

Digitale Karten für das vollautomatisierte Fahren auf der Schiene

Einblicke in Anwendung, Erstellung und Bereitstellung digitaler Karten für den automatisierten Bahnbetrieb

ALEXANDER PFITZNER | GORDON ISAAC | THOMAS RENNER

Digitale Karten sind eine zentrale Voraussetzung für den vollautomatisierten, fahrerlosen Bahnbetrieb im „Automatic Train Operation – Grade of Automation 4“ (ATO GoA 4). Sie stellen eine hochgenaue digitale Abbildung der Infrastruktur dar und unterstützen eine zuverlässige Hinderniserkennung sowie präzise Zuglokalisierung. Für digitale Karten im Bahnbetrieb ist ATO GoA 4 ein Anwendungsfall und aktuell ein wichtiger Gegenstand von Entwicklung und Standardisierung. Die zunehmende Bedeutung des Themas erfordert die Entwicklung neuer Kartenerstellungs- und Verarbeitungsprozesse. Durch die enge Zusammenarbeit der Sektorinitiative Digitale Schiene Deutschland (DSD) mit der Industrie im Projekt Automated Train und der europäischen Initiative Europe's Rail Joint Undertaking (ERJU) wird eine wichtige Grundlage für die Zukunft des automatisierten Bahnbetriebs gelegt.

Einführung

Bedeutung der digitalen Karte für den automatisierten Bahnbetrieb

Zahlreiche Projekte der DSD haben in den letzten Jahren verdeutlicht, dass digitale Karten grundlegend für einen digitalisierten Bahnbetrieb sind. So wurde beispielsweise im Projekt Sensors4Rail (2019–2023) das Zusammenspiel aus sensorbasierter Umfeldwahrnehmung und Zugortung mit einer digitalen Karte intensiv getestet [1]. Eine präzise und detaillierte digitale Darstellung der Eisenbahnumgebung ist entscheidend, um einen automatisierten Bahnbetrieb in ATO GoA 4 zu ermöglichen, bei dem der Zug vollautomatisiert und fahrerlos fährt sowie das Eingreifen bei Gefahrensituation durch technische Systeme übernommen wird. Die digitale Karte beinhaltet statische Infrastrukturdaten, wie etwa Objekte entlang der Gleise, die als dreidimensionale Landmarken digitalisiert werden. Zu den Landmarken gehören beispielsweise Oberleitungsmasten, Signale und Bahnsteige. Zudem ist die Streckentopologie des Schienennetzes in der digitalen Karte enthalten.

In der Systemarchitektur der DSD wird die digitale Karte für den ATO-Betrieb durch das Digitale Register (DR) bereitgestellt. Das DR ist eine Plattform, die als zentrale Quelle für Infrastrukturdaten fungiert und diese für verschiedene Anwendungen des digitalen Bahnsystems bereitstellt [2]. Im Pilotprojekt „Digitaler Knoten Stuttgart“ [3] ist das DR ein Bestandteil der ATO-Zentrale und stellt betriebliche Infrastrukturdaten zur Erstellung von Journey und Segment Profiles gemäß Subset 125 für den ATO-GoA 2-Betrieb im gesamten Knoten bereit. Auch das von der DSD entwickelte, KI-basierte Capacity and Traffic Management System (CTMS) ist auf aktuelle Infrastrukturdaten aus dem DR angewiesen, um eine effiziente digitale Planung und Steuerung zu gewährleisten [4]. Darüber hinaus benötigt das neue, im Rahmen der „Advanced Digital Infrastructure (ADI)“ von der DSD mitentwickelte, zugbasierte Sicherungssystem zuverlässige Infrastrukturdaten aus dem DR, um den Betrieb in sogenannten „Moving Blocks“ zu realisieren [5, 6]. Das DR ist damit nicht nur ein zentraler Baustein für die Umsetzung von ATO GoA 4, sondern auch eine Grundlage für die Digitalisierung und Automatisierung des Bahnsystems. Es gewährleistet eine einheitliche und konsistente Datengrundlage, die essenziell für einen nahtlosen digitalen Bahnbetrieb ist.

Das DR ist inzwischen ein Bestandteil europäischer Standardisierungsaktivitäten. Es wird im Rahmen der europäischen Initiative ERJU spezifiziert und standardisiert. Dadurch sollen zukünftig alle europäischen Bahnen auf kompatible Infrastrukturdaten zugreifen können [2]. Als Betreiber der Eisenbahninfrastruktur ist die DB InfraGO AG (DB InfraGO) verpflichtet, allen Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) diskriminierungsfreien Zugang zum Schienennetz und den dafür erforderlichen Infrastrukturdaten zur Verfügung zu stellen.

Vor diesem Hintergrund strebt die DB InfraGO an, eine führende Rolle bei der Entwicklung und deutschlandweiten Einführung des DR unter Berücksichtigung europäischer Standardisierungsaktivitäten zu übernehmen.

Anwendung und Nutzen der digitalen Karte im ATO-GoA 4-Betrieb

Verwendung findet die digitale Karte in einem ATO-GoA 4-Betrieb vor allem für zwei Hauptanwendungen: die Hinderniserkennung und die Lokalisierung. Für die Hinderniserkennung dient die digitale Karte als Referenz für die

Zugsensorik, um die Umgebung zu analysieren und zwischen sicheren und potenziell unsicheren Situationen zu unterscheiden [7]. Die Lokalisierung ermöglicht durch die Verwendung von Gleismittelachse, Gleisgeometrie und markanten Landmarken entlang der Strecke eine präzise Positionierung des Zuges [8]. Darüber hinaus hat sich die digitale Karte als eine wichtige Datenquelle bei der Erstellung eines digitalen Zwillings erwiesen, der zur Simulation von Szenarien für den automatisierten Zugbetrieb genutzt wird [9]. Mithilfe der digitalen Karte lässt sich eine fotorealistische Nachbildung des Bahnsystems erzeugen. So können unter anderem seltene Störfälle, wie etwa ein Gepäckstück auf den Gleisen, realitätsnah und in unterschiedlichsten Konstellationen simuliert werden. Diese Szenarien werden verwendet, um verschiedene Sensoren sowie Hinderniserkennungsalgorithmen und -systeme unter realistischen Bedingungen kostengünstig zu testen und zu bewerten, bevor mit aufwendigeren Feldtests begonnen wird [10]. Darüber hinaus treten viele zu testende Störfälle, wie z. B. ein ins Gleis geworfener E-Scooter oder gefallenes Trampolin (z. B. bei Starkwind), in der Realität selten auf, sodass die Erkennung dieser nur mittels simulierter Szenarien trainiert werden kann.

Das Digitale Register und die digitale Karte im Projekt AutomatedTrain

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderte Projekt „AutomatedTrain (AT)“ [11] hat das Ziel, durch fahrerlose, vollautomatisierte Bereitstellungs- und Abstellfahrten den Fahrzeugeinsatz flexibler zu gestalten und der sich verstärkenden demographischen Entwicklung zu begegnen. Dies ist eine zentrale Voraussetzung für die Steigerung des Verkehrsaufkommens auf der Schiene. Zum Konsortium gehören, neben der DB InfraGO, neun weitere Partner aus Industrie, EVU, Eisenbahninfrastrukturbetreibern und Wissenschaft.

Im Rahmen des AT-Projekts liefert das DR den fahrerseitigen Hindernis- und Lokalisierungssystemen die erforderliche digitale Karte. Die dafür notwendigen Prozesse und Systeme werden von den Experten der DSD in dem Projekt entwickelt. Gleichzeitig müssen die genauen Inhalte und Qualitätsanforderungen der digitalen Karten in Zusammenarbeit



Abb. 1: Kinematisch eingemessene Punktwolke

Quelle aller Abb.: Digitale Schiene Deutschland / DB InfraGO AG

mit der Industrie definiert werden, damit diese die Systeme und Algorithmen entwickeln kann, die für die Hinderniserkennung und Lokalisierung im ATO-GoA 4-Betrieb benötigt werden. Die Ergebnisse werden in die ERJU-Arbeitsgruppen eingebracht, um langfristig einen offenen und herstellerunabhängigen Kartenstandard zu etablieren.

Die erste Erprobung der entwickelten Systeme wird auf einem Testgelände der Havelländischen Eisenbahn Gesellschaft (HVLE) in Berlin-Spandau ab 2025 stattfinden.

Kartenherstellung

Bei der Erstellung der digitalen Karte werden Bestandsdaten der DB InfraGO um weitere Infrastrukturobjekte und detailliertere Repräsentationen dieser ergänzt. Für einige dieser Informationen ist eine Neuvermessung der Strecken erforderlich. Zwar umfassen die Bestandsdaten den Standort der meisten relevanten Infrastrukturobjekte entlang der Strecke, allerdings sind deren Ausrichtung und die dreidimensionalen Abmessungen der Objekte nicht immer vorhanden. Diese sind im Rahmen der genannten Hinderniserkennung notwendig, da die Ausdehnung eines Objektes zur Differenzierung zwischen eigentlichem Objekt und unerwartetem Hindernis notwendig ist. Aus diesem Grund werden die Bestandsdaten um sogenannte 3D-Objekte ergänzt. Des Weiteren existieren häufig keine Angaben über die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Lageinformation. Gerade diese Qualitätskennzeichen der Karte sind allerdings für die sich aus dem Anwendungsfall ATO GoA 4 ergebenden Sicherheitsanforderungen relevant.

Kinematische Vermessung mittels Punktwolken

Als Grundlage für die Erstellung der 3D-Objekte dienen hochgenau eingemessene Punktwolken. Diese sind eine Sammlung von Datenpunkten in einem dreidimensionalen Koordinatensystem, die durch die Vermessung der Oberfläche eines Objekts oder einer Umgebung mit Laserscannern und anderen Sensoren erzeugt werden. Zur Durchführung dieser Vermessung werden die durch eine Produktfreigabe (Ril 883.600) der DB vorgegebenen Multisensorsysteme verwendet. Mittels zweifacher LiDAR-Sensoren wird bei langsamer bis mittelschneller Fahrt die unmittelbare Umgebung der Gleisbereiche gescannt und mithilfe von mehreren optischen Kameras in 360° fotografiert. Zur Sicherstellung der geometrischen Genauigkeit wird zuvor ein Festpunktfeld entlang der Strecke ertüchtigt. Dieses Feld umfasst ausreichend Passpunkte, welche zur hochgenauen Lagekorrektur der Daten benötigt werden. Passpunkte sind fest definierte und eindeutig identifizierbare Punkte auf der Erdoberfläche, die mit hochgenauen Instrumenten eingemessen werden. Im Anschluss an die sensorbasierte Vermessung wird ein Teil dieser Passpunkte für die Lagekorrektur der eingemessenen Punktwolke verwendet. Die Farbinformation der Kamerabilder wird zusätzlich auf die Punktwolken projiziert, um ihnen ein fotorealistisches Aussehen zur besseren kontextbezogenen Auswertung und Plausibilitätsprüfung zu geben (Abb. 1).

Da die Einmessung der Punktwolken in der Prozesskette am Anfang steht und geometrische Ungenauigkeiten große Auswirkungen auf spätere Prozessschritte haben, ist die

hochgenaue Erfassung von zentraler Bedeutung. Einige Passpunkte werden vorgehalten und nicht für die Kalibrierung verwendet, sondern als Referenzpunkte genutzt, um die Lagegenauigkeit der Punktwolke unabhängig zu bewerten.

Objekterkennung und Kartenerstellung

Punktwolken bilden den unmittelbaren Gleisbereich in seiner Gänze ab. Durch eine notwendige, hohe Punktdichte entsteht bei der Abbildung von längeren Gleisbereichen ein sehr hohes Datenvolumen. Außerdem sind Informationen zu Objekttypen und -geometrien nur indirekt und durch Interpretation der Punktwolke zu entnehmen. Daher ist es notwendig, die Daten für die Verwendung im Rahmen des automatisierten Fahrens in ein hierfür geeigneteres Format zu überführen.

Durch die Verwendung einer semantischen Karte, welche einzelne Objekte durch Attribute und vereinfachte Geometrien beschreibt, kann sowohl das notwendige Datenvolumen stark reduziert als auch die Interpretation der Daten erheblich vereinfacht werden. Ein weiterer Vorteil der semantischen Karte ist ihre Sensorunabhängigkeit. Sie lässt sich unabhängig vom verwendeten Sensortyp interpretieren, und verschiedene Sensoren können gleichzeitig auf denselben Kartendatenbestand zugreifen.

Zur Erstellung der semantischen Karte wird eine Objekterkennung innerhalb der Punktwolke durchgeführt. Dabei werden Objekte identifiziert und durch eine vereinfachte Geometrie in Punkt, Linien- oder Polygonform dargestellt. Details von geringer Größe werden hierbei ignoriert, die Grundmaße und -form

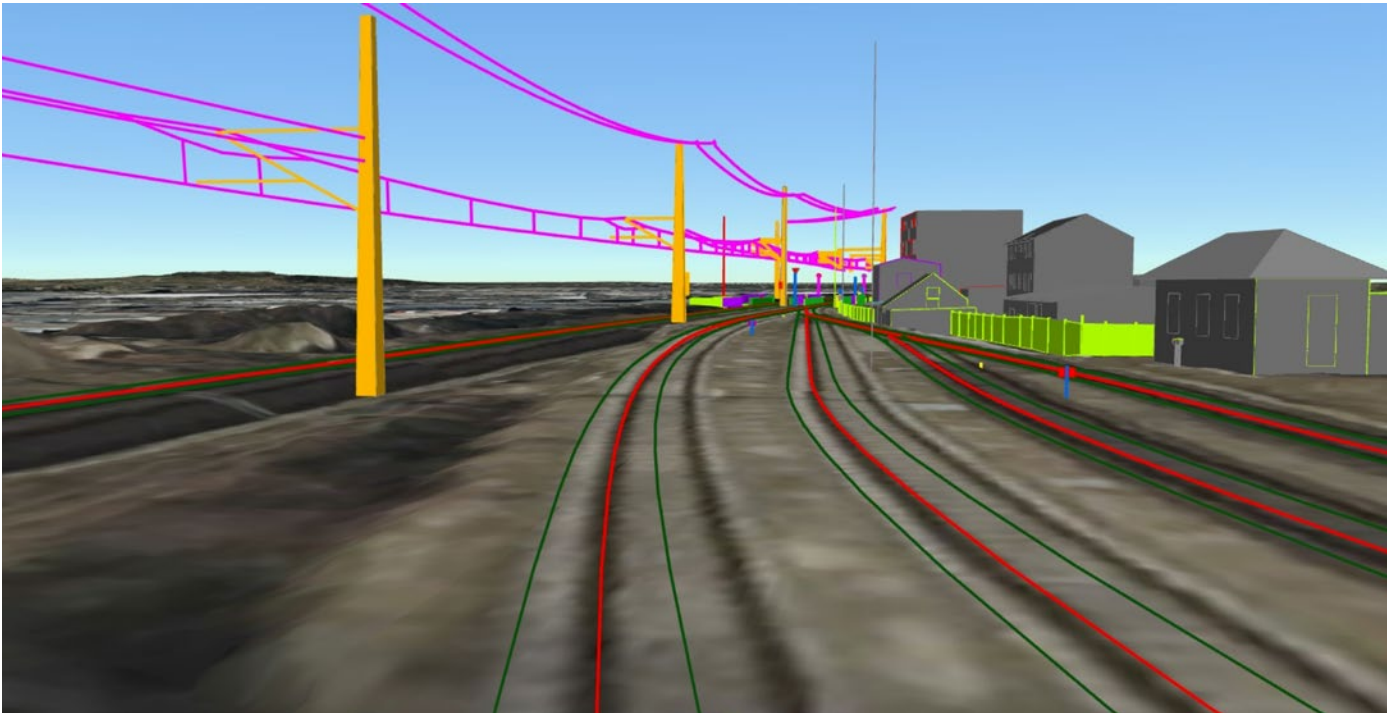


Abb. 2: Aus einer Punktwolke abgeleitete semantische Objekte

der Objekte werden jedoch berücksichtigt. Dieser Schritt wird als Labeling bezeichnet. Abb. 2 zeigt die so entstandenen vereinfachten Objekte.

Zu erfassende Objekte wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern definiert und in einem Objektkatalog zusammengefasst, der als Grundregelwerk für die Digitalisierung der benötigten Objekte dient. Insgesamt sind, neben Grundobjekten wie Gleise, Masten aller Art, Lärmschutzwänden und Bahnsteigen, aktuell ca. 40 Objekte definiert.

Diese neu erstellten dreidimensionalen Objekte werden zunächst in mehreren Schritten und mit verschiedenen Methoden plausibilisiert und verifiziert und anschließend mit den Bestandsdaten zusammengeführt, sodass eine ganzheitliche Karte entsteht.

Bereitstellung der digitalen Karte im Zug

Die eingangs genannte Initiative ERJU definiert und standardisiert die Schnittstellen, welche benötigt werden, um die digitale Karte sowohl im Zug als auch weiteren zentralen Systemen zur Verfügung zu stellen. Eine besondere Herausforderung besteht dabei auch in der Sicherstellung der Synchronität der Daten über mehrere Systeme hinweg. Dabei werden im Projekt auch Kartenupdates und die Möglichkeit der Kommunikation über das neue Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) untersucht [12].

Im Projekt AT entwickeln die Projektpartner gemeinsam ein ergänzendes Datenformat, welches ausschließlich die für die zugseitigen Systeme notwendigen Kartendaten in einer geeigneten Repräsentation enthält und dabei auch die neuen dreidimensionalen Objekte

abbildet. Dieses Format wird anschließend ebenfalls in die Standardisierung überführt, um die Interoperabilität zwischen verschiedenen Anbietern und Zugsystemen gewährleisten zu können.

Herausforderungen und Lösungen

Da sich die Kartenerstellung in unterschiedliche Prozessschritte gliedert, u. a. Vermessung, Objektabstrahierung und -weiterverarbeitung, ist es notwendig, einen kumulierten Gesamtfehler zu berechnen und diesen im Rahmen von Sicherheitsbetrachtungen zu bewerten.

Eine große Herausforderung stellt der Nachweis der Genauigkeit und Vollständigkeit der digitalen Karte dar. Diese wird hauptsächlich während der kinematischen Vermessung bestimmt. Einen starken Einfluss auf die Lagegenauigkeit der kinematischen Vermessungen haben komplizierte Topografien, wie beispielsweise unterirdische Bereiche, Täler, zwischen Hochhäusern eingebettete Abschnitte oder Kreuzungen mit Starkstromüberlandleitungen, die sich negativ auf den GNSS-Empfang auswirken können.

Auch gestaltet sich eine mit einem Messzug durchgeführte vollständige kinematische Vermessung oft als herausfordernd. In vielen Streckenabschnitten teilen sich S-Bahn, Regional-, Güter- und Fernverkehr die Gleise, sodass die Taktrate und daraus resultierend die Zeitfenster für kinematische Messfahrten in hochfrequentierten Bereichen in Metropolregionen häufig eingeschränkt sind.

Einschränkungen bei der Abtastung ergeben sich aufgrund der Tatsache, dass LiDAR-Scanner nur die in direkter Luftlinie sichtbaren Orte erfassen können. Bereiche hinter Wänden und

Gebäuden oder auf Nachbargleisen abgestellten Zügen bleiben außen vor und können zu einer unvollständigen Abtastung des unmittelbaren Gleisbereiches führen.

Manuelles Labeling ist mit einem hohen Aufwand verbunden. KI-gestützte Klassifizierungs- und Extraktionsalgorithmen ermöglichen bereits eine teilweise Automatisierung.

Die zentrale Herausforderung im Kartenerstellungsprozess aus DSD-Sicht besteht jedoch darin, die Sicherheitsanforderungen aus dem Anwendungsfall ATO GoA 4 in Bezug auf Zuverlässigkeit und Genauigkeit zu erfüllen. Für kurze Strecken, etwa bei Bereitstellungs- und Abstellfahrten, kann auf manuelles Labeling zurückgegriffen werden. Langfristig ist dieser Aufwand jedoch nicht skalierbar, falls eine Kartenerstellung für größere Netzbereiche notwendig wird.

Das DR verwaltet statische Infrastrukturdaten über alle Phasen ihres Lebenszyklus. Durch Umbauten, Neubauten oder infrastrukturelle Anpassungen unterliegt die reale Umgebung einem ständigen Wandel. Eine Herausforderung ist es, die Kartendaten stets aktuell, sicher und konsistent zu halten, insbesondere da der aktuelle Prozess noch einige manuelle und zeitaufwendige Schritte umfasst. Der Lebenszyklus der Daten besteht aus einer Preparation und einer Publish Phase [2]. Während der Preparation Phase werden die Daten importiert und nach vorgegebenen Regeln aggregiert und validiert. In der Publish Phase werden die aktuellen Daten in der jeweils gleichen Version den verschiedenen Systemen zur Verfügung gestellt. So wird eine konsistente Datenhaltung sichergestellt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwicklungen in Richtung ATO GoA 4 stellen neue Herausforderungen an die digitale Karte: Die zugewiesenen Systeme stellen erweiterte Anforderungen an die Inhalte der Karte. Erstmals werden darüber hinaus auch Sicherheitsaspekte in den Vordergrund gestellt, da zukünftig sicherheitsrelevante Zugsysteme auf der digitalen Karte basieren werden. Diese neuen Anforderungen bedingen die Entwicklung neuer Kartenerstellungs- und Verifizierungsprozesse. Die Grundlagen für diese neuen Prozesse werden aktuell in diversen Projekten der DSD gemeinsam mit der Industrie gelegt, bei denen die Kartenerstellung erprobt wird und Formate zum Austausch neuer Kartendaten entwickelt und getestet werden.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden die notwendigen Systeme entwickelt und Formate standardisiert.

QUELLEN

- [1] Hauswald, C. et al.: Sensors4Rail: Ein Erfolgsprojekt ist zu Ende, DER EISENBAHNINGENIEUR 09/2023, https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads_Mediathek/55_61_Hauswald_etal.pdf
- [2] Kreyenberg, D. et al.: Digitales Register – die „Single Source of Truth“ für Infrastrukturdaten für das vollautomatisierte Fahren, SIGNAL+DRAHT 6/2024, https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads_Mediathek/06_15_Kreyenberg_Digitales_Register_SignalDraht.pdf
- [3] Digitaler Knoten Stuttgart, <https://digitale-schiene-deutschland.de/de/projekte/Hochautomatisiertes-Fahren-DKS>
- [4] Küpper, M.: Das Capacity & Traffic Management System für die Digitale Schiene, DER EISENBAHNINGENIEUR 10/2023, https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/2310_EI_Artikel_CTMS_K%C3%BCpper.pdf
- [5] Skowron, F.; Treydel, R.: Blöcke waren gestern – Chancen einer zugzentrischen LST, DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2022, https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/34_39_Skowron_Treydel_neu.pdf

[6] Leuteritz, J. et al.: Advanced Digital Infrastructure – betriebliche Szenarien für einen robusten Bahnbetrieb der Zukunft, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 06/2024, https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/ETR_ADI_Artikel_Leuteritz_Schiffmann_Schneider_07_08_24_Belegexemplar.pdf

[7] Innovatives Hinderniserkennungssystem wird erstmalig bei der S-Bahn Berlin erprobt, Siemens Mobility Pressemitteilung 06/2024, <https://sie.ag/7YAkWd>

[8] Nitzschke, H. et al.: SafeRailMap – Sichere Gleisdaten für eine sichere Zuglokalisierung, DER EISENBAHNINGENIEUR 10/2020, https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads_Mediathek/Artikel%20SafeRailMap-%2010-20.pdf

[9] Digitale Schiene Deutschland und NVIDIA arbeiten an einem digitalen Zwilling des Schienennetzes, Digitale Schiene Deutschland 11/2020 <https://digitale-schiene-deutschland.de/de/aktuelles/2022/Digitaler-Zwilling>

[10] Spenneberg, D.; Bauer, M.; Ghee, M.; Krönke, S.; Teststrategie zur Vermeidung von Feldtests bei der Entwicklung vollautomatisiert fahrender Züge, SIGNAL+DRAHT 11/2024, S. 67-76

[11] Digitale Schiene Deutschland, AutomatedTrain, <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/projects/AutomatedTrain>

[12] Digitale Schiene Deutschland, FRMCS/5G-Datenkommunikation, <https://digitale-schiene-deutschland.de/FRMCS-5G-Datenkommunikation>



Alexander Pfitzner

Geodata Engineer
Digitale Schiene Deutschland
DB InfraGO AG, Berlin
alexander.pfitzner@deutschebahn.com



Dr. Gordon Isaac

Product Owner
Digitale Karte für ATO GoA 4
Digitale Schiene Deutschland
DB InfraGO AG, Berlin
gordon.isaac@deutschebahn.com



Dr. Thomas Renner

Circle Lead Digital Register
Digitale Schiene Deutschland
DB InfraGO AG, Berlin
thomas.th.renner@deutschebahn.com

Wir sind dort, wo Ihre Kunden sind.

1. Halbjahr 2025

DER **EI**
EISENBAHN
INGENIEUR

FEBRUAR
Heft 2

13.02. – 14.02.2025

27. Jahrestagung der Eisenbahn-Sachverständigen (EBA), Berlin

06.03. – 07.03.2025

Wiener Eisenbahnkolloquium, Wien

MÄRZ
Heft 3

20.03.2025

66. VDEI Oberbaufachtagung, Darmstadt

18.03.2025

5. VDEI Geotechnik-Kolloquium, Neustadt an der Weinstraße

31.03. – 01.04.2025

VDEI Kongress BIM in der Infrastruktur, Dresden

APRIL
Heft 4

13.04. – 15.04.2025

49. Tagung Moderne Schienenfahrzeuge, Graz

05.05. – 07.05.2025

2. ÖPNV-Zukunftskongress 2025, Freiburg

MAI
Heft 5

20.05. – 22.05.2025

iaf 29. Internationale Ausstellung Fahrzeugtechnik, Münster

02.06. – 05.06.2025

transport logistic, München

JUNI
Heft 6

15.06. – 18.06.25

UITP Summit, Hamburg

17.06. – 19.06.2025

VDV-Jahrestagung, Hamburg

Weitere Infos: Silke Härtel • Telefon: 040/237 14-227 • silke.haertel@dvwmedia.com

Änderungen vorbehalten.