

Technologisches Umfeld für eine kontinuierliche und hochgenaue Lokalisierung von Zügen im ATO GoA 4-Modus

Quelle: DB Regio AG

Lokalisierungsmethoden für die vollautomatisierte Zugfahrt

Lokalisierung für den Use Case vollautomatisierte Bereit- und Abstellungsfahrten im Projekt AutomatedTrain. Über Herausforderungen und weitere Einsatzmöglichkeiten

FABIAN PUCKS | RAYMOND SCHULZ |
ANANTHAKRISHNA IRVATHRAYA |
ZOLTÁN ÁBRÁM

Art und Umfang der Reaktion auf Objekte im offenen Bahnbereich hängen maßgeblich von der absoluten Lage dieser im Streckennetz ab. Damit ein GoA 4-System (GoA – Grade of Automation) diese bestimmen kann, ist eine kontinuierliche und hochgenaue Positionsbestimmung des Zuges erforderlich und zentrale Voraussetzung für den sicheren Betrieb einer vollautomatisierten, fahrerlosen Zugfahrt im ATO GoA 4-Modus (ATO – Automatic Train Operation). Dieser Beitrag gibt einen Einblick in die Herleitung der Anforderungen, Lösungsansätze, Testmöglichkeiten sowie weitere Einsatzmöglichkeiten.

Einführung

Der zunehmende Fachkräftemangel in zentralen Funktionen, wie z.B. Triebfahrzeugführende (Tf), stellt Betreiber vor erhebliche Herausforderungen und erfordert einen möglichst effizienten Einsatz dieser Personen [1]. Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) geförderte Entwicklungsprojekt AutomatedTrain [2] ist eine Kooperation aus neun Partnern verschiedener Branchen. Im Rahmen des Projekts werden Systeme für vollautomatisierte Bereitstellungs- und Abstellungsfahrten spezifiziert, entwickelt und erprobt [3]. Dazu zählen die Ableitung der Anforderungen sowie die Umsetzung geeigneter Lokalisierungsmethoden und ihrer Bewertung mittels eines Referenzsystems. In dem Projekt wird bewusst die zeitnahe Umsetzung pri-

orisiert und daher bewusst auf den Einsatz von KI-basierter Algorithmen in sicherheitskritischen Pfaden verzichtet.

Warum ist eine hochgenaue absolute Zugposition erforderlich?

Tf müssen gemäß Richtlinie (Ril) 408.0581 [4] und 408.0581A01 [5] der Deutschen Bahn AG (DB) auf Personen und Objekte im Bahnbereich reagieren. Die erforderliche Reaktion hängt im Wesentlichen von ihrer Position im Bahnbereich ab. Tf müssen kontinuierlich bewerten, ob sich ein Objekt oder eine Person innerhalb oder außerhalb definierter Zonen befindet (Abb. 1). Ein GoA 4-System benötigt diese Fähigkeit ebenfalls. Es benötigt für das erkannte Objekt eine absolute Koordinate, z.B. eine GPS-Position, um sie mit einer GPS referenzierten Karte vergleichen zu können. In-

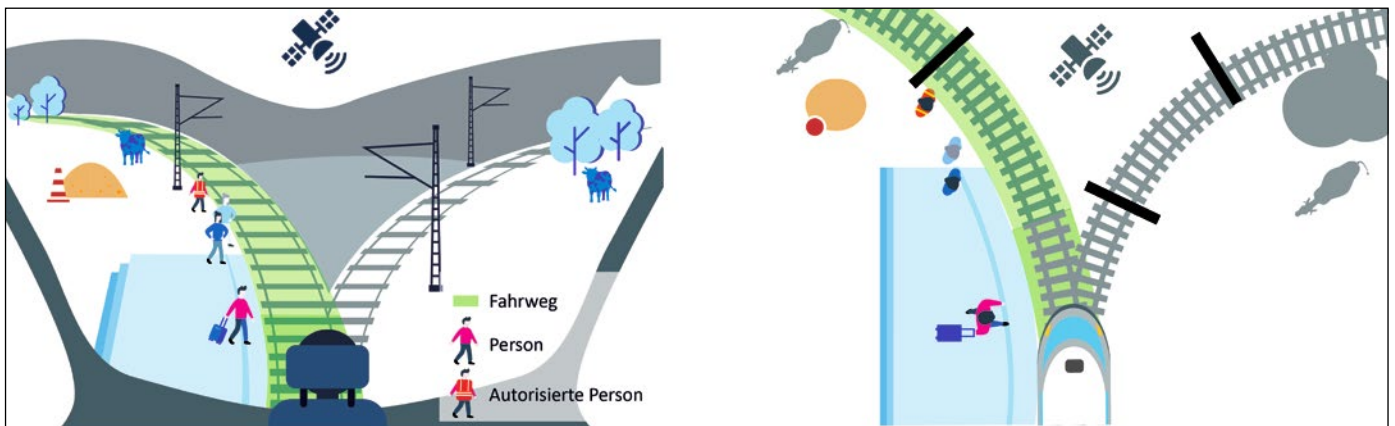


Abb. 1: Erkennung und Zuordnung von Personen am Bahnhof und im Gleisbereich (schematische Darstellung)

Quelle: Digitale Schiene Deutschland / DB InfraGO

nerhalb dieser Karte können dreidimensionale Zonen entlang der Strecke und des Bahnsteigs definiert werden. Die erforderlichen Reaktionen des GoA 4 fahrenden Zuges auf ein Objekt lassen sich somit je Zone definieren und abrufen [3].

Nach dem Ansatz gleicher Sicherheit muss ein ATO GoA 4-System das Risiko der Kollision mindestens gleichwertig vermeiden und allerdings, zur Aufrechterhaltung der Betriebsqualität, Fehlauflösungen vermeiden.

Die Sensoren eines GoA 4-Systems können die Umgebung in Fahrtrichtung nur relativ zur Zugspitze wahrnehmen. Erst in Kombination mit der absoluten Zugposition und der Verbauposition der Sensoren im Zug lassen sich absolute Objektpositionen ermitteln. Da die Zonen dreidimensional definiert sind und der Zug Bewegungen durch Gelände und Fahrwerk unterliegt, muss der Rechenweg vollständig dreidimensional ausgeführt werden: Karte, Zugposition, Sensorposition, Sensordaten. Zusätzlich müssen Geländeprofil, Fahrwerk, Gleisneigung, Gleiskrümmung und Gleisabstände bei Weichendurchfahrten dreidimensional betrachtet werden.

Die aus dem Rechenweg resultierende Ungenauigkeit der Objektposition ist die Summe der Fehler aller Komponenten im Rechenweg.

Wie werden Anforderungen an die absolute Zugposition definiert?

Tf erkennen Überschreitungen von Grenzen bei Personen oder anderen Objekten auf dem Bahnsteig oder im Lichtraum des Gleises auf Basis ihrer Ausbildung und jahrelanger Erfahrung. Ein GoA 4-System hat diese Erfahrung nicht. Das macht es erforderlich, die Entscheidungsgrundlagen durch konkrete Zahlen explizit zu definieren.

Sobald definiert ist, mit welcher Genauigkeit eine Objektposition bestimmt werden muss, entspricht diese der Anforderung an das Gesamtfehlerbudget, welches sich die beteiligten Systeme des Rechenweges untereinander aufteilen müssen.

Ein realistisches Beispiel für solch eine Genauigkeit ist die Schulterbreite einer Person bei einer Sichtweite von 50 m. Wären also alle übrigen Komponenten ideal und ohne Fehler, bliebe für die absolute Zugposition

ein tolerierbarer Fehler einer halben Schulterbreite – wenn die dreidimensionale Blickrichtung der Zugposition ebenfalls ohne Fehler ist.

Fehler in der Orientierung und der Position führen dazu, dass die detektierten Objekte fehlerhaft in die Karte der Zonen projiziert werden. Hindernisse könnten somit fälschlicherweise außerhalb des Lichtraumes und Personen auf dem Bahnsteig außerhalb des Bahnsteiges verortet werden. Strommasten könnten als Hindernisse in den Lichtraum wandern. Das GoA 4-System muss sich auf die Genauigkeit der Position und Orientierung verlassen können, um sicher im fahrerlosen Betrieb fahren zu können. Hieraus leiten sich Anforderungen an die funktionale Sicherheit der beteiligten Systeme ab [3, 2].

Ergeben sich Anforderungen aus dem Streckenverlauf?

Entlang einer absolut geraden Strecke kann sich ein Objekt nicht vor oder hinter dem Lichtraum befinden, sofern nicht das Ende des Gleisverlaufs oder das Ende der Movement Authority erreicht wurde. Ändert sich

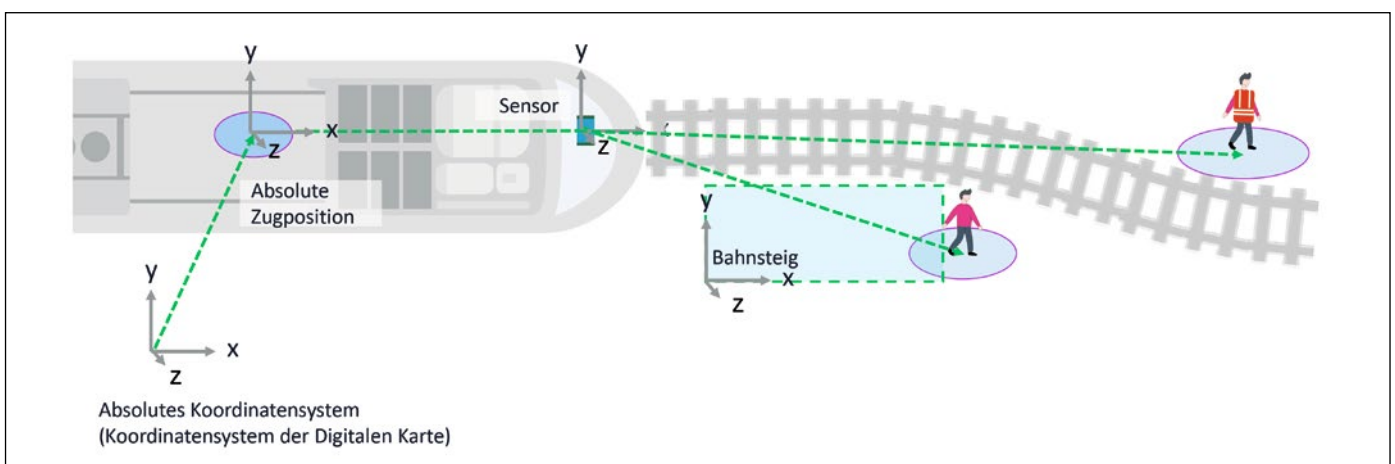


Abb. 2: Rechenweg zur Ermittlung der Objektposition (schematische Darstellung): Person vor dem Lichtraum und Person mit Warnweste hinter dem Lichtraum des Fahrweges. Im Gegensatz zu den absoluten Positionen des Zuges und des Bahnsteiges sind die Positionen des Sensors sowie der Personen relativ zum vorherigen Punkt.

Quelle: Digitale Schiene Deutschland / DB InfraGO

aber in Sichtweite der Sensoren die Krümmung des Streckenverlaufes, kann sich ein Objekt von der Zugspitze aus gesehen in einem Bogen vor oder hinter dem Lichtraum befinden (Abb. 2). Bei Fahrten über Weichen hat eine fehlerhafte Positionsannahme vor oder hinter der Weiche die größte Auswirkung auf die Berechnung der absoluten Objektposition. Nicht nur die Stellung der Weiche, auch der Abstand der Drehgestelle eines Waggons und der Gleise wirken sich auf die dynamische Bewegung der Zugspitze aus und müssen bei der Berechnung der Lokalisierung berücksichtigt werden. In AutomatedTrain wurden derartige Szenarien definiert und untersucht.

Erforderliche Lokalisierungsgenauigkeit anhand eines Streckenbeispiels

In einem Beispiel befindet sich ein GoA 4-Zug auf gerader Strecke kurz vor dem Übergang in einen Bogen mit 180 m Bogenradius (Abb. 3). Die Sensoren registrieren ein Objekt mit 50 cm Durchmesser (analog der Schulterbreite) direkt voraus. Tatsächlich befindet sich das Objekt gerade noch innerhalb des Lichtraumes des Bogens. Eine fehlerhafte Bestimmung der Zugposition in Fahrtrichtung würde dazu führen, dass die Objektposition um diese Distanz in Fahrtrichtung aus dem Lichtraum verschoben wird. Die Hälfte der Distanz, die das Objekt vollständig aus dem Lichtraum verschiebt, ist der maximal tolerierbare Lokalisierungsfehler in Fahrtrichtung in diesem Streckenbeispiel. Er beträgt aufgrund der Gleis- und Lichtraumgeometrie in diesem Fall etwa 60 cm. In Weichensituationen und bei Gleisneigungen erfordern die wechselnden Gleiskrümmungen und die Abstände der Fahrwerke komplexe Berechnungen der maximal tolerierbaren Lokalisierungsfehler.

Lokalisierungsmethoden für GoA 4 und deren Bewertung

Im Rahmen von AutomatedTrain wird untersucht, welche Lokalisierungssysteme unter welchen Randbedingungen und Streckenabschnitten ihre höchste Positionsgenauigkeit erreichen können und verfügbar sind.

ETCS

Das ETCS-System liefert zugseitig nur eine relative Position, sofern Balisen im Streckenabschnitt verfügbar sind. Der ETCS-Standard [6] fordert zwar höchste Zuverlässigkeit und Sicherheit, erlaubt aber Toleranzen in der Genauigkeit, die mit 5 % des Abstandes zur letzten Balise stetig zunehmen dürfen. Eine Fehlertoleranz von 50 cm wäre bei der Verwendung von Präzisionsbalisen bereits nach etwa 10 m erreicht.

GNSS

Ein satellitengestütztes Navigationssystem (GNSS, Global Navigation Satellite System) kann eine Genauigkeit im Zentimeterbereich erreichen, erfordert jedoch freie Sicht zu mindestens vier Satelliten [7] sowie das Ausbleiben von reflektierten Satellitensignalen (Mehrwegausbreitung) und Störsendern. Im Projekt AutomatedTrain wird untersucht, ob es möglich ist, den Sichtkontakt zu mindestens vier Satelliten entlang einer Strecke zur aktuellen Tageszeit vorherzusagen. Hierzu werden die Höhenprofile entlang der Strecke aus Geoinformationen der Digitalen Karte extrahiert und den aktuellen Satellitenpositionen gegenübergestellt. Wenn ein Satellit an der Zugposition verdeckt ist, seine Signale aber trotzdem empfangen werden, kann man davon ausgehen, dass diese Signale zuvor an Objekten wie z. B. einer Hauswand reflektiert wurden. Dies kann die Positionsberechnung um mehrere Meter

beeinflussen. Durch den Ausschluss solcher Satellitensignale kann die Positionsgenauigkeit erhöht werden [8, 9, 10, 11].

Landmarkenbasierte Lokalisierung

Die Algorithmen basieren auf der Wiedererkennung von Landmarken, die in hochgenauen Digitalen Karten verzeichnet sind. Die streckenseitigen Elemente des Bahnbetriebes (z.B. Strommasten, Schilder, Signale, Gleisverläufe) eignen sich hierfür ideal. Sie ermöglichen eine Lokalisierung im Genauigkeitsbereich der Sensoren (z.B. LiDAR im Zentimeterbereich) sowie eine hochgenaue Orientierungsschätzung, solange Landmarken detektiert werden können. Bei der Verwendung von aktiven Sensoren wie LiDAR oder Radar funktioniert die Detektion auch bei Dunkelheit. Die Algorithmen sind bereits in hoher Qualität verfügbar und können aus anderen Branchen adaptiert werden. Sie gelten im Rahmen des Projekts daher als bevorzugte Methode der absoluten Zuglokalisierung. Im Projekt Sensors4Rail wurde die landmarkenbasierte Lokalisierung bereits erfolgreich erprobt [12]. In AutomatedTrain stellen sich Teile des Projektes unter anderem der zentralen Herausforderung, welche CENELEC-Normen und Anforderungen an die funktionale Sicherheit für die Objekterkennung gelten und welche auch durch die absolute Zugposition erfüllt werden müssen [3, 13, 14, 15].

Kombination verschiedener Methoden

Eine Fusion verschiedener Sensoren hat die Aufgabe zu erkennen, welcher Sensor im aktuellen Moment die geringste Fehlergröße besitzt. Sie kann ggf. alle anderen Sensorsysteme geringer gewichten oder vollständig ignorieren. Für ein GoA 4-System ist es von entscheidender Bedeutung zu wissen, welche Streckenabschnitte und welche Umweltsituationen bestimmte Sensortypen benötigen. Dies kann in der Digitalen

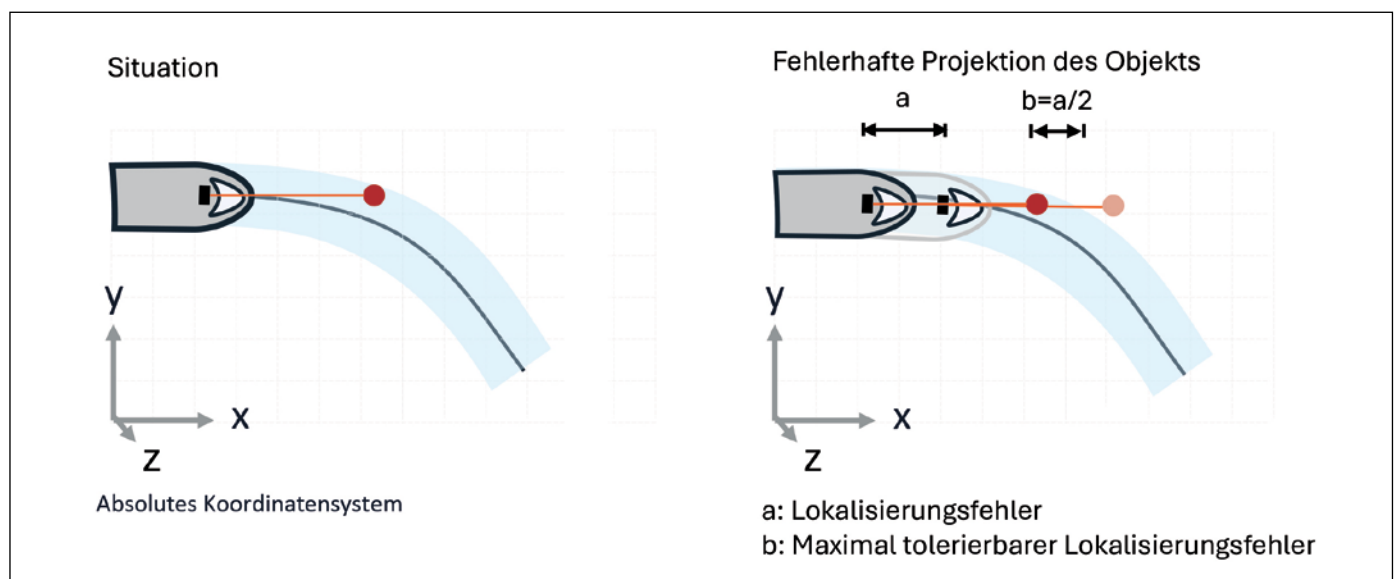


Abb. 3: Schematische Darstellung einer Situation vor einem Bogen mit möglichem Lokalisierungsfehler (a); b stellt den maximal tolerierbaren Lokalisierungsfehler dar.

Quelle: Digitale Schiene Deutschland / DB InfraGO

Karte hinterlegt werden. Eine zentrale Anforderung der funktionalen Sicherheit ist die verlässliche Kenntnis, welche Lokalisierungsgenauigkeit dem System aktuell zur Verfügung steht. Letztendlich obliegt die gewählte Kombination der Methoden dem Hersteller.

Nachweis der Genauigkeit einer Position (GroundTruth)

Um die erforderliche funktionale Sicherheit des Lokalisierungssystems nachweisen zu können, muss unter anderem die Genauigkeit der ermittelten Positionen im Falle eines fahrenden Zuges belegt werden. Hierfür wird ein Referenzsystem benötigt, welches als sogenannte GroundTruth gewählt wird: Ein zweites unabhängiges Lokalisierungssystem, das idealerweise zehnmal genauer ist als das zu überprüfende System (ANSI/NCSLI Z540.3:2006). Im Projekt AutomatedTrain werden verschiedene Methoden für GroundTruth-Systeme evaluiert (z.B. GNSS/RTK) und auf ihre Anwendbarkeit [8, 10, 11], ob sie als Referenzsystem für den Nachweis der erforderlichen Genauigkeit und Zuverlässigkeit im Bahnbereich dienen können.

Darüber hinaus wird eine Alternative zu der klassischen Nutzung eines Referenzsystems geprüft [16]: Ein zusätzlich am fahrenden Zug angebrachtes LiDAR-System beobachtet die Umgebung. Seine Messungen werden mit den zu überprüfenden Lokalisierungspositionen des fahrenden Zuges kombiniert. Dadurch wird die Bewegung des Zuges aus den LiDAR-Aufnahmen entfernt. Das Ergebnis ist ein unbewegtes Abbild der statischen Umgebung (Strommasten, Bäume). Fehler in der Lokalisierung führen jedoch zu einer Unschärfe in dieser Abbildung von statischen Objekten. Die Konturen von Bäumen oder Strommasten werden ungenauer abgebildet, als sie das LiDAR-System im Stillstand darstellen könnte.

Das Ausmaß der Unschärfe repräsentiert den Gesamtfehler im System, der im Wesentlichen den Positionsfehler der Lokalisierung enthält (neben weiteren Fehlergrößen, wie Kalibrierung und systematische Fehler, Abb. 2). Hier ließe sich ein maximal zulässiger Gesamtfehler definieren. Da der Gesamtfehler auch den Lokalisierungsfehler beinhaltet, kann mit dieser Methode die Überschreitung von z.B. einer Schalterbreite überprüft werden [16].

Der Nachweis der Erfüllung der Anforderungen an die Lokalisierung ließe sich damit maßgeblich vereinfachen.

Weitere Verwendungsmöglichkeiten einer hochgenauen Lokalisierung

Die Vermessung und Protokollierung des Zustandes von Infrastrukturelementen und angrenzender Vegetation anhand von Satellitenbildern oder Vor-Ort-Begehungen spielt eine zentrale Rolle für Sicherheit, Betrieb und Instandhaltung. Mithilfe von zugseitigen Wahrnehmungssensoren und hochgenauer Lokalisierung kann bei jeder Vorbeifahrt im Nahbereich überprüft und protokolliert werden, ob Streckenelemente be-

schädigt sind, Bäume ihre Position verändert haben, Sträucher oder Äste in den vorgeschriebenen Lichttraum hineinragen oder neue Objekte im Streckenbereich aufgetaucht sind.

FRMCS-Empfangsbedingungen (FRMCS – Future Railway Mobile Communication System) und öffentlicher Mobilfunkempfang können ortsgenau auch in Tunneln oder hochurbaner Umgebung protokolliert werden. Die gleichen dreidimensionalen Karten, die die Empfangsmöglichkeiten von Satellitendaten prognostizieren können, könnten dabei unterstützen, geeignete Standorte für Sendemasten mit möglichst hoher Funkabdeckung zur Strecke zu bestimmen und ihren Empfang im Zug ortsgenau zu überprüfen.

Zusammenfassung & Ausblick

Die hochgenaue absolute Lokalisierung ist ein Grundfehler des GoA 4-Systems, ohne die das vollautomatisierte Fahren auf Basis einer fahrerseitigen Hinderniserkennung nicht möglich ist. Hierfür stehen mehrere Lösungsansätze zur Verfügung. Als Favorit gilt die landmarkenbasierte Lokalisierung mithilfe hochgenauer Digitaler Karten.

In AutomatedTrain werden die Verfügbarkeiten der Methoden streckenabhängig untersucht und wird eine innovative Methode für die Überprüfung der Lokalisierung eines fahrenden Zuges analysiert. Auf zwei Testfahrzeugen (BR 430 von DB Regio sowie Mireo von Siemens Mobility), ausgerüstet mit lokalisierungsrelevanten Sensoren, werden die Projektpartner die Leistungsfähigkeit und Einsetzbarkeit ihrer Lösungen unter Beweis stellen, wie die Bestimmung der Position von Zug und Objekten sicher gelingen kann. In umfangreichen und systematischen Testkampagnen, die bis Ende 2026 ihren Abschluss finden, werden besonders herausfordernde Szenarien und Randbedingungen identifiziert und kategorisiert, um neue Strecken außerhalb des Projektes auf ihre Eignung für die verwendeten Lösungen systematisch untersuchen zu können. Die Lokalisierungsmethoden könnten aufgrund ihrer hohen Genauigkeiten zudem neue Anwendungsmöglichkeiten für die vorausschauende Instandhaltung von streckenseitiger Infrastruktur liefern.

Nach dem erfolgreichen Abschluss des Projektes können die Industriepartner auf Grundlage der erzielten Ergebnisse unmittelbar mit ihren Serienentwicklungsphasen starten. Die Digitale Schiene Deutschland hat damit wichtige Impulse in den Sektor gesendet und den Grundstein gelegt, dass entsprechende Systeme bereits in naher Zukunft von Eisenbahnverkehrsunternehmen bei der Industrie bestellt werden könnten. ■

QUELLEN

- [1] Spiegel, D.; Hauswald, C.: Vollautomatisiertes, fahrerloses Fahren auf der Schiene, EI 05/2024, pp. 18–21
 [2] AutomatedTrain, <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/projects/AutomatedTrain>, 15.01.2025, 15.01.2026 um 13:49

- [3] Knitter, O.; Hey, J.; Scheel, A.; Schultz, J.; Voelz, H.: Konzepte und Systembausteine für fahrerlose Züge, EI 10/2025, S. 40–44
 [4] Waldecker, F.: Richtlinie 408.0581 Züge fahren; Verhalten bei Gefahr, Version 4.0, 14.12.2025
 [5] Waldecker, F.: Richtlinie 408.0581A01 Züge fahren; Handlungsanweisung Personen am Gleis, Version 4.0, 14.12.2025
 [6] European Union Agency for Railways (ERA). SUBSET-026-3: ERTMS/ETCS System Requirements Specification Chapter 3 Principles, Version 4.0.0, 05.07.2023
 [7] Bauer, M. (2018): Vermessung und Ortung mit Satelliten. 7. Aufl. Berlin: Wichmann
 [8] CLUG 2 Analysebericht, <https://www.clug2.eu/deliverables/>, 15.01.2026 um 14:12
 [9] EGNSS Mate [https://navisp.esa.int/uploads/files/project_documents/EGNSS%20MATE%20Final%20Presentation%20\(1\).pdf?v=497380](https://navisp.esa.int/uploads/files/project_documents/EGNSS%20MATE%20Final%20Presentation%20(1).pdf?v=497380)
 [10] Ruwisch, F.; Kersten, T.; Schön, S.; Wübbena, T.; Ren, L.; O'Connor, M.; Skupin, C.; Liu, Y.; Hinrichs, A.: Korrektur von GNSS-Mehrwegeffekten für die zuverlässige Eigenlokalisierung von hochautomatisierten Fahrzeugen in innerstädtischen Bereichen (KOMET), 07/2024, <https://oa.tib.eu/renate/items/6f74f518-970f-4250-95d4-0444ee2fb2e0>
 [11] Breili, K.; Lund, C. W.: Simulation of GNSS Dilution of Precision for Automated Mobility Along the MODI Project Road Corridor Using High-Resolution Digital Surface Models. Geomatics 2025, 5, 26. <https://doi.org/10.3390/geomatics5020026>
 [12] Hauswald, C.; Skibinski, S.; Reiniger, F.; Euler, T.; Isaac, G.; Irvathraya A.: Sensors4Rail: Ein Erfolgsprojekt geht zu Ende, EI 09/2023, S.55-59
 [13] ENS0126-1: CENELEC, Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) – Part 1: Generic RAMS Process, 10/2017
 [14] ENS0128: CENELEC, Railway Applications: Software for Railway Control and Protection Systems, 2011
 [15] ENS0129: CENELEC, Railway Application: Safety-Related Electronic Systems for Signalling, 2019
 [16] Patent „Verfahren, Steuergerät und Fahrzeug zur Validierung der Lokalisierung eines Fahrzeuges durch Referenzierung zu statischen Objekten im Umfeld“, Patentnummer: DE102020132397A1



Fabian Pucks, M. Eng.

Teilprojekt Manager Lokalisierung
 DB InfraGO AG, Berlin
 fabian.pucks@deutschebahn.com



Dipl.-Inf. Raymond Schulz

Senior Experte Lokalisierung
 DB InfraGO AG, Berlin
 raymond.schulz@deutschebahn.com



Ananthakrishna Irvathraya, M. Eng.

Senior Experte Lokalisierung
 DB InfraGO AG, Berlin
 ananthakrishna.irvathraya@deutschebahn.com



Dipl.-Ing. Zoltan Abram

Lokalisierungsexperte,
 Systemingenieur
 Accenture GmbH, Kronberg
 zoltan.abram@accenture.com