

On-board-Fahrzeugortung mit GNSS und digitalen Karten im Projekt EGNSS MATE

On-board vehicle localisation with GNSS and map data in the EGNSS MATE project

Michael Roth | Judith Heusel | Keivan Kiyandar | Sebastian Ohrendorf-Weiss | Andreas Wenz | Paulo Mendes | Nikolas Dütsch | Alice Martin

Der Beitrag stellt das Projekt EGNSS MATE vor, das fahrzeugseitige GNSS-, Multi-Sensor- und kartengestützte Lokalisierung für das European Train Control System (ETCS) untersucht. Die Motivation für die Lokalisierung mit Fahrzeugsensorik, die umfangreichen Projektdaten, die Lokisierungsalgorithmen und spezielle GNSS-Themen werden beschrieben.

1 Einleitung

Positions- und Geschwindigkeitsinformationen sind für das Europäische Zugsicherungssystem (ETCS) des Europäischen Eisenbahnverkehrsleitsystems (ERTMS) von entscheidender Bedeutung [1]. Die genaue und zuverlässige Lokalisierung von Fahrzeugen im Schienennetz ist eine wichtige Voraussetzung für den Moving-Block-Betrieb (Fahren im wandernden Raumabstand) und andere Anwendungsfälle, die die Streckenkapazitäten erhöhen und die Wettbewerbsfähigkeit des klimafreundlichen Bahnsektors steigern. Verfügbare infrastrukturbasierte Lokalisierungslösungen [2] sind mit hohen Kosten und erheblichem Wartungsaufwand für die Infrastrukturbetreiber verbunden, insbesondere in großen Eisenbahnnetzen. Andererseits sind fahrzeugseitige Sensoren und GNSS-Technologie (GPS, Galileo usw.) prinzipiell verfügbar und bieten im Schienenverkehr ein ebenso großes Potenzial wie in anderen Bereichen. Weiterhin können digitale Karten dazu beitragen, die auf das Gleis beschränkte Fahrzeugbewegung zu nutzen. Diese Tatsachen motivieren die Untersuchung, Entwicklung und Erprobung von GNSS-, Multi-Sensor- und kartengestützten On-board-Lokalisierungslösungen im Rahmen des EGNSS-MATE-Projekts (Bild 1). EGNSS MATE (European GNSS based Map Assisted Train localisation for ERTMS) [3] ist ein Kooperationsprojekt zwischen der Schweizerische Bundesbahnen AG (SBB), der Industrianlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG) und dem Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). Die Partner setzen sich aus relevanten Akteuren zusammen: SBB als großer Eisenbahn- und Infrastrukturbetreiber, IABG als GNSS- und Testunternehmen in der Positioning, Navigation and Timing (PNT)-Industrie und das DLR als anwendungsorientierte ingenieurwissenschaftliche Forschungseinrichtung im Verkehrs- und Eisenbahnsektor. EGNSS MATE wird von der ESA im Rahmen des NAVISP-Programms (Element 2) [4] finanziert. Das Projekt ist Anfang 2023 angelaufen und soll Anfang 2025 abgeschlossen werden. Die Beiträge von EGNSS MATE reichen von der Untersuchung fortgeschrittener GNSS-Themen und deren Potenzial im Bahnbereich bis hin zu digitalen Karten und deren Integration in GNSS- und Multi-Sensor-Lokisierungsalgorithmen. Alle Entwicklungen basieren auf fahrzeuggetragenen SBB-Systemen, die die relevanten GNSS-

This article introduces the EGNSS MATE project that is contributing to On-board GNSS, multi-sensor and map-supported localisation for European Train Control System (ETCS). Details are given with regard to the motivation for On-board localisation, the extensive project data, the localisation algorithm development and specific GNSS topics.

1 Introduction

Position and velocity information is vital for the ETCS within the European Rail Traffic Management System (ERTMS) [1]. The accurate and reliable localisation of vehicles in the railway network is a key requirement for moving block operation and other use cases that increase line capacities and make the climate-friendly rail sector more competitive. Available infrastructure-based localisation solutions [2] come at high costs and considerable maintenance efforts for the infrastructure operators, especially in large railway networks. On the other hand, On-board sensors and GNSS technology (Global Navigation Satellite Systems – GPS, Galileo, etc.) are readily available and are showing as great potential in the railway industry as in other domains. Furthermore, digital maps can help exploit the vehicle motion that is constrained to the railway network. These facts have motivated the investigation, development and testing of GNSS multi-sensor, map-supported, On-board localisation solutions within the EGNSS MATE project (fig. 1). EGNSS MATE (European GNSS based Map Assisted Train localisation for ERTMS) [3] is a collaborative project between the Swiss Federal Railways (SBB), Industrianlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG), and the Institute of Transportation Systems at the German Aerospace Center (DLR). The partners comprise relevant stakeholders, with SBB as a large railway and infrastructure operator, IABG as a GNSS and testing company in the positioning, navigation and timing (PNT) industry and DLR as a technology-driven research institution within the transportation and railway sector. EGNSS MATE is funded by the ESA within the NAVISP Program (Element 2) [4]. The project started in early 2023 and is planned to conclude in early 2025. The contributions of EGNSS MATE range from the investigation of advanced GNSS topics and their potential in the rail domain to digital map data and its integration into GNSS and multi-sensor localisation algorithms. All the developments are based on SBB On-board systems that provide the relevant GNSS and sensor data. The localisation algorithms are prepared for open-source publication and are being integrated into an SBB backend system for testing on large scale datasets.



Bild 1: Das Projekt EGNSS MATE untersucht die Ortung von Zügen.

Fig. 1: The EGNSS MATE project investigates train localisation.

Quelle / Source: SBB

und Sensordaten liefern. Die Lokalisierungsalgorithmen werden als Open-Source-Veröffentlichung vorbereitet und zudem in ein SBB-Backend-System integriert, um sie an großen Datensätzen zu testen.

2 Architekturaspekte

EGNSS MATE baut auf aktuellen Entwicklungen im Eisenbahnsektor auf, einschließlich der OCORA-Referenzarchitektur (Open CCS (Control Command and Signalling) On-board Reference Architecture) [5]. Konkret wird die On-board-Lokalisierung (LOC-OB) [6] von OCORA betrachtet. Die LOC-OB-Architektur umfasst fahrzeugseitige Sensoren und Systeme sowie Algorithmen für deren Verarbeitung. Die LOC-OB-Hardware kann GNSS-Empfänger und -Antennen, inertielle Messeinheiten (IMU – Inertial Measurement Units), Geschwindigkeitssensoren und mehr enthalten. Die algorithmische Verarbeitung ihrer Daten innerhalb von LOC-OB liefert absolute Positionsinformationen und andere kinematische Größen. Somit geht LOC-OB über die Odometrie hinaus, die bereits in ETCS [1] eingesetzt wird. LOC-OB als eigenständiges On-board-Modul kann im Gegensatz zur Lokalisierung als Teil eines ETCS-On-board-Monolithen die Entwicklung entsprechender Branchenlösungen vereinfachen. Die Möglichkeit, aus einer Reihe von LOC-OB-Produkten zu wählen, kann die Anschaffung und den Betrieb für Bahnbetreiber wirtschaftlicher machen.

Das Projekt folgt der LOC-OB-Idee. Die verwendete SBB-Hardware besteht aus GNSS, IMU und bahnspezifischen Geschwindigkeitssensoren, die auf Radumdrehungen und optischen Prinzipien basieren. Ihre Daten werden an einen Lokalisierungsalgorithmus weitergeleitet, der Positions- und Geschwindigkeitsschätzungen in vereinbarten Nachrichtenformaten berechnet. Eine weitere Architekturentscheidung ist die Verwendung von Kartendaten in den Lokalisierungsalgorithmen. Die Kartendaten umfassen sowohl Gleisgeometrie- als auch Topologieinformationen.

2 Architecture considerations

EGNSS MATE builds on current developments in the railway sector, including the Open CCS (Control Command and Signalling) On-board Reference Architecture (OCORA) [5]. It specifically addresses the Localisation On-board (LOC-OB) [6] within OCORA. The LOC-OB architecture comprises On-board sensors and systems as well as the algorithms for processing them. LOC-OB On-board hardware can contain GNSS receivers and antennas, inertial measurement units (IMU), velocity sensors and more. The algorithmic processing of the data within LOC-OB provides absolute position information and several other kinematic quantities. Hence, LOC-OB goes beyond the odometry already employed in ETCS [1]. LOC-OB can simplify the development of respective industry solutions as an independent On-board module in contrast to localisation as part of an ETCS On-board monolith. The ability to select from a range of LOC-OB products can render acquisition and operation more economical for railway operators.

The project follows the LOC-OB concept. The employed SBB hardware set-up comprises GNSS, IMU and railway-specific velocity sensors based on wheel rotation and optical principles. Their data is provided to a localisation algorithm that computes position and velocity estimates in agreed message formats. A separate architecture decision involves the use of map data in the localisation algorithms. The map data comprises both track geometry and topology information.

3 SBB measurement and map data

A certain highlight of the EGNSS MATE project is the fact that all the developments are supported by actual SBB data. This includes several different sources.

3 SBB-Fahrzeugdaten und die digitale Karte

Ein besonderes Merkmal des EGNSS-MATE-Projekts ist, dass alle Entwicklungen durch aktuelle SBB-Daten unterstützt werden. Dazu gehören mehrere verschiedene Quellen.

Erstens stellt SBB digitale Kartendaten für das gesamte Streckennetz mit mehr als 66 000 Gleisabschnitten und einer Gesamtlänge von mehr als 10 000 km zur Verfügung. Diese Informationen wurden aus den Daten abgeleitet und umfassen z.B. auch Rangierbahnhöfe. Für jeden Gleisabschnitt sind geografische Messpunkte mit einer räumlichen Auflösung von 10 Metern oder besser verfügbar. Informationen zur Gleisgeometrie (Überhöhung, Neigung, Azimut) sind für jeden Messpunkt enthalten.

Zweitens hat die SBB ihren Telekommunikations-Messwagen mit einer umfangreichen Hardwareausstattung versehen. Diese umfasst ein Sensor-Set-Up (tactical-grade) für die in EGNSS MATE entwickelten Lokalisierungsalgorithmen und ein zweites Set-Up mit präziseren Sensoren (navigation-grade), das für die Berechnung einer Grundwahrheit verwendet wird. Ersteres besteht aus einem handelsüblichen GNSS-Empfänger, einer MEMS IMU, einem Radtachometer und einem optischen Geschwindigkeitsmesser. Letzteres besteht aus einem weiteren GNSS-Empfänger (unterstützt durch RTK-GNSS), einer IMU mit Ringlaser-Gyroskop und einem Radtachometer, die alle mit einem kommerziellen Sensorfusionsalgorithmus integriert sind, um präzise Positionsdaten zu liefern. Außerdem steht ein Eurobalise-Lesegerät für die Validierung zur Verfügung. Das Fahrzeug dient in erster Linie der Überwachung von Mobilfunksystemen auf dem Schweizer Schienennetz. Es deckt dieses Netz mindestens einmal im Jahr ab, was die Erfassung umfangreicher Datensätze über ein breites Spektrum unterschiedlicher Umwelt- und Betriebsszenarien ermöglicht.

Drittens verfügt die SBB über Fahrstraßeninformationen für die Zugbewegungen. In einem aufwendigen Verfahren werden die Positionsdaten der Präzisionshardware mit Balisendaten, der digitalen Karte und den Fahrstraßen abgeglichen, um die Grundwahrheit zu erhalten. Zu den einzelnen Schritten gehören beispielsweise das Cross-Matching der empfangenen Balisennachrichten mit den Positionen zu den jeweiligen Zeitstempeln. Weiterhin werden die relativen Entfernungen zwischen den Balisen mit den Entfernungen in der Karte abgeglichen.

Zudem werden besondere Messkampagnen mit dem Fahrzeug durchgeführt, um experimentelle Daten aufzuzeichnen und spezifische Szenarien zu testen, die im regulären Betrieb nicht abgedeckt werden. Eine dreitägige Kampagne im November 2023 lieferte 18 Stunden Daten über 1 170 Gleiskilometer (Bild 2). Die Aufnahmen umfassen anspruchsvolle Umgebungen für den GNSS-Empfang, wie die Lötschberglinie in den Schweizer Alpen und städtische Umgebungen in der Nähe von Lausanne. Außerdem wurde Rangierbetrieb im Bahnhof von Brig durchgeführt. Für die kartengestützte Ortung ist das Rangieren eine besondere Herausforderung, da Weichen in hoher Frequenz passiert werden. Eine weitere Testkampagne findet im Mai 2024 statt, um die Anfälligkeit der entwickelten Lokalisierungslösung für absichtliche GNSS-Störungen und Spoofing-Angriffe zu testen.

4 Lokalisierungsalgorithmen und Software

Die Schätzung der Position und Geschwindigkeit eines Schienenfahrzeugs mithilfe von On-board-Sensorik ist in vielerlei Hinsicht eine große Herausforderung. Einerseits werden im Eisenbahn- und ETCS-Kontext sehr strenge Anforderungen an die Verfügbarkeit und Genauigkeit der Ortung gestellt. Es bedarf einer sorgfältigen

Erstens, digitale Karte-Daten sind durch SBB für ihr gesamtes Netzwerk umfassend bereitgestellt, bestehend aus mehr als 66.000 Gleisabschnitten mit einer Gesamtlänge von über 10.000 km. Diese Informationen wurden aus den Daten abgeleitet und umfassen beispielsweise auch Rangierbahnhöfe. Für jeden Gleisabschnitt sind geografische Messpunkte mit einer räumlichen Auflösung von 10 Metern oder besser verfügbar. Informationen zur Gleisgeometrie (Überhöhung, Neigung, Azimut) sind für jeden Messpunkt enthalten.

Zweitens hat die SBB ihren Telekommunikations-Messwagen mit einer umfangreichen Hardwareausstattung versehen. Diese umfasst ein Sensor-Set-Up (tactical-grade) für die in EGNSS MATE entwickelten Lokalisierungsalgorithmen und ein zweites Set-Up mit präziseren Sensoren (navigation-grade), das für die Berechnung einer Grundwahrheit verwendet wird. Ersteres besteht aus einem handelsüblichen GNSS-Empfänger, einer MEMS IMU, einem Radtachometer und einem optischen Geschwindigkeitsmesser. Letzteres besteht aus einem weiteren GNSS-Empfänger (unterstützt durch RTK-GNSS), einer IMU mit Ringlaser-Gyroskop und einem Radtachometer, die alle mit einem kommerziellen Sensorfusionsalgorithmus integriert sind, um präzise Positionsdaten zu liefern. Außerdem steht ein Eurobalise-Lesegerät für die Validierung zur Verfügung. Das Fahrzeug dient in erster Linie der Überwachung von Mobilfunksystemen auf dem Schweizer Schienennetz. Es deckt dieses Netz mindestens einmal im Jahr ab, was die Erfassung umfangreicher Datensätze über ein breites Spektrum unterschiedlicher Umwelt- und Betriebsszenarien ermöglicht.

Drittens verfügt die SBB über Fahrstraßeninformationen für die Zugbewegungen. In einem aufwendigen Verfahren werden die Positionsdaten der Präzisionshardware mit Balisendaten, der digitalen Karte und den Fahrstraßen abgeglichen, um die Grundwahrheit zu erhalten. Zu den einzelnen Schritten gehören beispielsweise das Cross-Matching der empfangenen Balisennachrichten mit den Positionen zu den jeweiligen Zeitstempeln. Weiterhin werden die relativen Entfernungen zwischen den Balisen mit den Entfernungen in der Karte abgeglichen.

Zudem werden besondere Messkampagnen mit dem Fahrzeug durchgeführt, um experimentelle Daten aufzuzeichnen und spezifische Szenarien zu testen, die im regulären Betrieb nicht abgedeckt werden. Eine dreitägige Kampagne im November 2023 lieferte 18 Stunden Daten über 1 170 Gleiskilometer (fig. 2). Die Aufnahmen umfassen anspruchsvolle Umgebungen für den GNSS-Empfang, wie die Lötschberglinie in den Schweizer Alpen und städtische Umgebungen in der Nähe von Lausanne. Außerdem wurde Rangierbetrieb im Bahnhof von Brig durchgeführt. Für die kartengestützte Ortung ist das Rangieren eine besondere Herausforderung, da Weichen in hoher Frequenz passiert werden. Eine weitere Testkampagne ist für Mai 2024 geplant, um die Anfälligkeit der entwickelten Lokalisierungslösung für absichtliche GNSS-Störungen und Spoofing-Angriffe zu testen.

4 Localisation algorithms and software

Estimating the position and velocity of a rail vehicle from On-board sensor data is a challenging topic in many aspects. On the one hand, the railway and ETCS contexts dictate immensely strict requirements for localisation availability and accuracy. Careful risk assessment, systematic testing and validation and certification are needed. On the other hand, the available (and economically viable) On-board hardware provides a range of technical challenges and limitations. These include GNSS signal reception issues, IMU bias and calibration errors and slip and slide in wheel rotation as examples of sensor-specific phenomena. Moreover, the combination of multiple streams of sensor data with varying sampling rates and intermediate outages (especially GNSS) must be performed in a robust, traceable and modular manner.

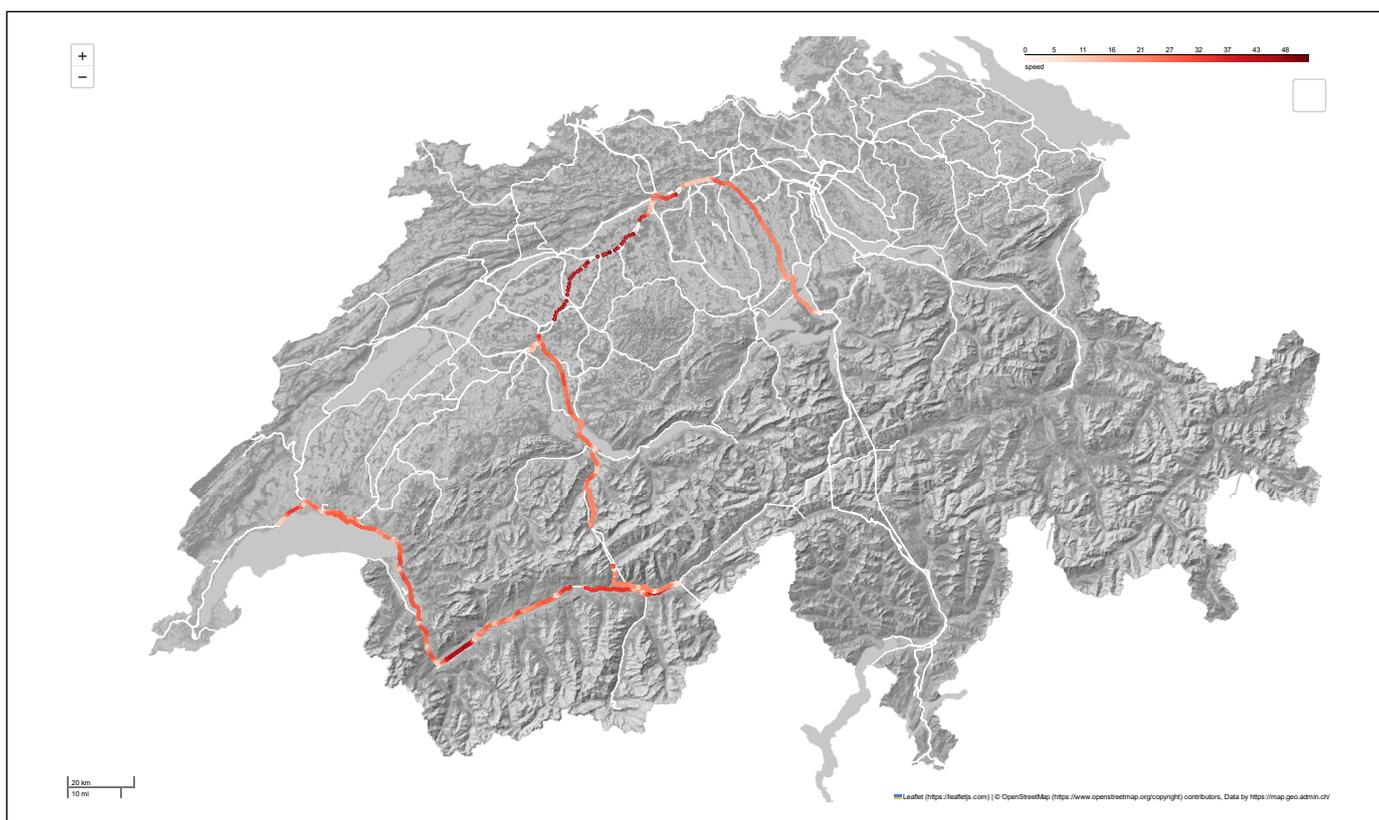


Bild 2: Messdaten einer Kampagne im November 2023 auf dem SBB-Schiennetz

Fig. 2: Measurement campaign data from November 2023 on the SBB railway network

Quelle / Source: DLR, Hintergrundkarte / background map <https://map.geo.admin.ch/>

tigen Risikobewertung, systematischer Tests und Validierungen sowie einer Zertifizierung. Andererseits zeigt die verfügbare (und wirtschaftlich vertretbare) On-board-Hardware eine Reihe von technischen Herausforderungen und Einschränkungen. Dazu gehören Probleme beim GNSS-Signalempfang, IMU-Kalibrierfehler und Schlupf und Rutschen bei der Messung von Radumdrehungen. Weiterhin muss die Kombination mehrerer Sensordatenströme mit unterschiedlichen Abtastraten und zwischenzeitlichen Ausfällen (insbesondere GNSS) auf robuste, nachvollziehbare und modulare Weise durchgeführt werden.

EGNSS MATE konzentriert sich auf die technischen Herausforderungen und entwickelt Lokalisierungsalgorithmen für die systematische Kombination von Sensordaten. Es wird eine Sensorfusionsperspektive angenommen, mit Zustandsraummodellen und Kalman-Filtern (KF) als Werkzeugen [7, 8]. Dies gewährleistet Modularität in Bezug auf die eingesetzten Sensoren und ermöglicht eine konstante Ausgaberate unabhängig von den einzelnen Sensorraten. Darüber hinaus werden Unsicherheiten in allen Variablen (Sensormessungen, Schätzungsergebnisse usw.) systematisch behandelt. Die Position wird im Zustandsvektor als Distanz entlang eines Gleisabschnitts im Eisenbahnnetz eingebunden. Diese Wahl ermöglicht es, das Wissen über die gleisgebundene Fahrzeugbewegung zu nutzen und so Schätzfehler zu reduzieren. Es erfordert jedoch die enge Einbindung von Kartendaten in den Lokalisierungsalgorithmus.

Der Ansatz von EGNSS MATE nutzt die Gleisgeometrien und die Topologie der digitalen Karte. Eine Distanzschätzung auf einem Gleisabschnitt kann mithilfe der Streckengeometrie auf eine globale 2D- oder 3D-Position abgebildet werden. Dies ermöglicht den Vergleich mit GNSS-Messdaten und die Verarbeitung in einem KF-Mess-Update. Pfade werden als Abfolge mehrerer ver-

EGNSS MATE concentrates on the technical challenges and contributes localisation algorithms for the systematic combination of sensor data. A sensor fusion perspective is assumed with state space models and Kalman filters (KF) at its core [7, 8]. This ensures modularity with regard to the employed sensors and allows for a constant output rate regardless of the individual sensor input rates. Furthermore, uncertainties in all variables of interest (sensor measurements, estimation results, etc.) are treated systematically. The position is represented as a distance along a path in the railway network in the employed state vector. This choice helps to exploit the knowledge about the track-bound vehicle motion and reduces any estimation errors. However, it requires the tight integration of the map data into the localisation algorithm.

The approach in EGNSS MATE makes use of the track geometries and the topology of the digital map. An on-track distance estimate on a given track can be mapped to a 2D or 3D global position using the track geometry. This facilitates a comparison with the GNSS measurement data in a KF measurement update. Railway paths are introduced as sequences of several adjacent track sections that can be treated in the same way as a track (simply put, a long line geometry). The necessary extension of the railway paths (as the vehicle traverses the network) is achieved using topology information (which track can be visited next after the current track).

A critical point in this regard concerns the fact that the railway path is not known in EGNSS MATE. Therefore, several railway path hypotheses and on-path KF are considered in parallel within a localisation filter bank. Each KF corresponds to a railway path hypothesis. All the KF receive the same sensor data. New railway path hypotheses with associated KF are

bundener Gleisabschnitte eingeführt, die wie ein Gleis behandelt werden können (einfach ausgedrückt, eine lange Liniengeometrie). Die notwendige Erweiterung von Pfaden (beim Befahren des Netzes) wird mithilfe der Topologiedaten umgesetzt (welche Gleisabschnitte folgen auf das aktuell befahrene Gleis usw.).

Ein kritischer Punkt in diesem Zusammenhang ist, dass der befahrene Pfad in EGNSS MATE nicht bekannt ist. Daher werden mehrere Pfadhypothesen und pfadgebundene KF parallel in einer Lokalisierungfilterbank betrachtet. Jedes KF entspricht einer Pfadhypothese. Alle KF erhalten die gleichen Sensordaten. Neue Pfadhypothesen mit zugehörigen KF werden der Filterbank hinzugefügt, sobald sich das Fahrzeug einer Weiche nähert. Die Güte oder Performance aller Pfadhypothesen in der Filterbank wird anhand der Residuen der jeweiligen KF überwacht. Die Intuition dahinter ist, dass falsche Pfadhypothesen die Messungen nicht so gut widerspiegeln wie der korrekte Pfad. KF und Pfadhypothesen geringer Güte werden schließlich aus der Filterbank entfernt.

Ein vereinfachtes Schema des Filterbank-Lokalisierungsalgorithmus ist in Bild 3 dargestellt. Illustriert in grau sind die statischen Eingabedaten, die beim Systemstart geladen werden (Kartendaten und Konfiguration des Algorithmus). Die Datenströme verschiedener Sensoren und Systeme sind in orange dargestellt. Auf der Grundlage der Konfiguration und der ersten Messungen wird die Lokalisierungfilterbank mit wahrscheinlichen Anfangspfadhypothesen initialisiert (grauer Block). Die folgende Iteration umfasst die blauen Blöcke. In den Phasen des Pfadmanagements werden die Pfadhypothesen durch Hinzufügen von Gleisen erweitert (dies kann zu neuen Hypothesen führen) und durch Entfernen von Gleisen verkürzt (dies vermeidet unnötig lange Pfade). Die Verarbeitung der Messungen erfolgt dann mit KF-Zeit- und KF-Mess-Updates für jedes Filter. Jedes KF gibt seine Messresiduen zur Gütebewertung an die Filterbank. Schließlich werden die Ausgangsdaten der Lokalisierung aus den KF in der Filterbank berechnet.

EGNSS MATE entwickelt nicht nur Algorithmen, sondern auch Open-Source-Software. Der Code für die Lokalisierung ist in Python implementiert und wird am Ende des Projekts veröffentlicht.

5 GNSS-spezifische Themen

Die Nutzung von GNSS im Eisenbahnbereich ist ein Thema mit viel Potenzial, aber die Risiken müssen gut verstanden und schließlich beherrscht werden. GNSS-Signale werden von Satelliten im Weltraum gesendet und von den GNSS-Antennen auf Fahrzeugen empfangen. Viele Schienenumgebungen schwächen oder verhindern den Empfang von GNSS-Signalen. Einige Beispiele sind Tun-

added to the filter bank whenever the vehicle approaches a switch point. The performance of all the path hypotheses in the filter bank is monitored using the measurement residuals from the respective KF. The intuition behind this lies in the fact that the wrong railway path hypotheses do not represent the measurements as well as the correct path. Any KF and path hypotheses that do not perform well are eventually dropped from the filter bank.

A simplified schematic of the filter bank localisation algorithm is given in fig. 3. It shows the static input data loaded at system start-up in grey (map and algorithm configuration data). The streams of different On-board sensor and system data are shown in orange. The localisation filter bank is initialised (grey block) with the likely initial railway paths based on the configuration and the first measurements. The subsequent iteration comprises the blue blocks. In railway path management stages, the paths are extended by appending tracks (which can result in new hypotheses) and shortened by removing tracks (which avoids unnecessarily long paths). The processing of the measurements is then achieved using KF time and measurement updates for each filter. Each KF outputs its measurement residuals to the filter bank for performance assessment. Finally, the localisation output is computed from the KF in the filter bank.

EGNSS MATE is not only developing the algorithms, but also the localisation software for open-source publication. All the code is implemented in Python and will be made available at the end of the project.

5 Specific GNSS topics

The use of GNSS in the railway domain is a topic with much potential, but its risks must be well-understood and eventually mitigated. GNSS signals are transmitted by satellites in space and received by On-board GNSS antennas. Many rail environments weaken or prevent the reception of GNSS signals. Obvious examples are tunnels, urban, indoor or underground stations. In addition, there is also the less predictable risk of deliberate radio-frequency interference (RFI) affecting the GNSS signals used for On-board localisation.

Deliberate interference is now a significant problem for civilian GNSS applications and not only for the armed forces. Devices that disrupt GNSS receivers, such as so-called Personal Protection Devices (PPD), are available on the market at very low prices and therefore constitute a potential threat [9]. EGNSS MATE addresses the jamming and spoofing types of

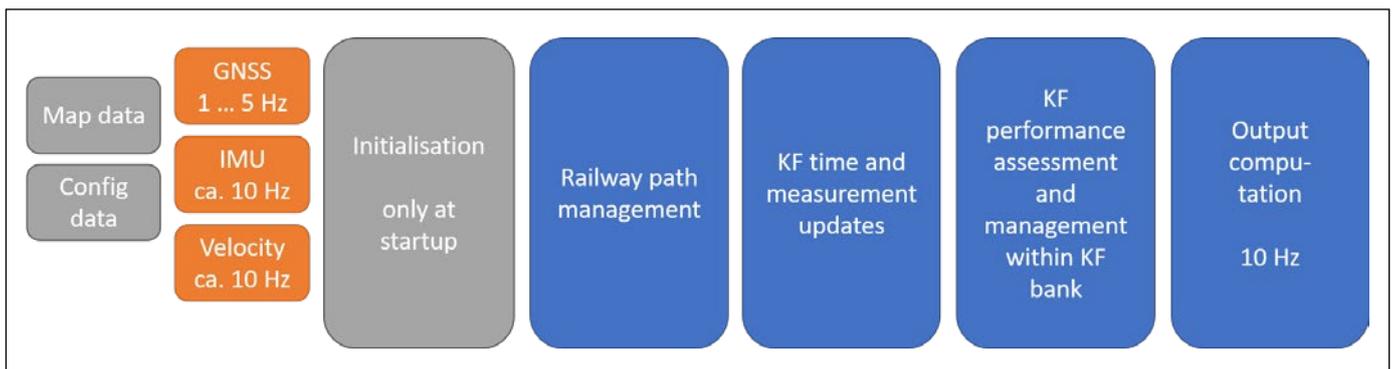


Bild 3: Struktur der KF-Bank für die Lokalisierung

Fig. 3: Structure of the localisation KF bank

Quelle / Source: DLR

nel, städtische Bereiche, überdachte oder unterirdische Bahnhöfe. Darüber hinaus besteht das Risiko von Radio-Interferenz-Störungen (RFI) der GNSS-Signale.

Absichtlich verursachte Störungen sind heute nicht nur für die Streitkräfte, sondern auch für zivile GNSS-Anwendungen ein großes Problem. Geräte, die GNSS-Empfänger stören (sogenannte Personal Protection Devices, kurz PPD) sind zu niedrigen Preisen auf dem Markt erhältlich und stellen eine potenzielle Bedrohung dar [9]. EGNSS MATE befasst sich mit den Inferenzarten Jamming und Spoofing. Jamming beschreibt eine Bedrohung, bei der ein Angreifer absichtlich ein Störsignal höherer Leistung in relevanten Frequenzbändern sendet. GNSS-Nutzer in der Umgebung können so die echten GNSS-Signale nicht mehr empfangen. Unter Spoofing versteht man einen Angriff, bei dem absichtlich gefälschte Satellitensignale an den Empfänger gesendet werden, um so die Berechnung falscher Positions-, Geschwindigkeits- oder Zeitlösungen (PVT – Position, Velocity, Time) zu forcieren. Beide Bedrohungen haben das Ziel, PVT-Lösungen zu degradieren. Jamming zielt auf Verfügbarkeit, Spoofing auf Integrität.

Die Auswirkungen und die Bedeutung des Umgangs mit RFI-Bedrohungen wurden zuvor an RFI-Fällen in der Luftfahrt aufgezeigt. Auch im Bahnbereich gibt es Arbeiten zur Erkennung von GNSS-Störungen [10]. Unseres Wissens gibt es jedoch noch keine groß angelegte statistische Analyse von zeitlich umfassenderen Aufzeichnungen. Ein Ziel von EGNSS MATE ist es daher, umfangreiche GNSS-Datensätze auf Schienenfahrzeugen zu sammeln und sie auf RFI-Ereignisse hin zu analysieren. Analysen von Kampagnendaten aus dem November 2023 zeigen eine hohe Anzahl von RFI-Ereignissen im GNSS L1/E1-Band. Es wurde eine spezielle Testkampagne mit sieben RFI-Szenarien geplant, die im Mai 2024 für verschiedene Störungsprofile (Chirp, angepasste Modulation, Sägezahn-Chirp-Störungen) unter verschiedenen Umwelt- (Stadt, Land) und Betriebsbedingungen (unterwegs, im Stand, beim Rangieren, beim Anfahren) durchgeführt wird.

Zusätzlich zu RFI analysiert EGNSS MATE die Nutzung der neuen Galileo Services HAS und OSNMA für Eisenbahnanwendungen. Der HAS-Dienst bietet eine verbesserte PVT-Lösung, OSNMA eine robuste Maßnahme gegen Spoofing-Angriffe.

inference. Jamming describes a threat in which an entity intentionally tries to prevent a GNSS processing device from receiving satellite signals by transmitting an interfering, higher powered signal in the same radio frequency bands as those used by the GNSS receiver. Spoofing is understood to be a method that intentionally transmits fabricated, fake satellite signals towards the receiver forcing it to calculate erroneous position, velocity, or time (PVT) solutions. Both have the common goal of degrading the PVT solution in terms of its availability (jamming) or integrity (spoofing).

The impact and importance of addressing RFI threats has been demonstrated by RFI cases affecting aeronautical users. Efforts have been made in the railway context with regard to detecting GNSS interference [10]. To our knowledge, though, no large-scale statistical analysis supported by ground-based infrastructure for detecting GNSS interference in the railway domain is yet available. It is an objective of EGNSS MATE to collect real world GNSS data and analyse it in terms of RFI events. Analyses performed on data collected during November 2023 have revealed a high number of RFI events in the GNSS L1/E1 band. A dedicated test campaign of 7 test RFI scenarios has been defined and will be carried out in May 2024 for different interference profiles (chirp, matched modulation and saw-tooth chirp jamming) occurring under different environmental (urban, rural) and operating conditions (en-route, parked stable, shunting, start-up).

In addition to RFI, EGNSS MATE is also analysing the use of the new HAS and OSNMA Galileo services for railway applications. The HAS service provides an improved PVT solution, while OSNMA constitutes a robust measure against spoofing attacks.

6 Conclusion and outlook

Large scale testing of the developed algorithms and specific testing in jamming and spoofing scenarios will be undertaken in autumn this year. We expect to present the full results of the EGNSS MATE project in early 2025. ■

Progress Rail

A Caterpillar Company

MEET US!

InnoTrans 2024 | Hall 2.2, Booth 130

6 Fazit und Ausblick

Groß angelegte Tests der entwickelten Algorithmen und spezielle Tests für Störungs- und Spoofing-Szenarien werden im Herbst dieses Jahres durchgeführt. Umfassende Ergebnisse des EGNSS-MATE-Projekts werden Anfang 2025 erwartet. ■

Finanzielle Unterstützung wird durch das ESA NAVISP Element 2 Programm (Activity Code: NAVISP-EL2-131) gewährt, das der Förderung der Wettbewerbsfähigkeit der PNT-Industrie (Positionierung, Navigation und Zeitmessung) gewidmet ist.

Financial support has been provided by the ESA NAVISP Element 2 Programme (Activity Code: NAVISP-EL2-131), which is devoted to support the competitiveness of the PNT (Positioning, Navigation and Timing) industry.

AUTOREN | AUTHORS

Dr. Michael Roth

Wissenschaftlicher Mitarbeiter / *Researcher*
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. / *German Aerospace Center*
Institut für Verkehrssystemtechnik / *Institute of Transportation Systems*
Adresse / *Address*: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig
E-Mail: m.roth@dlr.de

Dr. Judith Heusel

Wissenschaftlicher Mitarbeiterin / *Researcher*
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. / *German Aerospace Center*
Institut für Verkehrssystemtechnik / *Institute of Transportation Systems*
Adresse / *Address*: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig
E-Mail: judith.heusel@dlr.de

Keivan Kiyanfar

Wissenschaftlicher Mitarbeiterin / *Researcher*
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. / *German Aerospace Center*
Institut für Verkehrssystemtechnik / *Institute of Transportation Systems*
Adresse / *Address*: Rutherfordstraße 2, D-12489 Berlin
E-Mail: keivan.kiyanfar@dlr.de

Dr. Andreas Wenz

Technischer Projektleiter Lokalisierung / *Technical Project Manager Localisation*
SBB AG
Infrastruktur-NAT-BST-DEV
Fahrzeugprojekte / *Rolling Stock Projects*
Adresse / *Address*: Hilfikerstraße 3, CH-3000 Bern 65
E-Mail: andreas.wenz@sbb.ch

Sebastian Ohrendorf-Weiss

Projektleiter Lokalisierung / *Project Manager Localisation*
SBB AG
Infrastruktur-NAT-BST-DEV
Fahrzeugprojekte / *Rolling Stock Projects*
Adresse / *Address*: Hilfikerstraße 3, CH-3000 Bern 65
E-Mail: sebastian.ohrendorf-weiss@sbb.ch

Dr. Paulo Mendes

Projektleiter & Analyst GNSS / *Project Manager & Analyst GNSS*
Satellitennavigation / *Satellite Navigation*
IABG mbH
InfoKom/CT20
Adresse / *Address*: Einsteinstraße 20, D-85521 Ottobrunn
E-Mail: silveira-mendes@iabg.de

Dr. Alice Martin

Ingenieurin für Navigation / *Navigation Engineer*
Satellitennavigation / *Satellite Navigation*
IABG mbH
InfoKom/CT20
Adresse / *Address*: Einsteinstraße 20, D-85521 Ottobrunn
E-Mail: martina@iabg.de

Nikolas Dütsch

Ingenieur für Navigation / *Navigation Engineer*
Satellitennavigation / *Satellite Navigation*
IABG mbH
InfoKom/CT20
Adresse / *Address*: Einsteinstraße 20, D-85521 Ottobrunn
E-Mail: duetsch@iabg.de

LITERATUR | LITERATURE

- [1] Schnieder, L.: *European Train Control System (ETCS)*, 3rd ed. Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 2022
- [2] Pacht, J.: *Railway Signalling Principles*, Braunschweig, 2020
- [3] EGNSS MATE Website, Accessed: Apr. 26, 2024. <https://www.dlr.de/en/ts/research-transfer/projects/egnss-mate-map-supported-gnss-localisation-for-european-railways>
- [4] ESA NAVISP Website, Accessed: Apr. 26, 2024. <https://navisp.esa.int/>
- [5] OCORA, Accessed: Apr. 26, 2024. <https://github.com/OCORA-Public/Publications>
- [6] OCORA, *Localisation On-board (LOC-OB)*, OCORA-TWS01-100, Jun. 2023
- [7] Gustafsson, F.: *Statistical Sensor Fusion*. Lund, Sweden: Studentlitteratur, 2010
- [8] Roth, M.; Heusel, J.; Groos, J. C.: "Kartengestützte GNSS/Multi-Sensor-Ortung von Schienenfahrzeugen," *EI – DER EISENBAHNINGENIEUR* 12/2023
- [9] Borio, D.; Dovis, F.; Kuusniemi, H.; Lo Presti, L.: "Impact and Detection of GNSS Jammers on Consumer Grade Satellite Navigation Receivers," *Proceedings of the IEEE*, Jun. 2016
- [10] Vennarini, A.; Coluccia, A.; Gerbeth, D.; Crespillo, O. G.; Neri, A.: "Detection of GNSS Interference in Safety Critical Railway Applications using Commercial Receivers," *Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2020)*, Sep. 2020