antennengewinn der größte Einflussfaktor ist. Die Richtung, aus welcher das Satellitensignal über das Fahrzeug (z.B. Motorhaube) auf die Antenne trifft, ist zweitrangig.

Die detaillierte Signalanalyse zeigt, dass die GNSS-Signale durch variierende Empfänger(einstellungen) beeinflusst werden. Daher ist auch mit einem Einfluss auf die geschätzten GDV-Pattern zu rechnen. Abbildung 4 stellt die durch Geo++ geschätzten GDV Pattern für die GPS und Galileo L1-Frequenz dar. Insgesamt lässt sich feststellen, dass eine hohe Übereinstimmung einerseits zwischen den Pattern der unterschiedlichen Empfänger und andererseits zwischen GPS und Galileo GDV vorliegt. Zweitgenanntes entspricht der Theorie, da GDV frequenzabhängig sind und diese identisch für die GPS und Galileo L1-Frequenz ist. Werden die geschätzten Pattern zwischen den Empfängern näher betrachtet, so lässt sich feststellen, dass die GDV, die mit den vom Sept-Empfänger aufgezeichneten Daten geschätzt wurden, einen glatteren Verlauf aufweisen als die anderen beiden GDV-Pattern. Um die Differenzen besser zu sehen, werden die GDV Differenzen zu Javad Omega am DoY 052 in Abbildung 22 dargestellt.

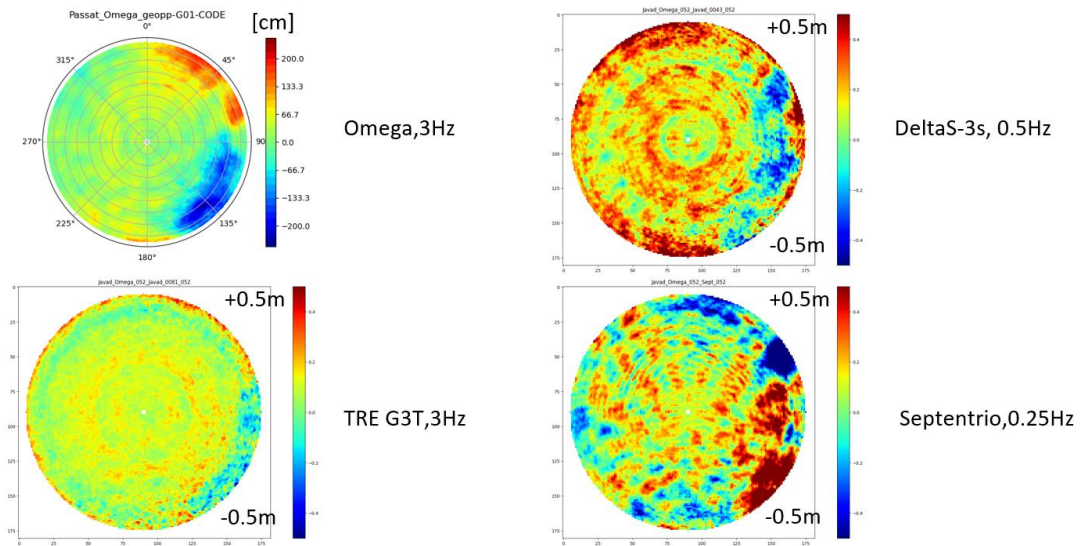


Abbildung 22: GDV-Differenz zu Javad Omega am DoY 052 (Omega ist die originale GDV)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die GNSS-Beobachtungen durch die verwendeten Empfänger und deren Einstellungen beeinflusst werden. Dies hat einen Einfluss im Dezimeterbereich auf die geschätzten GDV, wobei die größten Differenzen in niedrigen Elevationsbereichen aufzufinden sind.

### 2.2.3 AP3: Digitaler Zwilling der Fahrzeugkalibrierung

Die installierte Leistung einer GNSS-Antenne auf einem Auto wird dann auch mit einem hybriden Full-Wave-Simulationsansatz bestimmt, einer Methode, die in (Caizzone et al., 2022) für Flugzeuge schon beschrieben wurde. Die gesamte Simulationskette ist in Abbildung 23 dargestellt, wobei die Testumgebung beispielhaft als ein Dach oder ein Flugzeug dargestellt ist. Für ACCURAUTO ist die Testfahrzeugumgebung ein VW Passat B8 Variant 2014, wie er von Geo++ verwendet wird, ausgestattet mit einer eingebauten GPS-Dachantenne, die im L1-Band Signale empfangen kann. Der Prozess beginnt mit der Kalibrierung der Standalone-Antenne: das DLR verfügt über eine eigene semianechoische Kammer der Microwave Vision Group (MVG), in der die zu testende Antenne (AUT) auf einer kreisförmigen Metallplatte mit einem Durchmesser von 40 cm gemessen wird, wie in Abbildung 24 dargestellt.

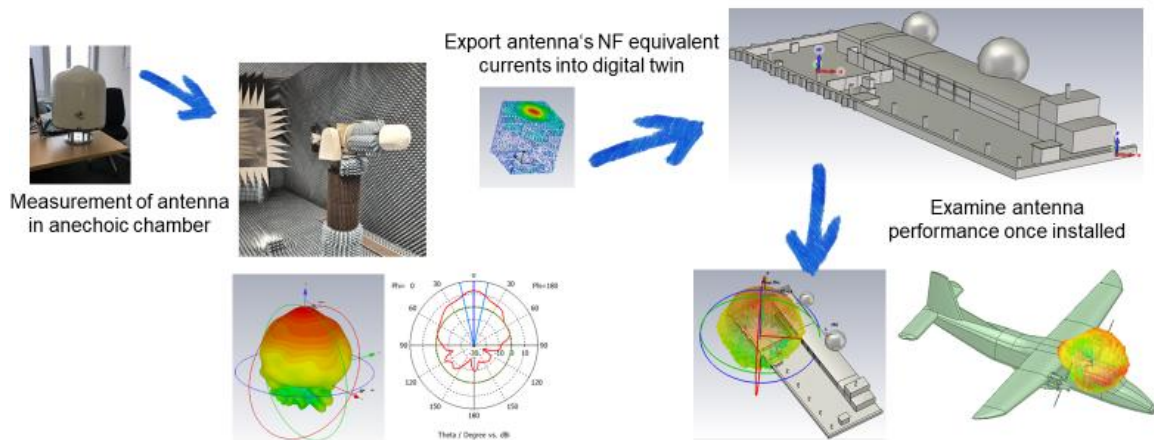


Abbildung 23: Hybrides Kalibrierungsschema

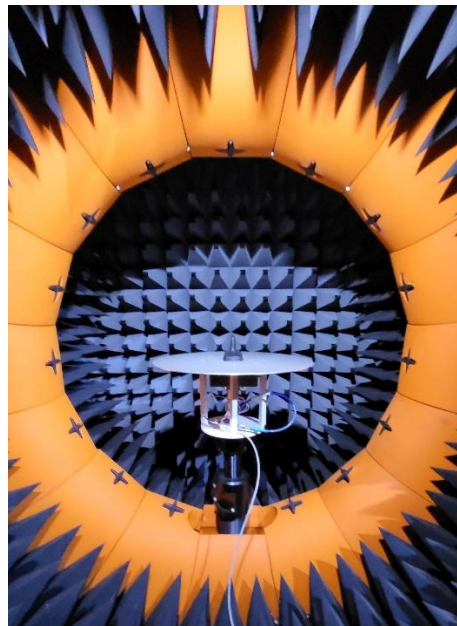


Abbildung 24: Antennenmessung im DLR-Antennenkammer

Dieser Ansatz beinhaltet die Extraktion einer Nahfeldquelle (NFS) der AUT, modelliert als Oberflächenströme auf einer Huygens-Box, die auf dem Auto positioniert ist, aus Messungen in einer schalltoten Kammer unter Verwendung des Äquivalenzprinzips (Futter, P. W. et al., 2018).

Die NFS wird dann mit Hilfe eines digitalen Zwillings des Installationsszenarios simuliert, und zwar mit einem EM-Ray-Tracing-Solver in SIMULIA CST Studio Suite®, einem 3D-EM-Feld- und Multiphysik-Modellierungs- und Simulationstool von Dassault Systemes (2024). Die Interaktion zwischen den Eigenschaften der eigenständigen Antenne und den Eigenschaften der gestreuten Mehrwegstrahlen führt zu Verzerrungen im effektiven Antennenstrahlungsdiagramm, die dann verarbeitet werden, um die installierten CPVs zu erhalten.

Bei einer Standalone-Antenne können die komplexen Phasendaten der Antenne (über Frequenz, Elevation und Azimut) direkt aus Messungen in einem schalltoten Raum extrahiert und dann für die Berechnung der Gruppenlaufzeit verwendet werden. Abbildung 25 zeigt die Strahlungseigenschaften der Antenne für 1575 MHz, gemessen auf einer Metallplatte. Die Daten werden in einem linken topozentrischen Koordinatensystem dargestellt, wobei  $\phi = 0^\circ$  die "Nord"-Richtung der Antenne angibt, d.h. die Richtung, die im installierten Fall zur Vorderseite des Autos zeigt.

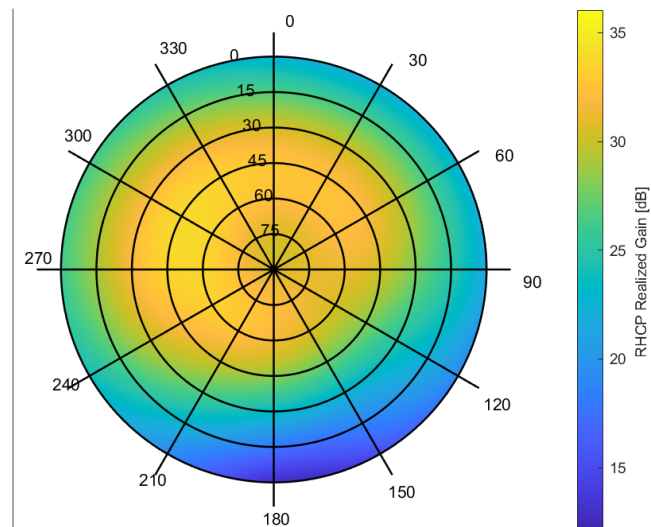


Abbildung 25: Strahlungsdigramm der Standalone-Antenne

Abbildung 26 zeigt die GDV entlang des Elevations- und Azimutwinkels für 1575 MHz (L1-Band). GDVs ergeben die Übertragungsfunktion der Antenne für das GNSS-Band als Funktion der Frequenz, des Elevations- und des Azimutwinkels und werden als Maß für die Zeitverzögerung der Signale in Nanosekunden angegeben. Bei der Untersuchung des Gewinn diagrams der Antenne fällt auf, dass in bestimmten Regionen der oberen Hemisphäre (z.B. in Richtung Süden (d.h. Azimut  $\sim 150^\circ$ - $180^\circ$ )) der Empfangsgewinn der Antenne gering ist, was bedeutet, dass die Satellitensignale in diesem Bereich sehr schwach empfangen werden. Das zeigt sich auch in den Messungen von  $C/N_0$ , die von IFE zuvor gezeigt wurden. Die GDV diagramme zeigen, dass die Gruppenlaufzeit genau in denselben Bereichen (um Azimut =  $150^\circ$ - $180^\circ$ ) einen hohen absoluten Wert hat. Obwohl auch für diese Gebiete Kalibrierungsdaten verfügbar sind, ist ihre Relevanz aufgrund der schlechten GNSS-Signalverfolgung (wegen der geringen Verstärkung) geringer.

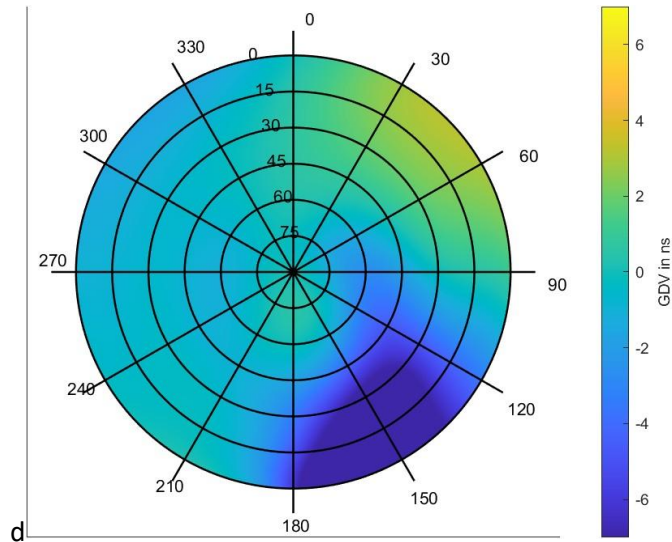


Abbildung 26: GDV einer Standalone-Antenne

Um die durch die Antenne verursachten Fehler über das GNSS-Frequenzband genau zu bewerten, muss die Antennenübertragungsfunktion angemessen mit dem GNSS-Signalspektrum gewichtet werden. Dies wurde erreicht, indem die Antennenübertragungsfunktion durch ein ideales Empfänger-Tracking-Fehlermodell verarbeitet wurde, das der von (Vergara et al., 2016) beschriebenen Methodik folgt. Die erhaltenen Fehler (jetzt in Form von CPVs) sind in Abbildung 27 dargestellt.

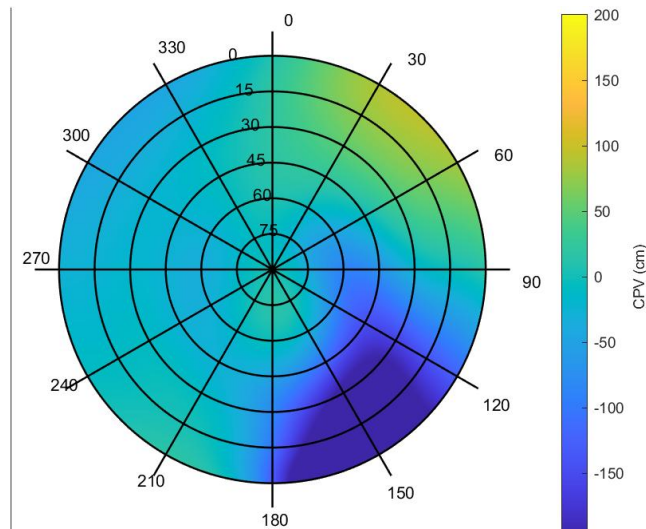


Abbildung 27: CPV einer Standalone-Antenne

Nach der anfänglichen Kalibrierung der Standalone-Antenne wird ein vereinfachter digitaler Zwilling erstellt, indem die elektromagnetischen Messungen der Antenne mit einem CAD-Modell des Testfahrzeugs (Abbildung 28) kombiniert werden, das aus einer öffentlich zugänglichen Datenbank (Volkswagen Passat (B8)) stammt. Im CAD-Modell des Fahrzeugs wird die Karosserie

des Fahrzeugs als perfekter elektrischer Leiter (PEC) dargestellt (grün), während die Seiten-, Front- und Heckscheiben als Glas dargestellt werden (hellblau).

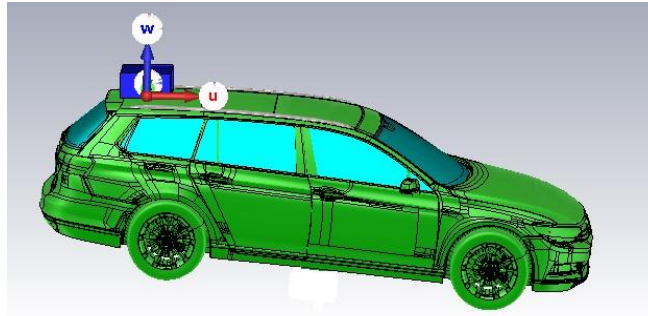


Abbildung 28: Simuliertes Auto CAD mit Antenne als Quelle

Bei der Bewertung der installierten Leistung der Antenne mit dem zuvor erläuterten hybriden Ansatz berücksichtigen die extrahierten Gewinn- und Phasendaten nun auch die Auswirkungen der am Fahrzeug montierten Antenne. Das sich daraus ergebende Strahlungsdiagramm, das den realisierten Gewinn des rechtsdrehend polarisierten Signals (RHCP) bei Vorhandensein von Reflexionen an der Fahrzeugkarosserie veranschaulicht, ist in Abbildung 29 abgebildet. Abbildung 30 zeigt die entsprechenden GDV und CPV, die aus dem vereinfachten digitalen Zwilling gewonnen wurden. Der erzielte Gewinn ist im Bereich von  $180^\circ$  Azimut gering und sogar noch geringer als bei der Standalone-Antenne. Im Bereich der niedrigen Gewinne sind zudem starke CPVs zu sehen. Die Ergebnisse zeigen, wie die Leistung der Antenne, sobald sie am Auto installiert ist, aufgrund der Reflexionen von nahegelegenen Objekten Oszillationen und Welligkeiten aufweist.

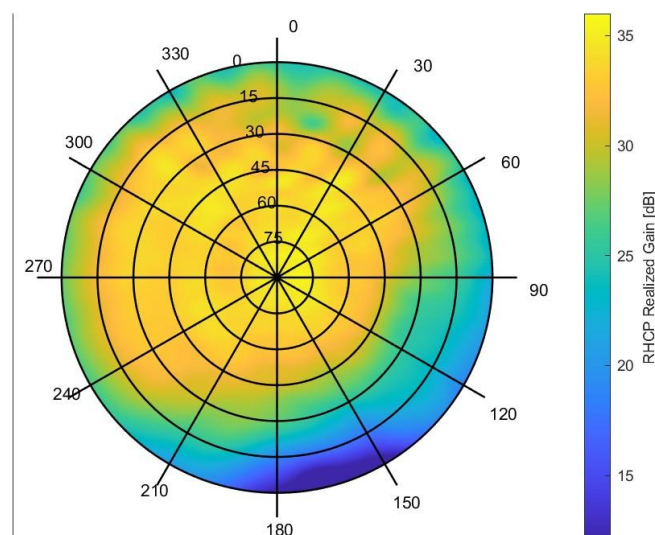


Abbildung 29: Abstrahlungsmuster der installierten Leistung eines vereinfachten digitalen Zwillings

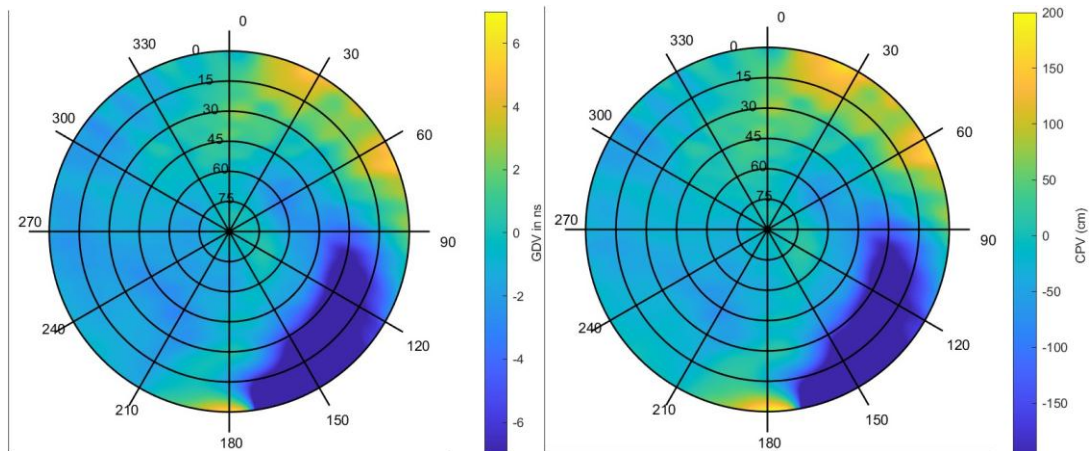


Abbildung 30: GDV und CPV aus dem vereinfachten digitalen Zwilling

Für die Erstellung des digitalen Zwillings wurde unter der Federführung des IfE zunächst in Abstimmung mit den Projektpartnern das zu modellierende Gebiet und die Auflösung festgelegt. Hierbei wurden auch die aufzunehmenden Objekte festgelegt. Darauf aufbauend wurden zwei Messstandpunkte ausgewählt, um alle Objekte durch terrestrische geodätische Messungen aufnehmen zu können. Als Instrument wurde ein Tachymeter (TS50 von Leica) verwendet, das Richtungen und Strecken mit einer Genauigkeit von  $0.5''$  bzw.  $0.6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$  messen kann. Die Koordinaten der Instrumentenstandpunkte sowie zwei weitere Koordinaten zur Festlegung der Orientierung des Instruments wurden mittels GNSS RTK Messungen bestimmt.

Abbildung 31 zeigt das eingesetzte Tachymeter auf einem der beiden Instrumentenstandpunkte. Im Hintergrund ist das Testauto mit montierter Kfz-Antenne auf der Kalibrierplattform von Geo++ ersichtlich.



Abbildung 31: Eingesetztes Tachymeter zur Erzeugung eines digitalen Zwillings der Geo++ Kalibrierplattform

Obwohl das Hauptinteresse in diesem Projekt auf den relativen Abständen zwischen den Objektkoordinaten (unter Verwendung eines lokalen Koordinatensystems) liegt, wurden die Koordinaten zunächst im Earth-centered, Earth-Fixed (ECEF) System bestimmt, um in Zukunft potenzielle Raytracing-Aufgaben unter Berücksichtigung der Positionen der GNSS-Satelliten im gleichen Koordinatenrahmen ermöglichen zu können.

Anschließend erfolgt die Objekterfassung über terrestrische, tachymetrische Zwei-Lagen-Messungen auf Reflektoren, sofern möglich, und alternativ reflektorlos. Zusätzliche Metadaten wie Temperatur, Luftdruck und Oberflächenmaterialien wurden ebenfalls erfasst, da diese für die elektromagnetischen Simulationen vom DLR-KN von entscheidender Bedeutung sind. Die Erfassung der physikalischen Größen diene hingegen zur Korrektur der Tachymeter-Messungen.

Insgesamt wurden die Polarkoordinaten von 139 Punkten gemessen und anschließend in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert. Die Umgebungsgeometrie wurde mit geometrischen Primitiven modelliert, und teilweise wurden zusätzliche Punkte auf 3D-Körpern berechnet, um Volumenkörper bereitstellen zu können. Da ein 3D-Modell des identischen Fahrzeugmodells in einer öffentlich zugänglichen Datenbank verfügbar ist, wurden lediglich markante Punkte auf dem Fahrzeug gemessen. Mithilfe dieser wurde anschließend das präzise CAD-Modell des Autos in den digitalen Zwilling integriert.

Abbildung 32 zeigt einen Ausschnitt aus der Software „Leica Infinity“, mit der die tachymetrischen Messungen initial ausgewertet wurden. Deutlich erkennbar sind beispielsweise der Zaun (Punktnummern im 5000er Bereich), der den Kalibrierstand umgibt, sowie einzelne markante Punkte außerhalb dieses Bereiches, die Bäume bzw. Vegetationsgrenzen (mit Punktnummern im 6000er Bereich) markieren.



Abbildung 32: Mittels Leica Infinity ausgewertete Messungsbildung

Abschließend wurde der detaillierte digitale Zwilling, einschließlich des Fahrzeugs, im Standard for the Exchange of Product Data (STEP)-Format bereitgestellt. Dazu wurden mittels „AutoCAD“ die Volumenkörper der aufgenommenen Objekte erstellt. Abbildung 33 zeigt einen Ausschnitt des digitalen Zwillings, in dem für den Austausch mit dem DLR-KN zusätzliche Informationen enthalten sind.

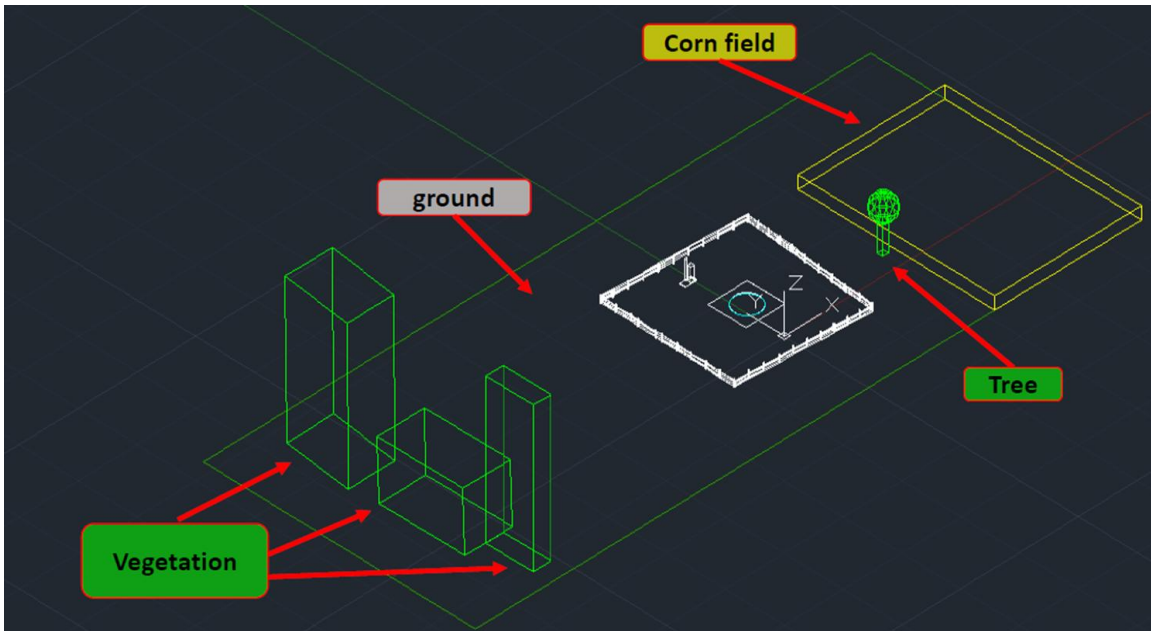
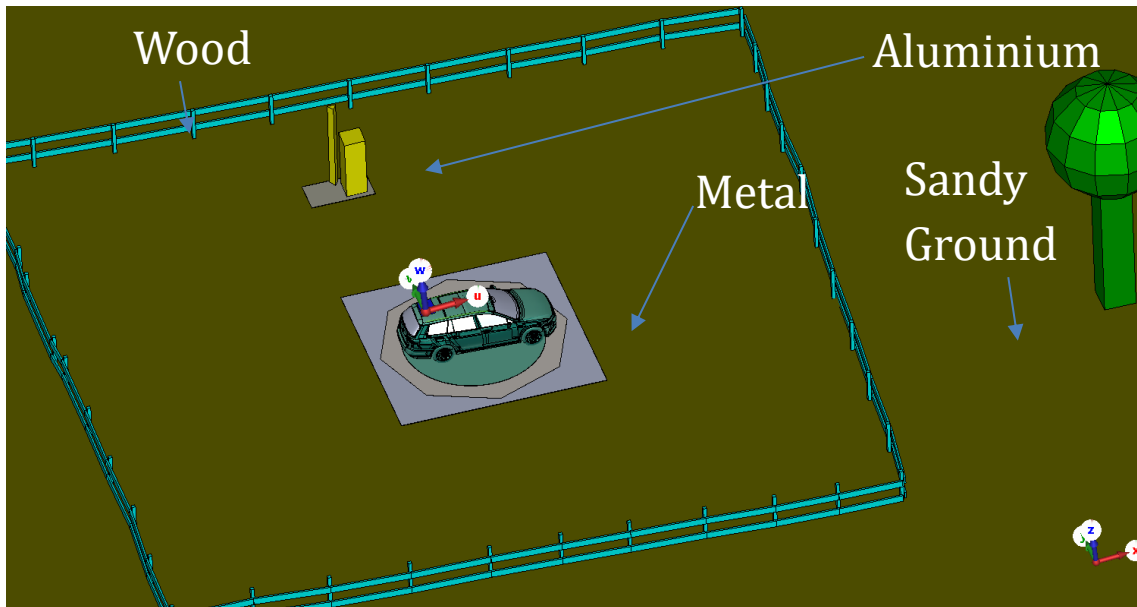


Abbildung 33: Ausschnitt des digitalen Zwillings mit zusätzlichen Informationen für den Austausch mit DLR-KN

Das umfassende CAD-Modell, das an der Kalibrierungsstation erstellt wurde, wurde dann in den digitalen Zwilling importiert und mit dem CAD-Modell des Autos integriert, um eine genauere Darstellung des tatsächlichen Szenarios zu erhalten. Neben den Objektgeometrien wurden auch Informationen zu den Objektmaterialien hinzugefügt: So wurde die Messplattform des Autos als Metall modelliert, der Zaun an der Grenze des Grundstücks als Holz und der Turm für die Referenzantenne als Aluminium. Die Bodenoberfläche wurde als feuchter Sandboden modelliert (mit  $\epsilon_r = 13$ ,  $\mu_r = 1$  und elektrischem Verlusttangens = 0,29). Diese detaillierte Zuordnung der Materialien ist in Abbildung 34 dargestellt.



**Abbildung 34: Detaillierter digitaler Zwilling mit den Strukturen in der Umgebung des Fahrzeugs, jeweils mit entsprechendem Material berücksichtigt**

Abbildung 35 zeigt nun das vorhergesagte Strahlungsdiagramm der am Auto installierten Antenne unter Berücksichtigung des spezifischen Szenarios des detaillierten digitalen Zwillings. Das Pattern stellt die Strahlungseigenschaften der Antenne dar, wenn das Auto steht und in die x-Richtung zeigt. Abbildung 36 zeigt das entsprechende GDV und CPV des detaillierten digitalen Zwillings.

Jetzt weisen die Pattern noch mehr Oszillationen über der oberen Hemisphäre auf und es treten einige für das Szenario typische Phänomene auf (z.B. die Abschattung bei niedrigen Höhen für Azimut  $\sim 10^\circ$  oder  $160^\circ$ , mit entsprechend niedrigen Gewinnwerten und hohen GDV-Oszillationen).

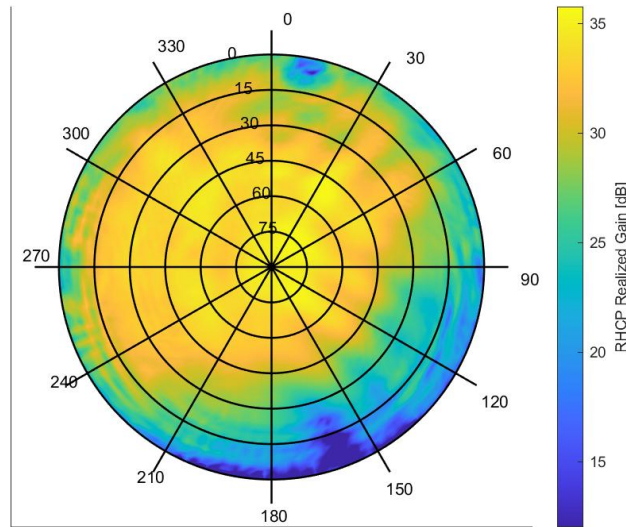


Abbildung 35: Ausstrahlungsmuster der installierten Leistung auf dem detaillierten digitalen Zwilling

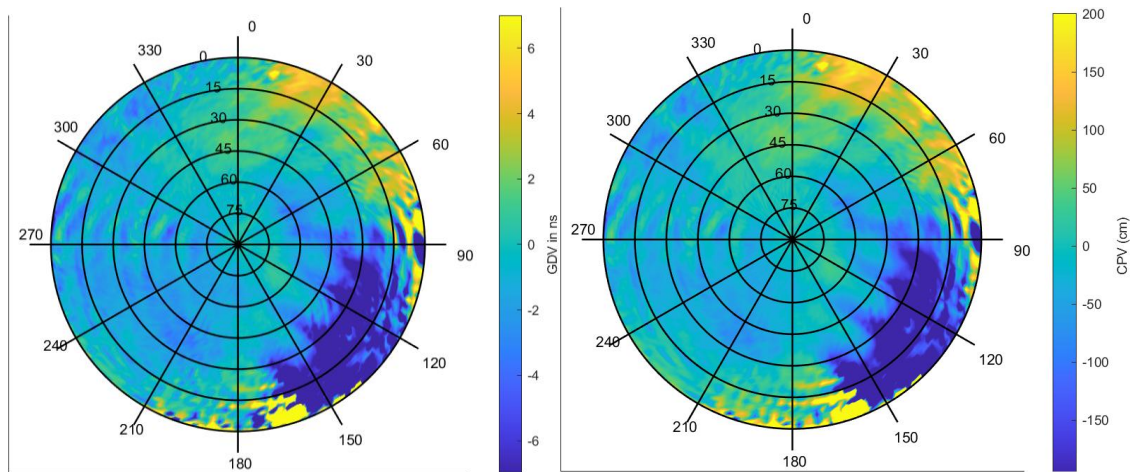
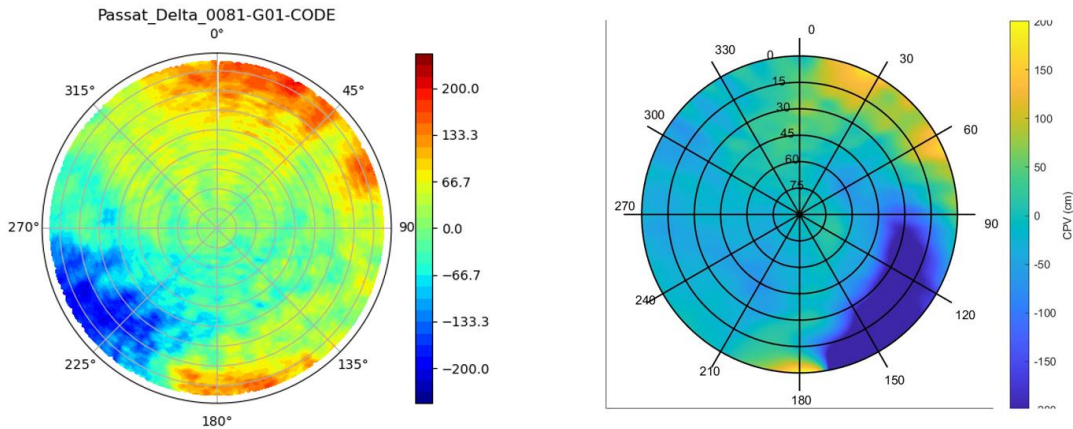


Abbildung 36: GDV und CPV aus dem detaillierten digitalen Zwilling

### 2.3 Abweichungen vom ursprünglichen Plan

Die Freifeldkalibrierung dauerte einen Monat länger als ursprünglich geplant. Während der ersten Kalibrierung stellten wir fest, dass externe Störquellen wie GSM-Signale einen erheblichen Einfluss auf das GDV-Muster haben (siehe Abbildung 37). In der zweiten Kalibrierung zeigte sich, dass das Fahrzeugdach nach Abschluss der Messungen vereist war, was die Mehrwegeeffekte potenziell verfälschen kann. Um derartige Störeinflüsse auszuschließen und zuverlässige Ergebnisse zu gewährleisten, war eine dritte Kalibrierung erforderlich.



**Abbildung 37: Kalibrierte GDV mit Radioquelle und simulierte GDV**

Da durch Geo++ eine dritte Kalibrierung durchgeführt wurde, wurden auch während dieser Kalibrierung die GNSS-Rohdaten mit mehreren Empfängern vom IfE aufgezeichnet und ausgewertet. Daher wurden für AP2 auch Analysen bis in den letzten Projektmonat hinein durchgeführt.

Wegen der verzögerten dritten Kalibrierung bei Geo++, wurden die Analysen für WP3 mit dem Vergleich zu AP1 auch bis zum letzten Monat des Projekts durchgeführt.

### 3. Projektergebnisse

#### 3.1 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen und anderer wesentlicher Ergebnisse

- Die kalibrierten GDV- und PCV-Werte zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den vom DLR simulierten GDV-Daten.
- Sowohl GDV als auch PCV erwiesen sich als reproduzierbar unter vergleichbaren Messbedingungen.
- Die GDV verursachen Positionsabweichungen von bis zu ca. 50 cm in der Positionsdomäne und sind daher für präzise GNSS-Anwendungen von erheblicher Relevanz.
- Untersuchungen zu Empfängern/Trackingeinstellungen (DLL 0.25–3 Hz) zeigen systematische, kleine Unterschiede in Signalstärke (GS1C) und CMC-Linear kombinationen; das unterschiedliche GNSS-Beobachtungsmaterial beeinflusst die geschätzten GDV im Dezimeterbereich, insbesondere bei niedrigen Elevationen.

- Rotationssynchrone Signalstärkevariationen wurden während der Kalibrierung detektiert; sie werden primär durch das Antennengewinn der installierten Fahrzeugantenne verursacht.
- Der digitale Zwilling der Geo++-Kalibriereinrichtung bildet die Umgebung adäquat ab und ermöglicht die zuverlässige Vorhersage der richtungsabhängigen GDV-/PCV-Pattern im installierten Fall; die simulierten Pattern stimmen gut mit den Geo++-Messungen überein.
- Die kalibrierten GDV- und PCV-Werte zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den vom GEO++ insitu GDV-Daten.
- Der vorgeschlagene hybride Ansatz wurde erfolgreich mittels Vergleich mit Feldtests validiert und hat sich als ein wertvolles Werkzeug bewiesen, das potenziell eine effiziente, skalierbare Kalibrierung verschiedene Fahrzeug-/Antennenkombinationen ermöglicht und den Weg für die Nutzung offener Korrekturdatendienste im Mobilitätssektor ebnet.

### 3.2 Bereitstellung der Daten für Dritte (Interessenten und Nutzer)

- Die kalibrierten GDV- und PCV-Daten wurden im standardisierten ATX-Format gespeichert und können interessierten Dritten (z. B. Forschungseinrichtungen, Industriepartnern oder Behörden) auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.
- Die GNSS-Rohdaten aller verwendeten Empfänger wurden in standardisierten RINEX Beobachtungsdateien gespeichert und können interessierten Dritten (z. B. Forschungseinrichtungen, Industriepartnern oder Behörden) auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

### 3.3 Wissenschaftlich-technische Innovationen und Beiträge

Im Rahmen des ACCURAUTO-Projektes konnten wesentliche wissenschaftlich-technische Innovationen erzielt werden, die den Stand der Technik in der GNSS-basierten Fahrzeuglokalisierung signifikant voranbringen. Durch die Kombination von Freifeldkalibrierungen, der detaillierten Charakterisierung verschiedener Empfängertypen und der Entwicklung eines digitalen Zwillings wurde ein hybrider Ansatz etabliert, der erstmals eine verlässliche Vorhersage von Gruppenlaufzeit- und Phasenzentrumsvariationen in automobilen Szenarien ermöglicht. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Variationen reproduzierbar sind und Abweichungen im Dezimeterbereich hervorrufen können, die für präzise Positionierungsanwendungen von erheblicher Relevanz sind.

Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass die Wahl der Empfängerhardware und deren Einstellungen einen spürbaren Einfluss auf die Auswertung hat. Dies liefert wertvolle Erkenntnisse für die Weiterentwicklung von GNSS-Empfängern im automobilen Umfeld. Mit dem digitalen Zwilling wurde zudem ein Simulationswerkzeug geschaffen, das realistische Karosserie- und Umgebungsmodelle integriert und dadurch eine übertragbare Methodik für unterschiedliche Fahrzeug- und Antennenkonfigurationen bereitstellt. Damit schließt ACCURAUTO die Lücke zwischen geodätisch etablierten Verfahren und den Anforderungen

kostengünstiger Fahrzeugantennen und ebnet den Weg für eine verbesserte Nutzung offener Korrekturdienste in Mobilitätsanwendungen.

### 3.4 Beiträge zu förderpolitischen Zielen

Das Projekt ACCURAUTO leistet einen unmittelbaren Beitrag zur Erreichung der förderpolitischen Ziele des mFUND-Programms. Mit den entwickelten Verfahren wird die Grundlage geschaffen, GNSS-Daten in Verbindung mit offenen Korrekturdiensten wie SAPOS präziser und robuster in Fahrzeuganwendungen einzusetzen. Damit wird die datenbasierte Mobilität gestärkt und die Voraussetzung für innovative Dienste im Bereich der vernetzten und automatisierten Mobilität geschaffen.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Aufbereitung und Bereitstellung der Projektergebnisse in standardisierten Formaten gelegt. Die Kalibrierdaten und Rohmessungen stehen interessierten Dritten zur Verfügung und tragen so zur Transparenz, Nachnutzbarkeit und Interoperabilität bei. Gleichzeitig eröffnen die im Projekt erzielten Verbesserungen der Positionierungsgenauigkeit neue Möglichkeiten für sicherheitsrelevante Anwendungen im Bereich automatisierter Fahrfunktionen.

Durch die enge Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft konnten Forschungsergebnisse unmittelbar in praxisnahe Szenarien übertragen werden. Dies stärkt den Technologietransfer und fördert die Innovationsfähigkeit im Mobilitätssektor. Insgesamt unterstützt ACCURAUTO damit in zentraler Weise die Digitalisierungsstrategie im Verkehrsbereich und verdeutlicht, wie durch datenbasierte Forschung nachhaltige Impulse für die Mobilität von morgen entstehen können.

### 3.5 Veröffentlichung der Ergebnisse und Einbindung des wissenschaftlichen Nachwuchses

- Vorstellung des Projekts und erster Ergebnisse im Rahmen einer Präsentation auf der NAVITEC 2024:  
  
Kröger, J., Ren, L., Wübbena, J., Tripathi, V., Caizzone, S., and Schön, S. (2024) Impact of GNSS receivers on GNSS antenna performance prediction for automotive scenarios  
In: 11th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Noordwijk, The Netherlands. Presentation
- Das Projekt wird bei der “Nacht, die Wissen schafft”, die am 8. November 2025 an der Leibniz Universität Hannover stattfindet, der Allgemeinheit vorgestellt
- Eine studentische Hilfskraft wurde aktiv in das Projekt eingebunden. Sie unterstützte die praktischen Messungen vor Ort und half bei der Analyse der GNSS-Beobachtungsdaten

- Erste Ergebnisse wurden im Rahmen eines Papiers/Präsentation auf der EuCAP 2025 vorgestellt:

Tripathi, Veenu und Caizzone, Stefano (2025) *Hybrid GNSS Antenna Characterization for Automotive Scenarios*. European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2025, 2025-03-30 - 2025-04-04, Stockholm, Sweden.

- Ein ausführlicher Artikel mit Beteiligung aller Projektpartner und Federführung von DLR, ist für das Navigation Journal eingereicht:

Tripathi, Veenu, Ren, Le, Kröger, Johannes, Wübbena, Jannes, Schön, Steffen and Caizzone, Stefano (2025) *Hybrid GNSS Antenna Characterization for Improved Vehicle Localization*.

#### 4. Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die kalibrierten GDV- und PCV-Korrekturen können für hochpräzise GNSS-basierte Fahrzeugnavigation eingesetzt werden.

Durch die präzise Kalibrierung lassen sich Mehrwegeeffekte, die durch das Fahrzeug selbst verursacht werden, von jenen aus der Umgebung trennen. Dies ermöglicht eine gezieltere Analyse und Modellierung der umgebungsbedingten Mehrwegeeffekte – ein wichtiger Schritt zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit in Echtzeit-Navigationssystemen.

Die Projektergebnisse sind somit sowohl für die Forschung als auch für industrielle Anwendungen, etwa im Bereich automatisiertes Fahren oder GNSS-Empfängerentwicklung, von großem Nutzen.

Der digitale Zwilling des Kalibrierstandes und der Umgebung bildet die Szene adäquat ab und dient als ausgezeichnete Grundlage für weiterführende Analysen: sowohl für GNSS-Auswertungen als auch für elektromagnetische Detailanalysen/Raytracing. Da die 3D-Volumenkörper in einem standardisierten Format vorliegen, können die Daten effizient weiterverarbeitet und ausgetauscht werden. Die mit unterschiedlichen Empfängern und Trackingeinstellungen erhobenen GNSS-Rohdaten im RINEX-Standardformat können von Forschungseinrichtungen und Industriepartnern genutzt werden, um den Einfluss der Trackingeinstellungen in statischen und kinematischen Anwendungen (mit geringer Dynamik) systematisch zu untersuchen.

Die Ergebnisse des Projekts haben den vorgeschlagenen Ansatz des digitalen Zwillings erfolgreich validiert und damit die Grundlage für eine weitere Nutzung im Automobilsektor geschaffen.

Insbesondere wurde gezeigt, dass die entwickelte Technik mit realen Messdaten vergleichbar ist und somit sogar zum schnellen Testen von Szenarien/Fahrzeugkonfigurationen/Setups

vollständig im digitalen Zwilling verwendet werden kann. Die Ergebnisse können sowohl aus wissenschaftlicher Sicht genutzt werden, um die DigitalTwin Verfahren RF-mäßig weiter zu entwickeln und besser zu verstehen, was genau modelliert werden muss, um gute Ergebnisse zu erzielen, als auch aus kommerzieller Sicht, da diese Technik auch auf kommerzieller Ebene eingesetzt werden kann, um die Kalibrierung mehrerer Antenneninstallationen an Fahrzeugen zu beschleunigen und zu ermöglichen.

Darüber hinaus fließen die Ergebnisse aller Projektpartner als Beispiele in die Unterrichtsmaterialien zu Lehrveranstaltung Vertiefung GNSS im Master Geodäsie und Geoinformatik an der Leibniz Universität ein.

## 5. Offene Fragen und Ausblick

### 5.1 Offene technische, wissenschaftliche oder praktische Fragestellungen

- Es ist noch ungeklärt, ob Fahrzeuge desselben Modells identische GDV- und PCV-Muster aufweisen oder ob individuelle Unterschiede berücksichtigt werden müssen.
- Wie sich durch die Einbeziehung kalibrierter GDV- und PCV-Werte die Ambiguitäts-Fixierung (Mehrdeutigkeitslösung) bei GNSS-Messungen verbessern lässt, ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.
- Haben GDV-/PCV-Pattern, die mit unterschiedlichen Empfängern geschätzt wurden, einen signifikanten Einfluss auf die Positionslösung?
- Inwiefern ist der Einsatz eines GNSS-Softwareempfängers während der Kalibrierung hilfreich, um den Einfluss unterschiedlicher Empfänger(einstellungen), die in verschiedenen Fahrzeugen verbaut/verwendet werden, auf die Kalibrierergebnisse zu bewerten?
- Ist eine Fahrzeug-Antennen-Empfänger-Kalibrierung notwendig, damit GDV-/PCV-Pattern das in-situ-Verhalten widerspiegeln?
- Die Auswirkungen von Umgebungsbedingungen (Eis, Regen) auf die Antennenkalibrierung wurden noch nicht analysiert.
- Die Auswirkungen verschiedener Fahrzeugkonfigurationen (Glasdach, Kombi-Version, Vorhandensein einer Dachbox usw.) auf die Antennenkalibrierung wurden noch nicht analysiert.
- Es muss untersucht werden, wie digitale Zwillingstechniken nahtlos in die GNSS-basierten Kalibrierungstechniken integriert werden können, um einen technischen Vorsprung zu erzielen, der sich in einem attraktiven kommerziellen Angebot für Kunden niederschlagen kann.

## 5.2 Empfehlungen für Folgeforschung oder Implementierung

- Durchführung systematischer Kalibrierungen an mehreren Fahrzeugen desselben Typs, um Modellkonstanz oder fahrzeugspezifische Abweichungen der GDV/PCV zu identifizieren.
- Weiterentwicklung und Integration verbesserter Algorithmen zur Ambiguitätsauflösung, unter gezielter Nutzung der kalibrierten GDV- und PCV-Daten.
- Systematische Vergleichsstudien zu mit unterschiedlichen Empfängern geschätzten GDV-/PCV-Pattern und deren Einfluss auf die Positionslösung; daraus Einsatzkriterien für empfängerbezogene Pattern ableiten.
- Integration eines GNSS-Softwareempfängers in den Kalibrierprozess zur isolierten Bewertung von Empfänger- und Einstellungseinflüssen in verschiedenen Fahrzeugkonfigurationen; Ergebnisse gegenüber hardwarebasierten Kalibrierungen validieren.
- In-situ-Pilotstudien zur Notwendigkeit einer fahrzeugspezifischen Antennen-Empfänger-Systemkalibrierung, damit GDV-/PCV-Pattern das reale Verhalten widerspiegeln; bei nachgewiesenem Nutzen schrittweise als Standardprozess implementieren.
- Durchführung von Kalibrierungen mit verschiedenem Fahrzeug/Antennen-Kombinationen.
- Durchführung von Kalibrierungen mit Analysen der Einflüsse von Eis, Regen, etc. auf das Auto bzw. auf das Messsetup.
- Analyse der Integrierbarkeit der Digital-Twin-Lösungen in die GNSS-basierten Antennenkalibrierungstechniken mit dem Ziel, ein Mehrwertprodukt zu entwickeln, das Geo++-Kunden angeboten werden kann.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: GDV von GPS L1; links: Geo++ Roboterkalibrierung, rechts: DLR Kammerkalibrierung .....	6
Abbildung 2: Antennenkalibrierung auf einem Drehplattform .....	7
Abbildung 3: Experiment Konfiguration .....	7
Abbildung 4: Auf dem Drehplattform am DoY 052 kalibrierte GDV von GPS L1 von vier Empfängern .....	9
Abbildung 5: Auf dem Drehplattform am DoY 048 kalibrierte GDV von GPS L1 von vier Empfängern .....	10
Abbildung 6: Kalibrierte (links: Geo++) und simulierte GDV (rechts: DLR) von GPS L1 .....	10
Abbildung 7: Trajektorie der kinematischen Testfahrt .....	11
Abbildung 8: Fixing Status der Referenztrajektorie .....	12
Abbildung 9: Abweichungen gegenüber der Referenztrajektorie in Ost- (oben) und Nordrichtung (unten) mit (rot) und ohne (blau) GDV von DoY 052 .....	13
Abbildung 10: Differenzen in Ost- (rot) und Nordrichtung (grün) mit und GDV .....	13
Abbildung 11: Abweichungen gegenüber der Referenztrajektorie in Ost- (oben) und Nordrichtung (unten) mit (rot) und ohne (blau) GDV von DoY 048 .....	14
Abbildung 12: GPS L1 Signalstärke (GS1C) für alle drei Empfänger an der Referenzstation während der Kalibrierung 2024 .....	15
Abbildung 13: GS1C Signalstärke (links) und CMC-Linearkombination (rechts) für PRN03 an der Referenzstation während der Kalibrierung 2024 .....	16
Abbildung 14: GS1C Detailanalyse für PRN03 (links) und der Baum als Ursache (rechts) für den Einbruch der Signalstärke um 13 Uhr GPS-Zeit .....	16
Abbildung 15: GS1C Signalstärke aller drei Empfänger für die Fahrzeugantenne während der Kalibrierung 2024 .....	17
Abbildung 16: GPS L1 Signalstärke (GS1C) für alle vier Empfänger für die Fahrzeugantenne während der Kalibrierung 2025 .....	18
Abbildung 17: Kontinuität der GPS Codebeobachtungen für die Fahrzeugantenne während der Kalibrierung 2025 .....	18
Abbildung 18: CMC-Linearkombination für die Fahrzeugantenne während der Kalibrierung 2025 .....	19
Abbildung 19: GS1C Signalstärke für PRN18 für die Fahrzeugantenne während der Kalibrierung 2025 .....	20
Abbildung 20: GS1C Signalstärke in Abhängigkeit der Orientierung der Fahrzeugantenne (links) und Skyplot (rechts) für PRN18 während der Kalibrierung 2025 .....	20
Abbildung 21: GS1C Signalstärke in Abhängigkeit der Orientierung der Fahrzeugantenne (links) und Skyplot (rechts) für PRN25 während der Kalibrierung 2025 .....	21
Abbildung 22: GDV-Differenz zu Javad Omega am DoY 052 (Omega ist die originale GDV) .....	22
Abbildung 23: Hybrides Kalibrierungsschema .....	23
Abbildung 24: Antennenmessung im DLR Antennenkammer .....	23
Abbildung 25: Strahlungsdiagramm der Standalone-Antenne .....	24
Abbildung 26: GDV einer Standalone-Antenne .....	25
Abbildung 27: CPV einer Standalone-Antenne .....	25
Abbildung 28: Simuliertes Auto CAD mit Antenne als Quelle .....	26
Abbildung 29: Abstrahlungsmuster der installierten Leistung eines vereinfachten digitalen Zwillinges .....	26
Abbildung 30: GDV und CPV aus dem vereinfachten digitalen Zwilling .....	27
Abbildung 31: Eingesetztes Tachymeter zur Erzeugung eines digitalen Zwillinges der Geo++ Kalibrierplattform .....	27
Abbildung 32: Mittels Leica Infinity ausgewertete Messung .....	29
Abbildung 33: Ausschnitt des digitalen Zwillinges mit zusätzlichen Informationen für den Austausch mit DLR-KN .....	29

<i>Abbildung 34: Detaillierter digitaler Zwilling mit den Strukturen in der Umgebung des Fahrzeugs, jeweils mit entsprechendem Material berücksichtigt.....</i>	<i>30</i>
<i>Abbildung 35: Ausstrahlungsmuster der installierten Leistung auf dem detaillierten digitalen Zwilling .....</i>	<i>31</i>
<i>Abbildung 36: GDV und CPV aus dem detaillierten digitalen Zwilling.....</i>	<i>31</i>
<i>Abbildung 37: Kalibrierte GDV mit Radioquelle und simulierte GDV.....</i>	<i>32</i>

## **Tabellenverzeichnis**

<i>Tabelle 1: Bandbreite der Empfänger.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabelle 2: Verwendete Empfänger und deren Einstellungen für die Kalibrierung der Fahrzeugantenne im Jahr 2024.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabelle 3: Verwendete Empfänger und deren Einstellungen für die Kalibrierung der Fahrzeugantenne im Jahr 2025.....</i>	<i>17</i>

## Literaturverzeichnis

Caizzone, S., Circiu, M.-S., Elmarissi, W., Enneking, C., Rippl, Markus, & Sgammini, M. (2022). The Role of Antennas on GNSS Pseudorange and Multipath Errors and Their Impact on DFMC Multipath Models for Avionics. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 69(3), navi.532. <https://doi.org/10.33012/navi.532>

Cicconet, F., Silva, R., & Mendes, P. M. (2023). GNSS Antenna Pattern Prediction and Placement Optimization: A Prototype Method Using Machine Learning to Aid Complex Electromagnetic Simulations Validated on a Vehicle Model. *Applied Sciences*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/app13042197>

Cicconet, F., Silva, R., Mendes, P. M., Pereira, T., & Kaulmann, S. (2023). GNSS antenna placement for autonomous vehicles supported by Bayesian optimization. *Expert Systems with Applications*, 214, 119158. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119158>

Dassault Systèmes. (2024) CST studio suite: Electromagnetic field simulation software. Brochure: <https://www.3ds.com/assets/invest/2024-03/simulia-cst-studio-suite-brochure.pdf>

Futter, P. W., Scialacqua, L., Foged, J. L., & Soler, J. (2018). Combining Measurement with Simulation for Automotive Antenna Placement and EMC Analysis. *2018 IEEE 4th Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/GEMCCON.2018.8628571>

Platz, H. D. (2025). Absolute antenna group delay variations: estimation, single station repeatability and their influence on coordinate and float ambiguity estimation in baseline positioning. *GPS Solutions*, 29(1), 16.

Siebert, C., Konovaltsev, Andriy, & Meurer, M. (2023). Development and Validation of a Multipath Mitigation Technique Using Multi-Correlator Structures. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, 70(4), navi.609. <https://doi.org/10.33012/navi.609>

Vergara, M., Sgammini, M., Thaelert, S., Enneking, C., Zhu, Y., & Antreich, F. (2016). Tracking Error Modeling in Presence of Satellite Imperfections. *NAVIGATION*, 63(1), 3–13. <https://doi.org/10.1002/navi.129>

Wübbena, J. B., Nietsch, A., Matzke, N., Wübbena, T., & Wübbena, G. (2021). *VehiCal – GNSS Antenna Calibration for Cars*. 778–795. <https://doi.org/10.33012/2021.17925>

## Abkürzungsliste

- **GNSS** – Global Navigation Satellite System
- **DGNSS** – Differentielle GNSS-Auswertung
- **RTK** – Real-Time Kinematic
- **PCV** – Phasenzentrumsvariationen
- **GDV** – Gruppenlaufzeitvariationen
- **CMC** – Code-Minus-Carrier (Linearkombination; Maß für Mehrwege)
- **C/N<sub>0</sub>** – Träger-zu-Rauschleistungsverhältnis
- **DLL-BW** – Delay-Locked-Loop-Bandbreite
- **RHCP** – Right-Hand Circular Polarization