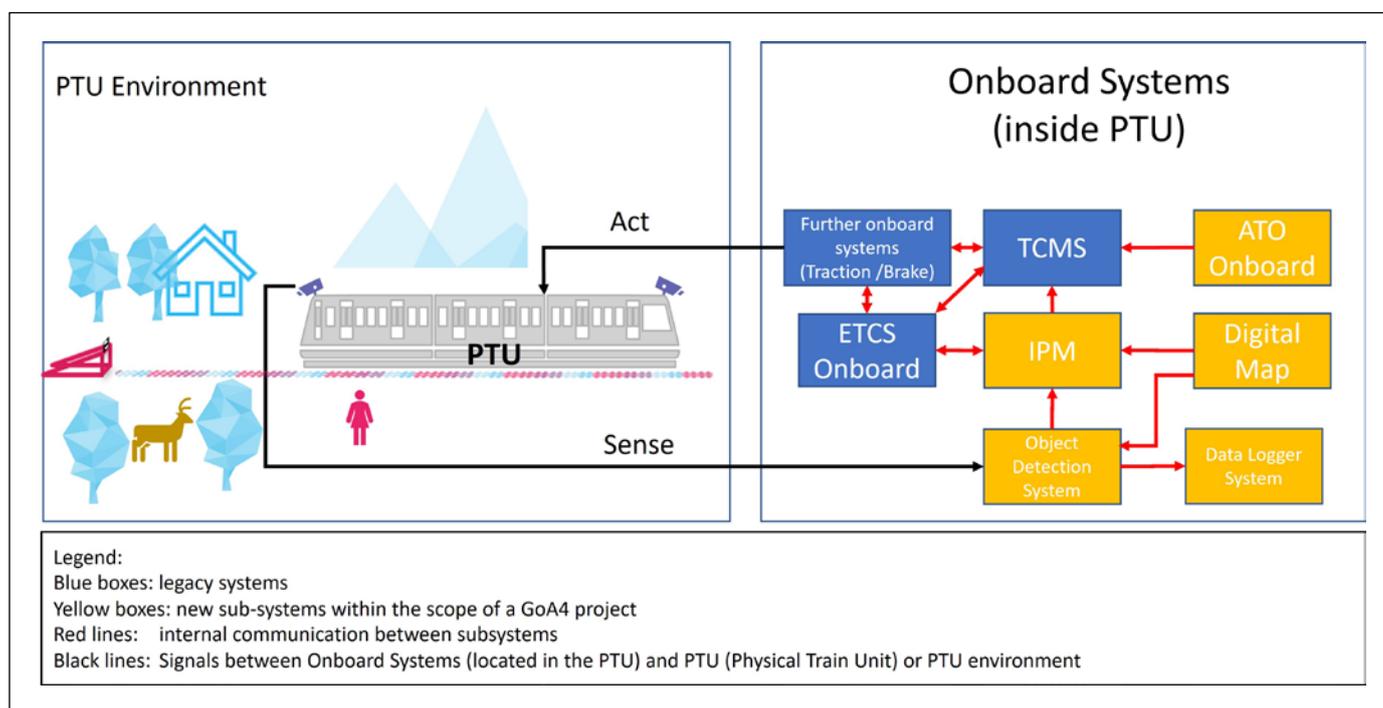


# Teststrategie zur Vermeidung von Feldtests bei der Entwicklung vollautomatisiert fahrender Züge

A testing strategy to limit field tests in the development of fully automated driving



**Bild 1: Vereinfachte Darstellung einer Onboard-Architektur eines ATO GoA 4-Systems**

Fig. 1: A simplified possible architecture for a train with an ATO GoA 4 system

Quelle / Source: Digitale Schiene Deutschland / DB InfraGO

Dirk Spenneberg | Michael Bauer | Michael Ghee | Stefan Krönke

In diesem Beitrag werden die wesentlichen Herausforderungen bei der Erprobung vollautomatisiert fahrender Züge durch die Sektorinitiative Digitale Schiene Deutschland (DSD) beschrieben sowie die verschiedenen Testumgebungen, die während der Entwicklung eines ATO-GoA 4-Systems zum Einsatz kommen. Die Testansätze zielen darauf ab, die komplexen, teuren und zeitaufwendigen Feldtests im Bahnbereich zu reduzieren. Die DSD evaluiert diese Ansätze im Förderprojekt AutomatedTrain [1].

## 1 Einführung – Herausforderungen beim Test vollautomatisiert fahrender Züge

Ein vollautomatisiert fahrender Zug (Automated Train Operation, Grade of Automation Level 4 – ATO GoA 4) führt folgende Arbeitsschritte selbstständig durch: die Betriebsvorbereitung, die Fahrfunktionen, das Anhalten, das Schließen der Türen, die Umgebungs- und Objekterkennung sowie das Störungsmanagement. Anstatt eines Triebfahrzeugführers steuern neue Onboard-

This article describes the major challenges pertaining to testing fully automated trains that will be addressed in the Digitale Schiene Deutschland (DSD) sector initiative through the use of different test environments during the development of an ATO GoA 4 system. The approach focuses on reducing the highly complex, expensive and time-consuming field tests in the railway sector. DSD will use these test environments for system testing in its AutomatedTrain Project [1].

## 1 Introduction – challenges when testing fully automated trains

A fully automated train (Automated Train Operation, Grade of Automation Level 4 – ATO GoA 4) automatically performs the preparation for service, driving functions, train stops, door closure and environment and object recognition, as well as any incident management. Instead of a train driver, these trains are controlled by new on-board systems that make use of additional

Systeme diesen Zug. Diese Onboard-Systeme nutzen wiederum zusätzliche leistungsfähige Sensorsysteme zur Objekt- und Umgebungserkennung. Eine vereinfachte Fahrzeugarchitektur mit diesen neuen Systemen ist in Bild 1 dargestellt. Sie beinhaltet ein Objekterkennungssystem, das mithilfe von Sensorik Objekte in der Umgebung erkennt. Ein zusätzliches Incident-Prevention-Management-System (IPM) reagiert auf Objekte im Fahrweg des Fahrzeugs. Des Weiteren sammelt ein Data-Logger Daten für die spätere Verwendung, und ein zusätzliches ATO-Onboard-System ermöglicht eine vollautomatische Kontrolle – vom Einschalten des Fahrzeugs bis zum Abstellen.

Diese Systeme sind Teil der physischen Zugeinheit (Physical Train Unit – PTU), die mit ihrer Umgebung (PTU-Umgebung) interagiert. In der Regel haben diese neuen Systeme zusätzliche Schnittstellen zu dem Zugsteuerungs- und -managementsystem (TCMS) und zum ETCS-Onboardsystem.

Das Objekterkennungssystem wird in der Regel mit Sensordaten aus verschiedenen Sensoren wie Kameras, LiDAR- und Radarsystemen gespeist. Sie sind an der Fahrzeugfront angebracht. Im Projekt „Sensors4Rail“ [2] – das von DSD zusammen mit Industriepartnern durchgeführt wurde – wurde dieser Sensoraufbau evaluiert. Für vollautomatische Systeme wird häufig der Begriff Operational Design Domain (ODD) verwendet, um die verschiedenen Bedingungen zu beschreiben, unter denen das System gemäß Spezifikation sicher betrieben werden kann. Aus der ODD lassen sich Szenarien mit unterschiedlichsten Objekten im Gleisbereich ableiten (z. B. Tiere, Bäume, Gleisarbeiter, unbefugte Personen). Das System muss darauf korrekt und sicher reagieren und auch unter verschiedenen Umgebungsbedingungen funktionieren (z. B. Lichtverhältnisse, Wetter, geografische Gegebenheiten etc.). Um die Kombination der korrekten Funktionen unter den verschiedenen möglichen Betriebsbedingungen zu überprüfen, ist eine sehr große Anzahl von Tests erforderlich. Leider ist das Sammeln von Daten und die Durchführung von Fahrzeugtests im Eisenbahnsektor wesentlich schwieriger als in anderen Verkehrsbereichen, wie z. B. dem Automobilsektor. Denn anders als Straßen sind Gleise nicht nahezu frei verfügbar. Der Zugang zu ihnen ist stark reglementiert, und sie sind durch den planmäßigen Zugverkehr ausgelastet.

Auch die Verfügbarkeit von Schienenfahrzeugen ist begrenzt. Änderungen an einem Fahrzeug, wie z. B. der Einbau von Sensorsystemen, ziehen neue Sicherheitsbewertungen und anschließende Zulassungsschritte nach sich, damit das Fahrzeug wieder in Betrieb genommen werden darf. Diese Punkte zeigen, dass die Kosten für Fahrzeugtests im Bahnsektor sehr hoch und viele Einschränkungen zu berücksichtigen sind. Daher konzentrieren wir uns bei DSD auf Ansätze, die zu einer Reduzierung der Fahrzeugtests im hochausgelasteten Schienennetz führen. Im Folgenden wird dargestellt, wie diese Herausforderung durch die Einführung zusätzlicher, vorgelagerter Testumgebungen bewältigt werden kann.

## 2 Testumgebungen

Bild 2 zeigt die Testumgebungen, die bei der DSD eingesetzt werden. Ähnliche Umgebungen findet man auch in verwandten Bereichen (z. B. Automobil) zum Test von hoch- oder vollautomatisierten Systemen.

Eine grundlegende Herangehensweise ist es, die Systemintegration, -verifizierung und -validierung in allen Phasen der Entwicklung zu ermöglichen. Mit dem Schritt „Model-in-the-Loop“ (MIL) kann bereits in der Systemanforderungsphase begonnen werden.

complex sensor systems to perceive the environment and perform object detection and recognition. Fig. 1 depicts a possible simplified onboard architecture with these new subsystems. It consists of an Object Detection System that uses sensors to detect any objects in the surroundings, an additional Incident Prevention Management System (IPM) that reacts to any objects in the path of the vehicle, a Data Logger System to collect the data for later use and an additional ATO onboard system that enables fully automated mission control from powering up the vehicle through to stabling it again.

These systems are part of the physical train unit (PTU) that interacts with its environment (the PTU Environment). Typically, these new systems have additional interfaces to a Train Control and Management System (TCMS) and to an ETCS Onboard system.

The Object Detection System is typically fed with sensor data from complex sensors including cameras, LiDAR and radar systems mounted on the front of the vehicle. An example of one such sensor setup has been evaluated in the Sensors4Rail project [2] that was conducted by DSD together with its industry partners.

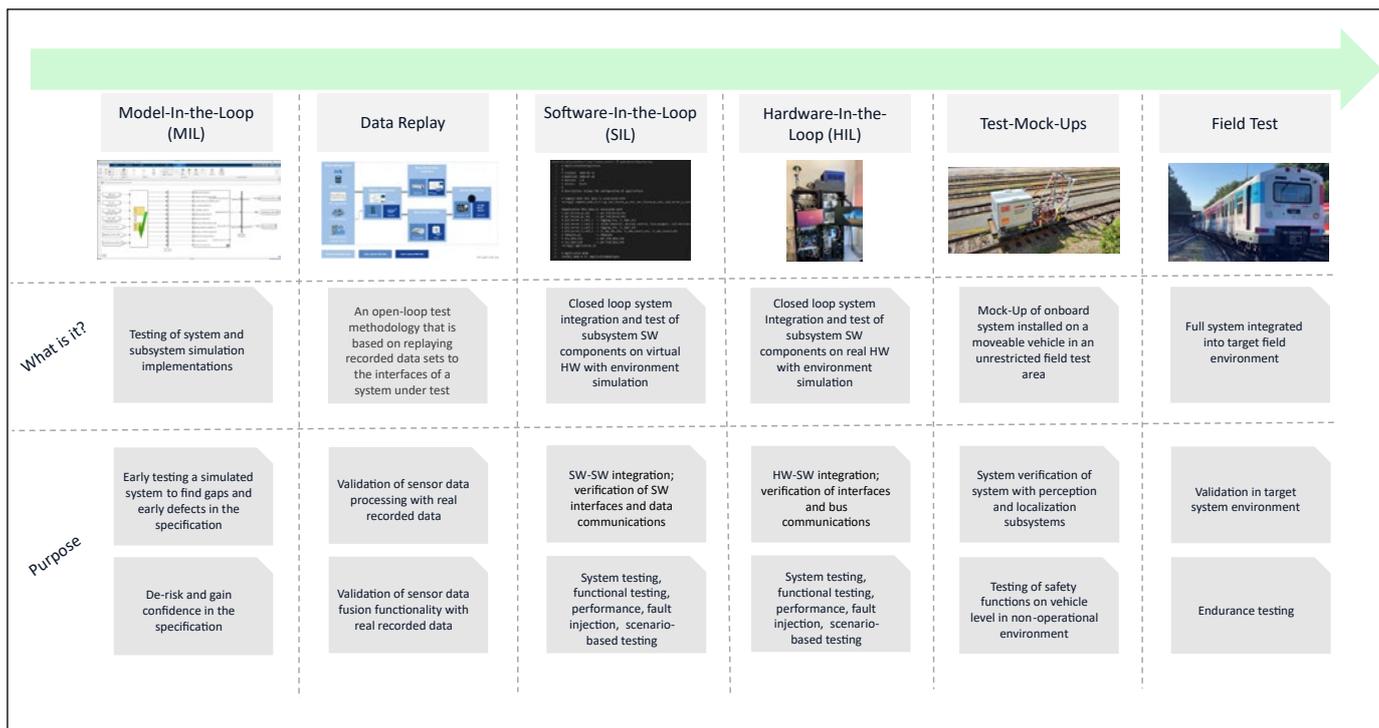
The term Operational Design Domain (ODD) is often used for fully automated systems to describe the various conditions under which the system can be operated safely according to specification. Many scenarios with various kinds of objects on the track, such as animals, trees, track workers, unauthorised individuals, etc., can be derived from the ODD. The system has to react correctly in these scenarios and to function safely in all the relevant defined environmental conditions (lighting, weather, geographical, etc.). A very large number of tests is necessary to verify the combination of the correct functions under the different possible operating conditions. Unfortunately, data collection and the performance of vehicle tests is significantly more difficult in the rail sector than in other transport sectors such as the automotive sector. Tracks are not as available as open roads. Access to them is highly regulated and they are often fully occupied by the scheduled traffic.

In addition, the availability of rail vehicles is limited and most vehicle modifications, such as the installation of sensor systems, entail new safety assessments and subsequent approval steps before the revised vehicle can be returned to operations. There are also other problems, but these issues alone show that the costs of vehicle testing in the rail sector are very high and a lot of restrictions apply. We have therefore focussed on approaches that lead to a reduction in testing in the highly utilised rail network. The following discusses how this challenge can be overcome by introducing additional test environments.

## 2 The test environments

Fig. 2 depicts the test environments deployed at the DSD. Similar environments can also be found in related areas (i.e. the automotive industry) for the testing of highly or fully automated systems.

The idea we are pursuing is to enable system integration, verification and validation during all the development phases. The Model-in-the-Loop (MIL) Environment means that a start can already be made while the project is in the system requirement and design phase. The Software-in-the-Loop (SIL), Hardware-in-the-Loop (HIL), Testing in Proving Ground and Data Replay steps can later be introduced in parallel with the system development in order to test any intermediate releases. The more cost-



**Bild 2: Systemtestumgebungen**

Fig. 2: The system test environments

Quelle / Source: Digitale Schiene Deutschland / DB InfraGO

Parallel zur Systementwicklung können später die Schritte „Software-in-the-Loop“ (SIL), „Hardware-in-the-Loop“ (HIL), „Testen im Testfeld“ und das „Data Replay“ eingeführt werden, um frühzeitig Zwischenversionen zu testen. Erst in der Endphase des Projekts, wenn das zu testende System (System under Test, SUT) vollständig entwickelt ist, werden zusätzlich kostenintensivere Feldtests durchgeführt.

Im Folgenden werden die einzelnen Phasen/Testumgebungen näher erläutert.

**2.1 MIL-Umgebung**

MIL-Tests finden Anwendung bei der Umsetzung von modellbasierten Entwicklungen wie modellbasiertes Systems Engineering (MBSE). Hierbei werden in einer ausgewählten Simulationsumgebung, wie bspw. Simulink [3], das SUT und alle erforderlichen Peripheriesysteme modelliert und entsprechend bestehenden Anforderungen simuliert. Verbindungen zwischen den (Teil-)Systemen werden häufig unabhängig von zukünftiger Steuergerätefunktionalität, wie z. B. Abstraten, gebildet. Solche Modelle können als Grundlage für die Codegenerierung dienen und in einer Hardwareumgebung zum Einsatz kommen.

Bei DSD werden die Spezifikationen der betrieblichen Anforderungen bis zur Spezifikation der Teilsysteme im MBSE-Tool Eclipse Capella [4] ausdetailliert. Dabei kommt die sog. Arcadia-Methode [5] zum Einsatz. Um diese Spezifikationen vor der Übergabe an Dritte (z. B. Industrie) zu verfeinern und zu validieren, sind Simulationen hilfreich. Dafür wird bei DSD die Software Simulink eingesetzt, wofür ein Konverter entwickelt wurde. Der Konverter kann automatisiert ein Simulink-Modell mit „leeren“ Subsystemen, Ports und diversen Parametern erstellen, das vollständig auf den Informationen der logischen Schicht in Capella beruht. Die logische Schicht beschreibt die funktionalen Bausteine des modellierten Systems. Das generierte „Skelettmodell“ in Simulink wird in einem nächsten Schritt durch manuelle Modellierung des

intensive field tests are only performed in the project’s final stages, when the system to be tested has been fully developed. The following explains each stage / test environment in more detail.

**2.1 The MIL environment**

MIL testing is usually applied when implementing Model-Based Design (MBD) as part of Model-Based System Engineering (MBSE). The SUT and the required peripheral systems are modelled and executed based on the existing requirements in a selected simulation environment such as Simulink® [3]. The interconnections between the systems are often modelled regardless of the future control unit capabilities such as the sampling rate. Such models can serve as a basis for code generation and deployment onto hardware.

At DSD, railway specifications from operating requirements down to the sub-system specification are defined in the Eclipse Capella Model-Based System Engineering (MBSE) tool [4]. The so-called Arcadia method is used in conjunction with it [5]. Simulations are helpful in refining and validating these specifications prior to their transfer to any third parties (i.e. the industry). DSD carries out simulations using the Simulink software, for which a converter has been built. The current converter can fully automatically generate Simulink models containing “empty” subsystems, ports and various parameters from the logical layer defined in Capella. The logical layer describes the functional components of the system to be modelled. The behaviour of the dynamic system is manually modelled inside the generated “skeleton” model in the following step. Work is currently being carried out on tools and methods so as to also bridge the operating requirement layer.

DSD is working on a specification that assumes technical modules such as perception or object detection, the incident prevention management system (IPM), the automated train operation

dynamischen Verhaltens erweitert. Derzeit wird an Werkzeugen und Methoden gearbeitet, um auch die Ebene der betrieblichen Anforderungen zu konvertieren.

Im Rahmen von ATO GoA 4 arbeitet die DSD an einer Spezifikation, die Subsysteme wie Wahrnehmungs- oder Objekterkennung, Incident Prevention Management System (IPM), Automated Train Operation System (ATO) und European Train Control System (ETCS) voraussetzt. Eine vereinfachte Form der Zielkonfiguration ist in Bild 3 dargestellt. Zur Verfeinerung dieser Spezifikationen werden derzeit verschiedene Simulink-Modelle auf Grundlage der Capella-Spezifikationen entwickelt. Eine Simulink-Konfiguration kann beispielsweise ATO, digitale Karte, ETCS, TCMS-Steuerungsfunktionalitäten und ein PTU-Modell umfassen. So können zusätzliche Funktionen eines GoA 4-ATO-Systems, wie Selbsttests des Bremssystems oder die Ausführung von Fahrbefehlen, von einer Leitstelle im Vergleich zu einem GoA 2-ATO-System ermittelt werden. Andere Simulink-Modelle enthalten nur das IPM, die digitale Karte, die ETCS-Funktionen und das PTU-Modell zur Bewertung der Reaktionen auf irreguläre Situationen [6, 7].

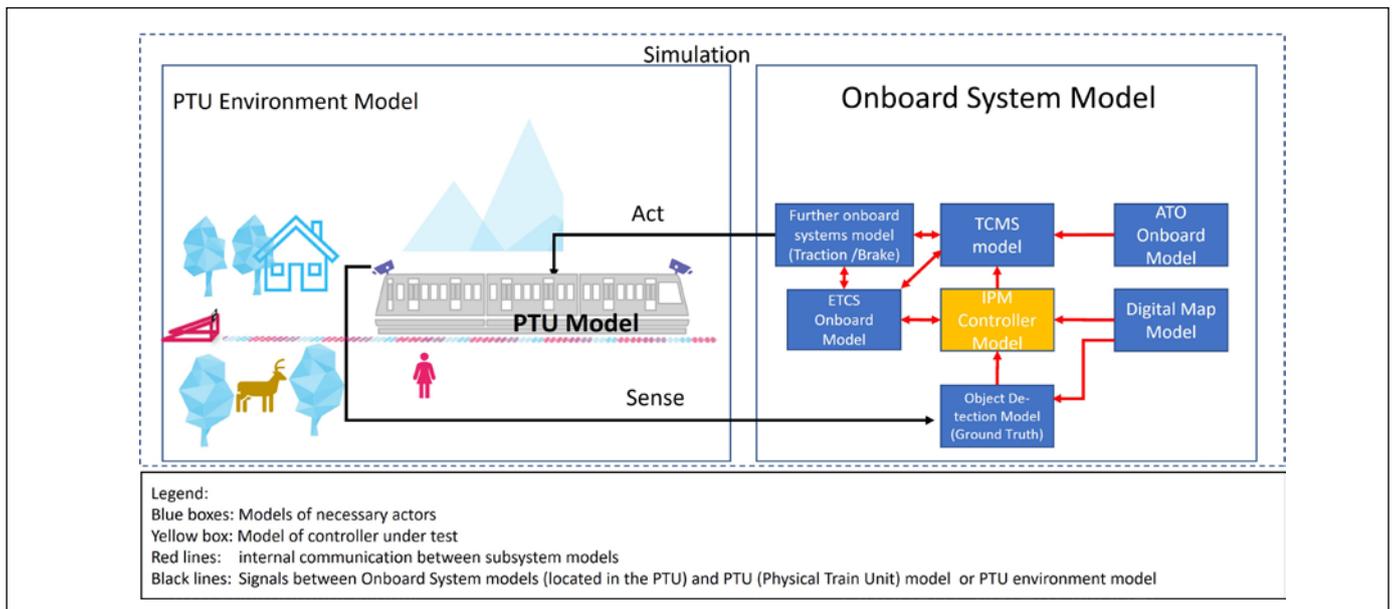
**2.2 SIL im Labor**

SIL-Testumgebungen verwenden speziell entwickelte Softwareumgebungen, die kompilierte Steuergerätesoftware und relevante Peripheriesysteme in einer virtuellen Umgebung betreiben können. Bestimmte technische Einschränkungen oder Anforderungen der Zielhardware können dabei teilweise berücksichtigt werden, z. B. zeitliche Einschränkungen wie feste Schrittweite oder der Einsatz von speziellen Kommunikationsschnittstellen. Eine große Herausforderung im Bahnbereich ist die noch geringe Standardisierung von Softwarewerkzeugketten und der eingesetzten Methoden. Betriebskonzepte und Schnittstellen sind in Teilnormen definiert. Auch gibt es Ansätze wie Remote Processing Calls, um Interoperabilitätstests zu ermöglichen. Aber im Vergleich zum Automobilsektor, der Standards wie AUTOSAR [8] oder ASAM [9] entwickelt und implementiert hat und in der virtuelle elektronische Steuergeräte weit verbreitet sind, sind standardisierte Softwarearchitekturen oder kompatible Datenformate im Bahnsektor noch nicht üblich. Dies hat zur Folge, dass bereits am

system (ATO) and the European train control system (ETCS) as part of ATO GoA 4. A simplified image of the target configuration is shown in fig. 3. Different Simulink models are currently being developed from Capella specifications to refine these specifications. For instance, one Simulink configuration may include ATO, the digital map, ETCS, TCMS controller functionalities and the PTU model in order to verify the additional features of a GoA 4 ATO system such as braking system self-tests or the execution of driving commands from a control centre compared to a GoA 2 ATO system. Other Simulink models only include the IPM, the digital map, ETCS functionalities and the PTU model so as to evaluate the reactions to irregular situations [6, 7].

**2.2 SIL in the laboratory**

SIL systems use specially developed software environments that can run compiled controller applications and peripheral models in a virtual setup. Certain technical restrictions or requirements of the target hardware are already considered. This can include timing restrictions such as fixed step sizes or the use of target protocols. A significant challenge in the railway sector involves the standardisation process concerning the software tool chain and methods. The operating concepts and interfaces are defined in the sub-standards, including approaches such as remote processing calls to enable interoperability testing. However, when compared to the automotive sector, which has developed and implemented standards such as AUTOSAR [8] or ASAM [9] and makes wide use of virtual electronic control units, standardised software architectures or compatible data formats are still not common in the railway sector. As a result, proven tool chains for SIL testing cannot easily be used. Furthermore, fully automated train operation and protection systems are being developed and operated differently than before: for example, modern software architectures (e.g. micro-services) for independent development and modern communication approaches (e.g. the Robot Operating System or message broker) to the data exchange between software components and



**Bild 3: Beispiel einer Systemkonfiguration für den MIL-Test**

Fig. 3: An example of the system configuration for MIL testing

Quelle / Source: Digitale Schiene Deutschland / DB InfraGO

Markt bewährte Werkzeugketten für SIL-Tests nicht ohne weiteres im Bahnsektor genutzt werden können.

Zudem werden vollautomatische Zugbetriebs- und Zugsicherungssysteme anders entwickelt und betrieben als früher. So werden z. B. moderne Softwarearchitekturen (z. B. Microservices) für die unabhängige Entwicklung, moderne Kommunikationsansätze (z. B. Robot Operating System, Message Broker) für den Datenaustausch zwischen Softwarekomponenten und moderne Softwarevirtualisierungsmethoden (z. B. Docker, virtuelle Maschinen) für die Bereitstellung von Softwarekomponenten eingesetzt.

DSD baut daher projektbezogenen Simulations- und Testumgebungen auf, die diese State-of-the-Art-Aspekte einbeziehen. So werden beispielsweise Dienste wie ein Digitales Register [10], ein Advanced Protection System [11] oder ein Lokalisierungssystem mit Werkzeugen wie Kubernetes [12] oder Docker [13] orchestriert. Bei Tests werden diese Dienste entweder mit vordefinierten Daten wie Einsatzplänen oder mit verfügbaren Sensordaten stimuliert. Als Ergebnis wird die Reaktion mit einem Erwartungswert verglichen. Oder diese Dienste arbeiten in Verbindung mit bestehenden Modellen, wie z. B. einem ETCS-Bordmodell, das einen sogenannten Closed-Loop-Betrieb (geschlossener Regelkreis) ermöglicht. In beiden Fällen ist eine fortschrittliche Visualisierung wie bspw. dSPACE AURELION geplant [14, 7].

### 2.3 HIL im Labor

HIL-Systeme verwenden speziell entwickelte Simulationssoftware und -hardware, die das SUT nicht nur stimulieren (offener Regelkreis), sondern auch in Echtzeit auf Ausgaben des SUT reagieren können (geschlossener Regelkreis). Ein solcher HIL-Aufbau umfasst in der Regel die Emulation des Verhaltens von Sensoren und Aktoren, peripheren Systemen und der Zielkommunikationsschnittstelle bis hin zur physikalischen Schicht. Im Vergleich zu SIL-Systemen können Hardwareeffekte und elektrische Designs des SUT untersucht werden.

Im Eisenbahnsektor sind HIL-Tests im Labor ein wesentlicher Schritt für Komponenten-, Integrations- und Netzwerktests der Leit- und Sicherungstechnik. So werden beispielsweise Interoperabilitätstests und Konformitätsnachweise gemäß den ETCS- und EULYNX-Spezifikationen für bestimmte Komponenten durch HIL-Tests durchgeführt, die vor Ort oder in verteilten Labors stattfinden. Für den vollautomatischen Zugbetrieb und die Zugsicherung werden jedoch moderne Softwarearchitekturen, Kommunikationsansätze und fortschrittliche Wahrnehmungssysteme verwendet, für die die bestehenden Standards für Interoperabilitätstests nicht ausreichend sind.

Bei DSD sind HIL-Tests auch Teil der Verifikations- und Validierungsstrategie. Ein HIL-Setup für den vollautomatischen Zugbetrieb umfasst alle Hardware- und Softwarekomponenten eines Zuges, die für die Objekterkennung und das Störfallmanagement erforderlich sind. Dazu gehören neben der sicheren Rechnerplattform auch alle elektronischen Sensoreinheiten wie Kamera, Radar, LiDAR und GPS. Diese Konfiguration wird als Static Mock-Up (SMU) bezeichnet und liefert gute Erkenntnisse über Kommunikationsaspekte und Softwarekompatibilität, auch ohne Sensorstimulation oder Simulation.

In Hinblick auf HIL-Tests gibt es verschiedene Arten der Sensorstimulation. Sensoren können „over-the-air“ stimuliert werden, wie bspw. das Erfassen eines Bildschirms mit der animierten Szene durch eine Kamera. Sensordaten können aber auch in Form von Sensorrohdaten oder Objektlisten über definierte Schnittstellen in das SUT eingespeist werden. Die verschiedenen Arten unterscheiden sich signifikant in Bezug auf Zielsetzung, Komplexität

modern software virtualisation methods (e.g. docker or virtual machines) for the provision of software components are used.

As a result, DSD is also setting up simulation and test environments based on project needs that incorporate these modern aspects. For instance, services such as a Digital Register [10], an Advanced Protection System [11] or a localisation system are orchestrated using tools such as Kubernetes [12] or docker [13]. During tests, these services are either stimulated using predefined data such as the operating plans or the available sensor data. The response is then compared with the expected value. Or these services operate in conjunction with existing models such as an ETCS onboard model that will enable closed loop operations. In either case, there are plans for the use of advanced visualisation such as dSPACE AURELION [14, 7].

### 2.3 HIL in the laboratory

HIL systems use specifically developed simulation software and hardware that not only stimulate the system under test (open loop testing), but can also react in real time to outputs from the SUT (closed loop testing). Such a HIL setup usually includes the emulation of the behaviour of the sensors and actuators, peripheral systems and the target communication interface up to the physical layer. The hardware effects and the electrical designs of the SUT can be investigated in comparison to the SIL systems.

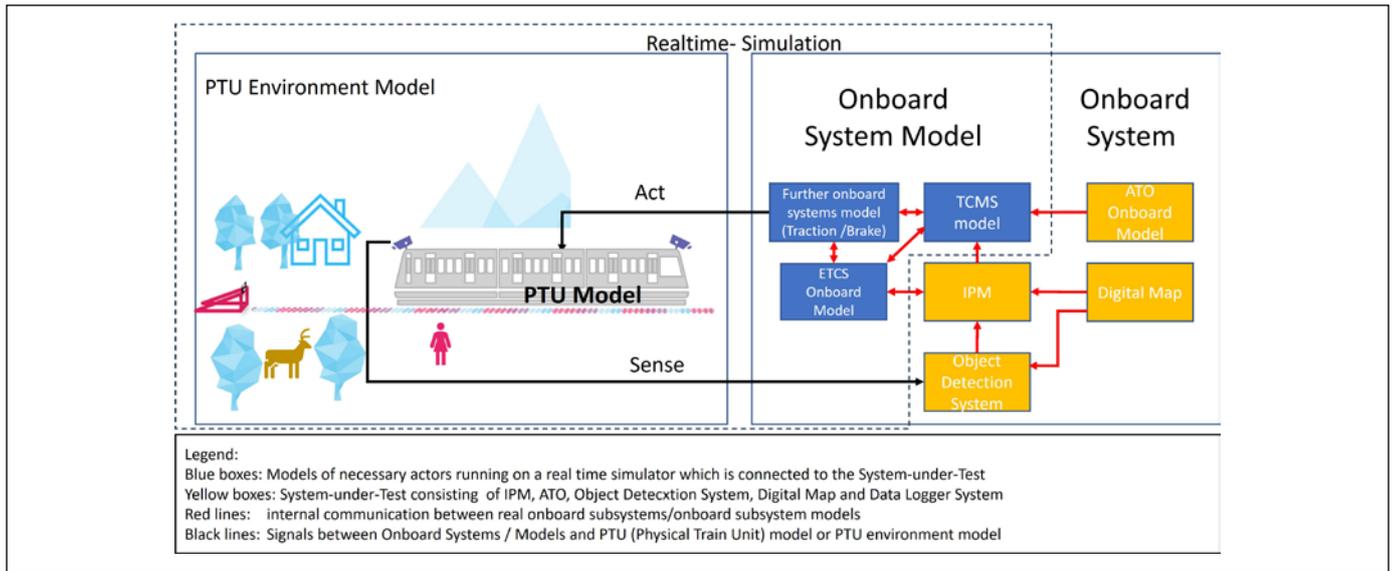
In the railway sector, HIL testing in a laboratory is an essential step for the component, integration and network testing of onboard units and train control centres. For example, interoperability tests and proof of conformity have to be carried out for certain components using HIL tests that take place on site or in distributed laboratories according to the ETCS and EULYNX specifications. However, fully automated train operations and train protection systems make use of modern software architectures, communication approaches and advanced perception systems, for which the existing interoperability testing standards are insufficient.

At DSD, HIL tests also constitute part of the verification and validation strategies. A HIL setup for fully automated train operations will include all the train's hardware and software components that are required for object detection and incident prevention management. In addition to the Safe Computation Plat-



**Bild 4: Static Mockup Unit (SMU), die im Projekt Automated Train für HIL-Tests verwendet wird**

Fig. 4: A Static Mock-Up Unit (SMU) used for HIL testing in the Automated Train project  
Quelle / Source: Digitale Schiene Deutschland / DB InfraGO



**Bild 5: Beispielhafte HIL-Systemkonfiguration für Closed-Loop-Tests eines ATO GoA 4-Systems**

Fig. 5: An example of a HIL system configuration for open and closed loop tests of fully automated train operations Quelle / Source: Digitale Schiene Deutschland / DB InfraGO

und Kosten. DSD ist an einen HIL-Aufbau interessiert, der Systeme zur Objekterkennung und Vorfallovermeidung im Labor testen kann. Dabei werden die Sensoren, wie in Bild 5 dargestellt, simuliert. D.h. die Sensorrohdaten werden über eine standardisierte Kommunikation in die Komponenten der SMU eingespeist. Für die Tests kommen bewährte und skalierbare Standard-HIL-Testwerkzeuge wie dSPACE AURLION und Echtzeit-3D-Grafik-Plattformen wie NVIDIA Omniverse für die Sensorsimulation zum Einsatz. Diese Werkzeuge werden kontinuierlich weiterentwickelt, um die notwendige Simulationsqualität zu erreichen.

**2.4 Data Replay**

Data Replay ist eine Open-Loop-Testmethode, die auf der Wiedergabe von aufgezeichneten Datensätzen an den Schnittstellen eines SUT und der Bewertung der Reaktionen dieses SUT im Vergleich zu den erwarteten, im Datensatz hinterlegten Reaktionen basiert. Eine Übersicht über die Testmethode der Datenwiedergabe ist in Bild 6 dargestellt.

Der Aufbau der Datenwiedergabe ermöglicht es, reale Daten oder simulationsgenerierte synthetische Daten in das SUT einzuspeisen, wodurch die Notwendigkeit entfällt, Fahrzeugtests im Feld zu wiederholen.

Rohdaten, die reale Szenarien darstellen, werden während der Fahrzeugtests aufgezeichnet oder durch Simulationen synthetisch erzeugt. Die Rohdaten werden dann von einer Data Factory [15] verarbeitet, dort zusätzlich annotiert und anschließend von der Datenwiedergabepattform verwendet. Bei der Datenannotation wird dem Datensatz primär Information über die im Datensatz enthaltenen Objekte hinzugefügt (Typ, Position etc.).

Das Datenwiedergabewerkzeug injiziert die aufgezeichneten Daten, die reale Szenarien darstellen, in die richtigen Schnittstellen des SUT. Das resultierende Verhalten des SUT wird anhand der annotierten Zusatzinformation bewertet (z. B. wurden alle Objekte in der Szene korrekt erkannt), um das Testergebnis zu ermitteln.

Data Replay ermöglicht es also, aufgezeichnete Daten aus realen Szenarien in einer Laborumgebung in das SUT einzuspielen. Die Datenwiedergabe wird dann für Systemintegrations-, Regressions- und Validierungstests mit neuen Subsystemversionen verwendet.

Eine Einschränkung des Data Replays besteht darin, dass annotierte Datensätze benötigt werden, um die Systemreaktion und das Systemverhalten im Vergleich zu den zugehörigen, nicht anno-

form, this also includes all the electronic sensor units such as camera, radar, LiDAR, GPS and other sensor units as real parts. This configuration is known as a Static Mock-Up (SMU) and provides good insights into communication aspects and software compatibility, even without any sensor stimulation or simulation.

There are different levels of sensor simulation with regard to HIL-Testing. The sensors can be stimulated over-the-air, for instance by placing a display showing an animated scene in front of the camera. The sensor data can also be fed into the SUT as raw sensor data or object lists through dedicated interfaces. Each level differs in terms of its objective, complexity and cost. At DSD, the goal is to possess a laboratory setup that can test systems for object detection and incident prevention. Therefore, the sensors are simulated as shown in fig. 5. Raw sensor data is fed into the SMU via standardised communication. Proven and scalable standard HIL test tools such as dSPACE AURELION and real-time 3D graphics collaboration platforms such as NVIDIA Omniverse for sensor simulation will be used for the tests. These tools will be continuously enhanced to achieve the necessary simulation quality.

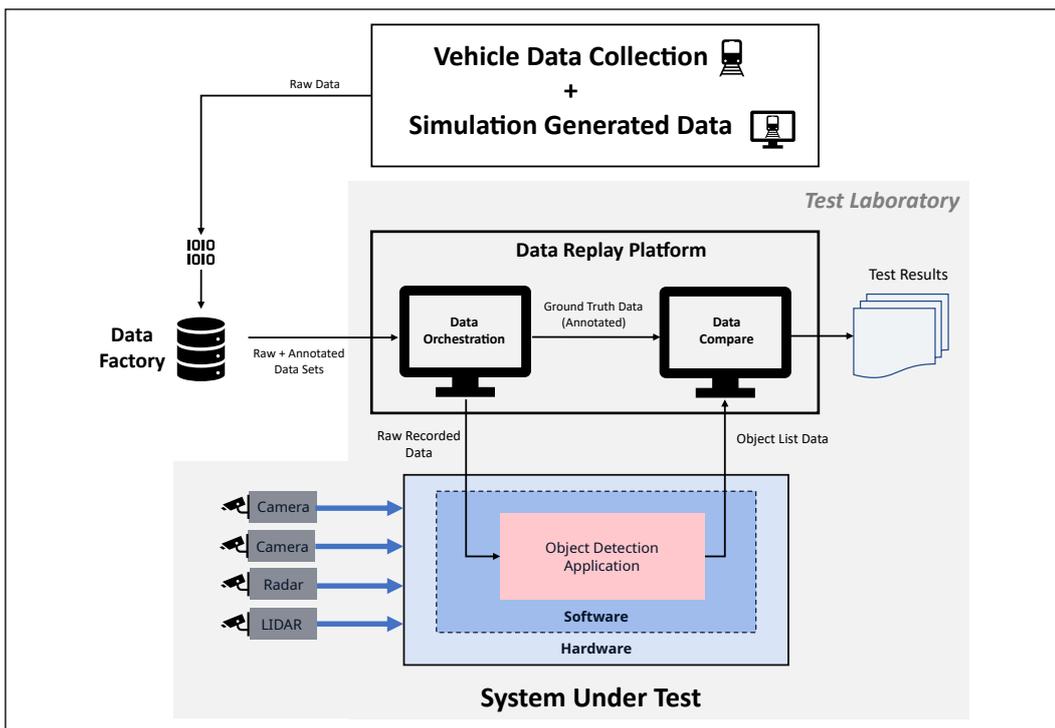
**2.4 Data replay**

Data replay is an open-loop test method based on the playback of recorded data sets at the interfaces of a SUT and the evaluation of the responses of this SUT compared to the annotated, ground truth data. A high-level illustration of the data replay test method is shown in fig. 6.

The data replay configuration allows real world data or simulation-generated synthetic data to be fed into the SUT, thereby eliminating the need for repeating vehicle tests in the field.

Raw data representing real world scenarios is recorded by vehicle testing or generated synthetically by simulation. The raw data is then processed and annotated by a data factory [15] and subsequently used by the data replay tooling platform. Data annotation primarily involves the addition of information about the objects contained in the data set (type, position, etc.).

The data replay tool injects the recorded data representing real world scenarios into the SUT interfaces. The resulting behaviour of the SUT is evaluated using the annotated truth data with defined criteria to determine a pass/fail test result.



**Bild 6: Konzeptuelle Darstellung des Data-Replay-Tests am Beispiel der Objekterkennung**

Fig. 6: A concept for the data replay test method using the example of the Object Detection application test Quelle / Source: Digitale Schiene Deutschland / DB InfraGO

tierten Rohdatensätzen zu bewerten. Ohne sogenannte Ground-Truth-Daten kann die Leistung des Systems nicht genau anhand eines bestimmten Kriteriums getestet werden, sodass dann kein verlässliches Ergebnis (bestanden / nicht bestanden) erhalten wird. Daher können ohne entsprechende annotierte Datensätze mit den zugehörigen Rohdatensätzen nur informelle Integrations- / Akzeptanztests mit Data Replay durchgeführt werden.

Bei DSD bauen wir derzeit eine Data-Replay-Pipeline auf, die zusammen mit unserem HIL-Setup und der neuen Data Factory [15, 16] in unseren zukünftigen ATO-GoA 4-Projekten eingesetzt werden soll.

**2.5 Dynamic Mock-Up Unit & Teststrecke**

Die Dynamic Mock-up Unit (DMU) ist eine vereinfachte Nachbildung des Zielfahrzeugs, das auf einer geschlossenen Teststrecke betrieben werden kann.

Data replay therefore makes it possible to replay recorded data from real scenarios into the SUT within a laboratory environment. Data replay is then used for system integration, regression and validation tests with new subsystem versions.

The limitation of data replay lies in the fact that annotated data sets are needed to serve as the ground truth for evaluating the system response and behaviour compared to the associated unannotated raw data sets. Without the ground truth data, the system performance cannot be accurately tested against a certain criterion in order to obtain a reliable pass / fail result. Therefore, a lack of any corresponding annotated data sets with the associated raw datasets means that only informal integration / acceptance tests can be performed with data replay. AT DSD, we are now setting up a data replay pipeline which will be used together with our HIL setup and the new data factory [15, 16] in our future ATO GoA4 projects.



**Bild 7: DMU, welches im Sensors4Rail-Projekt verwendet wurde.**

Fig. 7: The DMU from the Sensors4Rail project Quelle / Source: Digitale Schiene Deutschland / DB InfraGO

Ein Beispiel für ein solches DMU-Fahrzeug ist in Bild 7 dargestellt. Hauptzweck und -ziel der DMU ist es, ein Mittel für die frühzeitige und schnelle Verifizierung und Validierung des Systems und seiner Teilsysteme bereitzustellen und damit die Abhängigkeit für die Integration, Verifizierung und Validierung von der Verwendung eines echten Zielfahrzeugs zu verringern. Die DMU sollte die mit der SMU durchgeführten Systemtestaktivitäten ergänzen, wenn eine reale Umgebung für den Test einer bestimmten Systemfunktionalität erforderlich ist, z.B. für den Test des Objekterkennungssystems in Situationen, die aufgrund von Einschränkungen in den Sensorsimulationsmodellen dort noch nicht realistisch simuliert werden können.

Um diesen Zweck zu erfüllen, ist es wichtig, dass das DMU dem Zielfahrzeug in den relevanten Parametern hinreichend ähnlich ist und dass der ausgewählte Teststreckenbereich relevante Aspekte der späteren Zielumgebung abdecken kann. Die DMU-Testumgebung kann in zwei Teile aufgeteilt werden: das DMU-Fahrzeug und der Teststreckenbereich, in dem das DMU-Fahrzeug betrieben wird.

**2.5.1 DMU-Fahrzeug**

Bei DSD wird aktuell ein neues DMU-Fahrzeug aufgebaut, das aus zwei Containern besteht, die auf einem Flachwagen montiert sind. Der Flachwagen hat zwei Drehgestelle, eine Federung und eine aktive Bremse. Die Komponenten des zu testenden Systems sind in dem Projektcontainer installiert. Der generische Container wird für allgemeine Hilfssysteme wie die Stromversorgung verwendet. An der Vorderseite des Projektcontainers ist ein Sensorrahmen angebracht, der dazu dient, die Sensorkomponenten an Positionen zu installieren, die dem späteren Zielfahrzeug entsprechen. Eine Konzeptdarstellung des weiterentwickelten DMU-Fahrzeugs, das in unseren kommenden ATO-GoA 4-Projekten verwendet werden soll, zeigt Bild 8.

Zur Durchführung dynamischer Tests kann das DMU-Fahrzeug von einer Lokomotive geschoben werden, wobei die Sensoren nach vorne gerichtet sind. Dadurch können Sensordaten erzeugt werden, die denen mit dem Zielfahrzeug gewonnenen Daten sehr ähnlich sind.

**2.5.2 Teststrecke**

Die für GoA 4-Projekte der DSD zur Verfügung stehende Teststrecke besteht derzeit aus einem Rangier-/Ladebahnhof und einem durchgehenden Gleis mit einer Länge von 5 km. Sie wird von der

**2.5 The Dynamic Mock-Up Unit & the proving ground**

The Dynamic Mock-up Unit (DMU) is a simplified replica of the target vehicle that can be operated on a closed test track. Fig. 7 shows an example of such a DMU.

The main purpose and objective of the DMU is to provide a means of early and rapid verification and validation of the system and subsystems, thus reducing the dependence of IVV (Integration, Verification, Validation) efforts on the target vehicle environment. The DMU should complement the system testing activities performed with the SMU when a real environment is required to test a particular system functionality, for example testing the object detection system in situations that cannot yet be realistically simulated due to the limitations in the sensor simulation models.

In order to fulfil this purpose, it is important that the DMU is representative of the target vehicle and that the selected test track area represents the final target environment. The DMU test environment can be described in two parts: the DMU vehicle and the test track area in which the DMU vehicle is operated.

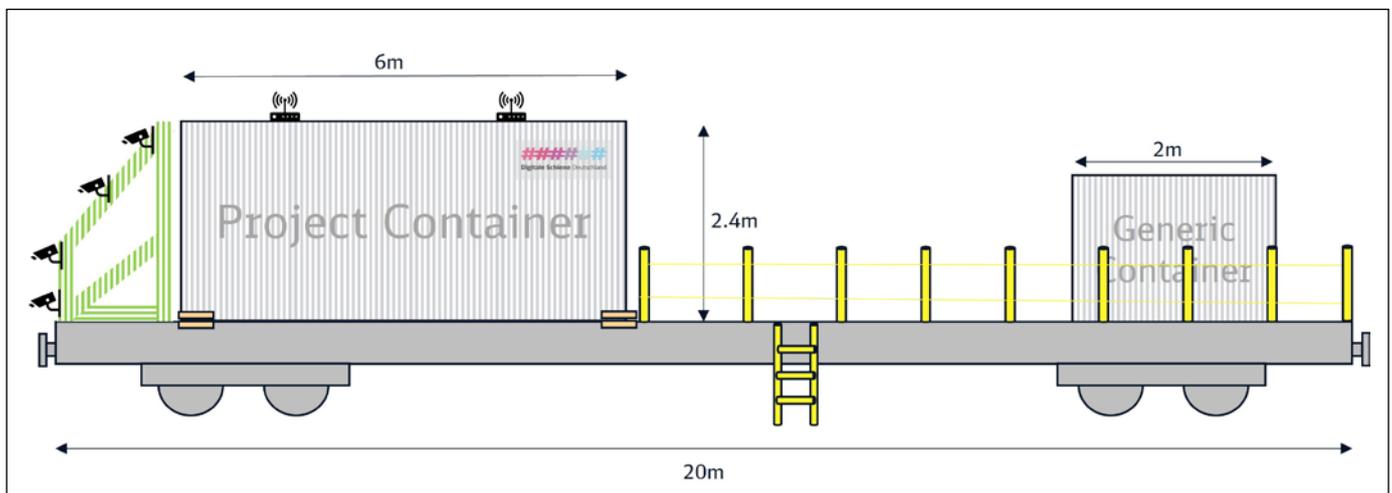
**2.5.1 The DMU vehicle**

At DSD, we have established a DMU vehicle consisting of a container mounted on a flat wagon. The flat wagon has two bogies, spring suspension and an active brake. The components of the system under test are installed inside the project container. The generic container is used for general auxiliary systems such as the power supply. A sensor frame is mounted on the front of the project container, which is used to install sensor components in positions that match the target train. A concept representation of the DMU that will be used in our upcoming ATO-GoA 4 projects is shown in fig. 8.

The DMU vehicle can be pushed by a locomotive with the sensors facing to the front to perform dynamic testing. This allows sensor data to be generated that is very similar to the data obtained with the target vehicle.

**2.5.2 The test track environment**

The test track available for the DSD's GoA4 projects currently consists of a rail shunting/loading yard and a single continuous 5 km long track. It has been provided by the Havelländische Eisenbahn AG (HVLE) and can easily be closed to operations, thus offering the advantage that situations that deviate from normal operations can be tested.



**Bild 8: Skizze der DMU für zukünftige ATO GoA 4-Projekte bei DSD**

Fig. 8: A sketch of the DSD DMU for future GoA 4 projects

Quelle / Source: Digitale Schiene Deutschland / DB InfraGO



**Bild 9: Vogelperspektive auf das Testgelände an der HVLE in Spandau**

Fig. 9: A bird's eye view of the HVLE test in Spandau

Quelle / Source: OSM (verändert / modified)

Havelländischen Eisenbahn AG (HVLE) betrieben und kann für den Testbetrieb einfach gesperrt werden, was den Vorteil hat, dass hier auch vom Normalbetrieb abweichende Situationen getestet werden können.

Die in Bild 9 gezeigte gerade Strecke wird als Grundlage für die meisten Testszenarien zur Objekterkennung und Kollisionsvermeidung verwendet. Objekte, wie z.B. Puppen in Form von Personen oder Tieren, können an verschiedenen Positionen im Gleisbereich platziert werden. Das DMU-Fahrzeug kann dann in verschiedenen Abständen positioniert und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf die Objekte im Gleisbereich zubewegt werden.

Diese Umgebung erlaubt es, viele verschiedene Szenarien zu testen, ist aber natürlich noch begrenzt und bildet nicht alle möglichen Anwendungsbereiche ab, die typischerweise im Betriebskonzept eines ATO-GoA 4-Fahrzeuges vorkommen können (z.B. Anzahl der parallelen Gleise). Es ist daher geplant, weitere Testfelder für ATO GoA 4-Projekte zu erschließen. Ein mögliches, umfassenderes Testgelände, das bereits von DSD genutzt wird, ist das Digitale Testfeld Bahn (DTB) im Erzgebirge (siehe [17]).

## 2.6 Feldtests mit dem Zielfahrzeug

Sobald die Technologie in den bereits beschriebenen Testumgebungen gereift ist, besteht der letzte Schritt darin, die Leistung des dann im Zielfahrzeug installierten Systems auf den späteren Zielstrecken gemäß dem festgelegten Betriebskonzept zu überprüfen. Die Erprobung im Zielzug auf dem öffentlichen Netz erfordert eine sorgfältige Vorbereitung. In vielen Fällen muss eine Genehmigung für eine Testfahrt gemäß EIGV § 15 (4) eingeholt werden. Die Strecke muss für das Testteam gesperrt werden, und ein autorisierter Triebfahrzeugführer, ein Betriebsleiter und ein Versuchsleiter müssen zur Verfügung stehen. Feldtests sind daher in der Regel einer der letzten Schritte in einer Testkampagne. Das Testen mit dem Zielzug in der Zielumgebung ist auch heute noch unverzichtbar, da alle anderen beschriebenen Testumgebungen aktuell noch Einschränkungen aufweisen (z.B. Qualität der Sensormodelle) oder noch nicht vollständig geeignet sind, Tests in den späteren Zielumgebungen zu ersetzen. Beispiele für Feldtests sind die im Rahmen des Projekts Sensors4Rail [2] durchgeführten Fahrten auf dem Netz der S-Bahn Hamburg.

The straight route shown in fig. 9 is used as the basis for most test scenarios for object detection and collision avoidance. Objects, such as dolls in the shape of people, children or animals, can be placed at various points in the track area. The DMU vehicle can then be positioned at different distances and moved towards the objects on the track at different speeds.

This environment allows many different scenarios to be tested, but is of course still limited and does not resemble all the potential areas of application that typically occur in the operating concept of the ATO GoA4 system (e.g. the number of parallel tracks). There are therefore plans to make more testing grounds available for ATO GoA4 projects in the future. One potential additional test ground, which is also used by DSD, is the Digital Rail testbed in the Ore Mountains (see [17]).

## 2.6 Field tests with the target vehicle

Once the technology has matured in the described test environments, the final step would be to check the performance of the system installed in a real target vehicle on the later target tracks and according to the defined operating concept.

Testing on a target train in the public network requires careful preparation. In many cases, a permit for the test run must be obtained in accordance with EIGV § 15 (4). The route must be blocked for the test team and an authorised train driver, an operations officer and a test train supervisor must be available. This is only useful once the technology has been sufficiently matured by the described test environment. Field tests are therefore usually one of the last steps in a testing campaign. On the other hand, testing with a target train in the target environment is still essential today, as all other test environments currently have certain limitations or are not yet fully qualified to replace tests in the later target environments.

Examples for field tests include the runs on the S-Bahn Hamburg network that DSD performed in the Sensors4Rail project [2].

## 3 Outlook

There are plans to apply parts of the presented approach in the BMWK-funded AutomatedTrain project [1]. In this project, DB

### 3 Ausblick

Es ist geplant, Teile des vorgestellten Ansatzes in dem vom BMWK geförderten Projekt AutomatedTrain [1] anzuwenden. In diesem Projekt demonstriert die DB InfraGO AG zusammen mit neun Partnern eine vollautomatische, fahrerlose Bereitstellungsfahrt sowie die zugehörige automatische Zugvorbereitung und -abstellung. Es wird davon ausgegangen, dass mit dem vorgestellten Ansatz die Anzahl der Feldtests in diesem Projekt deutlich reduziert werden kann. Derzeit entwickeln wir die neue DMU (Bild 8), um im Rahmen des AutomatedTrain-Projekts schon in diesem Jahr erste Tests durchführen zu können. Die Feldtests sind bis 2026 geplant. Wenn sich der gewählte Aufbau von Testumgebungen bewährt, planen wir, die Umgebungen in einem nächsten Schritt zu zertifizieren, damit sie für CENELEC-konforme Tests in Folgeprojekten verwendet werden können. Dadurch wäre man in der Lage, zukünftig Teile der abschließenden Verifikations- und Validierungstests vom Fahrzeug ins Labor zu verlagern, was aufgrund der großen Anzahl der zu testenden Szenarien von sehr hoher Bedeutung sein wird. Eine zentrale Herausforderung ist dabei die Erzeugung von synthetischen Daten, die für die Verifizierung und Validierung sicherheitskritischer Funktionen geeignet sind. ■

#### LITERATUR | LITERATURE

- [1] DB Infra GO AG, „AutomatedTrain Project Webpage,“ 2023. [Online]. Available: <https://digitale-schiene-deutschland.de/en/news/2023/funding-fully-automated-train>
- [2] Deutsche Bahn AG, „Sensors4Rail project page,“ 2023. [Online]. Available: <https://digitale-schiene-deutschland.de/de/impressum>. [Zugriff am 2023]
- [3] Mathworks, „Simulink,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
- [4] Eclipse Foundation, „Capella - Open Source Solution for Model-based Systems Engineering,“ [Online]. Available: <https://mbse-capella.org/>. [Zugriff am 9.8.2024]
- [5] HCSC Engineering Ltd, „Enabling Model-Based Systems Engineering,“ [Online]. Available: <https://iexcelarc.com/>. [Zugriff am 9.8.2024]
- [6] Digitale Schiene Deutschland, „Simulation-based system tests – a key to the digitalization of the rail system,“ 2024. [Online]. Available: [https://digitale-schiene-deutschland.de/en/news/2024/simulationbased\\_systemtests](https://digitale-schiene-deutschland.de/en/news/2024/simulationbased_systemtests)
- [7] Spenneberg, D.; Al-Hashimi, R.; Kersting, N., „Simulationsbasierte Systemtests – Schlüssel für die Digitalisierung des Bahnsystems,“ *Deine Bahn* 11/2024. [Online]. Available: <https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/DeiBa-11-2023-26-SB.pdf>
- [8] AUTOSAR GbR, „AUTOSAR,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.autosar.org/>
- [9] ASAM e. V., „ASAM,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.asam.net/>
- [10] Kreyenberg, D.; Narayanan, H.; Renner, T.; Nitzschke, H.; Wenzel, B., „Digitales Register – die „Single Source of Truth“ für Infrastrukturdaten für das vollautomatisierte Fahren,“ *SIGNAL+DRAHT* 6/2024. [Online]. Available: [https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/06\\_15\\_Kreyenberg\\_Digitales\\_Register\\_SignalDraht.pdf](https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/06_15_Kreyenberg_Digitales_Register_SignalDraht.pdf)
- [11] Skowron, F.; R. Treydel, R., „Blöcke waren gestern – Chancen einer zugzentrischen LST,“ *DER EISENBAHNINGENIEUR* 11/2022. [Online]. Available: [https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/34\\_39\\_Skowron\\_Treydel\\_neu.pdf](https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/34_39_Skowron_Treydel_neu.pdf)
- [12] The Linux Foundation, „kubernetes,“ 2024. [Online]. Available: <https://kubernetes.io/>
- [13] Docker Inc., „docker,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.docker.com/>
- [14] dSPACE GmbH, „AURELION product page,“ [Online]. Available: [https://www.dspace.com/en/inc/home/products/sw/experimentandvisualization/aurelion\\_sensor-realistic\\_sim.cfm](https://www.dspace.com/en/inc/home/products/sw/experimentandvisualization/aurelion_sensor-realistic_sim.cfm)
- [15] Marsch, P.; Neumaier, P.; David P.; du Chatinier, B., „Pan-European Railway Data Factory – infrastructure and ecosystem for fully automated rail operations,“ *SIGNAL+DRAHT* 4/2024. [Online]. Available: [https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/SD\\_04\\_24\\_extracted\\_PanEuropeanDataFactory.pdf](https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/SD_04_24_extracted_PanEuropeanDataFactory.pdf)

InfraGO AG and nine other partners will demonstrate the fully automated, driverless dispatching and stabling of trains, as well as automated train preparation and shutdown.

We assume, that the approach presented above will help us significantly reduce the number of field tests in this project. We are currently developing the new DMU to enable early testing in the AutomatedTrain project starting this year. The field tests are planned to take until 2026. If the chosen test environment setup proves successful, we plan to qualify the environments in the next step so that they can be used for CENELEC-compliant testing in subsequent projects. This would enable us to move parts of the final verification and validation tests from the vehicle into the laboratory, which will be crucial due to the large number of scenarios to be tested. A key challenge here is the production of synthetic data that can be qualified for the verification and validation of safety critical functions. ■

[schiene-deutschland.de/Downloads/SD\\_04\\_24\\_extracted\\_PanEuropeanDataFactory.pdf](https://digitale-schiene-deutschland.de/Downloads/SD_04_24_extracted_PanEuropeanDataFactory.pdf)

- [16] Digitale Schiene Deutschland, „Studie zur Pan European Railway Data Factory als Grundlage für KI-basierte Bahnbetrieb erfolgreich abgeschlossen,“ April 2024. [Online]. Available: <https://digitale-schiene-deutschland.de/de/aktuelles/2024/Pan-European-Railway-Data-Factory>
- [17] Digitale Schiene Deutschland, „Teststrecke im „Digitalen Testfeld Bahn“,“ [Online]. Available: <https://digitale-schiene-deutschland.de/5G-Testfeld-im-Erzgebirge>

#### AUTOREN | AUTHORS

##### Dr. Dirk Spenneberg

Leitung System Integration, Verifikation, Validierung und Simulation / *Head of System Integration, Verification, Validation and Simulation*  
Digitale Schiene Deutschland (DSD)  
E-Mail: [dirk.spenneberg@deutschebahn.com](mailto:dirk.spenneberg@deutschebahn.com)

##### Michael Bauer

Leitung System Simulation / *Head of System Simulation*  
Digitale Schiene Deutschland (DSD)  
E-Mail: [michael.ba.bauer@deutschebahn.com](mailto:michael.ba.bauer@deutschebahn.com)

##### Michael Ghee

Leitung System Verifikation and Validation / *Head of System Verification and Validation*  
Digitale Schiene Deutschland (DSD)  
E-Mail: [michael.ghee@deutschebahn.com](mailto:michael.ghee@deutschebahn.com)

##### Stefan Krönke

Leitung System Integration / *Head of System Integration*  
Digitale Schiene Deutschland (DSD)  
E-Mail: [stefan.kroenke@deutschebahn.com](mailto:stefan.kroenke@deutschebahn.com)

Alle Autoren / *all authors:*

DB InfraGO AG

Anschrift / *Address:* EUREF Campus 17, D-10829 Berlin