Erfahrungen aus der Erstellung und Anwendung Digitaler Karten im Projekt AutomatedTrain

Vollautomatisierter Bahnverkehr im GoA4-Betrieb erfordert verlässliche Infrastrukturdaten. Digitale Karten bilden dabei die Grundlage für Lokalisierung und Hinderniserkennung. Der Artikel beschreibt die Erfahrungen aus dem Projekt AutomatedTrain, die ermittelten Anforderungen, die durchgeführten Vermessungen, sowie die Herausforderungen bei der Erstellung sicherheitskritischer Digitaler Karten.



Dr. Gordon Isaac
DB InfraGO AG, EUREF-Campus Berlin
Gordon.Isaac@deutschebahn.com



Dr. Thomas Renner
DB InfraGO AG, EUREF-Campus Berlin
thomas.th.renner@deutschebahn.com



Alexander Pfitzner, Diplom-Geograf
DB InfraGO AG, EUREF-Campus Berlin
Alexander.Pfitzner@deutschebahn.com

Bedeutung der digitalen Karte im GoA4-Betrieb

Die digitale Karte stellt eine hochgenaue, digitale Repräsentation der Bahninfrastruktur dar. Sie bildet die reale Eisenbahnumgebung strukturiert, georeferenziert und maschinenlesbar ab und dient als zentrale Datengrundlage für das vollautomatisierte Fahren auf der Schiene [1]. Die digitale Karte enthält statische Infrastrukturobjekte wie Signale, Oberleitungsmasten und Bahnsteige, die als dreidimensionale Landmarken repräsentiert werden. Zudem enthält sie eine detaillierte Streckentopologie des Schienennetzes, welche die logische Verknüpfung der Gleise über Weichen und Kreuzungen abbildet.

Für die Erstellung der digitalen Karte wurde im Projekt AutomatedTrain der Ansatz einer kinematischen Vermessung der Strecke mit Lidar- und Kamerasystemen gewählt, aus deren Daten hochgenaue 3D-Punktwolken erzeugt werden. In den Punktwolken werden relevante Infrastrukturobjekte erkannt, geometrisch abstrahiert und semantisch beschrieben, indem die Geometrien um wesentliche Objekteigenschaften und Beziehungen zueinander ergänzt werden. Die so erzeugte Karte wird qualitätsgesichert aufbereitet, dadurch in der Dateigröße stark reduziert und dem Zug bereitgestellt.

Im Forschungs- und Entwicklungsprojekt AutomatedTrain (AT) [2] wird der Einsatz fahrerloser, vollautomatisierter Bereitstellungs- und Abstellfahrten im GoA4-Betrieb erprobt. Für den Betrieb im Automatic Train Operation – Grade of Automation 4 (ATO GoA4) ist diese digitale Infrastrukturbeschreibung grundlegend. Da die Züge in diesem Automatisierungsgrad ohne Triebfahrzeugführer verkehren, übernehmen technische Systeme vollständig sicherheitsrelevante Funktionen, einschließlich Lokalisierung und den Umgang mit nicht regulären Situationen. Dabei liefert die digitale Karte infrastrukturseitige Referenzen wie Gleismittelachsen, Gleisgeometrie und charakteristische Landmarken, die eine präzise Positionsbestimmung des Zuges ermöglichen [3]. Für die Hinderniserkennung wird die digitale Karte benötigt, um die bekannte Infrastruktur mit den Sensordaten der Umgebung auf dem Zug abzugleichen [4].

Anforderungserfassung und Safety-Betrachtung

Der Anwendungsfall ATO GoA4 stellt neue Anforderungen an die digitale Karte, weil erstmals eine Verwendung als zentrale Eingangsgröße für sicherheitskritische Funktionen im vollautomatisierten Bahnbetrieb stattfindet. Daher gelten für die digitale Karte besonders hohe Anforderungen an Genauigkeit und Vollständigkeit.

Im Projekt AutomatedTrain wurde eine vollständige Anforderungsanalyse für erforderliche Fahrfunktionen für die automatisierte Bereitstellung durchgeführt. Die digitale Karte wurde von Beginn an als Subsystem in diesen Prozess eingebunden. Gemeinsam mit den Projektpartnern Siemens Mobility und Bosch Engineering wurden die Anforderungen der nutzenden Systeme an die digitale Karte definiert. Durch diesen Prozess wurde definiert, welche Inhalte die digitale Karte benötigt. Diese Anforderungen beschreiben im Detail, welche Objekte mit welcher Genauigkeit und mit welcher Repräsentation bereitgestellt werden müssen.

Digitale Nutzung durch Deutsche Bahn AG zeitlich unbefristet genehmigt durch DVV Media Group, 2026



1: Karten-Erstellungs-Prozess Quelle: DB InfraGO, eigene Darstellung

Im Zuge dieses Prozesses wurde schnell klar, dass die so ermittelten Anforderungen von den aktuell bestehenden Karten der DB InfraGO AG, wie Lage- und Sicherheitspläne, nicht erfüllt werden konnten. Diese konnten beispielsweise für ATO GoA2 verwendet werden. Der Anwendungsfall GoA4 stellt jedoch erhöhte Anforderungen: Zum einen werden erstmal dreidimensionale Repräsentationen der Infrastrukturobjekte benötigt, des Weiteren können von den bestehenden Karten nur selten zuverlässige Aussagen über die Vollständigkeit, Aktualität und Genauigkeit getroffen werden. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projekts die Infrastrukturdaten für die erforderlichen Strecken neu eingemessen und ein spezifischer Prozess zur Kartenerstellung aufgebaut, der diesen hohen Anforderungen gerecht wird.

Der Kartenerstellungsprozess umfasst im Kern die Vermessung der Infrastruktur, die Ableitung relevanter Objekte und die Erstellung der digitalen Karten. Der Basisprozess muss durch umfassende Schritte zur Qualitätskontrolle und Validierung ergänzt werden. Nur so lassen sich die hohen Anforderungen an Genauigkeit und Vollständigkeit einhalten und durch Sicherheitsnachweise belegen.

Sicherheitsanforderungen für die Softwareentwicklung im Kontext von Eisenbahnanwendungen sind allgemein in der CENELEC-Norm EN 50716 festgelegt. Die Norm definiert Anwendungsdaten – wie die digitale Karte – als Artefakt, welches verwendet wird, um spezifische Anwendung für ein Eisenbahnsystem zu konfigurieren. Die Sicherheitsanforderungen an die Anwendungsdaten richten sich daher nach dem Safety Integrity Level (SIL) des jeweiligen Systems beziehungsweise der konkreten Anwendung. Unabhängig vom identifizierten SIL empfiehlt die Norm die Verifikation und Validierung der Anwendungsdaten, um sicherzustellen, dass diese vollständig, korrekt und mit der Anwendung kompatibel sind. Dies kann entweder durch die direkte Verifikation und Validierung der Daten oder durch die Verifikation und Validierung der für die Datenerzeugung verwendeten Werkzeuge erreicht werden. In beiden Fällen wird ein Integrationstest empfohlen, um die korrekte Integration mit der Anwendung sicherzustellen.

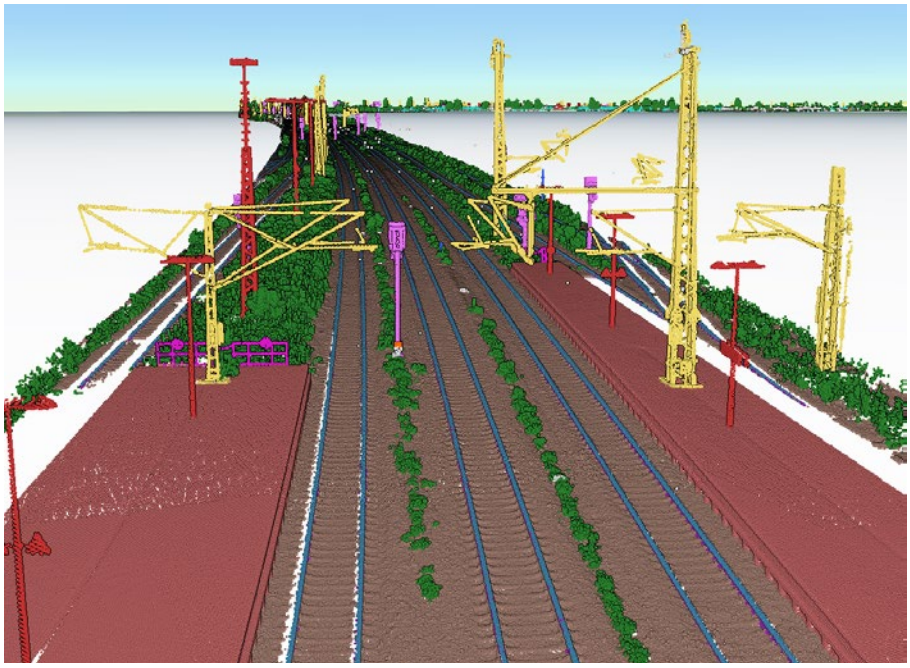
Um den Prozess der Kartendatenerzeugung auf potenzielle Fehler zu analysieren, wurde begleitend zur Prozessentwicklung eine Risikobewertung in Form einer Prozess- Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) durchgeführt.

Abbildung 1 zeigt die drei zentralen Schritte der Kartenerstellung: die Rohdatenaufnahme durch Vermessung, die Objekterkennung in diesen Daten, auch Labeling genannt und die eigentliche Kartenerstellung, also die Überführung ins Zielformat. Im Rahmen der FMEA wurden für jeden Einzelschritt mögliche Fehlerquellen identifiziert und Maßnahmen definiert,



2: Das verwendete, auf einem aufgebauten Gestell montierte MX-9 Sensorsystem Quelle: DB InfraGO

Digitale Nutzung durch Deutsche Bahn AG zeitlich unbefristet genehmigt durch DVV Media Group, 2026



3: Klassifizierte Lidar-Punktwolke Quelle: DB InfraGO

um Fehler zu vermeiden oder frühzeitig zu erkennen. Abbildung 1 zeigt weiterhin den durch die Norm empfohlenen Integrationstest in Form einer Bestätigungsfahrt (gelb).

Im Rahmen der FMEA wurden die noch verbleibenden Fehler im Gesamtprozess unter Berücksichtigung der Auftrittswahrscheinlichkeit ermittelt und mit den definierten Anforderungen abgeglichen. Die Fehleranalyse hat ergeben, dass die hohen Anforderungen an die digitale Karte nur erfüllt werden können, wenn vor der Bereitstellung eine Überprüfung durch einen unabhängigen Gutachter durchgeführt wird. Auch dieser Prozessschritt (grün) wurde daher in den Erstellungsprozess mit aufgenommen.

Kinematische Vermessung der Teststrecken

Im AutomatedTrain Projekt wurden zwei Strecken im Stuttgarter Schienennetz als Erprobungsstrecken ausgewählt. Im Rahmen einer umfangreichen Vermessung wurden diese beiden Strecken detailliert erfasst. Abbildung 2 zeigt das hierzu verwendete spezielle Messsystem. Die erste vermessene Trasse verläuft vom Bahnhof Stuttgart-Bad Cannstatt über Esslingen und Plochingen bis nach Kirchheim unter Teck. Bei einer Gesamtlänge von etwa 25 Kilometern umfasst dieser Abschnitt unter anderem die beidseitige Umfahrung des Mercedes-Benz Motorenwerks in Bad Cannstatt sowie die Abstellanlage in Esslingen. Als zweite Strecke wurde die Verbindung vom Bahnhof Zuffenhausen über Renningen nach Böblingen mit einer Länge von etwa 32 Kilometern vermessen. Dabei wurden grundsätzlich beide Gleise sowie im Bereich Esslingen sämtliche Gleisanlagen der Abstellanlage berücksichtigt.

Der zeitliche Ablauf der Vermessung gestaltete sich aufgrund technischer und logistischer Herausforderungen komplexer als ursprünglich geplant und daher erfolgte im Juli 2025 eine Nachvermessung der ersten Strecke in Kombination mit der Erfassung des zweiten Abschnitts. An beiden Terminen verhinderte jedoch die Belegung der Abstellanlage Esslingen durch drei parkende S-Bahn-Züge eine vollständige Abtastung.

Die Integration von Vermessungsfahrten in den laufenden Betrieb stellt eine große Herausforderung dar. Daher wurde für ausgewählte Bereiche eine terrestrische Vermessung gewählt. Auch hierzu sind umfangreiche Planungen, wie Gleissperrungen und eine Bereitstellung von Sicherungspersonal, notwendig.

Zur Sicherstellung einer hohen Lagegenauigkeit sind fest eingemessene Gleisvermarkungspunkte notwendig, welche mit Gelb-Weiß-Targets ausgestattet sind. Diese sind anschließend in der Punktwolke identifizierbar und werden sowohl für die Korrektur als auch die Bestimmung der Genauigkeit verwendet. Bei der Vermessung ergab sich die Schwierigkeit, dass die Strecken nicht mit den notwendigen Vermessungspunkten ausgestattet waren. Um den zeitlichen Aufwand zu begrenzen, wurde auf eine ganzheitliche Ausstattung mit regelkonformen Gleisvermarkungspunkten verzichtet und stattdessen Referenzpunkte ausschließlich an öffentlich zugänglichen Stellen, wie etwa Bahnsteigen, eingemessen.

Die hohe Punktdichte in langsam befahrenen Abschnitten erforderte zur Bearbeitung eine nachträgliche Ausdünnung der Punktwolken. Während vorbeifahrende Züge vereinzelt für die üblichen Schlagschatten in den Daten sorgten, war die Qualität der Panorama-Fotos aufgrund der sommerlichen Lichtverhältnisse durchweg gut. Auch die Wetterbedingungen spielten dem Projekt in die Hände: Da weder Regen noch Schnee zu Reflexionen oder Streuungen der Laserpunkte führten und die Temperaturen für den Betrieb der Messgeräte ideal waren, konnte eine hohe Datenqualität sichergestellt werden. Abbildung 3 zeigt eine aufbereitete und nach Objekten klassifizierte Punktwolke.

Die Notwendigkeit einer vollständigen Neuvermessung der Infrastruktur ergab sich in diesem Projekt aus dem Umstand, dass keine aktuellen Rohdaten in ausreichender Qualität für den Untersuchungsraum zur Verfügung standen. Zukünftig gilt es zu untersuchen, ob Daten aus bereits bestehenden Quellen, wie Abnahmefahrten oder Vegetationskontrollen, genutzt werden können.

Komplexität von Labeling und Objektkatalog

Die Erstellung digitaler Karten für das vollautomatisierte Fahren erfordert eine gezielte Abstraktion hochdetaillierter sensorischer Rohdaten. 3D-Punktwolken bilden den Gleisbereich in hoher geometrischer Detailtiefe ab, sind jedoch aufgrund ihres großen Datenvolumens sowie fehlender Semantik für die direkte Nutzung durch zugseitige Systeme ungeeignet.

Ziel des Labelings ist daher die Identifikation relevanter Infrastrukturobjekte und deren Überführung in eine semantische, vereinfachte geometrische Repräsentation, die eine effiziente Verarbeitung bei deutlich reduzierter Datenmenge ermöglicht.

Mit dem während des Labelings gewählten Abstraktionsgrad ist unmittelbar die Definition der kartenseitigen Schnittstelle verknüpft. Für die Nutzung in Hinderniserkennung und Lokalisierung muss festgelegt werden, welche Objektklassen, Attribute und geometrischen Repräsenta-

Digitale Nutzung durch Deutsche Bahn AG zeitlich unbefristet genehmigt durch DVV Media Group, 2026

tionen erforderlich sind. Eine starke Abstraktion vereinfacht Verarbeitung, Aktualisierung und Übertragung der Daten und reduziert zugleich den Labeling-Aufwand sowie die damit verbundenen Kosten. Klare, vereinfachte Objektmodelle verringern zudem die Anzahl der zu behandelnden Sonderfälle.

Eine detailliertere Modellierung mit geringerem Abstraktionsgrad erhöht hingegen den Labeling-Aufwand deutlich. Mit zunehmender Detailtiefe entstehen zusätzliche Sonderfälle, die für die Anwendungsfälle Lokalisierung und Hinderniserkennung nicht zwingend erforderlich sind. Dies führt zu höheren Anforderungen an Konsistenz und Qualitätssicherung, die eigentlich nicht notwendig sind.

Ein Objektkatalog, welcher im Rahmen der Abschlussdokumentation des Berichts veröffentlicht werden soll, bildet die formale Grundlage für das Labeling, indem er Objektklassen, Attribute und zulässige Geometrietypen definiert und so eine automatisierte Verarbeitung ermöglicht. In der Praxis weist die Eisenbahninfrastruktur jedoch trotz bestehender Regelwerke eine hohe Vielfalt auf. Sie ist historisch gewachsen, regional unterschiedlich ausgeprägt und durch zahlreiche betriebs- und bauspezifische Besonderheiten geprägt. Eine strikt starre Ausgestaltung des Objektkatalogs stößt dabei an Grenzen, insbesondere bei streckenspezifischen Sonderformen und infrastrukturellen Besonderheiten. Gleichzeitig erfordert der sicherheitsrelevante Einsatz der digitalen Karte klar definierte und überprüfbare Objektmodelle. Daraus entsteht eine Abwägung zwischen standardisierten Vorgaben und notwendiger Flexibilität.

Eine besondere Herausforderung ist die Validierung der semantischen Karte. Mit zunehmender Abstraktion wird der direkte geometrische Abgleich mit der Punktwolke komplexer. Der Nachweis von Vollständigkeit, korrekter Objektklassifikation und geometrischer Genauigkeit erfordert aufwendige Verfahren, die automatisierte Prüfungen mit manueller Qualitätssicherung kombinieren.

Herausforderungen im Kartenerstellungsprozess

Insbesondere im Kontext sicherheitskritischer Anwendungen besteht die Gefahr, Anforderungen zunächst ausschließlich aus Sicht der nutzenden Systeme zu formulieren. Dadurch entstehen häufig Forderungen nach maximaler Vollständigkeit, höchster geometrischer Genauigkeit und umfassender semantischer Beschreibung. Aus technischer Sicht erscheinen solche Anforderungen zunächst sinnvoll. In der praktischen Umsetzung zeigt sich jedoch, dass nicht jede theoretisch wünschenswerte Eigenschaft wirtschaftlich, organisatorisch und technisch realisierbar ist.

Bereits die Vermessung der Infrastruktur verdeutlicht diese Problematik. Die im Projekt durchgeführten Messkampagnen haben gezeigt, dass selbst unter günstigen Bedingungen zahlreiche äußere Randbedingungen die Qualität und Verfügbarkeit der Daten beeinflussen. Dazu zählen gesperrte oder belegte Gleise, fehlende Vermarkungspunkte, Witterungseinflüsse, technische Ausfälle oder begrenzte Sperrpausen. Werden Anforderungen definiert, die ausschließlich unter idealisierten Bedingungen erreichbar sind, entsteht ein Kartenprozess, der im Regelbetrieb kaum wirtschaftlich oder zeitlich beherrschbar bleibt.

Gleiches gilt für den semantischen Detailgrad des Objektkatalogs. Eine sehr feingranulare Modellierung erzeugt zusätzliche Sonderfälle, erhöht die Komplexität des Labelings und erschwert automatisierte Prüfverfahren erheblich. Der Nutzen zusätzlicher Detailinformationen muss daher stets gegen den entstehenden Aufwand sowie den tatsächlichen Mehrwert für die Anwendung abgewogen werden.

Hinzu kommt, dass jede zusätzliche Anforderung direkte Auswirkungen auf den gesamten Kartenlebenszyklus besitzt. Höhere Genauigkeitsforderungen erhöhen nicht nur den Aufwand bei der Vermessung, sondern auch bei der Nachprozessierung, Qualitätssicherung, Validierung und späteren Aktualisierung der Daten.

Die finalen Anforderungen an die Vollständigkeit der Karte müssen noch genauer definiert werden. Auch muss noch gezielter festgelegt werden, wie oft Karten zu aktualisieren sind und ob die Verwendung der Sensorik des automatisierten Zuges selbst für die Validierung der Aktualität der Karte eingebunden werden kann. Neben der konkreten Verwendung der digitalen Karten für das vollautomatische Fahren können die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen auch in anderen Bereichen eingesetzt werden. Werkzeuge, die ursprünglich für die Erstellung und Validierung von GoA4-Kartendaten von der DB InfraGO entwickelt wurden, kommen inzwischen auch für die georeferenzierte Abnahme von Elementen der Leit- und Sicherungstechnik zur Anwendung, wie in [5] gezeigt.

Zusammenfassung

Im Projekt AutomatedTrain wurden von der DB InfraGO erstmals hochgenaue digitale Karten speziell für das vollautomatisierte Fahren erstellt. Die Vermessung und Erstellung der digitalen Karten zeigten, dass die in der Anforderungsanalyse definierten hohen Anforderungen an Genauigkeit und Vollständigkeit, insbesondere bei größeren Streckenabschnitten, nur mit großem Aufwand zu erfüllen sind. Daher ist stets zwischen Aufwand bei der Erstellung und dem tatsächlichen Mehrwert für die Anwendung abzuwägen. •

Literatur

[1] Pfitzner, A. et. al.: Digitale Karten für das vollautomatisierte Fahren auf der Schiene, EI - Der Eisenbahningenieur 02/2025, https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/202502_Eisenbahningenieur_Digitale%20Karte%20f%C3 %BCr%20vollautomatisiertes%20Fahren.pdf
[2] AutomatedTrain | Vollautomatisierte Bereitstellungs- und Abstellungsfahrt | Digitale Schiene Deutschland, https://digitale-schiene-deutschland.de/de/projekte/automatedtrain
[3] Nitzschke, H. et al.: SafeRailMap - Sichere Gleisdaten für eine sichere Zuglokalisierung, EI - Der Eisenbahningenieur 10/2020, https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads_Mediathek/Artikel%20SafeRailMap-%2010-20.pdf
[4] Schilling R. et. al.: Umfeldwahrnehmung für fahrerlose Bereit- und Abstellfahrten, EI - Der Eisenbahningenieur 05/2025, https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/2025_05_Eisenbahningenieur_Umfeldwahrnehmung_AutomatedTrain.pdf
[5] Kreyenberg, D. Nitzschke, H.: Georeferenzierte Abnahme von LST-Elementen am Beispiel der Zugbildungsanlage Mannheim, Deine Bahn, 06/2026, S.48-54.

Summary

Lessons learnt from the creation and use of digital maps in the AutomatedTrain project

In the AutomatedTrain project, DB InfraGO created, for the first time, high-precision digital maps specifically designed for fully automated driving. The surveying and creation of the digital map demonstrated that the high standards of accuracy and completeness defined in the requirements analysis – particularly for longer sections of track – can only be met at considerable cost. It is therefore always necessary to weigh up the cost of creation against the actual added value for the application.

Digitale Nutzung durch Deutsche Bahn AG zeitlich unbefristet genehmigt durch DVV Media Group, 2026