

Sachbericht Teil I des WIR!-Vorhabens „ELFE“

03WIR1221E, DRAIVE GmbH

Ursprüngliche Aufgabenstellung

Ziel des Verbundprojekts war es, Automatisierungslösungen für Rangier- und Betriebshoffahrten zu entwickeln und dadurch in Zukunft die vorhandene Schieneninfrastruktur effizienter zu nutzen. Aufbauend auf Forschungsergebnissen sollte ein durchgängiges, hochgenaues Lokalisierungs- und Steuerungssystem für fahrerlose Zugbewegungen entwickelt werden.

Ein Schwerpunkt lag auf der zuverlässigen Positionsbestimmung mit einer Genauigkeit von ca. 10 cm – insbesondere beim Übergang zwischen Außen- und Hallenbereichen, wo unterschiedliche technische Verfahren kombiniert werden müssen. Im Außenbereich sollte GNSS durch zusätzliche Fahrzeug- und Umgebungsdaten abgesichert werden, während in Hallen eine angepasste UWB-basierte Lokalisierung zum Einsatz kam. Darauf aufbauend wurde ein robustes, dynamisches Brems- und Fahrprofil entwickelt, das Messunsicherheiten, Witterung, Schienenbedingungen und technische Beschränkungen berücksichtigt. Die Ergebnisse sollten mit einer automatisierten Ein- und Ausfahrt eines Triebfahrzeugs in eine Wartungshalle demonstriert werden.

Ablauf des Vorhabens

Die Arbeitspakete (AP) des Projekts ELFE bauten systematisch aufeinander auf und deckten Konzeption, Umsetzung, Erprobung und Validierung eines automatisierten, hochgenauen Lokalisierungssystems für Rangierfahrten ab.

In **AP 1 (Systemspezifikation und -konzeption)** wurden zunächst technische Grundlagen erarbeitet. Es erfolgte eine umfassende Markt- und Technikanalyse zu GNSS-Modulen, Korrekturverfahren (RTK, PPK, SBAS, PPP) und Qualitätsmaßen. Darauf aufbauend wurden geeignete Komplementärsensoren (IMU, Raddrehzahlsensoren, UWB) bewertet und eine partnerübergreifende Gesamtarchitektur mit klaren Schnittstellen, Kommunikationsprotokollen (MQTT) und Zeitsynchronisation (GNSS, NTP/PTP) definiert. **AP 2 (Versuchskonzeption und Datengenerierung)** umfasste die Auswahl und den Aufbau der Hardware für ein prototypisches GNSS-System sowie die Definition eines realistischen Testszenarios auf dem Betriebsgelände der DB Fahrzeuginstandhaltung (Tankstelle → Waschhalle). In vier Messkampagnen mit Zügen der Erzgebirgsbahn wurden umfangreiche Realdaten erhoben, die die Notwendigkeit eines GNSS–UWB-Handover belegten. In **AP 3 (Softwareentwicklung)** wurden ein Handover-Algorithmus, ein Softwareframework für die GNSS-Datenverarbeitung sowie Filter- und Integritätsmetriken entwickelt. Zudem wurden RTK-Korrekturdienste integriert und ein Echtzeit-Monitoring zur Systemgesundheit implementiert. **AP 4 (Implementierung und Integration)** realisierte eine temporäre Trägerplattform für Messfahrten und bereitete die Integration in den geplanten TUC-Forschungszug vor. Das Gesamtsystem wurde erfolgreich in einer Laborumgebung mit Simulationen und Realmessdaten getestet. **AP 5 (Validierung und Tests)** bewertete die Systemleistung unter realen Bedingungen. Es zeigte sich die Notwendigkeit von RTK und UWB insbesondere in satellitenarmen Bereichen. Ergänzende Tests mit einem PKW bestätigten die Übertragbarkeit wesentlicher Ergebnisse außerhalb des Bahnumfeldes.

Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit Partnern

Die wesentlichen Ergebnisse des Projekts ELFE liegen in der erfolgreichen Entwicklung, Erprobung und Validierung eines integrierten, hochgenauen Lokalisierungssystems für (teil-)automatisierte Rangierfahrten im Bahnbetriebshof. Es wurde gezeigt, dass eine alleinige GNSS-Lokalisierung nicht ausreicht und eine Fusion mit weiteren Sensoren – insbesondere ein Handover zwischen GNSS im Außenbereich und UWB im Hallenbereich – zwingend erforderlich ist. Ein prototypisches GNSS-System mit RTK-Unterstützung wurde aufgebaut, in realen Messfahrten getestet und durch Softwarealgorithmen zur Datenfusion, Integritätsbewertung und Systemüberwachung ergänzt. Die entwickelte Systemarchitektur mit standardisierten Schnittstellen (u. a. MQTT) und präziser Zeitsynchronisation erwies sich als funktionsfähig

und übertragbar. Laborintegrationstests sowie Simulationen mit Realdaten bestätigten die Einsetzbarkeit für automatisierte Zugbewegungen.

Die Zusammenarbeit mit den Partnern war eng, kontinuierlich und arbeitsteilig organisiert. In gemeinsamen Workshops wurde die Gesamtsystemarchitektur definiert. Die TU Chemnitz (TUC) war für die Zugregelung und Integration auf Rechnerhardware verantwortlich, während PinPoint die UWB-Lokalisierung in der Waschhalle bereitstellte. DRAIVE entwickelte das GNSS-System, die Software und das Monitoring und stellte Messdaten für Handover- und Regelungstests bereit. Das SRCC unterstützte bei Antennentests und Messfahrten. Trotz Herausforderungen beim Forschungszug konnte durch Ersatzlösungen (Laborintegration und Erzgebirgsbahn-Züge) eine erfolgreiche, partnerschaftliche Umsetzung erreicht werden.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt**

Sachbericht Teil II des WIR!-Vorhabens „ELFE“

03WIR1221E, DRAIVE GmbH

1. Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

AP 1: Systemspezifikationen und Systemkonzeption

Die **Recherche zu GNSS-Modulen** (AP 1.1.5) erbrachte ein umfassendes Bild aktuell verfügbarer GNSS-Module sowie Chips und deren Schnittstellen, Protokolle, Updateraten und Korrekturverfahren. GNSS-Module lassen sich anhand mehrerer technischer Merkmale voneinander abgrenzen. Ein wesentliches Unterscheidungskriterium ist die Empfängerarchitektur, die als Single-Frequency-, Dual-Frequency- oder Tri-Frequency-Variante ausgeführt sein kann. Diese Architekturen bestimmen maßgeblich die erreichbare Genauigkeit und Störfestigkeit des Empfängers.

Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die unterstützten Satellitensysteme. Moderne GNSS-Module können neben dem amerikanischen GPS, das europäische Galileo, das chinesische Baidu oder auch das russische GLONASS-System empfangen. Die Kombination mehrerer Systeme erhöht die Verfügbarkeit von Satellitensignalen und verbessert die Positionsbestimmung, insbesondere in schwierigen Empfangssituationen.

Die Positionsrate, angegeben in Hertz, gibt an, wie häufig pro Sekunde eine neue Position berechnet wird. Während einfache Module mit 1 Hz arbeiten, erreichen hochwertige Empfänger Raten von 10 Hz oder mehr, was besonders für dynamische Anwendungen relevant ist.

Bei den Schnittstellen stehen verschiedene Standards zur Verfügung: UART ist weit verbreitet und einfach zu implementieren, USB-Schnittstellen, SPI und I²C bieten höhere Datenraten.

Protokolle und Datenformate spielen eine zentrale Rolle, die je nach Anwendungszweck zum Einsatz kommen. Das Basisprotokoll hierbei ist NMEA. Es ist das am weitesten verbreitete Format für die Ausgabe von Positionsdaten. Es liefert Informationen wie Koordinaten, Geschwindigkeit und Satellitenstatus in menschenlesbarer ASCII-Form, was die Integration in verschiedenste Systeme und die Fehlersuche erheblich vereinfacht. Nahezu alle GNSS-Empfänger unterstützen diesen offenen Standard. Parallel werden proprietäres Binärprotokoll eingesetzt.

Maßgeblich für die Genauigkeit von GNSS-Modulen sind die verwendeten Korrekturmaßnahmen: (1) RTK (Real-Time Kinematic) und (2) PPK (Post-Processing Kinematic). Diese Technologien ermöglichen durch Daten eine Korrekturdienstes eine Positionsbestimmung im Zentimeter-Bereich. Weitere gängige Verfahren sind: (3) SBAS (Satellite-Based Augmentation System), dieses nutzt geostationäre Satelliten, die Korrektursignale für größere Regionen ausstrahlen, z.B. EGNOS in Europa. (4) PPP (Precise Point Positioning) nutzt präzise Satellitenbahn- und Uhrdaten von globalen Netzwerken, meist in Kombination mit RTK für schnellere Konvergenz einer Positionslösung.

Planung und Aufbau, sowie HW-Auswahl erfolgten in AP2.

Die **Zuverlässigkeit von GNSS-Positionen** wird anhand mehrerer Qualitätsparameter bewertet. Die Recherche zu Vertrauensmaßen ergab eine Übersicht über GNSS-Qualitätsparameter: DOP-Werte (Dilution of Precision), Satellitenanzahl, Alter der Korrekturdaten, SNR (Signal-to-Noise Ratio). Diese sind einzeln nur hinreichend zur Erfassung der tatsächlichen Genauigkeit in der praktischen Anwendung geeignet. Ziel war es vorhandene GNSS-Qualitätsparameter in ein einzelnes Vertrauensmaß zusammenzuführen. Mit den durchgeführten Messungen im definierten Szenario wurde in AP 5 ein Schwellwert festgelegt, bis wann die für die Anwendung der automatisierten Fahrt das Vertrauensmaß noch ausreichend ist. Dieser Vertrauenswert soll eine ganzheitliche Bewertung der Positionsqualität durch eine spezifische Konfiguration im geplanten Szenario ermöglichen und erleichtert Entscheidungen über die Verwendbarkeit der Position für die Beeinflussung des Zuges im Projekt.

Die **Kombination von GNSS mit zusätzlicher Komplementärsensorik** kann die Robustheit und Genauigkeit der Positionsbestimmung erheblich erhöhen. Für den Ansatz in ELFE kommen nach Recherche folgende mögliche Sensoren in Frage:

IMU (Inertial Measurement Unit) vereint Beschleunigungssensoren und Gyroskope und liefert mit 100 bis 1000 Hz eine exzellente kurzfristige Bewegungsschätzung. Sie überbrückt GNSS-Ausfälle in Tunneln oder unter Brücken und liefert Gierrate sowie Längsbeschleunigung für Dead-Reckoning-Verfahren. Allerdings können Vibrationen und Kalibrierfehler die Messungen maßgeblich beeinträchtigen und erfordern eine gute Integration ins Zielsystem.

Raddrehzahlgeber und Odometer erfassen präzise relative Geschwindigkeiten und Distanzen im Bahnfahrzeug. Radschlupf bei Nässe, Schnee oder starkem Bremsen sowie eine notwendige Kalibrierung sind Fehlerquellen. Im geplanten Forschungszug des Partners TUC war für das Projekt geplant diese Sensoren zu implementieren und Messdaten über eine installierte Schnittstelle abgreifbar zu machen (Informationen aus Arbeitstreffen). Die Ergänzung des GNSS-Systems mit diesen Messdaten erscheinen daher sehr zielführend, um die Robustheit und Genauigkeit zu erhöhen. Als ergänzende Messsignale des TUC Forschungszuges wurden daher die Signale der Raddrehzahlsensoren (Umdrehung pro min, Winkelgeschwindigkeit - nicht angetriebene Radsätze) sowie das Geschwindigkeitssignal des Zuges identifiziert. Es war geplant diese Messsignale in AP 4 in des GNSS-Lokalisierungssystem einzubinden, siehe AP4.

UWB bietet punktgenaue Positionsfixpunkte und ist besonders In-Door wertvoll, wo GNSS-Signale fehlen. Eine Kombination mit UWB-Technologie des Partners PinPoint war im Projekt generell vorgesehen und wurde im definierten Szenario umgesetzt. Es wurde ein Handover zwischen GNSS und UWB im Projekt vom Partner implementiert. Hierfür sind im Folgenden in AP 1.2.1 die partnerübergreifende gemeinsame Gesamtarchitektur als Ergebnis aus AP1 vorgestellt.

Als **Voraussetzung für Handover zu UWB** ist eine gemeinsame Gesamtsystemarchitektur notwendig, welche gemeinsame Kommunikationsprotokolle und Zeitsynchronisation zwischen unterschiedlichen Modulen im Zielsystem (TUC-Forschungszug) berücksichtigt. Die Entwicklung und Definition einer solchen Architektur erfolgte gemeinsam mit allen Partnern in AP1.2.1.

In gemeinsamem Arbeitstreffen des Konsortiums wurde eine Gesamtsystemarchitektur (AP 1.2.1) basierend auf den Rechercheergebnissen mit definierten Kommunikationskanälen und Protokollen erstellt (siehe Abbildung unten).

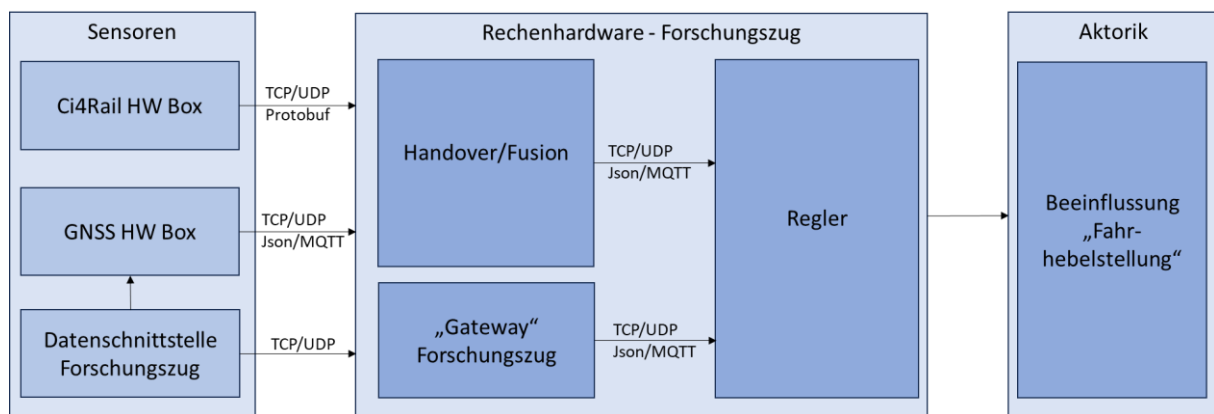


Abbildung 1: Entwurf der Gesamtsystemarchitektur

Für die **Kommunikation zwischen den Systemkomponenten** wurde MQTT über Ethernet eingesetzt. MQTT bietet als leichtgewichtiges Publish-Subscribe-Protokoll eine effiziente und flexible Datenverteilung, die sich besonders für verteilte Sensorsysteme eignet. Ethernet gewährleistet dabei eine stabile und hoch performante Übertragung mit ausreichender Bandbreite für die verschiedenen Datenströme aller Partner von GNSS, Raddrehzahl und UWB.

Die **zeitliche Zuordnung und Synchronisation** aller Sensordaten ist entscheidend für die Datenfusion und das GNSS-UWB-Handover. Hierfür kommen mehrere komplementäre Verfahren zum Einsatz: Die Ausgabe eines Nanosekunden-Zeitstempel das GNSS-System ermöglicht die hochpräzise Erfassung von Ereignissen, was insbesondere bei der Fusion hochfrequenter Raddrehzahldaten mit GNSS-Positionen unerlässlich ist. Weiterhin lässt sich das GNSS-System über einen NTP (Network Time Protocol) oder PTP (Precision Time Protocol)-Server synchronisieren. GPS-Zeitstempel dienen als absolute Zeitreferenz, da GNSS-Empfänger

hochpräzise UTC-Zeit liefern. Diese fungiert als Master-Zeitquelle für das gesamte System und gewährleistet eine globale Zeitbasis. Ein Zeitserver sollte auf dem Zugrechner die Zeitsynchronisation aller Komponenten koordinieren und die Zeitinformation über das Ethernet-Netzwerk verteilen. Hierzu wurde ein PTP/NTP-Server auf der Rechenhardware im TUC-Forschungszug integriert, siehe AP 4 „Integration“.

Das Arbeitspaket 1 wurde erfolgreich abgeschlossen und legt die konzeptionelle Grundlage für das Projekt. Zentrale Ergebnisse umfassen die Definition der Schnittstelle zwischen GNSS und UWB samt Kommunikationsprotokoll sowie die marktorientierte Spezifikation des GNSS-Setups unter Berücksichtigung der Projektanforderungen. Alle Teilkomponenten der satellitengestützten Außenbereichslokalisierung wurden spezifiziert und auf Kompatibilität mit dem Gesamtsystem geprüft (siehe auch AP 4). Zudem erfolgte die vollständige Spezifikation der zu entwickelnden Software unter Berücksichtigung der festgelegten Gesamtarchitektur.

AP 2: Versuchskonzeption und experimentelle Datengenerierung

Die **Planung und Aufbau des Messsetups** wurde in AP 2.1.1 durchgeführt. Hierfür wurden, basierend auf den Ergebnisse aus AP 1, alle benötigten und geeigneten embedded Hardware Komponenten sowie Antennen, Kabel und Anschlüsse für das GNSS Lokalisierungssystem ausgewählt und beschafft. Als Basis für das GNSS-System wurde ein System-on-Chip Lösung mit RTK-Unterstützung und erhöhter Ausrichtungsgenauigkeit durch zwei Antennen ausgewählt. Abbildung 2 zeigt ein Bild des Prototyps des GNSS-Systems. Der benötigte Mobilfunkzugang zum Erhalt der Korrekturdaten und Steigerung der Positionsgenauigkeit wird durch die Systemumgebung gewährleistet, welche der sich in Aufbau befindende Forschungszug des Partners TUC darstellt.



Abbildung 2: Prototyp des Embedded GNSS-Systems

Für die Empfangsantennen wurde die Auslegung ursprünglich auf die Hardware in der Zielumgebung des TUC Forschungszuges angepasst. In diesem sind FUNKWERK Zug Antennen auf dem Dach installiert. Für die temporären Installationen zu den Messfahrten mit Zügen der Erzgebirgsbahn wurden verschiedene Antennentypen getestet, siehe AP4.

Die Ausarbeitung und **Definition der Testszenarioumgebung** (AP 2.2.1) wurde in gemeinsamen Arbeitstreffen abgeschlossen. Es wurde auf dem Betriebsgelände der DB Fahrzeuginstandhaltung GmbH in mehreren experimentellen Datenerfassungen realisiert.

Das im Konsortium festgelegte Szenario fokussiert sich auf eine automatisierte Fahrt im Betriebsgelände der DB Fahrzeuginstandhaltung GmbH für wiederkehrende Service und/oder Wartungsarbeiten. Konkret betrifft dies den automatisierten Halt an der Tankstelle (A) und die Fahrt von der Tankstelle (A) in die Waschhalle (B), siehe Abbildung 4. Die Umsetzung der automatisierten Fahrt wurde vom Projektpartner TU Chemnitz (TUC) bearbeitet. Die Waschhalle wurde vom Projektpartner PinPoint GmbH mit UWB-Technologie zur Lokalisierung ausgerüstet. Außerhalb der Gebäude erfolgt die Bereitstellung der Zugposition für diese Anwendung durch das GNSS basiertes Lokalisierungssystem.



Abbildung 3: Desiro der Erzgebirgsbahn vor der Einfahrt zur Waschhalle

Es wurden vier experimentelle Datenerfassungen im Zielszenario durchgeführt. Diese erfolgten mit Unterstützung der Erzgebirgsbahn und wurden durch das SRCC organisiert. Die Messfahrten fanden im Betriebsgelände der DB Fahrzeuginstandhaltung GmbH statt. Es kam ein regulärer Zug der Erzgebirgsbahn des Typs Desiro 642 zum Einsatz. DRAIVE hat zu diesen Fahrten Messdaten mit Iterationen des Prototyps des GNSS-basierten Lokalisierungssystems für die Entwicklung, Analyse und Optimierung des GNSS-Systems sowie des Gesamtsystems aufgenommen. Abbildung 7 zeigt einen temporären Aufbau des GNSS-Systems und UWB-Empfängers auf dem Dach des durch die Erzgebirgsbahn bereitgestellten Zuges des Typs Desiro 642. Initialisierung, Überwachung und Aufzeichnung erfolgten im Passagierbereich des Zuges, siehe z.B. Abbildung 5.



Abbildung 4: GNSS-Messungen im Szenario auf dem Werksgelände der DB Fahrzeuginstandhaltung GmbH

Die technische Vorbereitung und Versuchskonzeption der Messdatenaufnahmen umfasst die Implementierung und Tests der Hardware- und Softwareschnittstellen sowie deren Konfiguration, Integration ins Aufzeichnungssystem und Prüfung der Datenintegrität (siehe AP3).

Die Ergebnisse der Auswertung der experimentellen Daten bestätigen die Notwendigkeit der Fusion zwischen GNSS im Außenbereich und UWB im Innenbereich innerhalb eines Übergabemechanismus (Handover). Sichtbar ist dies auch in Abbildung 4 innerhalb der Waschhalle. Sobald die Antennen des GNSS-Systems (temporäre Installation in Abbildung 7) den Waschhalleneingang passierten, brachen SNR der getrackten Satelliten sowie die Anzahl der sichtbaren Satelliten ein. Eine Aussage über die geplante Einbeziehung der Raddrehzahlsensoren des Zuges als komplementäre Sensorik (AP1) konnte in diesem temporären Setup nicht getroffen werden, da kein Messdatenzugang zum Zug in den von der Erzgebirgsbahn gestellten Fahrzeugen möglich war.



Abbildung 5: Testsetup zur Steuerung, Überwachung und Aufzeichnung des GNSS-Systems zur temporären Installation

Das Arbeitspaket 2 wurde erfolgreich abgeschlossen und bildet die datentechnische und kontinuierliche Basis für die Systementwicklung. Die Funktionalität der Lokalisierungssysteme konnte unter realen Bedingungen im festgelegten Szenario untersucht werden. Die aufgezeichneten Daten wurden bei der Entwicklung, Validierung und Optimierung der Teile des Gesamtsystems eingesetzt.

AP 3: Softwareentwicklung

Für die **Entwicklung des Handover-Algorithmus** wurden frühzeitig Arbeitsmeetings initiiert und das Vorgehen bzw. Verteilung der Aufgabenbereiche festgelegt. Benötigte Schnittstellen und Protokolle wurden im Austausch mit den Partnern abgestimmt (siehe Abbildung 1). Für die Entwicklung des Handover-Algorithmus (AP 3.1.6) wurden exemplarische Messdaten durch die temporäre Installation in einem regulären Zug der Erzgebirgsbahn in den beschriebenen Messfahrten (siehe AP 2) erhoben. DRAIVE erfasste hierbei die GNSS-Messdaten für die Entwicklung des Handover-Algorithmus.

Die **Entwicklung des Softwareframeworks für den Einsatz des GNSS-Systems** (3.2.1) erfolgte durch Definition und Implementierung der GNSS-Daten Schnittstellen und Akquisefunktionen für das GNSS-System. Die Implementierung wurde während der Messfahrten schrittweise eingesetzt und verfeinert. Die Implementierung ist erfolgreich in Echtzeit im Bahnumfeld getestet.

Für die prototypische Entwicklung der Filteralgorithmen und probabilistischen Methoden zur **Bestimmung des Integritätswertes** wurden aus GNSS-Qualitätsmaße gebildet. Die Optimierung und Test der Echtzeitfähigkeit unter Beachtung von AP 4 wurde in AP 5 unter Realbedingungen durchgeführt.

Basierend auf den Messdaten und realer Versuche wurden Parameteranpassungen (AP 3.2.3) im GNSS-System durchgeführt und getestet.

Konfiguration, Einbindung und Test des RTK-Korrekturdienstes (AP 3.2.4) umfasste die Auswahl und Registrierung bei einem Korrekturdienst-Anbieter und die Konfiguration des NTRIP-Clients. Für den RTK-Betrieb sind zum Zugang zum Korrekturdienst für die RTK-fähiger GNSS-Hardware eine stabile Internetverbindung notwendig sowie ausreichend Satelliten und räumliche Nähe zur Referenzstation des RTK-Dienstes. Die Internetverbindung stellt für den sicheren Betrieb einen kritischen Faktor dar und wurde durch das Monitoring überwacht. Tests wurden bei den beschriebenen Messfahrten unter realen Betriebsbedingungen durchgeführt, einschließlich Fahrten durch unterschiedliche Umgebungen wie Freifeld (Anfahrt zu A), abgeschattete Bereiche (Anfahrt zu B) sowie in der Waschhalle (B), siehe AP 5.

Beim **Online-Monitoring** (AP 3.2.5) der Systemgesundheit der Hardware und Software des GNSS-Systems wurden Metriken als Machbarkeitsnachweises implementiert. Hierbei werden Systemparameter der Hardware wie CPU- und Speicherinformationen, Schnittstelleninformationen und Frequenzen sowie Alter der Messdaten als Metriken erfasst und prozessiert. Diese lassen sich über ein mittels Ethernets verbundenen Laptops in einer Grafana-basierten Visualisierung anzeigen. Festgelegte Performance-KPIs der Positionsmessung können konfiguriert, ausgelesen und intern aufgezeichnet werden. Die Überwachung der Internetverfügbarkeit stellt für die Übermittlung der NTRIP Nachrichten für den RTK-Korrekturdienst einen wesentlichen Qualitätsparameter der GNSS-Genauigkeit dar.



Abbildung 6: Screenshot des GNSS-System Monitorings; Überwacht werden Hardwareparameter wie Auslastung und Temperatur sowie die Schnittstellen und Datenaustausch auf Softwareebene

AP 4: Implementierung und Integration

Aufgrund der verzögerten Verfügbarkeit des Forschungszuges des Projektpartners TUC erfolgten notwendige Messdatenaufnahmen im definierte Szenario (AP2) mittels regulärer Züge der Erzgebirgsbahn.

Für die Messdatenaufnahmen mit den regulären Fahrzeugen der Erzgebirgsbahn (siehe AP 2), wurde aufgrund der nur temporär möglichen Integration eine Trägerplattform erstellt. Diese hat es ermöglicht, zu den Messfahrtterminen auf dem Werksgelände DB Fahrzeuginstandhaltung GmbH die prototypische embedded Hardware und Antennen des GNSS-Systems im festgelegten Szenario (siehe AP 2) zu testen und Messdaten aufzunehmen. Die Trägerplattform ist möglichst lang, um eine ausreichende Baseline zwischen den Antennen zu erzeugen und gleichzeitig noch handhabbar für einen temporären Einbau. Abbildung 7 zeigt die Trägerplattform mit montiertem prototypischem GNSS-System und Antennen auf dem Dach eines Desiro VT 642 zur Messfahrt.



Abbildung 7: temporärer Versuchsaufbau auf dem Dach eines Desiro VT 642 der Erzgebirgsbahn mit dem prototypischen GNSS-System

Der Forschungszug der TUC soll bahntaugliche Antennen vorinstalliert haben. Als Vorbereitung der Integration wurde eine Antenne gleicher Bauart in einem Versuchsaufbau getestet. Die FUNKWERK Antenne wurde im Labor beim SRCC mit einer der Versionen des GNSS-Systems getestet. Die Ergebnisse zeigten eine gute Signalqualität im stationären Test. Für die temporären Installationen wurden verschiedene Antennentypen getestet und variiert. Hierbei waren keine signifikanten Unterschiede aufgetreten.

Das GNSS-System war für die Integration in den geplanten Forschungszug der TUC vorbereitet (AP 4.1.1). Daten des GNSS-Systems können vom Handover-Modul (siehe Abbildung 1) auf dem Rechner des Forschungszuges über die geplanten Schnittstellen und Datenformate, wie in AP 1 gemeinsam mit den Projektpartner festgelegt, empfangen werden. In Vorbereitung auf eine mögliche Integration in den Forschungszug wurde eine Integration des Gesamtsystems in Laborumgebung an einem Rechner (gleicher Bauart wie im geplanten Forschungszug) beim Partner TUC durchgeführt. Hierbei wurden die Module der Partner und das GNSS-System, wie im Gesamtsystem (Abbildung 1) geplant, verknüpft und erfolgreich getestet. Weiterhin wurden Simulationen mit Messdaten aus den Versuchsfahrten durchgeführt, um die Zug-Regelung der TUC mit GNSS-Eingangsdaten zu testen, siehe Abbildung 9 und Abbildung 8. Hierfür wurden die von DRAIVE aufgezeichneten Messdaten aus dem festgelegten Szenario (AP2) der Realfahrten mit der Erzgebirgsbahn im Werksgelände als abspielbarer Datenstream aufbereitet und eingesetzt, um GNSS-UWB-Handover und darauffolgende Regelmodule für die Zugsteuerung zu validieren.



Abbildung 8: Versuchsaufbau zum Test des Gesamtsystems im Labor der TUC



Abbildung 9: Ein baugleicher Rechner des Forschungszuges, darauf das GNSS-System und Antenne zum Test der Datenschnittstellen des Gesamtsystems im Labor der TUC

AP 5: Validierung und abschließende Tests

Wie in AP4 beschrieben wurde eine Integration in die Laborumgebung sowie eine temporäre Integration in Züge der Erzgebirgsbahn für die Messfahrten im festgelegten Szenario ausgeführt. Diese Messfahrten wurden geplant und technisch auf Hard- und Softwareseite vorbereitet sowie notwendige Systemtests im Vorfeld durchgeführt (AP 5.3.1). Im Rahmen von AP5 wurden Entwickelte sowie implementierte Hardware und Software auf Funktionalität geprüft. Messdaten und Testergebnisse analysiert und bezüglich der Positioniergenauigkeit bewertet (AP 5.1).

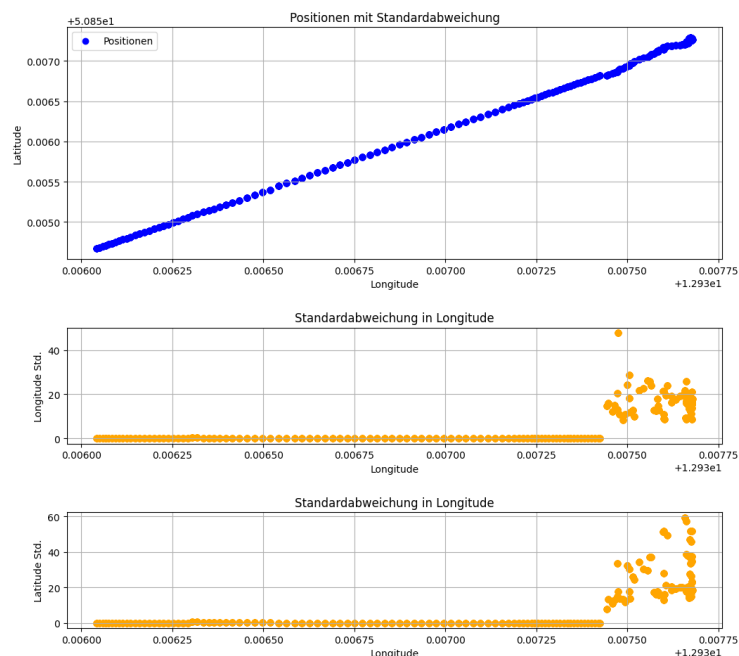


Abbildung 10: Diagramm der Zugposition und Standardabweichung bei Anfahrt an die Waschhalle, links nach rechts

Abbildung 10 zeigt eine Anfahrt des Zuges in die Waschhalle (links nach rechts). Bei Eintritt in die Waschhalle stieg die Standardabweichung stark an, das Positionssignal driftet weg. Innerhalb der Waschhalle war das Signal zu den Satelliten zu schwach oder nicht vorhanden. Sichtbar war dies auch in der Anzahl der verwendeten Satelliten und verlieren der Korrektur. Zur vereinfachten Handhabung wurde diese Qualitäts- und Genauigkeitswerte in einem Integritätsmaß zusammengefasst, welches mit

der Position an Handover und an den Regler gesendet wird. Somit lässt sich in den verarbeitenden Algorithmen zur (Teil-)Automatisierten Fahrt des Zuges eine klare Systemverfügbarkeit ermitteln.

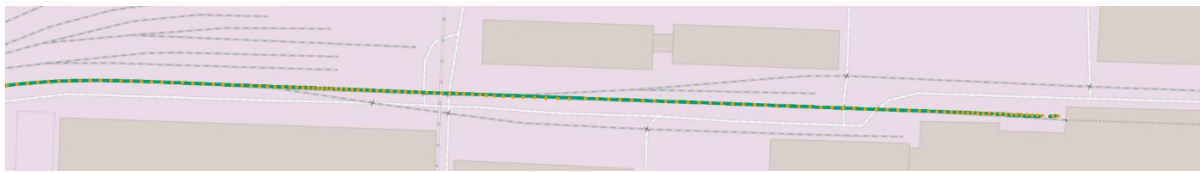


Abbildung 11: Zugposition auf OSM-Karte; Anfahrt zur Waschhalle

Der Einsatz von RTK erwies sich als notwendig, um die geforderten Genauigkeiten abzubilden (siehe AP 3.2.4). Tests hierzu wurden bei den beschriebenen Messfahrten durchgeführt. Auch die Verfügbarkeit des Korrekturdienstes ist aufgrund fehlender korrekter GNSS-Informationen (z.B. innerhalb der Waschhalle und in der Zeit bis zu einer validen Position nach Verlassen der Waschhalle) eingeschränkt. Besonders in diesen kritischen Bereichen ohne Satellitenempfang ist das Handover zu UWB entscheidend, siehe Abbildung 12 des Konsortialpartners TUC. Auch die Abhängigkeit von stabiler Mobilfunkverbindung zur Übertragung der Korrekturdaten stellt eine Einschränkung dar, welche beim Systemmonitoring mit überwacht wird.

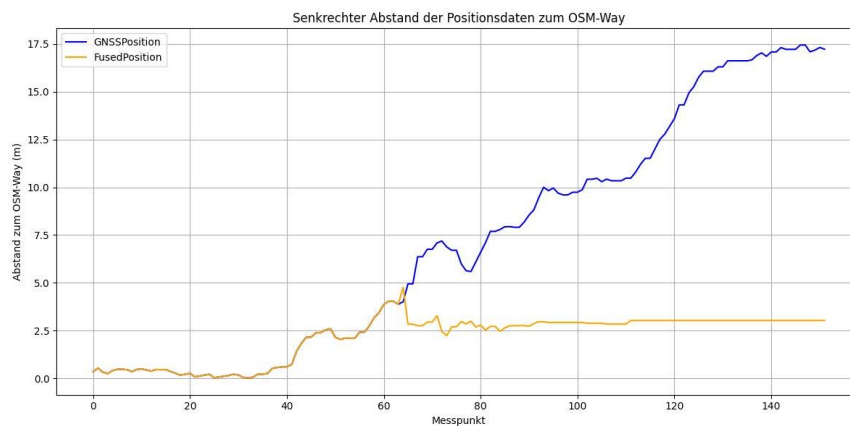


Abbildung 12: Vergleich GNSS und Fusion mit UWB am Eingang der Waschhalle; Ergebnis aus den gemeinsamen simulierten Labortests; Abbildung wurde vom Partner TUC für das Konsortium erstellt

In AP 5.2.2 wurden Validierungstest abseits des Bahnumfeldes zur Ermittlung von Performance-Messungen wurden mit einem PKW auf öffentlichen Straßen durchgeführt und analysiert. Hierbei wurden Parameter mit Hinblick auf die GNSS-Positionsgenauigkeit verifiziert, u.a. RTK und verfügbare Filter. Abbildung 13 zeigt eine Visualisierung zum Vergleich des Positionsverlaufes abseits des Bahnumfeldes auf der Straße. Problematische Situationen wie Abschattungen durch Vegetation und Gebäude treten in beiden Domains auf. Eine gute Integration der Hardware sowie Filter und Korrekturmaßnahmen können die Positionsgenauigkeit erhöhen.

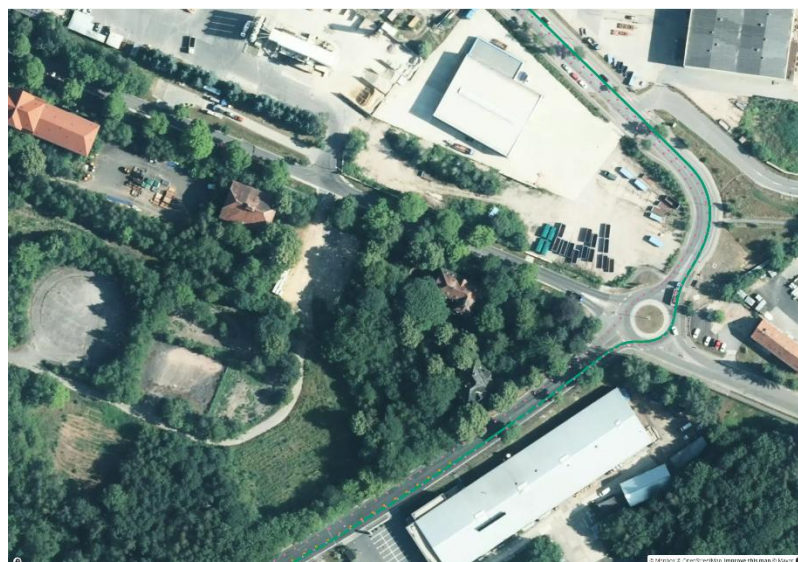


Abbildung 13: Testbeispiel abseits des Bahnumfeldes; rosa - GNSS mit RTK; orange - GNSS PVT; grün - GNSS Trajektorie gefiltert

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt**