AutomatedTrain – Forschung für vollautomatisiertes Fahren auf der Schiene

AutomatedTrain – Research for fully automated rail operations

Susanne Gschwendtner | Christian Hauswald

Das Ziel von AutomatedTrain ist, die technische Machbarkeit vollautomatisierter Bereit- und Abstellfahrten sowie des automatisierten Vorbereitungsdienstes zu demonstrieren. Auf Basis einer normenkonformen Systemarchitektur und Spezifikation wurden prototypische Lösungen entwickelt, auf zwei Fahrzeugen integriert und getestet. Die Ergebnisse umfassen neben den zwei Demonstratoren Spezifikationsdokumente, Sensordaten sowie fotorealistische Simulationsdaten. Sie schaffen die Grundlage für die Weiterentwicklung und Standardisierung von ATO GoA 4 (Grade of Automation 4) im Bahnsektor.

1 Motivation

Die Motivation des Projektes AutomatedTrain war es, die technische Machbarkeit von vollautomatisierten Bereit- und Abstellfahrten im Modus ATO GoA 4 sowie das automatisierte Auf- und Abrüsten von Triebzügen nachzuweisen und zu demonstrieren. Triebfahrzeugführende (Tf) können dann am Bahnhof zu- bzw. aussteigen, die Bereit- oder Abstellung von Zügen findet automatisiert ohne Tf statt.

Damit wird ein wesentlicher Vorteil des vollautomatisierten Fahrens im Modus ATO GoA 4 gegenüber dem heute schon z. T. praktizierten hochautomatisierten Fahren im Modus ATO GoA 2 mit Tf adressiert: Unabhängig von der Personalverfügbarkeit können Züge flexibel eingesetzt werden. Dies verspricht wesentliche Verbesserungen gegenüber dem heutigen Bahnbetrieb: Es ermöglicht eine Steigerung der Fahrzeugverfügbarkeiten, und durch den hohen Automatisierungsgrad steigt auch die Betriebsstabi-

The objective of the AutomatedTrain project was to demonstrate the technical feasibility of fully automated driving for the use case of fully automated train provisioning. Prototypical solutions have been developed, integrated and tested on two trains based on a standard-compliant system architecture and specification. The project results comprise two demonstrators, specification documents and sensor and simulation data. These results provide a foundation for the further development and standardisation of ATO GoA 4 (Grade of Automation 4) systems in the railway sector.

1 Motivation

The objective of the AutomatedTrain project was to demonstrate the technical feasibility of fully automated driving with a limited speed for train provisioning in ATO GoA 4, including train preparation and parking. The driving personnel can then board or alight at stations, while the depot-related movements are executed fully automatically without any onboard staff.

This addresses a key advantage of GoA 4 over the already partially deployed GoA 2 operations with a driver: the train deployment becomes independent of personnel availability, thereby enabling more flexible operations. It is expected to result in increased vehicle availability and improved operating stability due to the high degree of automation and to have a positive impact on punctuality, for example through improved provisioning reliability.

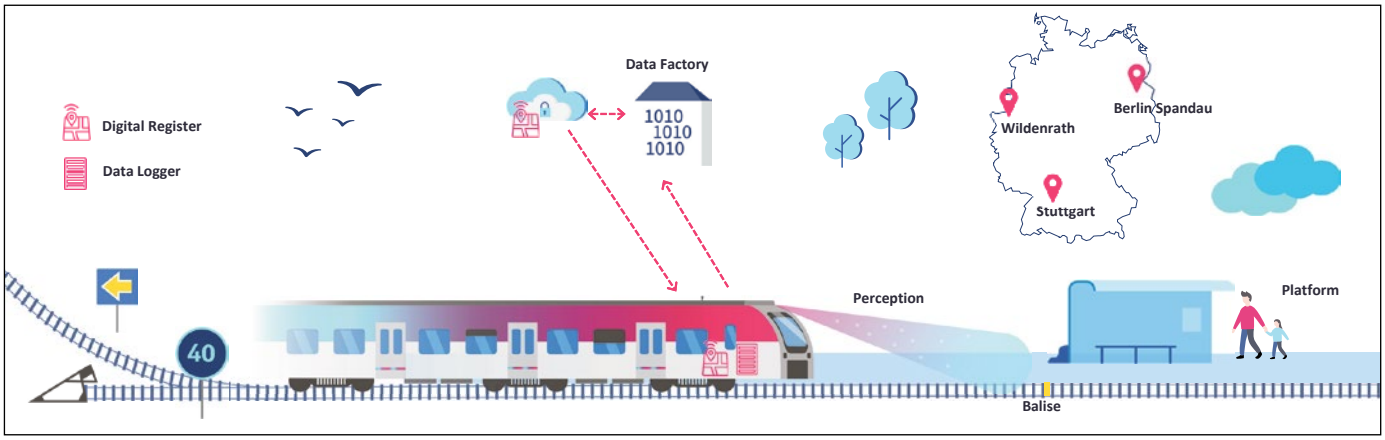


Bild 1: Use Case AutomatedTrain
Fig. 1: The AutomatedTrain use case

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

lität. Es ergeben sich auch positive Effekte auf die Pünktlichkeit – hier z. B. durch die Verbesserung der Bereitstellungspünktlichkeit. Der konkrete Projektauftrag war, einen Anwendungsfall prototypisch umzusetzen, der den zeitnahen Einstieg in das vollautomatisierte Fahren ermöglicht und noch offene Fragen klärt – beispielsweise im Hinblick auf konkrete Anforderungen an Technik und Betrieb. Dafür wurde der Anwendungsfall der vollautomatisierten Bereit- und Abstellungsfahrt eines Zuges gewählt, vgl. [1]. Er ist aufgrund niedriger Geschwindigkeiten und der Fahrt ohne Passagiere leichter beherrschbar und brächte, wie oben beschrieben, gleichzeitig eine direkte und relevante Verbesserung für die Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) im operativen Betrieb.
Der Anwendungsfall besteht aus folgenden Schritten (Bild 1):

- Vollautomatisierter Start des Fahrzeugs, Durchführung von Selbsttest und Kommunikation an die Leitstelle
- Nach Erhalt des Fahrbefehls von der Leitstelle vollautomatisierte Fahrt des Triebzuges mit max. 40 km/h, eigenständige Orientierung und Reaktion auf Hindernisse
- Halt des Triebzuges am Bahnsteig an der vorgesehenen Stelle entsprechend des Fahrbefehls. Wechsel von GoA 4-Betrieb zu GoA 2-Betrieb
- Zustieg Tf und Durchführung der Passagierfahrten im GoA 2-Betrieb
- Vollautomatisierte Rückkehr in die Abstellanlage und Abstellung / Abrüstung des Fahrzeuges.

2 Ziele und Anspruch des Projektes AutomatedTrain

Das Projekt AutomatedTrain verfolgt das übergeordnete Ziel des Nachweises der technischen Machbarkeit des GoA 4-Betriebs für den oben beschriebenen Anwendungsfall. Neben dieser Zielsetzung ist das Projekt durch das Ansinnen motiviert, im Bahnsektor das Thema GoA 4 stärker zu verankern, die Projektergebnisse nachhaltig anwendbar zu gestalten und die Standardisierung von GoA 4 auch außerhalb Deutschlands voranzutreiben. Aus diesen Gründen basieren die modulare Systemarchitektur und die Anforderungsspezifikationen auf ATO (Automatic Train Operation) over ETCS (European Train Control System) unter den ETCS-Modi Full Supervision (FS) und Automatic Driving (AD) in ETCS Level 2, vgl. [7]. Die Nachhaltigkeit der Projektergebnisse wurde durch den CENELEC-konformen Projektaufsatz gemäß EN 50126 in Bezug auf die Phasen 1–5 des V-Modells sowie durch eine Systemarchitektur mit offenen Schnittstellen sichergestellt, die durch einen Independent Safety Assessor, TÜV Süd, begutachtet wurde. Zudem fand ein regelmäßiger und aktiver Austausch mit dem Eisenbahn-Bundesamt (EBA) zur Klärung von Umsetzungsfragen statt. Die Einbringung der Ergebnisse aus AutomatedTrain in das Europe's Rail Joint Undertaking (ERJU) wird derzeit vorbereitet.
Um diese Ziele zu erreichen, wurde unter Leitung der DB InfraGO das Projekt AutomatedTrain gestartet und ein Konsortium aus neun Teilnehmern aus Industrie, Forschung, EVU und Eisenbahninfrastrukturbetreibern (EIU) etabliert. Beteiligt sind die Bosch Engineering GmbH, Codewerk AG, DB InfraGO AG, DB Regio AG, duagon AG, IAV AG, RedHat AG, Siemens Mobility GmbH, TU Dresden. Das Vorhaben wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) mit ca. 42 Mio. EUR gefördert. Die Projektlaufzeit beträgt drei Jahre und drei Monate.

3 Prozesse in AutomatedTrain

Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben wurde für die Projektumsetzung eine gemeinsame Herangehensweise bei der Entwick-

The specific project mandate was to prototypically implement a use case that would enable a timely transition to fully automated driving and clarify any outstanding issues: for example, regarding specific technical and operating requirements. The use case of fully automated train provisioning, including train preparation and parking, was selected for this purpose; see [1]. The absence of any passengers and the limited operating speed mean that this use case is comparatively less complex, while still offering direct operating benefits for the railway undertaking.
The use case comprises the following steps (fig. 1):

- fully automated train preparation, self-testing and communication with the control centre
- after the receipt of a Movement Authority: fully automated driving at a max. speed of 40 km/h, including the orientation of the train unit and obstacle detection and response
- the train stops at the assigned platform position; the transition from GoA 4 to GoA 2 mode
- the driver boards the train for a passenger service in GoA 2 mode
- the fully automated return of the vehicle to depot and stabling.

2 The project's objectives and ambition

The overarching goal of the AutomatedTrain project is to demonstrate the technical feasibility of GoA 4 operations for the described use case. In addition, the project aims to establish GoA 4 more firmly in the railway sector, to ensure that the AutomatedTrain results can be used sustainably and to contribute to the European GoA 4 standardisation efforts. To this end, the modular system architecture and requirements specification were based on ATO (Automatic Train Operation) over ETCS (European Train Control System) under ETCS Level 2, while using the Full Supervision (FS) and Automatic Driving (AD) operating modes; see [7]. Furthermore, the sustainability of the results has been ensured by a CENELEC-compliant (EN 50126) project framework with regard to V-model phases 1–5, as well as a system architecture with open interfaces, which has been assessed by the independent safety assessor, TÜV Süd. In addition, a regular and pro-active exchange with the Federal Railway Authority (EBA) has also taken place. The integration of the results into the Europe's Rail Joint Undertaking (ERJU) is currently being prepared.
The project was led by DB InfraGO and carried out by a consortium of nine partners from industry, research, operators and infrastructure managers, namely Bosch Engineering GmbH, Codewerk AG, DB InfraGO AG, DB Regio AG, duagon AG, IAV AG, RedHat AG, Siemens Mobility GmbH and TU Dresden. It was funded by the German Federal Ministry of Economic Affairs and Energy to the tune of approximately EUR 42 million. The project duration is three years and three months.

3 The processes in AutomatedTrain

The project selected a collaborative working mode between operators and industry for its development. In AutomatedTrain, safety-relevant systems were specified and partially developed for the railway sector. The lifecycle model defined in EN 50126-1:2017 has been applied in order to ensure the sustainability of the results as per the project goals. The project results were identified based on the annexes to EN 50126-1 and EN 50126-2 and were subjected to configuration management. Comprehensive

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

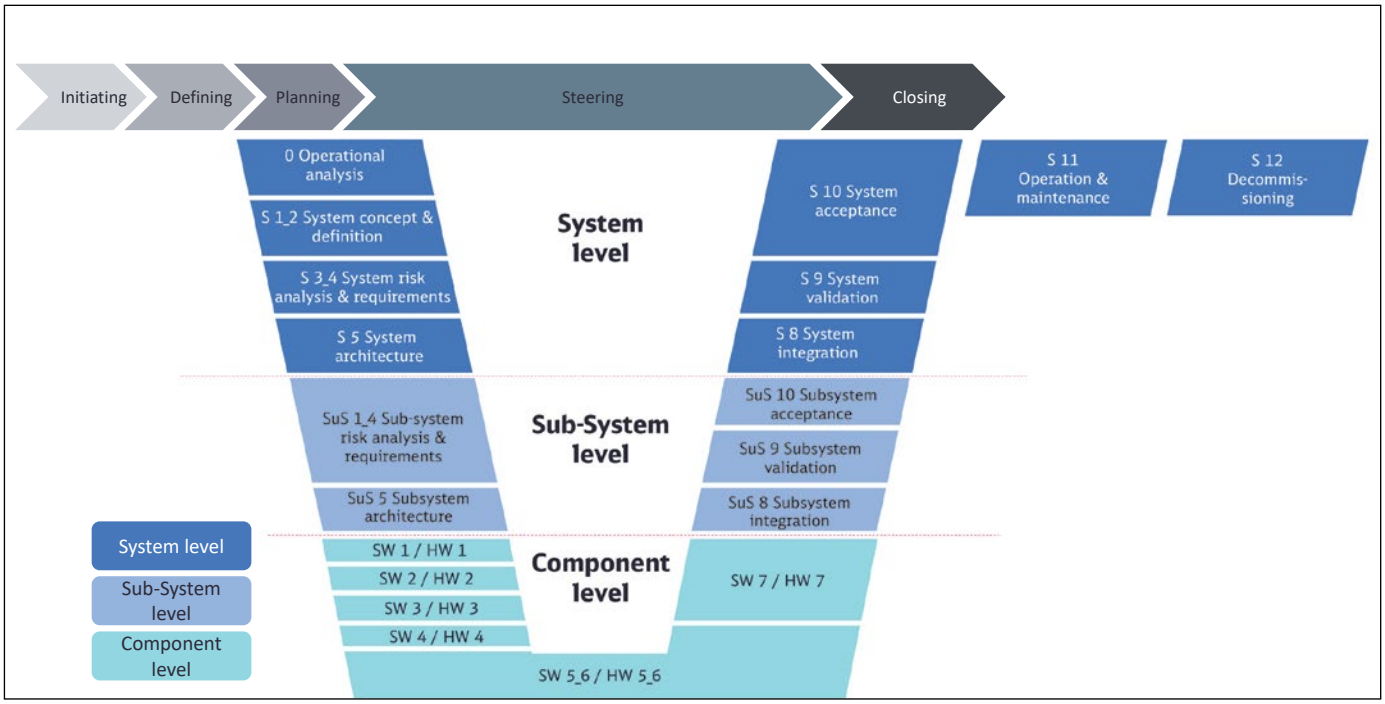


Bild 2: In AutomatedTrain angewendetes Lebenszyklusmodell
Fig. 2: The lifecycle model used in AutomatedTrain

lung von Betreibern und der Industrie gewählt. Im Rahmen von AutomatedTrain wurden sicherheitsrelevante Systeme für den Bahnsektor spezifiziert und entwickelt. Um die in den Projektzielen formulierte Nachhaltigkeit der Anforderungsspezifikationen zu gewährleisten, wurde das Lebenszyklusmodell aus der Norm EN 50126-1:2017 angewandt. Projektergebnisse wurden auf Basis der Anhänge zu EN 50126-1 und EN 50126-2 identifiziert und dem Konfigurationsmanagement unterzogen. Relevante Managementpläne wurden im Projekt erzeugt und regelmäßig aktualisiert, beispielsweise Systems Engineering Management, Pläne zur funktionalen und IT-Sicherheit sowie Qualitäts- und Anforderungsmanagementpläne. Des Weiteren wurden Projektrollen definiert und die benötigten Qualifikationen der Rolleninhaber nachgewiesen. Die in englischer Sprache erstellten Spezifikationsdokumente wurden einem Review durch die beteiligten Experten und Projektpartner sowie einer Qualitätsprüfung unterzogen. Eine vollständige Verifikation dieser Dokumente wurde über alle Lebenszyklusphasen hinweg durchgeführt. Die Validierung der Dokumente erfolgte vollständig bis Lebenszyklusphase 5 sowie in Teilen bis Lebenszyklusphase 9.
Der Scope von AutomatedTrain sieht eine Entwicklung und Systemintegration bis Technical Readiness Level 6 vor. Entsprechend wurden die Phasen 10, 11 und 12 des Lebenszyklusmodells nach EN 50126-1 nicht in AutomatedTrain implementiert (Bild 2).

4 Ergebnisse des Projektes AutomatedTrain

Innerhalb der letzten drei Jahre konnte durch AutomatedTrain die Basis für eine Produktentwicklung der vollautomatischen Bereit- und Abstellungsfahrt eines Zuges gelegt werden. Im Folgenden nun ein Ergebnisüberblick.

4.1 Spezifikationsdokumente und Systemarchitektur

In AutomatedTrain wurde eine CENELEC-konforme Spezifikation für den beschriebenen Anwendungsfall erzeugt. Ausgehend

management plans have been established and regularly updated, including system engineering, functional safety, IT security, quality management and requirement management. The project roles have been clearly defined and the required personnel qualifications have been substantiated. All the specification documents have been prepared in English, reviewed by experts and partners and subjected to formal quality assurance procedures. A complete verification of these documents has been performed across all the lifecycle phases, while the document validation has been completed up to Phase 5 and partially up to Phase 9.
The development scope in AutomatedTrain covered Technical Readiness Levels up to TRL 6. Consequently, Phases 10 to 12 of the lifecycle model according to EN 50126-1 were not addressed within the project (fig. 2).

4 The project results of AutomatedTrain

Over the past three years, AutomatedTrain has established the basis for the product development of the fully automated preparation, driving and parking of train units. The following chapters provide an overview of the project's results.

4.1 The system architecture and specification

A complete CENELEC-compliant specification comprising the operating concept, the system definition, the system requirements specification and system architecture has been developed for the use case [1]. Three new modular onboard system elements have been defined, as shown in fig. 3 and described in detail in [2]:

- The Object Detection System (ODS) is responsible for train environment perception and the detection of objects, obstacles and unauthorised individuals within the required field of view. The ODS includes a digital map of the rail infrastructure. The ODS system element must comply with Safety Integrity Level 1 (SIL1).

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

von einem Betriebskonzept wurden Systemdefinition, Systemanforderungsspezifikation und Systemarchitektur erarbeitet [1]. Aus der Systemarchitektur ergeben sich drei neue modulare und zugseitige Bausteine des vollautomatisierten Betriebes, welche in Bild 3 dargestellt und in [2] detailliert beschrieben sind:

- Das Objekterkennungssystem (ODS, Perception s. Bild 1) erfasst das Umfeld des Zuges und detektiert in den betrieblich geforderten Sichtbereichen Objekte, Hindernisse und unbefugte Personen. Es nutzt dazu eine digitale Karte des Streckenverlaufs. Dem ODS wurde das Sicherheitsintegritätslevel (Safety Integrity Level) SIL1 zugewiesen.
- Das Automatisierungsmodul (APM) leitet aus den von ODS erfassten Objekten eine Reaktion ab und gibt diese an die Leittechnik weiter. Außerdem umfasst es alle fahrzeugseitigen Automatisierungsfunktionen, die zum vollautomatischen Vorbereitungsdienst erforderlich sind. Dem APM wurde das SIL2 zugewiesen.
- Der Datenrekorder (VDL) wird vor allem in der Entwicklungs- und Pilotphase benötigt, um die Roh- und Funktionsdaten des ODS und APM aufzuzeichnen und für die nächste Iteration der Entwicklung bereitzustellen. Dem VDL wurde das Sicherheitsintegritätslevel Basisintegrität zugewiesen.

Die genannten SIL-Einstufungen wurden aus der Risikoanalyse im Zusammenspiel mit dem Gefährdungslogbuch abgeleitet, welche über den Projektverlauf kontinuierlich aktualisiert und erweitert wurde. Zusätzlich wurde eine Security-Bedrohungsanalyse durchgeführt und ein Security-Konzept erstellt. Auf Systemelementebene wurden für ODS, APM, VDL vollständige Systemanforderungsspezifikationen und Schnittstellenbeschreibungen zu den Bestandssystemen erstellt. Für das Gesamtsystem wurden Testspezifikationen erstellt, die sich auf die Systemelemente beziehen.

- The Automatic Processing Module (APM) determines the system's reactions based on the ODS outputs and forwards the required commands to the train's control system. In addition, it also comprises all the automation functions required for fully automated train preparation. The APM is assigned to SIL2.
- The Vehicle Data Logger (VDL) is primarily required during the development and pilot phases to record raw and processed data from the ODS and APM for development and validation purposes. It is classified with basic safety integrity.

The safety classifications have been derived from the risk analysis and hazard log and have been continuously updated throughout the project. In addition, a security threat analysis and corresponding security concept have also been developed. Complete specifications have been prepared for the ODS, APM and VDL at the system element level, while delta specifications have been created for the existing systems (ETCS-OB, ATO-OB, and TCMS), thereby identifying all the modifications required for GoA 4 relative to TSI CCS 2023 and the Siemens Mobility TCMS implementation. All the functional interfaces between the system elements have been defined in Interface Control Documents (ICD).

A total of approximately 1,800 requirements have been specified and agreed within the consortium and a corresponding number of test cases have been developed at both the system and system element levels. The test specifications are aligned to the system elements.

Around 50 process-compliant documents have been produced with contributions from more than 100 experts from DB Infra-

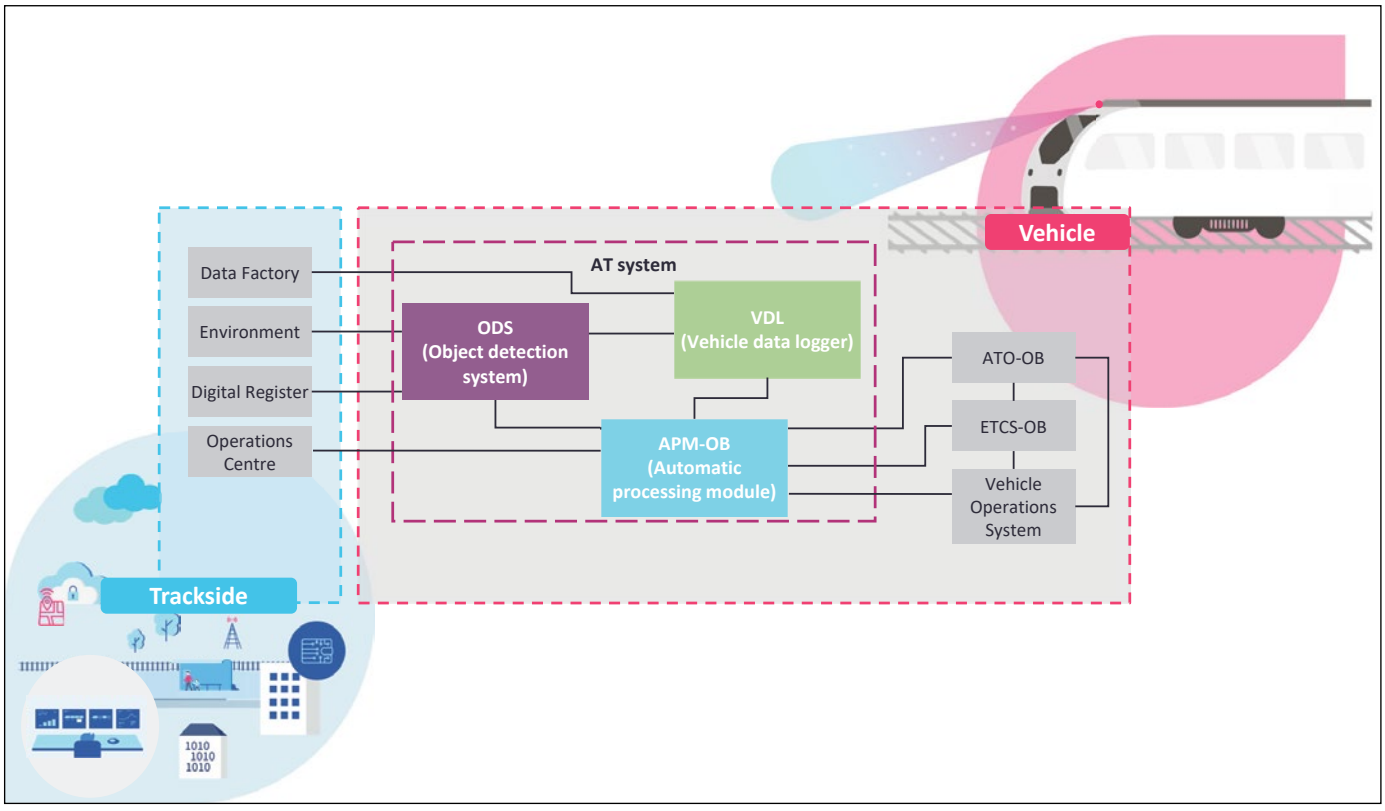


Bild 3: Schematische Darstellung der in AutomatedTrain abgeleiteten Systemarchitektur bestehend aus den drei neuen Systemelementen Objekterkennungssystem (ODS), Automatisierungsmodul (APM) und dem Vehicle Data Logger (VDL) sowie deren Schnittstellen zu Bestandssystemen

Fig. 3: A schematic diagram showing the AutomatedTrain system architecture consisting of three new system elements: the Object Detection System (ODS), Automatic Processing Module (APM) and Vehicle Data Logger (VDL), as well as their interfaces to the existing systems

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

elementspezifikationen und für die Bestandssysteme ETCS-OB, ATO-OB und Fahrzeugsteuerung Delta-Spezifikationen, also eine Übersicht aller für GoA 4 benötigten Änderungen bezogen auf TSI CCS 2023 und TCMS von Siemens Mobility, erzeugt. Alle funktionalen Schnittstellen, zwischen den Systemelementen sind in Interface Control Dokumenten (ICDs) definiert.
In Summe wurden so in AutomatedTrain etwa 1800 Anforderungen erstellt und im Projektkonsortium abgestimmt. Passend zu den Anforderungen an das AutomatedTrain-System und seine Systemelemente wurden etwa 1800 Testfälle auf System und Systemelementebene zum Testen der Anforderungen erstellt. Diese werden in Testspezifikationen zu jedem Systemelement zusammengefasst.
An der Erstellung der insgesamt 50 prozesskonform erzeugten Dokumente waren über 100 Experten der DB InfraGO, DB Regio, Siemens Mobility und Bosch Engineering beteiligt. Der gesamte Prozess der Spezifikation wurde hierbei durch das EBA sowie einen unabhängigen Sicherheitsgutachter begleitet und überwacht. Der vollständige Dokumentensatz kann nach Projektabschluss als Spezifikation zur Produktentwicklung, etwa als Lastenheft für Fahrzeugausschreibungen oder zur Weiterentwicklung im Rahmen von ERJU verwendet werden.

4.2 Implementierung der Module Umfelderkennung (ODS) und Automatisierung (APM)

Aufgrund der streng begrenzten Projektlaufzeit von drei Jahren mussten die Auswahl der Hardware und Implementierung der Software teilweise parallel zur Anforderungsdefinition gestartet werden. Ein wesentlicher Technologiebaustein des ODS ist die Sensorik zur Umfeldwahrnehmung und Lokalisierung. Bei ihrer Auslegung wurde basierend auf vorläufigen Anforderungen eine gemeinsame Hardwareauswahl für beide geplanten Baureihen (siehe Abschnitt Integration) im Projekt getroffen. Damit die an das ODS gestellten Anforderungen unter allen Umweltbedingungen erfüllt werden können, wurde das Sensorset multi-modal aufgebaut, d. h. es beinhaltet mehrfache und verschiedene Arten von Sensoren für die geforderten Sichtbereiche: Ultraschallsensoren, LiDAR-Sensoren, Fernbereichsradar sowie eine Kamera. Zusätzlich wurden weitere Farbkameras sowie Infrarotkameras (LWIR) zu Forschungszwecken des vollautomatisierten Fahrens bei höherer Geschwindigkeit als 40 km/h ausgewählt [3]. Die vollständige Bewertung der in AutomatedTrain verwendeten Sensorik steht noch aus, wird jedoch im Rahmen des Projektabschlussberichtes veröffentlicht werden.
Neben der Hinderniserkennung ist die absolute Lage der erkannten Objekte im Streckennetz maßgeblich für die Art und den Umfang der benötigten Reaktion. Damit ein GoA 4-System diese bestimmen kann, ist eine sichere, kontinuierliche und hochgenaue Positions- und Orientierungsbestimmung des Zuges erforderlich – eine zentrale Voraussetzung im ATO GoA 4-Modus [5]. Die Genauigkeit der Lokalisierung und Orientierung wird mit einer Referenzlösung überprüft, und die Ergebnisse werden im Projektabschlussbericht veröffentlicht.
Die notwendige Fahrzeugautomatisierung gemäß der gemeinsamen Spezifikation wurde von Siemens Mobility auf dem Mireo umgesetzt. Alle fahrzeugseitigen, zum Vorbereitungsdienst gehörenden Abläufe, wie z. B. Aktivierung des Führerstandes, Durchführen der Fahrzeugtests und Eingabe der ETCS-Zugdaten, wurden automatisiert. Details hierzu werden im Projektabschlussbericht bekannt gegeben und können während der InnoTrans 2026 in Berlin live im Rahmen von Demonstrationsfahrten mit dem Mireo erlebt werden.

GO, DB Regio, Siemens Mobility and Bosch Engineering. The EBA and an independent safety assessor accompanied and provided input throughout the end-to-end specification development. The complete set of documents will be made available at the end of the project for use by the railway sector, e.g. as a basis for product development specifications, requests for tender documents when ordering new rail vehicles or the continuous development of specifications through the ERJU.

4.2 Implementing the Object Detection (ODS) and Automation Module (APM)

The strictly limited project duration of three years meant that the selection of hardware and the implementation of the software had to be started in parallel with the definition of the requirements in some cases.
A key technological component of the ODS is the sensor system for environmental perception and localisation. A common hardware selection for both vehicles (see the "Integration" section) was made based on the preliminary requirements. The sensor set was designed to be multimodal so as to ensure that the requirements placed on the ODS can be met under all environmental conditions; that is, it includes multiple and various types of sensors for the required fields of view: ultrasonic sensors, LiDAR sensors, a long-range radar and a camera. In addition, further colour cameras and infrared cameras (LWIR) were also selected for research purposes related to fully automated driving at speeds exceeding 40 km/h. A complete evaluation of the sensor technology used in AutomatedTrain is still pending but will be published as part of the final project report.
In addition to obstacle detection, the absolute position of the detected objects within the rail infrastructure is critical to the nature and extent of the required reaction. The reliable, continuous and highly accurate positioning and orientation of the train are required for a GoA 4 system to be able to determine this, i.e. a key prerequisite in ATO GoA 4 mode [5]. The accuracy of the localisation and orientation has been verified using a reference solution and the results will be published in the final project report.
The required vehicle automation, in accordance with the agreed specification, has been implemented by Siemens Mobility on the Mireo. All the vehicle-side processes related to preparation for service, such as activating the driver's cab, conducting the vehicle tests and entering the ETCS train data, have been automated. The details will be shared in the final project report and can be experienced live during InnoTrans 2026 in Berlin as part of the Mireo demonstration.

4.3 Creating the digital map as "digital route knowledge"

Digital maps are a key prerequisite for GoA 4 operations. They provide a highly accurate digital representation of the infrastructure and support reliable obstacle detection as well as precise train localisation [6] within the ODS. In AutomatedTrain, digital maps have been generated for all the locations where the test vehicles were deployed: the Havelländische Eisenbahn (HVLE) Spandau test track, the Wegberg-Wildenrath test centre, Alstom's test site in Hennigsdorf and the Stuttgart S-Bahn network. The process of map generation, processing and validation has also been precisely defined, as the digital map, serving as an input to the ODS, must likewise comply with SIL1. An absolute, georeferenced accuracy of 10 cm has been achieved for the tracks and all other infrastructure objects. Bosch Engineering's Object Detection System has successfully used the maps in the project.

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

4.3 Erzeugung der Digitalen Karte als „digitale Streckenkenntnis“

Digitale Karten sind eine zentrale Voraussetzung für den GoA 4-Betrieb. Sie stellen eine hochgenaue, digitale Abbildung der Infrastruktur dar und unterstützen eine zuverlässige Hinderniserkennung sowie präzise Zuglokalisierung [6] innerhalb des ODS. In AutomatedTrain wurden digitale Karten für alle Einsatzorte der Testfahrzeuge erzeugt: Teststrecke der Havelländischen Eisenbahn (HVLE) Spandau, Prüfcenter Wegberg-Wildenrath, Testgelände von Alstom in Hennigsdorf und das S-Bahn Netz Stuttgart. Dabei wurde auch der Prozess der Kartenerzeugung, Verarbeitung und Validierung genau definiert, da die digitale Karte als Eingangssignal des ODS ebenfalls SIL1 erfüllen muss. Hierbei konnte eine absolute, georeferenzierte Genauigkeit des Gleisverlaufs und aller infrastrukturseitigen Objekte von 10 cm erreicht werden. Die Karten wurden von dem ODS von Bosch Engineering im Projekt erfolgreich eingesetzt.

4.4 Umsetzung von Fahrzeugintegration, Systemintegration und -tests

Im Projekt AutomatedTrain wurde die Fahrzeugintegration der entwickelten Systeme in unterschiedlichem Maße mit unterschiedlichen Verantwortlichkeiten auf folgenden zwei Baureihen vorgenommen (Bild 4):

1. Mireo (Hersteller: Siemens Mobility): Auf dem Mireo wurde der beschriebene Anwendungsfall vollständig umgesetzt: vollautomatischer Vorbereitungsdienst und vollautomatische Bereitstellungs- bzw. Abstellfahrt. Hierzu wurden die Systemkomponenten ODS, VDL und APM von der Firma Siemens Mobility entwickelt, welche auch die Fahrzeugintegration, Systemintegration und die Systemtests im Testcenter Wegberg-Wildenrath und bei der HVLE durchgeführt hat. Es wurden ebenfalls die spezifizierten Schnittstellen zu den Bestandssystemen ATO-OB (Automatic Train Operation on-board unit), ETCS-OB (European Train Control System on-board unit) und TCMS (Train Control and Management System) umgesetzt, integriert und getestet.
2. Baureihe 430 (Hersteller: Alstom) der S-Bahn Stuttgart (DB Regio). Bei diesem Fahrzeug handelte es sich um ein Fahrzeug mit dem Ausrüstungszustand ETCS Baseline 3, Release 2

4.4 Vehicle and system integration and testing

The vehicle integration of the developed systems in the AutomatedTrain project have been carried out to varying degrees and with different responsibilities on the following two vehicles (fig. 4):

1. The Mireo (manufacturer: Siemens Mobility): the described use case has been fully implemented on the Mireo: fully automated pre-service operations and fully automated deployment and return trips. The ODS, VDL, and APM system components for this purpose were developed by Siemens Mobility, the company that also carried out the vehicle integration, system integration and testing at the Wegberg-Wildenrath Test Centre and at the HVLE. The specified interfaces to the existing systems, i.e. ATO-OB (Automatic Train Operation on-board unit), ETCS-OB (European Train Control System on-board unit) and TCMS (train control and management system), have been implemented, integrated and tested.
2. The Class 430 (manufacturer: Alstom) provided by S-Bahn Stuttgart (DB Regio): this vehicle has been equipped with ETCS Baseline 3, Release 2 (Subset-026, V3.6.0). [10]. In AutomatedTrain, the vehicle was equipped with an ODS developed by Bosch Engineering and a VDL developed by DB InfraGO. The APM was implemented to provide the expected system responses, but without interfering with the train's traction and braking controls. DB Regio was responsible for vehicle integration, while DB InfraGO was responsible for the system integration and testing.

Another project goal involved integrating the identical ODS sensor hardware on both trains on similar positions relative to the top of the rail; however, the differences in the external contours of the vehicles and design constraints meant that this was only possible to a certain extent.

Prior to testing the AutomatedTrain system in a vehicle environment, each software release was tested in specialised laboratory environments. Parts of these labs are shown in fig. 5. All the ODS and VDL components in the “static mock-up Class 430” were integrated by Bosch Engineering and DB InfraGO; the same components in the “dynamic mock-up Class 430” were integrated into a mobile laboratory with sensor



Bild 4: Die beiden im Projekt umgebauten Triebzüge, BR430 der S-Bahn Stuttgart (links) und Mireo der Firma Siemens Mobility (rechts)
Fig. 4: The two train units that have been retrofitted in AutomatedTrain: A Class 430 provided by S-Bahn Stuttgart (left) and a Siemens Mobility Mireo (right)

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

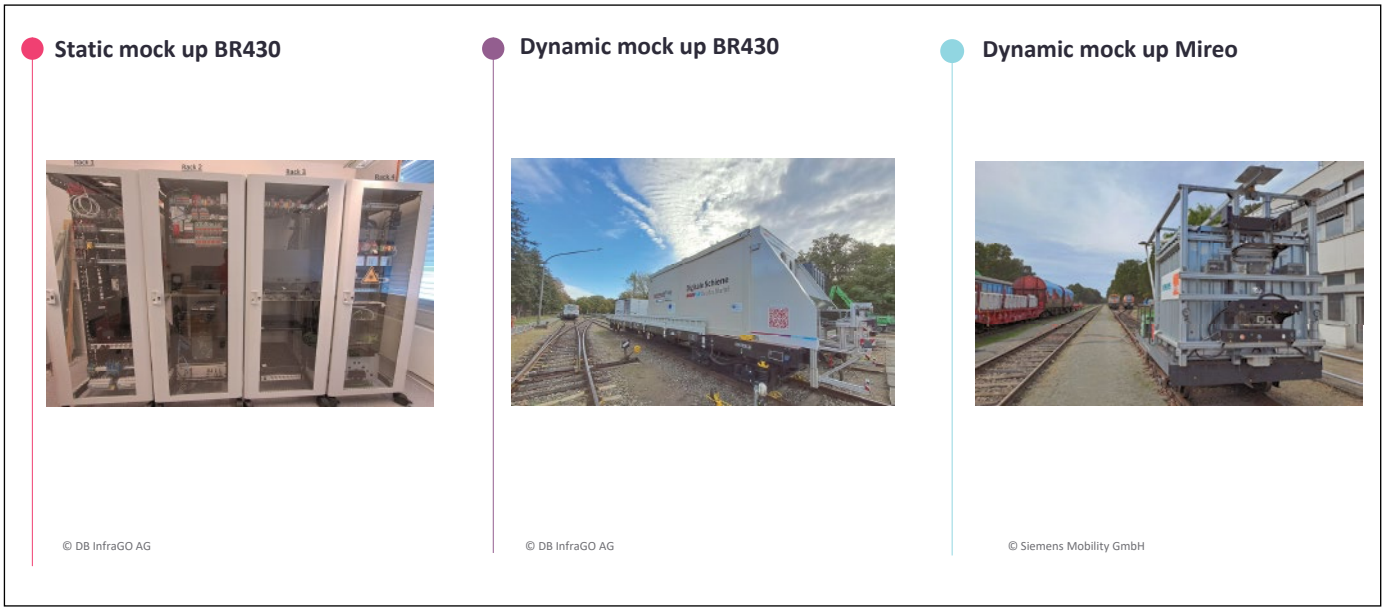


Bild 5: Laborumgebungen von AutomatedTrain, die vor der Implementation in die Fahrzeuge genutzt wurden; „Static Mock Up BR430", „Dynamic Mock Up BR430" und „Dynamic Mock Up Mireo"
Fig. 5: The laboratories in AutomatedTrain that were available prior to the implementation of the AutomatedTrain systems on the trains; "static mock-up Class 430", "dynamic mock-up Class 430" and "dynamic mock-up Mireo"

(Subset-026, V3.6.0) [10]. Das Fahrzeug wurde mit dem von Bosch Engineering entwickelten ODS und dem von der DB InfraGO entwickelten VDL ausgerüstet. Das APM wurde zur Ausgabe der erwarteten Systemreaktionen, jedoch ohne Eingriff in die Fahr- und Bremssteuerung des Triebzuges umgesetzt. Die Fahrzeugintegration lag in der Verantwortung von DB Regio, DB InfraGO verantwortete die Systemintegration und Systemtests.

Ziel im Projekt war es außerdem, innerhalb des ODS identische Sensorhardware auf beiden Zügen möglichst baugleich zu positionieren, was aufgrund der Unterschiede in der äußeren Kontur

mounting positions identical to those on the Class 430 multiple-unit train. On the "dynamic mock-up Mireo," the ODS components from Siemens Mobility were integrated into a mobile laboratory.

After vehicle commissioning, the Class 430 train was transferred to Esslingen and used for data logging and demonstration journeys. Unlike in the Mireo, the system components were installed on the train without any interference in vehicle's traction and braking control, meaning that the train could be used for test and demonstration journeys on the public network around Stuttgart [4]. In this case, the train driver

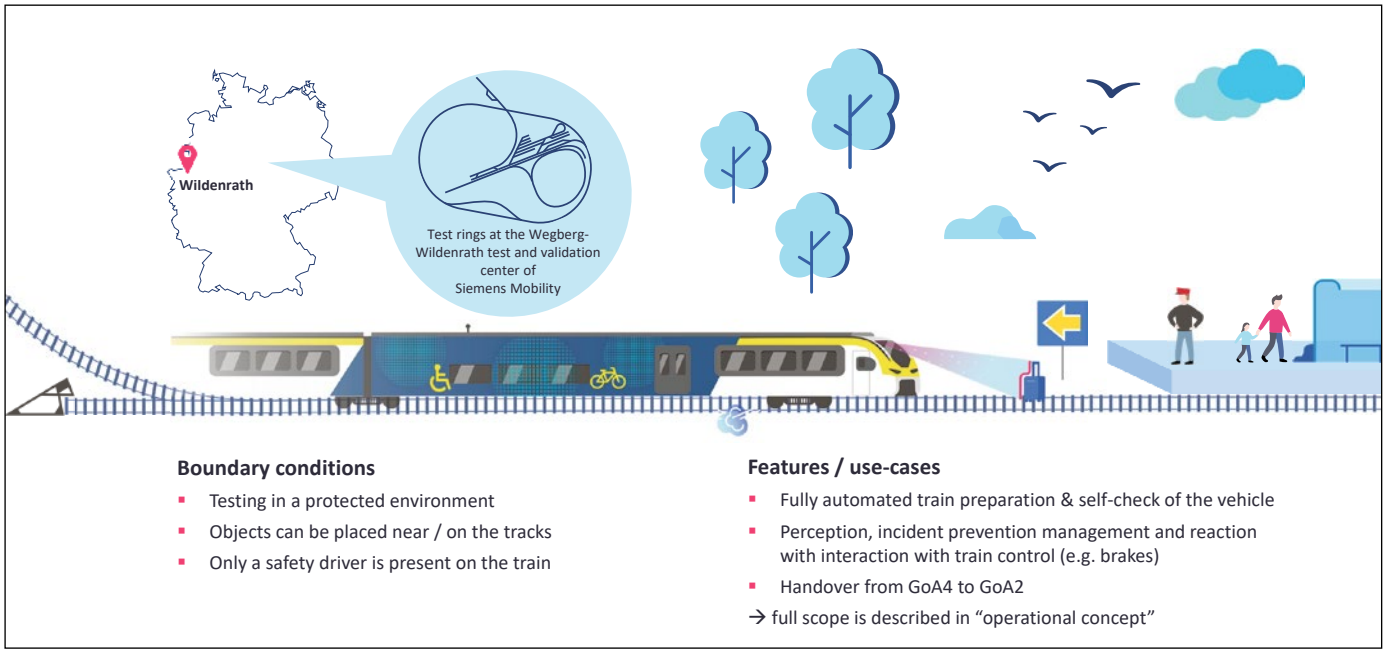


Bild 6: Testumgebung und Scope des Siemens Mireo
Fig. 6: The test environment and scope for the Siemens Mireo

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

der Fahrzeuge und konstruktiver Einschränkungen nur bedingt möglich war.
Bevor das AutomatedTrain System in einer Fahrzeugumgebung getestet wurde, erfolgte der Test jedes Softwarereleases in speziellen Laborumgebungen. Diese sind in Teilen in Bild 5 dargestellt. Im „Static Mock Up BR430" wurden alle Komponenten von ODS und VDL von Bosch Engineering und DB InfraGO integriert, im „Dynamic Mock Up BR430" wurden die gleichen Komponenten zu einem mobilen Labor mit identischen Einbaupositionen für die Sensorik wie auf dem Triebzug BR430 integriert. Im „Dynamic Mock Up Mireo" wurden die ODS-Komponenten von Siemens Mobility ebenso zu einem mobilen Labor integriert.
Nach Inbetriebnahme wurde das Fahrzeug BR430 nach Esslingen überführt und für die Aufzeichnung von Daten und zu Demonstrationsfahrten genutzt. Da die Systemkomponenten im Gegensatz zu dem Mireo rückwirkungsfrei auf dem Fahrzeug verbaut wurden, konnte das Fahrzeug weiterhin für Probe- und Demonstrationsfahrten auf dem öffentlichen Netz der S-Bahn Stuttgart genutzt werden [4]. Der Tf bleibt hierbei in allen Fällen in voller Verantwortung, und das AutomatedTrain-System läuft im „Schattenmodus" mit und zeichnet die Rohdaten und Systemreaktionen zur späteren Auswertung auf. Im Gegensatz dazu legt der Mireo den Weg aus der Abstellanlage bis zur ersten Station im Prüfcenter Wegberg-Wildenrath sowie auf dem Testgelände der HVLE

retained full responsibility for the vehicle and the AutomatedTrain system ran in "shadow mode," recording raw data and system responses for later evaluation. By contrast, the Mireo travels from the depot to the first station at the Wegberg-Wildenrath Test Centre fully automatically and without a train driver, as well as on the test track at the HVLE in Berlin-Spandau. The vehicle brakes automatically in the event of any obstacles on the track. In addition, the fully automated preparation for service and parking of the train were also implemented and tested (see fig. 6 and 7 for details).

4.5 Establishing a data factory for recording, transmitting and storing all the data

Comprehensive sensor data is required in GoA 4 projects for the development, validation and verification of the systems. In AutomatedTrain, this need was addressed by an end-to-end workflow for data recording, transmission and processing. In accordance with the requirements specification, DB InfraGO developed a Vehicle Data Logger (VDL) with hardware certified in compliance with the CE, EN 45545, EN 50155, EN 50121, REACH, RoHS and EMC06 standards. The VDL has been installed on the Class 430 train, where it enables the recording of up to 120 TB of sensor data per train side. When the train is parked at the depot in Esslingen am Neckar, the

ZUVERLÄSSIGE ZEITSYNCHRONISATION
für digitale Bahninfrastruktur und Schienenfahrzeuge


hopf Time and Frequency Solutions
Expertise für Zeitsynchronisation
seit mehr als 50 Jahren
www.hopf.com | sales@hopf.com
IRIS Certification

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

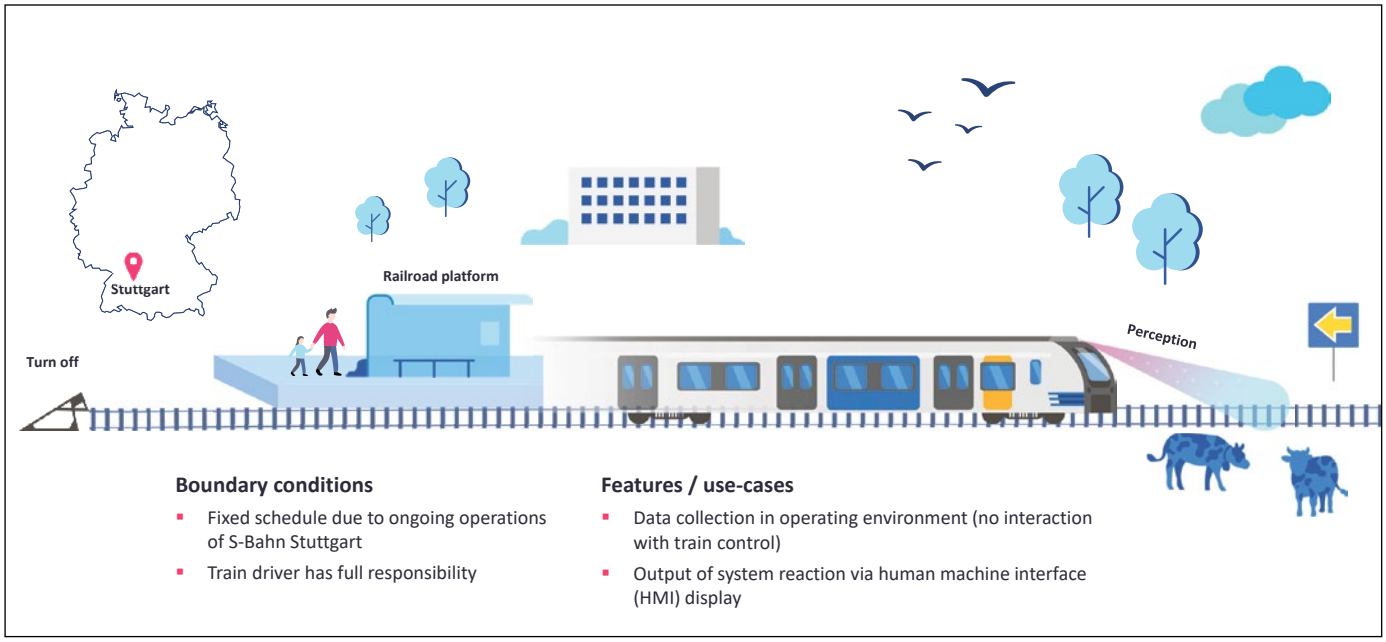


Bild 7: Testumgebung und Scope des BR 430
Fig. 7: The test environment and scope for the Class 430

in Berlin Spandau vollautomatisiert und ohne Tf zurück. Im Falle von auftretenden Hindernissen bremst das Fahrzeug selbstständig. Zudem wurde auch das vollautomatisierte Auf- und Abrüsten des Zuges umgesetzt und getestet (Details siehe Bild 6 und Bild 7).

4.5 Aufbau einer Data Factory zum Aufzeichnen, Übertragen und Vorhalten aller Daten

Umfassende Sensordaten werden in GoA 4-Projekten für die Entwicklung, Validierung und Verifikation der Systeme benötigt. In AutomatedTrain wurde dieser Bedarf durch eine Ende-zu-Ende Wirkkette zur Datenaufzeichnung, -übertragung und -verarbeitung adressiert. Entsprechend der Anforderungsspezifikation wurde von DB InfraGO ein Vehicle Data Logger (VDL) entwickelt, dessen Hardware nach den Normen CE, EN 45545, EN 50155, EN 50121, REACH, RoHS & EMV06 zertifiziert wurde. Der VDL wurde auf dem Triebzug BR430 verbaut und ermöglicht dort eine Datenaufzeichnung von bis zu 120 TB an Sensordaten pro Zugseite. Diese Sensordaten werden, wenn der Zug in der Abstellung in Esslingen a. Neckar geparkt ist, verschlüsselt via WIFI 6e mit bis zu 4 GB/s zur Landseite auf den sogenannten Data Touchpoint übertragen. Dort werden die Daten vorverarbeitet, beispielsweise finden ein Integritätscheck und eine Selektion statt. Anschließend werden die Daten via Glasfaser an das Tier-3 Data Center in Frankfurt übertragen. Im Data Center findet die Kuratierung der Daten statt, welche von den Projektbeteiligten genutzt werden können. Aktuell laufen noch die Arbeiten an einem annotierten Datensatz, ähnlich den bereits veröffentlichten Datensätzen „OSDaR23“ [12] und „OSDaR26“ [13, 11], welche der Entwicklung und Validierung von zukünftigen ATO GoA 4-Funktionen im Sektor dienen.
Bis Redaktionsschluss konnten über 210 Stunden mit insgesamt 400 TB Sensordaten im Raum Stuttgart mit dem Fahrzeug BR430 und dem dynamischen Mock-up aufgezeichnet werden. Diese werden aktuell von Experten gesichtet und Anteile für eine Multisensor-Annotation vorbereitet. Sensorrohdaten sowie veredelte Multisensordaten werden nach Projektende für den Bahnsektor zugänglich gemacht.

sensor data is transmitted in encrypted form to the so-called Data Touchpoint on the land side via Wi-Fi 6e at speeds of up to 4 GB/s. The data is pre-processed there: for example, an integrity check and data selection are performed. The data is then transmitted via fibre optics to the Tier-3 data centre in Frankfurt, which is also connected to the cloud. There, the data is curated and made available for use by the project participants. Work is currently underway on an annotated dataset, similar to the previously published “OSDaR23” and “OSDaR26” datasets, which will support the development and validation of future ATO GoA 4 functions in the sector.
By the time of this article’s publication, over 210 hours of sensor data, totalling 400 TB, have been recorded in the Stuttgart area by the Class 430 vehicle and the dynamic mock-up. Experts are currently reviewing this data and preparing portions of it for multi-sensor annotation. Both the raw sensor data and the processed multi-sensor data will be made available to the rail sector after the project concludes.
Photorealistic scenarios have been simulated so as to enable the testing of rare incidents. This has enabled the creation and simulation of over 10,000 scenarios depicting non-regular situations, such as a fallen tree on the tracks, in a realistic manner and under a wide variety of environmental conditions. The simulation has been developed in the NVIDIA Omniverse environment. These scenarios can be used to test and evaluate obstacle detection algorithms under realistic conditions.

4.6 Concept for a future GoA 4 computing platform on open railway tracks

In future full-scale GoA 4 operations, on-board computing platforms will be required for environmental detection and incident prevention; these platforms must be highly performant, modular and functionally safe. In the AutomatedTrain project, the hardware was decoupled from the applications wherever this was possible. Furthermore, the project has evaluated the extent to which the use of open-source software could be reliably es-

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

Um seltene Störfälle testbar zu machen, wurden neben Sensorrohdaten auch fotorealistische Daten simuliert. So konnten über 10 000 Szenarien nicht regulärer Situationen, wie etwa ein umgestürzter Baum auf den Gleisen, realitätsnah und in unterschiedlichsten Umweltbedingungen basierend auf der Umgebung NVIDIA Omniverse erzeugt und simuliert werden. Diese Szenarien können verwendet werden, um Hinderniserkennungsalgorithmen unter realistischen Bedingungen zu testen und zu bewerten.

4.6 Konzept einer zukünftigen Rechnerplattform für GoA 4 auf freier Strecke

In einem zukünftigen, vollständigen GoA 4-Betrieb werden für die Umfelderkennung und Vorfallprävention zugseitige Rechnerplattformen benötigt, die hoch performant, modular und funktional sicher sind. Dabei wurde in AutomatedTrain, wo möglich, die Hardware von den Anwendungen entkoppelt. Des Weiteren wurde evaluiert, inwieweit der Einsatz von Open-Source-Software zuverlässig im Bahnsektor etabliert werden kann [8]. Im Rahmen des Projektabschlussberichts werden die erarbeiteten Anforderungen an eine zugseitige hoch performante, funktional sichere Rechnerplattform sowie die Ergebnisse der im Projekt durchgeführten GAP-Analyse zur Identifikation der bestehenden Lücken bzgl. dieser Anforderungen veröffentlicht werden.

4.7 Konzept und Laboraufbau eines standardisierten Diagnosesystems

Für das vollautomatisierte Fahren werden erweiterte Funktionalitäten zur betrieblichen Störungsmeldung und Diagnose benötigt, insbesondere zur Fernüberwachung und Fernwartung der Onboard-Systeme. Im Projekt AutomatedTrain wurden Diagnosefunktionen prototypisch im Labor für die Sensorik zur Umfelderkennung implementiert. Der Fokus hierbei war die Validierung des standardisierten Protokoll-Stacks SOVD (Service-Oriented Vehicle Diagnostics) der Automobilindustrie für eine Adaption in den Bahnsektor. Dieser Ansatz wurde in AutomatedTrain als vielversprechend bewertet. Er ist schon heute kompatibel zu existierenden Kommunikationssystemen in Schienenfahrzeugen und kann auch mit neuen Komponenten sowie externen Diensten aufgrund der Standardisierung herstellerunabhängig integriert werden. Für zukünftige Entwicklungen ist es denkbar, neben Monitoring-Aufgaben das SOVD-System auch für Anwendungen in der Instandhaltung sowie für die Integration weiterer Systeme des Fahrzeugs zu nutzen [9].

5 Ausblick und Verwertung

Durch AutomatedTrain wurde ein wichtiger Impuls für den Bahnsektor und die Basis für die zukünftige Umsetzung automatisierter Anwendungen im Bahnbetrieb geschaffen. Auf zwei Triebzügen wurde der Anwendungsfall der vollautomatisierten Bereit- und Abstellung demonstriert. Nun ist es an der Industrie, die Ergebnisse aus AutomatedTrain fertig zu entwickeln und gemeinsam mit EVU und EIU im Betrieb zu erproben. Denn für die Bahnhersteller in Deutschland bedeutet die Automatisierung im Schienenverkehr die Chance, neue und zusätzliche Umsätze in einem Markt mit wachsenden Bedarfen zu generieren.
Neben den geschaffenen Chancen für den Bahnsektor ist die DB InfraGO bestrebt, die Dokumentation und Daten aus AutomatedTrain zur Nachnutzung dem Sektor zuzuführen. Alle erstellten Spezifikationsdokumente werden veröffentlicht und können bspw. als Lasten- und Pflichtenheft verwendet werden. Dies wur-

itk ENGINEERING

MASSGESCHNEIDERT STATT STANDARD-LÖSUNGEN

Smartes Software-Engineering für sichere, vernetzte und zukunftsfähige Bahnsysteme.

Von Systems Engineering und Softwareentwicklung nach CENELEC über Cyber Security bis hin zu AI-assisted Engineering – wir unterstützen Hersteller und Betreiber mit maßgeschneiderten Lösungen für anspruchsvolle Bahnprojekte.

Sprechen Sie mit uns auf der InnoTrans über die Herausforderungen Ihres Bahnprojekts:
Halle 20 I Stand 320

www.itk-engineering.de



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

de auch bereits durch das anlaufende F&E Projekt RemODtrAIn aufgegriffen, wo die Spezifikationsdokumente aus AutomatedTrain als Input verwendet werden. Des Weiteren werden diese Dokumente als Input für die anstehenden Arbeiten in ERJU verwendet werden.
Sensorroh- sowie simulierte Daten werden dem Sektor zugänglich gemacht und legen damit den Grundstein für die Entwicklung vollautomatischer Umfelderkennungssysteme. Die Ergebnisse sowie die umgebauten Fahrzeuge werden im Rahmen der InnoTrans Ende September 2026 vorgestellt. ■

AUTOREN | AUTHORS

Dipl.-Kfr. Susanne Gschwendtner
Projektleiterin AutomatedTrain / *Project Manager AutomatedTrain*
DB InfraGO AG
Anschrift / *Address*: Völckerstraße 5, D-80939 München
E-Mail: susanne.gschwendtner@deutschebahn.com

Dr. rer. nat. Christian Hauswald
Technischer Projektleiter AutomatedTrain /
Technical Project Manager AutomatedTrain
DB InfraGO AG
Anschrift / *Address*: EUREF-Campus 17, D-10829 Berlin
E-Mail: christian.hauswald@deutschebahn.com

LITERATUR | LITERATURE

[1] Knitter, O.; Höhne, T.; J. Schultz, J.: „Projekt AutomatedTrain: Betriebskonzept und Systemarchitektur für die vollautomatisierte Bereitstellung von Triebzügen (GoA4)," Deine Bahn, 11/2024, S. 18-23
[2] Knitter, O.; Hey, J.; Scheel, A.; Schultz, J.; Voelz, H.: "AutomatedTrain: Konzepte und Systembausteine für fahrerlose Züge", DER EISENBAHNINGENIEUR 10/2025, S. 40-44
[3] Schilling, R.; Bauckhage, P.; Meller, M.; Rudolph, P.; Wolf, R.; Hauswald, C.: „Umfeldwahrnehmung für fahrerlose Bereit- und Abstellfahrten", DER EISENBAHNINGENIEUR 572025, S. 72-75
[4] Hoffmann, M.; Lehnert, F. B.; Weinbeer, N.: „Umrüstung eines S-Bahn Elektrotriebzuges der BR430 für das Förderprojekt AutomatedTrain", Eisenbahntechnische Rundschau 6/2026, S. 52-57
[5] Pucks, F.; Schulz, R.; Irvathraya, A.; Ábrám, Z.: „Lokalisierungsmethoden für die vollautomatisierte Bereitstellungsfahrt im Projekt AutomatedTrain", DER EISENBAHNINGENIEUR 5/2026, S. 44-47
[6] Pfitzner, A.; Isaac, G.; Renner, T.: „Digitale Karten für das vollautomatisierte Fahren auf der Schiene", DER EISENBAHNINGENIEUR 2/2025, S. 6-9
[7] Martens-Knitter, O.; Eimann, P.: „AutomatedTrain: Anpassungen des ETCS-On Board Systems für den vollautomatisierten Betrieb unter ATO GoA4", Eisenbahntechnische Rundschau 7+8/2026, S. 10-14
[8] Rebstadt, J.; Schumacher, C.; Hetze, S.: „Einsatz von Open-Source-Software im Eisenbahnsektor am Beispiel von AutomatedTrain", Deine Bahn 5/2026, S. 40-43
[9] Rabe, M.; Adelberg, S.; Renatus, K.: „AutomatedTrain – Integration eines skalierbaren Diagnosekonzepts", DER EISENBAHNINGENIEUR 7/2026, S. 44-49
[10] Dietrich, F.; Pätzold, J.; Schiller, F.; Schunke-Mau, C.; Reinhart, P.: „Die Umrüstung von S-Bahn-Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart", Eisenbahn-Revue 3/2025 S. 110-118
[11] „OSDaR26: Open Sensor Data for Rail 2026, 11th International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), 2026
[12] Open Sensor Data for Rail 2023 – Datensatz – FID move
[13] Baetz, A.; Klasek, P.; Ham, S.-Y.; Neumaier, P.; Koeppel, M.; Lauer, M. (2026): Railway Artificial Intelligence Learning Benchmark (RAIL-BENCH): A Benchmark Suite for Perception in the Railway Domain. arXiv preprint arXiv:2604.22507

tablished in the rail sector [8]. The results of the conducted GAP analysis, as well as a list of the requirements formulated for a high-performance, functionally safe on-board computing platform, will be published as part of the final project report.

4.7 Concept and laboratory setup of a standardised diagnostic system

Fully automated driving requires advanced functionalities for operational fault reporting and diagnostics, particularly for the remote monitoring and maintenance of on-board systems. In the AutomatedTrain project, the diagnostic functions were prototyped in the laboratory for environmental sensing systems. The focus here was on validating the automotive industry's standardised SOVD (Service-Oriented Vehicle Diagnostics) protocol stack for adaptation to the rail sector. This approach has been deemed promising in AutomatedTrain. It is already compatible with existing communication systems in rail vehicles and, thanks to standardisation, can be integrated with new components and external services in a manufacturer-independent manner. For future developments, it is conceivable that, in addition to monitoring tasks, the SOVD system could also be used for maintenance applications and for the integration of other vehicle systems [9].

5 Outlook and application

AutomatedTrain has provided a significant impetus for the rail sector and laid the foundation for the future implementation of automated applications in rail operations. The use case, i.e. fully automated train preparation, provisioning and stabling, has been demonstrated using two multiple-unit trains. It is now up to the industry to finalise the developed results from AutomatedTrain and to test them in operations in collaboration with rail operators and infrastructure managers. For rail manufacturers in Germany, automation in rail transport represents an opportunity to generate new and additional revenue in a market with growing demand.
In addition to the opportunities created for the rail sector, DB InfraGO is committed to making the documentation and data from AutomatedTrain available for further use within the sector. All the specification documents that have been created in AutomatedTrain will be published and available for use, for example, in procurement as tender documents. Documents have already been made available to the ongoing RemODtrAIn R&D project, where the specification documents from AutomatedTrain are being used as input. Furthermore, these documents will also be made available as input for the upcoming work in the ERJU.
The generated raw sensor and simulated data will be made available to the sector, thereby laying the foundation for the development of fully automated environmental perception systems. The project results, as well as the modified vehicles, will be presented at InnoTrans in late September 2026. ■

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

Visit Knorr-Bremse at InnoTrans 2026



Hall 1.2, Booth 250
Solutions for the entire rail ecosystem

Hall 27, Booth 740
Embedded Electronic Solutions

Scan for more information

KNORR-BREMSE

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