



9 | 2026

September
www.eurailpress.de/sd
118. Jahrgang

SIGNAL+DRAHT

SIGNALLING & DATACOMMUNICATION



InnoTrans 2026
Messevorschau

32 Automatisierung:
Forschung und Weg zu
schnellerer Innovation
Automation in rail transport:
research and path to
faster innovation

51 Post Quantum Security
in der Leit- und
Sicherungstechnik
Post-quantum security
for railway signalling and
safety technology

101 Achszählrechner mit
EULYNX-Schnittstelle
in Betrieb
Train detection system
with a live
EULYNX interface

Made mit Köpfchen

Signalsysteme
made in Mödling.



ZELISKO



**Wir bieten Jobs mit Potenzial.
What drives you?**

Mehr auf www.zelisko.com/de/signalsysteme



Sensorik und Simulation als Innovationstreiber

Sensors and simulation as innovation drivers

Das Leitmotiv der InnoTrans 2026, das globale Wachstum der Branche thematisierend, ist: „Mobility on a global scale – shaping projects and growth opportunities“.

Um in Deutschland von diesem Wachstum profitieren zu können – wirtschaftlich wie verkehrstechnisch –, müssen wir im Schienenverkehrssystem Innovationen wie Remote Operation und automatisiertes Fahren etablieren. Dafür müssen wir Technologien wie die Sensorik virtuell validieren. Wir bilden also Technik, die es noch nicht gibt, in der virtuellen Welt ab. Denn so werden Tests leichter reproduzierbar. Die Vorteile: Rahmenbedingungen wie Wetterverhältnisse sind änderbar, Sperrpausen auf der realen Strecke verringern sich, Zulassungszyklen verkürzen sich. Sensorik kann darüber hinaus in Regelzügen verbaut werden und für vorausschauende Instandhaltung genutzt werden. Weniger Messzüge und -fahrten sind die Folge. Kurz: Kosten runter, Tempo hoch.

Überdies müssen vorhandene Infrastrukturmittel mutig und flexibel in neue Technologien investiert werden, denn reine Erneuerungsmaßnahmen oder Instandhaltung bringen keinen Innovationsschub. Ein sinnvoller Einsatz liegt nicht nur in der Reparatur alter Gleise, sondern in der Digitalisierung des Betriebsablaufs und der Züge selbst.

Das DLR beherrscht Simulationsverfahren, KI-Methoden und Hardwarekomponenten. Hersteller und Betreiber können z.B. unsere Forschungseinrichtung RailSiTe nach individuellem Bedarf nutzen, um ihre Investitionen vorzubereiten. Damit überführen wir Erkenntnisse in praxistaugliche Lösungen – denn Forschung muss Impact erzeugen. Mit virtueller Validierung können wir Sicherheit, Pünktlichkeit und Effizienz miteinander verknüpfen. Das bringt uns schneller zu modernen Mobilitätskonzepten auf der Schiene.

The theme of InnoTrans 2026, which focuses on the sector's global growth, is: „Mobility on a global scale – shaping projects and growth opportunities“.

If we are to benefit from this growth in Germany, both economically and in terms of transport technology, we must first establish innovations such as remote operation and automated driving within the rail transport system. We therefore need to validate technologies such as sensor systems virtually in order to do this. This means that we simulate technology that does not yet exist in a virtual world. This makes the tests more easily reproducible. The advantages include the fact that any environmental conditions such as the weather can be altered, track closures on real-world lines are reduced and approval cycles are shortened. Sensor technology can also be installed in regular trains and used for predictive maintenance. This results in fewer test trains and test runs. In short, costs go down, while speed goes up.

Moreover, any available infrastructure funds must be invested boldly and flexibly in new technologies, as mere renewal measures or maintenance cannot drive innovation. A sensible use of resources lies not only in repairing old tracks, but also in digitalising operating processes and the trains themselves.

The DLR is an expert in simulation techniques, AI methods and hardware components. Manufacturers and operators can use our research facility RailSiTe to prepare investments according to their individual needs. In this way, we are translating findings into practical solutions, because research must generate impact. Virtual validation enables us to combine safety, punctuality and efficiency. This brings us closer to modern rail mobility concepts more quickly.

Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer, Mitglied des Vorstands im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer, Member of the Executive Board of the German Aerospace Center (DLR)



Liebe Leserinnen und Leser,

EU-Kommission, ERA und das gemeinsame Forschungsunternehmen Europe's Rail haben Ende Juli einen Deal zur Entwicklung einer ERTMS-Standardlösung geschlossen. Dieser identifiziert drei Stellschrauben:

- Installation von ERTMS only, um die nationalen Besonderheiten zu reduzieren, die bei parallelem Betrieb zum nationalen konventionellen System notwendig sind.
- Reduzierung der möglichen nationalen Umsetzungsvarianten in den TSI ZZS durch Fokus auf eine Level-2-only-Umsetzung. Es sollten Standardausschreibungen ohne gesondertes „Prototyping“ für jedes Projekt möglich werden.

• Betrachtung des gesamten Systems der Zugsicherung und Signalisierung, das streckenseitig nicht vollständig in den TSI ZZS abgebildet ist. Kern für die Umsetzung dieser Überlegungen soll ein sogenannter „ERTMS Blue-print“ sein. Eine erste Version für Cybersicherheit, streckenseitige Anlagen und Fahrbetrieb soll bis Ende 2027 fertig sein. Es wäre denkbar, dass Blue-print-konforme Projekte im neuen Finanzierungsrahmen ab 2028 etwa aus der CEF priorisiert oder mit besseren Bedingungen gefördert werden.

Wir wünschen Ihnen eine anregende und erkenntnisreiche Lektüre dieser neuen Ausgabe von SIGNAL+DRAHT und würden uns freuen, Sie an unserem Stand (Halle 4.2 | 115) auf der InnoTrans 2026 begrüßen zu können.

Dear reader,

The EU Commission, the ERA and the Europe's Rail joint research undertaking concluded a deal to develop a standard ERTMS solution at the end of July. This has identified three main parameters:

- The installation of ERTMS only in order to reduce any national peculiarities that are necessary during parallel operations with the conventional national system.
- The reduction of possible national implementation variants in the TSI CCS by focussing on Level-2-only implementations. Standard calls for tenders without any special „prototyping“ should be possible for each project.
- The contemplation of the entire train protection and signalling system, which has not yet been completely mapped out trackside in the TSI CCS.

A so-called „ERTMS Blue-print“ should constitute the core for the implementation of these considerations. The first version pertaining to cybersecurity, trackside facilities and transport operations should be finished by the end of 2027. It would be conceivable to prioritise blueprint conforming projects within the new finance framework from 2028, for example the CEF, or potentially to support them with better conditions.

We wish you much exciting and insightful reading with this new edition of SIGNAL+DRAHT and we are looking forward to meeting you at our stand (Hall 4.2 | Booth 115) at InnoTrans 2026.

August Zierl

Reinhold Hundt

Chefredakteure | Advising Chief Editors

03 Karsten Lemmer

Auf ein Wort: Sensorik und Simulation als Innovationstreiber
Statement: Sensors and simulation as innovation drivers

06

InnoTrans: Messevorschau

InnoTrans: Exhibition Preview

20 Susanne Gschwendtner | Christian Hauswald

AutomatedTrain – Forschung für vollautomatisiertes Fahren auf der Schiene

AutomatedTrain – Research for fully automated rail operations

32 Lennart Asbach | Christian Meirich | Caroline Schießl | Gert Bickel

Automatisierung im Schienenverkehr: Forschung und Weg zu schnellerer Innovation

Automation in rail transport: research and path to faster innovation

44 Jens Köcher

Akkreditierung nach ISO/IEC 17025 – Herausforderungen im Hinblick auf FRMCS

Accreditation according to ISO/IEC 17025 – the challenges pertaining to FRMCS

51 Daniel Zelle | Stefan Katzenbeisser

Post Quantum Security in der Leit- und Sicherungstechnik

Post-quantum security for railway signalling and safety technology

Internationaler Fachbeirat

Klaus Althage, Signon Deutschland GmbH, Berlin | Bernhard Appel, Hitachi Rail GTS Austria GmbH, Wien | Stefan Bauer, TÜV Süd Schweiz AG, Zürich | Robert Baumeister, Peak Mobility GmbH, Berlin | René Berger, Voestalpine Signaling Austria GmbH, Wien | Dr.-Ing. Thorsten Büker, quattron GmbH, Aachen | Mahir Celik, safeTrail GmbH, Saarbrücken | Radek Dobiáš, SZ, Prag | Valentin Doytchev, Bulgarische Staatsbahnen, NRIC, Sofia | Oliver Fellner, Mer Mec Deutschland GmbH, München | André Feltz, SN CFL, Luxemburg | Andreas Freese, DB Systel GmbH, Frankfurt/M. | Udo Fritsch, Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (VDV), Köln | Thomas Gehringer, Eisenbahn-Bundesamt, Bonn | Urs Guggisberg, Schweizerische Bundesbahnen (SBB), Bern | Erich Grünberger, Rail Expert Consult GmbH, Wien | Aki Härkönen, Finnish Transport Infrastructure Agency, Helsinki | Ronald Helder, ProRail, Utrecht | Steffen Henning, Scheidt & Bachmann System Technik GmbH, Kiel | Dennis Herrmann, Stadler Signalling Germany GmbH, Braunschweig | Andreas Hinterschweiger, Westermo Data Communications GmbH, Waghäusel | Dr. István Hrivnák, Tran-SYS Ltd., Budapest | Dirk Isola, ipw Ingenieurgesellschaft, Braunschweig | Dr.-Ing. Birgit Jaekel, DZSF, Dresden | Detlef John, Frauscher Sensor Technology Group GmbH, St. Marienkirchen | Dr.-Ing. Richard Kahl, CERRS Kompetenzzentrum Bahnsicherungstechnik GmbH, Dresden | Szymon Kniaź, Kombud Group, Radom | Johannes Köbler, Bayerische Kabelwerke AG, Roth | Branko Korbar, Kroatische Eisenbahnen (HŽ), Zagreb | Dr.-Ing. Rolf-Dieter Krächter, VDB Service GmbH, Berlin | Dennis Kühnhold, W&S Technik GmbH, Castrop-Rauxel | Andreas Langer, ICS Informatik Consulting Systems GmbH, Stuttgart | Marco La Torre, Pintsch GmbH, Dinslaken | Dr. Christoph Lemmer, ESE Engineering und Software-Entwicklung GmbH, Braunschweig | Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer, DLR e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig | Dr.-Ing. Michael Lenders, Scheidt & Bachmann GmbH, Mönchengladbach | Helmut Liebinger, Voestalpine Signaling Siershahn

59 Katharina Prochazka | David Seider | Benedikt Wenzel
Normkonforme Werkzeugvalidierung – zielgerichtet und effizient
 Standard-compliant tool validation – targeted and efficient

68 Jonas Rebstadt | Martin Mitzkus | Sonja Steffens | Patrick Marsch
Erste Implementierung einer virtualisierten LST-Architektur bis SIL4
 The first implementation of a virtualised railway signalling architecture up to SIL4

76 Fabian Gaebler | Carsten Trog
Einsatz von Risikoanalysen in der Anforderungsermittlung
 Using risk analyses as a basis for specification

86 Freek van Capelle | Jenny Skarman
Modularer Ansatz zur Entwicklung sicherer Anwendungen
 A modular approach to developing safe applications

93 Woloszyk Przemyslaw | Marek Kucinski | René Berger
Vom Achszählsystem zur universellen Feldelementeplattform
 From axle counting systems to a universal field device platform

101 Christian Hein | Andre Wenning
Nächste Digitalisierungsstufe: Achszählrechner mit EULYNX-Schnittstelle in Betrieb
 The next step in digitalisation: a train detection system with a live EULYNX interface

108 Sami Hyryläinen
Erfahrungen mit EULYNX-Objekt Controllern für moderne modulare Signalarchitekturen
 Experience of EULYNX Object Controllers for modern modular signalling architecture

115 Matthias Forstenpointner
Maßgeschneiderte Zugerfassungssysteme für nicht-sicherheitskritische Anwendungen
 Tailored train detection systems for non-safety-critical applications

126 Thorsten Neumann | Susanne Reetz | Jörn Groos
Holistische Weichenzustandsüberwachung: bisherige und zukünftige Entwicklungen
 Holistic switch condition monitoring: what has been done and what's next?

135 Kurzberichte | Newsflash
EurailJobs

138 Impressum | Imprint

GmbH, Siershahn | **Sebastian Lücke**, Pilz GmbH & Co. KG, Ostfildern | **Dr.-Ing. Matthias Martin**, Siemens Mobility AG, Wallisellen | **Andreas Medek**, Siemens Mobility Austria GmbH, Wien | **Jens Meinecke**, Hanning & Kahl GmbH & Co KG, Oerlinghausen | **Dr.-Ing. Daria Menzel**, Technische Universität Dresden, Dresden | **Christoph Müller**, Systems Lab 21 GmbH, Potsdam | **Dr. Oleg Nasedkin**, Petersburger Staatl. Universität für Eisenbahnverkehr/Signaltechnik, St. Petersburg | **Michael Osterkamp**, Progress Rail Inspection & Information Systems GmbH, Bad Dürkheim | **PhD Marek Pawlik**, Railway Research Institute, Warschau | **Frank Peters**, Zöllner Signal GmbH, Kiel | **László Pósalaki**, MÁV ZRt., HU-Budapest | **Marián Roman**, Eisenbahnen der Slowakischen Republik (ŽSR), Bratislava | **Dr. Guido Rumpel**, Siemens Mobility GmbH, Braunschweig | **Christian Sagmeister**, ÖBB-Infrastruktur AG, Wien | **Mike Schick**, TÜV Rheinland InterTraffic GmbH, Köln | **Prof. Dr.-Ing. habil. Lars Schnieder**, TU Braunschweig, Braunschweig | **Dr. Robert Schöner**, Assessment Expert Services GmbH, A-Wien | **Kerstin Schreiber**, Funkwerk Systems GmbH, Kölleda | **Max Schubert**, INCYDE industrial cyber defense GmbH, Frankfurt/M. | **Christian Schunke-Mau**, Alstom Transport Deutschland GmbH, Berlin | **Hartwig Schuster**, UNISIG, Brüssel | **Patrick Steinebach**, DB InfraGO AG, Frankfurt/M. | **Miroslav Stojkovic**, Serbische Eisenbahnen (ŽS), Belgrad | **Dr.-Ing. Timo Strobel**, Hitachi Rail GTS Deutschland GmbH, Ditzingen | **Detlev K. Suchanek**, GRT Global Rail Academy and Media GmbH/PMC Media, Hamburg | **Péter Tóth**, Prolan Group, Budakalász | **Prof. Dr.-Ing. Jochen Trinckauf**, Dresden | **Laurenz Trunner**, EBE Railway Systems GmbH, Wien | **Bernhard Wahl**, Obermeyer Infrastruktur GmbH & Co. KG, Köln | **Christian Weiß**, Dr. techn. Josef Zelisko Fabrik für Elektrotechnik und Maschinenbau Gesellschaft m.b.H., Mödling | **Lennart Willms**, ITK Engineering GmbH, Holzkirchen | **Anton Zahner**, HIMA Paul Hildebrandt GmbH, Brühl

Wir wählen in den Fachbeiträgen aufgrund der besseren Lesbarkeit entweder die männliche oder weibliche Form von personenbezogenen Hauptwörtern. Wo möglich verwenden wir geschlechtsneutrale Alternativen. Meinungsbeiträge können auf ausdrücklichen Wunsch der verfassenden Person von dieser Regel ausgenommen sein. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung anderer Geschlechtsidentitäten.

For the sake of readability, we use either the masculine or feminine form of personal nouns in the specialist articles. Where possible, we use gender-neutral alternatives. Opinion pieces may be exempt from this rule at the express wish of the author. This in no way implies any discrimination against other gender identities.



Eurailpress Fachartikelarchiv | Archive of specialist articles

Alle Fachartikel sind dauerhaft unter www.eurailpress.de/archiv/ hinterlegt. Achten Sie auf unsere mit dem Archivsymbol gekennzeichneten Themenlinks, die an ausgewählten Beiträgen im Heft zu finden sind und auf weitere relevante Inhalte verweisen.

All specialist articles are filed permanently at www.eurailpress.de/archiv/. Look out for our links to subjects flagged with the archive symbol. This is placed on selected contributions in each issue and draws attention to additional relevant contents.

InnoTrans 2026

Vom 22. September bis zum 25. September 2026 trifft sich die Bahnwelt zum 30-jährigen Jubiläum auf der 15. InnoTrans. Fachbesucher erwartet auf der internationalen Leitmesse für Verkehrstechnik auf dem Berliner Messegelände eine schier unendliche Vielfalt an Produkten und Lösungen aus der Bahnindustrie. Eurailpress und SD wünschen Ihnen einen erfolgreichen Messebesuch!

From 22 September to 25 September 2026, the railway industry will gather to mark its 30th anniversary at the 15th InnoTrans. Trade visitors to the leading international trade fair for transport technology at the Berlin Exhibition Centre can expect a sheer endless variety of products and solutions from the rail industry. Eurailpress and SD wish you a successful visit to the fair!

Die Intelligence-Schicht für Alstoms Bahn-Assets

Talk to my Train ist der intelligente Assistent für Betriebs- und Instandhaltungsteams von Alstom im Bahnsektor. Er konsolidiert Informationen aus Zügen, Signal- und Zugsteuerungssystemen, Infrastruktur, Instandhaltungsdaten sowie technischer Dokumentation – einschließlich Komponentenhandbüchern – zu einer einzigen Intelligence-Schicht. Durch die Verknüpfung von Bahndaten, betrieblichem Kontext und technischem Expertenwissen, die typischerweise auf verschiedene Systeme verteilt sind, unterstützt Talk to my Train Teams dabei, schneller Antworten zu finden, Probleme effizienter zu lösen und Wissen effektiver zu teilen. Die Verantwortung für alle betrieblichen Entscheidungen bleibt jederzeit vollständig bei den Expertinnen und Experten.

Halle 3.2, Stand 450
www.alstom.com

The intelligence layer for Alstom's rail assets

Talk to my Train is the intelligent assistant for Alstom's operations and maintenance teams in the rail sector. It consolidates information from trains, signalling and train control systems, infrastructure, maintenance data and technical documentation – including component manuals – into a single intelligence layer. By linking rail data, operational context and technical expertise – which are typically spread across different systems – Talk to my Train helps teams find answers more quickly, resolve issues more efficiently and share knowledge more effectively. Responsibility for all operational decisions remains entirely with the experts at all times.



Schnellere Störungsanalyse für einen leistungsfähigeren Bahnbetrieb

Faster fault analysis for more efficient rail operations

Quelle / Source: Alstom SA

Hall 3.2, Booth 450
www.alstom.com



**Bleiben
Sie in der Spur!**

Mit dem Newsletter von

**Eurail
press**

**Jetzt
anmelden!**

[www.eurailpress.de/
anmeldung](http://www.eurailpress.de/anmeldung)

Kabel verstehen. Fehler erkennen. Sicher Handeln.

Bayka
seit 1885



Mit der gebündelten Expertise der W&S Academy und der Bayerische Kabelwerke AG (Bayka) erweitern wir unser Schulungsangebot ab 2027 um drei neue, praxisorientierte Fachseminare für die Eisenbahn- und Infrastrukturbranche.

Kurse, Termine und Anmeldung

Jetzt den QR-Code scannen
und direkt buchen!

[www.bayka.de/
servicebereich/seminare](http://www.bayka.de/servicebereich/seminare)



Aktuelle Seminare

Tag 1



WSC_9001

Grundlagen Eisenbahnkabel

Aufbau, Funktion,
Kabelarten, Messungen
und Prüfungen

Tag 2



WSC_9002

Herstellen von Muffen

SVSM- und VASS-Muffen
praxisnah fertigen

Tag 3



WSC_9003

Herstellen von Kabel- enden im Kabelschrank

Adern ausbinden, auflegen
und prüfen

Neue Kurse ab 2027

NEU

WSC_9004

Kabelfehlerortung

NEU

WSC_9005

Kabellokalisierung

NEU

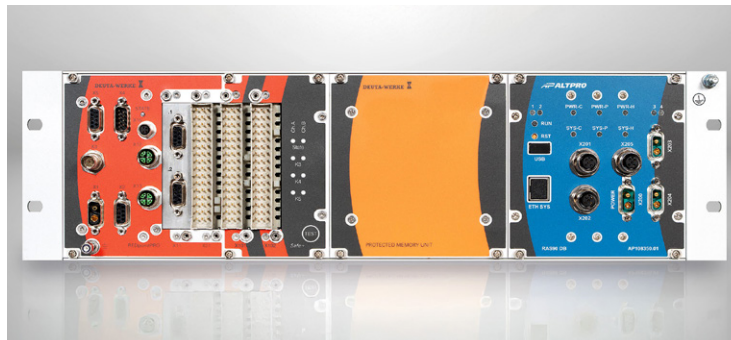
WSC_9006

Erdschlusssuche

RedpointPro: kompakte PZB-Komplettlösung für Schienenfahrzeuge

RedpointPro ist eine kompakte PZB-Komplettlösung für Schienenfahrzeuge in Deutschland und Österreich. Das System vereint PZB, juristischen Rekorder mit TSI-konformem geschütztem Datenspeicher, Gateway-Funktionen sowie Überwachungs- und Diagnosefunktionen in einem 19-Zoll-Rack. Es erfüllt aktuelle Betreiberanforderungen, unterstützt die Integration in ETCS-Projekte und ist für den Cyber Resilience Act (CRA) vorbereitet. Die Lösung entspricht aktuellen Anforderungen an Bahnnormen, Brandschutz und funktionale Sicherheit. Schnittstellen zu ETCS-EVC, TCMS, DMI, Sensorik und Führerstandssteuerungen ermöglichen die Einbindung in unterschiedliche Fahrzeugkonzepte. Unterstützt werden unter anderem Ethernet, MVB, CANopen und CAN-Bus. RedpointPro erleichtert die Modernisierung bestehender Fahrzeuge, den Ersatz abgekündigter PZB-Systeme sowie den grenzüberschreitenden Einsatz von Fahrzeugen auf den Netzen in Deutschland und Österreich.

Halle 27, Stand 560
www.deuta.com



RedpointPro: die moderne, kompakte und zukunftssichere PZB-Komplettlösung

RedpointPro: the modern, compact and future-proof complete PZB solution

Quelle / Source: Deuta-Werke

RedpointPro: a compact, all-in-one PZB solution for rail vehicles

RedpointPro is a compact, all-in-one PZB solution for rail vehicles in Germany and Austria. The system combines PZB, a legal data recorder with TSI-compliant secure data storage, gateway functions, and monitoring and diagnostic functions in a 19-inch rack. It meets current operator requirements, supports integration into ETCS projects and is prepared for the Cyber Resilience Act (CRA). The solution complies with current requirements for railway standards, fire safety and functional safety. Interfaces to ETCS-EVC, TCMS, DMI, sensor systems and driver's cab

controls enable integration into various vehicle concepts. Protocols supported include Ethernet, MVB, CANopen and CAN bus. RedpointPro facilitates the modernisation of existing rolling stock, the replacement of end-of-life PZB systems, and the cross-border operation of rolling stock on networks in Germany and Austria.

Hall 27, Booth 560
www.deuta.com

Next Generation Dual-Mode-FRMCS und GSM-R-Zugfunk

Mit dem TRS-G2 präsentiert ErvoCom eine wegweisende neue Generation des Zugfunks für die sichere Migration von GSM-R zu FRMCS. Die innovative Dual-Mode-Lösung basiert auf der neuesten FRMCS-Architektur und verbindet alle Systemkomponenten konsequent über Ethernet. Im Zentrum steht das innovative Bediengerät COCO24 mit modernster Touch-Technologie, in dem die Zugfunklogik integriert ist. Das Zentralgerät CCU24 dient als GSM-R-Gateway zur bestehenden Infrastruktur, während ein zukünftiges FRMCS-Gateway direkt an das Bediengerät (VAS) angebunden wird. Die offene Architektur unterstützt Multi-Vendor-Strategien, vereinfacht die Migration, reduziert Lebenszykluskosten und bietet Bahnbetreibern maximale Flexibilität, hohe Cybersecurity und langfristigen Investitionsschutz. TRS-G2 ebnet den Weg in die digitale Zukunft des Bahnfunks.

Halle 4.1, Stand 665
www.ervocom.ch



Bediengerät COCO24 für FRMCS- und GSM-R-Zugfunk

COCO24 control unit for FRMCS and GSM-R railway radio Quelle / Source: ErvoCom AG

Next-generation dual-mode FRMCS and GSM-R on-board radio

With the TRS-G2, ErvoCom presents a groundbreaking new generation of on-board radio for the secure migration from GSM-R to FRMCS. The innovative dual-mode solution is based on the latest FRMCS architecture and consistently connects all system components via Ethernet. At the heart of the system is the innovative COCO24 operator terminal, featuring state-of-the-art touch technology, in which the train radio logic is integrated. The CCU24

central unit serves as a GSM-R gateway to the existing infrastructure, whilst a future FRMCS gateway will be connected directly to the operator terminal (VAS). The open architecture supports multi-vendor strategies, simplifies migration, reduces lifecycle costs and offers rail operators maximum flexibility, high cyber security and long-term investment protection. TRS-G2 paves the way for the digital future of railway radio.

Hall 4.1, Booth 665
www.ervocom.ch

Funkwerk Gateway – FRMCS TOBA Box

Die nächste Generation von Cab-Radios wird auf FRMCS-Technologie basieren und im ersten Schritt ein Datenübertragungssystem nutzen, das eine extrem hohe Bandbreite und eine bemerkenswert geringe Latenz aufweist. Darüber hinaus werden Sicherheit und Zuverlässigkeit durch die Nutzung von privaten und kommerziellen 5G-Netzwerken verbessert. Funkwerk hat aufgrund seiner langjährigen Expertise in den Bereichen GSM-R, analoger Zugfunk und LTE-basierter Funkmodule ein 5G-Gateway mit einer Prozessoreinheit für die nächste Generation der Zugkommunikation entwickelt. Im Konzept des Gateways werden die Mobilfunkschnittstellen mithilfe von integrierten Modem-Modulen umgesetzt, die gängigen Industriestandards für Formfaktoren und Schnittstellen entsprechen. Dies gewährleistet nicht nur die bereits vorhandene Unterstützung verschiedener Mobilfunksysteme und Frequenzbänder, sondern auch eine herausragende Zukunftsfähigkeit und Flexibilität. Beispielsweise wird dadurch sichergestellt, dass das FGW auch zukünftigen Anforderungen im globalen Einsatz gerecht werden kann und problemlos Funkwerks zertifiziertes FRMCS-Modem integrieren kann, sobald es verfügbar ist.



Halle 4.1, Stand 420
www.funkwerk.com

Für FRMCS gut vorbereitet
 Well prepared for FRMCS

Quelle / Source: Funkwerk AG

Funkwerk Gateway – FRMCS TOBA Box

The next generation of cab radios will be based on FRMCS technology and, as a first step, will utilise a data transmission system offering extremely high bandwidth and remarkably low latency. Furthermore, safety and reliability will be enhanced through the use of private and commercial 5G networks. Drawing on its many years of expertise in the fields of GSM-R, analogue train radio and LTE-based radio modules, Funkwerk has developed a 5G gateway with a processing unit for the next generation of train communication. In the gateway's design, the mobile radio interfaces are implemented using integrated modem modules that comply with current industry standards for form factors and interfaces. This not only ensures existing support for various

mobile communications systems and frequency bands, but also outstanding future-proofing and flexibility. For example, this ensures that the FGW can meet future requirements in global operations and can seamlessly integrate Funkwerk's certified FRMCS modem as soon as it becomes available.

Hall 4.1, Booth 420
www.funkwerk.com



InnoTrans 2026
 22.-25. September
 THE FUTURE OF MOBILITY

Messe Berlin GmbH
 Expocenter city | Messedamm 22
 14055 Berlin

VON A NACH BAHN

Mit Energie, die ankommt.

Freigelände Süd | O/640

Sichere Stromversorgung für DBZ | DTZ | GFK
 Anschlussfertiges EEA Modul
 Integrierte 16,7 Hz Energieversorgung

Halle 25 | Stand 525

Elektrische Weichenheizung
 Intelligente Bahnanschlusssäule
 Sichere Stromversorgung für die digitale Schiene



Erleben Sie ESA Elektroschaltanlagen Grimma GmbH live auf der InnoTrans – oder online auf unserer Website.
Jetzt QR-Code scannen!

ESA-GRIMMA.DE

Next Generation – breit aufgestellt für die Zukunft

Hitachi Rail präsentiert in Berlin HMAX for Rail, eine digitale Asset-Management-Plattform, die Daten von Zügen, Signalanlagen und Infrastruktur in Stadt-, Fern- und Güterverkehrsnetzen zusammenführt. Mit Hilfe proprietärer Sensoren und bahnspezifischer Algorithmen generiert HMAX detaillierte Informationen zu Rollmaterial, Gleisen und streckenseitigen Anlagen und ermöglicht so vorausschauende Instandhaltung, optimiertes Lebenszyklusmanagement und verbesserte Zuverlässigkeit. Zudem werden neue Entwicklungen im Bereich der Signalanlagen für Fern- und Nahverkehr vorgestellt: Dazu gehört SelTrac G9, eine neue Generation von CBTC-Signalanlagen, die Virtualisierung und sichere Cloud-Dienste integriert. Im U-Bahn-Bereich bietet SelTrac CBTC verbesserte Simulationmöglichkeiten und Energieeffizienz, ergänzt durch Twin CBTC für cloudbasiertes Training und Green CBTC Next AI für fortschrittliche Energieeinsparungen. Alle Signallösungen für Fern- und Nahverkehr werden durch HMAX ergänzt, was eine zustandsbasierte und vorausschauende Instandhaltung ermöglicht, um die Lebenszykluskosten zu senken.

Halle 4.2, Stand 430
www.hitachirail.com

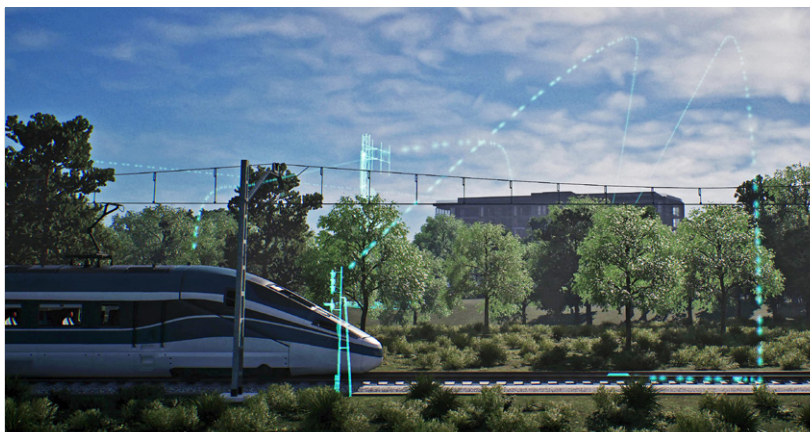
Next Generation – well-positioned for the future

Hitachi Rail is presenting HMAX for Rail in Berlin, a digital asset management platform that consolidates data from trains, signalling systems and infrastructure across urban, long-distance and freight transport networks. Using proprietary sensors and rail-specific algorithms, HMAX generates detailed information on rolling stock, tracks and trackside equipment, thereby enabling predictive maintenance, optimised lifecycle management and improved reliability. New developments in the field of signalling systems for long-distance and local transport are also being presented: these include SelTrac G9, a new generation of CBTC signalling systems that integrates virtualisation and secure cloud services. In the metro sector, SelTrac CBTC offers improved simulation capabilities and energy efficiency, complemented by Twin CBTC for cloud-based training and Green CBTC Next AI for advanced energy savings. All signalling solutions for long-distance and local transport are complemented by HMAX, which enables condition-based and predictive maintenance to reduce life-cycle costs.

Hall 4.2, Booth 430
www.hitachirail.com

Indra integriert offene digitale Signaltechnik und Bahnmanagement

Die Modernisierung des Bahnwesens erfordert interoperable, skalierbare und automatisierte Lösungen in Multi-Lieferanten-Umgebungen. Indra vereint Open Digital Signalling und Traffic Management in einer Architektur auf offenen Standards. Offene digitale Signaltechnik entkoppelt Hardware und Software durch COTS-Komponenten und Spezifikationen wie EULYNX und ETCS, erleichtert die Integration von Multi-Hersteller-Technologien und fördert die schrittweise Infrastrukturentwicklung. Sie ermöglicht sichere Konnektivität für strecken- und fahrzeugseitige Anlagen sowie neue Dienstleistungen wie Asset Management und vorausschauende Wartung. In-Mova Rail (TMS) integriert Planung, Simulation und operative Steuerung über standardisierte Schnittstellen mit Signalsystemen. Die Funktionen zur Überwachung, automatischen Konfliktlösung und dynamischen Neuplanung optimieren den Verkehrsfluss, erhöhen die operative Resilienz und steigern die Netzkapazität.



Offene und digitale Bahninfrastruktur
Open and digital rail infrastructure

Quelle / Source: Indra Group

Indra integrates open digital signalling and rail traffic management

The modernisation of the rail sector requires interoperable, scalable and automated solutions in multi-vendor environments. Indra combines open digital signalling and rail traffic management within an architecture based on open standards. Open digital signalling decouples hardware and software through COTS components and specifications such as EULYNX and ETCS, facilitates the integration of multi-vendor technologies and promotes phased infrastructure development. It enables secure connectivity for track-side and on-board equipment, as well as new services such as asset management and predictive maintenance. In-Mova Rail (TMS) integrates planning, simulation and operational control with signalling systems via standardised interfaces. Its functions for monitoring, automatic conflict resolution and dynamic re-planning optimise traffic flow, increase operational resilience and boost network capacity.

Halle 4.1, Stand 610
www.indragroup.com/en

Hall 4.1, Booth 610
www.indragroup.com/en

Die Zukunft der Schiene startet jetzt in drei Lösungswelten

Knorr-Bremse präsentiert Lösungen in drei Bereichen: Fahrzeuglösungen (On-Train), Signaltechnik (Wayside) und Cross-Sectional (X.Sectional) verbinden Zug, Zugstrecke und digitale Intelligenz.

On-Train-Systeme spielen im Zug immer intelligenter zusammen, um Leistung und Effizienz auf der Schiene zu steigern. Knorr-Bremse vereint Mechanik, Mechatronik, Elektrifizierung, Automatisierung und Digitalisierung zu zukunftsweisenden Software-definierten Lösungen.

Wie viel Leistung bestehende Bahninfrastruktur bereitstellen kann, entscheidet sich auch an den Gleisen, Trassen und Infrastrukturkomponenten. Neue elektronische und digitale Anwendungen überwachen Infrastrukturelemente wie Stellwerke, Bahnübergänge, Gleisstromkreise und Weichen und nutzen Zustandsdaten für tiefe Einblicke in den Betrieb und damit bessere Entscheidungen. Das Herzstück des Wayside-Portfolios ist die skalierbare ElectroLogIXS-Plattform. Auf ihrer gemeinsamen Hardware- und Softwarebasis stellt Knorr-Bremse Lösungen für Stellwerke, Feldelemente und Bahnübergänge vor.

Daten sorgen dafür, dass Fahrzeuge, Infrastruktur, digitale Anwendungen und RailServices nahtlos zusammenspielen. Unter X.Sectional bündelt Knorr-Bremse diese Technologien. Digital Solutions verwandeln Daten in wertvolle Erkenntnisse für intelligente Zustandsüberwachung, bessere Wartung und KI-gestützte Umfeldbeobachtung. RailServices bietet Lösungen für den gesamten Lifecycle von Schienenfahrzeugsystemen, darunter Modernisierungen, Reparatur und Überholung.

Halle 1.2, Stand 250
www.knorr-bremse.de

The future of rail begins now across three solution areas

Knorr-Bremse presents solutions in three areas: rolling stock solutions (On-Train), signalling technology (Wayside) and Cross-Sectional (X.Sectional) which connect the train, the route and digital intelligence.

On-train systems are interacting in increasingly intelligent ways to boost performance and efficiency on the railways. Knorr-Bremse combines mechanics, mechatronics, electrification, automation and digitalisation to create forward-looking, software-defined solutions. The capacity that existing rail infrastructure can provide also depends on the tracks, routes and infrastructure components. New electronic and digital applications monitor infrastructure elements such as signal boxes, level crossings, track circuits and points, and use condition data to provide in-depth insights into operations, thereby enabling better decision-making. At the heart of the Wayside portfolio is the scalable ElectroLogIXS platform. Building on its shared hardware and software foundation, Knorr-Bremse presents solutions for signal boxes, field elements and level crossings.

Data ensures that vehicles, infrastructure, digital applications and RailServices interact seamlessly. Knorr-Bremse brings these technologies together under the X.Sectional umbrella. Digital Solutions transform data into valuable insights for intelligent condition monitoring, improved maintenance and AI-supported environmental monitoring. RailServices offers solutions covering the entire lifecycle of rail vehicle systems, including modernisation, repair and overhaul.

Hall 1.2, Booth 250
www.knorr-bremse.de



SIGNON
SCHIENE. MOBILITÄT. ZUKUNFT.

SIGNON – Experte für digitale Bahnsysteme

Von Datenaufnahme und -speicherung, über die KI-gestützte Analyse bis zur Planung technischer Bahninfrastruktur – wir schaffen vollumfängliche Lösungen für ihr Bahninfrastrukturprojekt.



SIGNON SATengine
Mobile Mapping für
Bahninfrastruktur



SIGNON InfraAI
KI-gestützte automatisierte
Infrastrukturerrfassung und
-analyse

SIGNON Data Factory
Systematische Erzeugung und
Aufbereitung von Daten für
verschiedene Anwendungsfälle
des digitalen Bahnsystems



SIGNON IOLAcad
Softwarelösung zur effizienten
Planung von Oberleitungsanlagen

Sie wollen mehr erfahren? Kommen Sie vom 22.–25. September zur InnoTrans in Berlin!
Sie treffen unsere Expertinnen im City Cube Halle B am Stand 320!

SIGNON – Schiene. Mobilität. Zukunft.

www.signon-group.com/innotrans



signon-group.com

USB-C Power Delivery für den Führerstand

Lütze Transportation präsentiert ihr neues 60-W-USB-C-Ladesystem mit Power Delivery 3.2 für Schienenfahrzeuge. Es besteht aus einem DC/DC-Wandler für den Weitspannungsbereich zwischen DC 24 und 110 V sowie einem USB-C-Ladekabel. Das System ist dimensionskompatibel zum bisherigen USB-A-Ladesystem und ermöglicht dadurch sowohl einen einfachen Austausch ohne Änderungen an Verdrahtung oder Einbauraum. Mit bis zu 60 W Ladeleistung können nun auch leistungsstarke Laptops und Tablets effizient betrieben und geladen werden. Das System erfüllt die relevanten Bahnnormen EN 50155, EN 50121-3-2, EN 61373, EN 45545-2 und die Regelung EMV 06:2019. Damit eignet es sich ideal für Retrofit-Anwendungen. Umfangreiche Schutzfunktionen sowie ein für 10 000 Steckzyklen ausgelegter USB-C-Port sorgen für hohe Zuverlässigkeit im Bahneinsatz.

Halle 27, Stand 650
www.luetze-transportation.com



Lütze USB-C-Ladesystem
 Lütze USB-C charging system
 Quelle / Source: Lütze Transportation GmbH

USB-C Power Delivery for the driver's cab

Lütze Transportation presents its new 60 W USB-C charging system with Power Delivery 3.2 for rail vehicles. It comprises a DC/DC converter for the wide voltage range between 24 and 110 V DC, as well as a USB-C charging cable. The system is dimensionally compatible with the previous USB-A charging system, thereby enabling a straightforward replacement without any changes to the wiring or installation space. With up to 60 W of charging power, even high-performance laptops and tablets can now be operated and charged efficiently. The system complies with the relevant railway standards EN 50155, EN 50121-3-2, EN 61373, EN 45545-2 and the EMC 06:2019 regulation. This makes it ideally suited for retrofit applications. Comprehensive protection functions and a USB-C port designed for 10,000 plug cycles ensure high reliability in railway applications.

Hall 27, Booth 650
www.luetze-transportation.com

AirScale Radio für 1900 MHz (n101-Band)

Das 5G-Mobilfunk-Breitbandradio von Nokia für das 1900-MHz-Band (n101) bietet Hochgeschwindigkeits-, Hochkapazitäts- und latenzarme Konnektivität für die kritische Infrastruktur in der Bahnkommunikation. Es wurde zur Unterstützung des Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) entwickelt und arbeitet mit dem optimierten 5G-Standalone-Core für Bahnen von Nokia zusammen, um eine reibungslose, skalierbare Implementierung von FRMCS, aber auch eine Migration von Altsystemen wie GSM-R zu ermöglichen. Die Lösung unterstützt Bahnunternehmen dabei, ihren digitalen Betrieb zu modernisieren, die Netzwerkresilienz zu stärken und sich auf die nächste Generation der Bahn-Automatisierung, nachhaltigen Mobilität und erweiterte Dienste vorzubereiten, während sie zugleich auf die entstehenden FRMCS-Spezifikationen und Initiativen für den digitalen Schienenverkehr ausgerichtet ist.

Halle 4.1, Stand 360
www.nokia.com/industries/railways/



Nokia AirScale Remote Radio Head für 1900 MHz (n101-Band)
 Nokia AirScale Remote Radio Head for 1900 MHz (n101 band)
 Quelle / Source: 2026 Nokia

AirScale Radio for 1900 MHz (n101 band)

Nokia's 5G mobile broadband radio for the 1900 MHz band (n101) delivers high-speed, high-capacity and low-latency connectivity for critical infrastructure in rail communications. It has been developed to support the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) and works in conjunction with Nokia's optimised 5G Standalone Core for railways to enable a seamless, scalable implementation of FRMCS, as well as migration from legacy systems such as GSM-R. The solution helps railway operators modernise their digital operations, strengthen network resilience and prepare for the next generation of railway automation, sustainable mobility and enhanced services, whilst also aligning with emerging FRMCS specifications and initiatives for digital rail transport.

Hall 4.1, Booth 360
www.nokia.com/industries/railways/

Sichere Digitalisierung der Schiene: Pilz zeigt erprobte Anwendungen

Wie sichere, modulare Steuerungslösungen zur Modernisierung der Signaltechnik und Bahninfrastruktur beitragen, zeigt das Automatisierungsunternehmen Pilz. Mit Modellen von weltweit erfolgreich realisierten Applikationen veranschaulicht Pilz, wie sich die Digitalisierung in der Bahninfrastruktur effizient und sicher umsetzen lässt. Mit dem sicheren und modularen Bahnsteuerungssystem PSSrail steht Systemanbietern und Integratoren eine leistungsfähige Lösung zur Verfügung, die weltweit bereits in über 1000 Streckenkilometern und mehr als 500 Bahnübergängen im Einsatz ist. Die Bahnsteuerung ist bis SIL4 zertifiziert und EULYNX-kompatibel. Mit ihrem modularen Aufbau ermöglicht sie eine flexible Umsetzung unterschiedlichster Anwendungsfälle – bei gleichzeitig geringen Lebenszykluskosten und erhöhter betrieblicher Sicherheit. Pilz zeigt anhand von Modellen, wie sich sichere, modulare Steuerungslösungen in bestehende wie neue Infrastrukturen integrieren lassen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf sicheren Datenübertragungslösungen. Unter anderem werden Lösungen auf Basis von Frauscher Safe Ethernet (FSE) vorgestellt, die die sichere Vernetzung von Komponenten entlang der Strecke unterstützen. Ebenso zeigt Pilz Anwendungen für Bahnübergänge – von der Überwachung bis zur vollständigen Steuerung – sowie die Nutzung von PSSrail als EULYNX Object Controller zur Ansteuerung von Feldelementen entlang der Strecke.

Halle 27, Stand 550
www.pilz.com/de-INT



PSSrail ist bereits vielfach im Einsatz.
PSSrail is already in widespread use.

Quelle / Source: Pilz GmbH & Co. KG

Safe digitalisation of the railways: Pilz showcases tried-and-tested applications

The automation company Pilz demonstrates how safe, modular control solutions contribute to the modernisation of signalling technology and railway infrastructure. Using examples of applications successfully implemented worldwide, Pilz illustrates how digitalisation can be implemented efficiently and safely in railway infrastructure. The safe and modular PSSrail railway control system provides system suppliers and integrators with a high-performance solution that is already in use worldwide on over 1,000 kilometres of track and at more than 500 level crossings. The railway control system is certified to SIL4 and is EULYNX-compatible. Thanks to its modular design, it enables the flexible implementation of a wide variety of use cases – whilst ensuring low life-cycle costs and enhanced operational safety. Using models, Pilz demonstrates how safe, modular control solutions can be integrated into both existing and new infrastructure. A key focus is on secure data transmission solutions. Among other things, solutions based on Frauscher Safe Ethernet (FSE) will be presented, which support the secure networking of components along the line. Pilz will also demonstrate applications for level crossings – from monitoring to complete control – as well as the use of PSSrail as an EULYNX Object Controller for controlling field elements along the line.

Hall 27, Booth 550
www.pilz.com/de-INT



Advancing Infrastructure

quattron is the international partner for holistic, integrated solutions for the future of critical infrastructure in the railway, energy, telecommunications and security sectors.

Visit us at InnoTrans in Berlin, 22–25 September, Hall CityCube A, Stand 240



quattron.com

Oberleitungsmodul ProVI OLA und die Kabeltrassenplanung feiern Premiere

Mit ProVI OLA als vollständig integriertes Modul innerhalb der Planungssoftware ProVI werden Oberleitungsanlagen als intelligente Objekte geplant, nicht als Zeichnungselemente. Weil die Oberleitungsplanung direkt auf dem gemeinsamen Modell aufsetzt, sind Änderungen an der Trassierung unmittelbar in der Oberleitungsplanung sichtbar. Manuelle Datenübergaben und Nacharbeit zwischen den Gewerken entfallen. Für Planungsbüros bedeutet das weniger Koordinationsaufwand, weniger Fehlerquellen und mehr produktive Ingenieurszeit im Projekt.

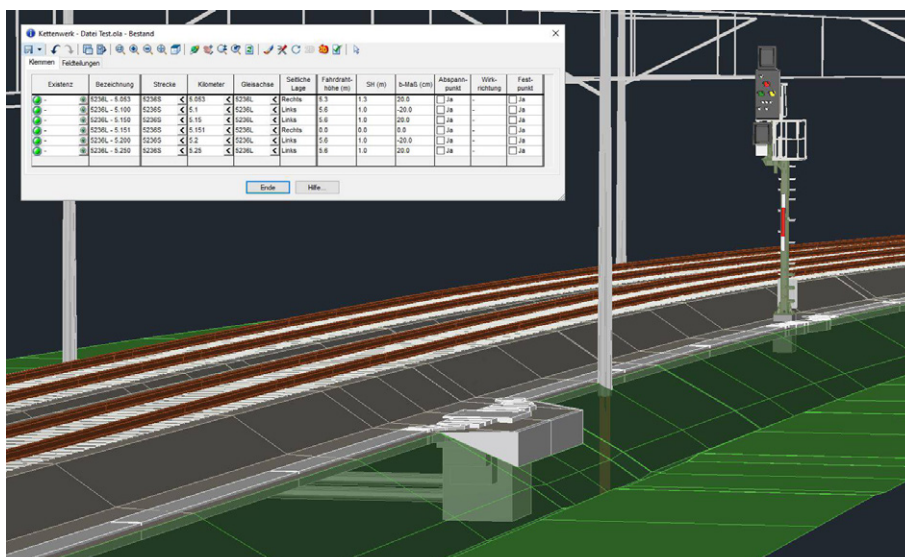
Als Querschnittsgewerk verbindet die Kabeltrassenplanung die Fachplanungen entlang der Strecke: Der Kabeltiefbau – als Teil der Verkehrsanlage, werden Kabeltröge, Schächte und Querungen geplant, bevor die Kabelplanung sie mit den Kabeln der Ausrüstungsgewerke, von der Leit- und Sicherungstechnik über die Telekommunikation bis zur 50-Hz-Versorgung, belegt. Änderungen in der Fachplanung fließen unmittelbar in die Kabeltrassenplanung ein. An drei Arbeitsplätzen erleben Fachbesucher die komplette Gesamtlösung live: Verkehrsanlage, Leit- und Sicherungstechnik, Oberleitung und Kabeltrassenplanung im gemeinsamen Modell.

The ProVI OLA catenary module and cable route planning make their debut

With ProVI OLA as a fully integrated module within the ProVI planning software, catenary systems are planned as intelligent objects, not as drawing elements. Because catenary planning is based directly on the shared model, changes to the route are immediately visible in the catenary planning. Manual data transfers and rework between trades are eliminated. For design consultancies, this means less coordination effort, fewer sources of error and more productive engineering time on the project.

As a cross-disciplinary trade, cable route planning links the specialist designs along the route: Cable civil engineering – as part of the transport infrastructure – involves planning cable trays, shafts and crossings before the cable planning phase populates them with cables from the equipment disciplines, ranging from control and safety systems through telecommunications to the

50 Hz power supply. Changes in the specialist planning are immediately incorporated into the cable route planning. At three workstations, trade visitors can experience the complete end-to-end solution live: transport infrastructure, control and safety systems, overhead lines and cable route planning in a single integrated model.



Halle 5.2, Stand 280
www.provicad.de

Gewerkeübergreifende Bearbeitung in 3D-Ansicht
Cross-discipline editing in 3D view

Quelle/Source: ProVI GmbH

Hall 5.2, Booth 280
www.provicad.de

EXPERT*IN GESUCHT!

Suchen Sie mit uns Ihr
qualifiziertes Fachpersonal!



DER EI
EISENBAHN
INGENIEUR

Eurail Jobs

Ihre Ansprechpartnerin:

Silvia Sander

+49 40 237 14 171

silvia.sander@dvvmmedia.com

LUKS: Software für die Eisenbahnbetriebsforschung

Die LUKS-Software-Suite ist ein integriertes System für verschiedene Arten der Eisenbahnbetriebsforschung und Fahrplanerstellung. Sie unterstützt Ansätze der Warteschlangentheorie, Simulationen und Fahrplanstudien für beliebige Infrastrukturnetze, Fahrpläne und technologische Ausstattungsstufen, einschließlich Altsystemen, allen ETCS-Stufen und ATO-over-ETCS. Durch die Bereitstellung all dieser Funktionen auf der Grundlage eines einzigen Infrastruktur- und Fahrplandatenmodells gewährleistet LUKS eine optimale Kombination verschiedener Ansätze zur Kapazitätsbewertung sowie die direkte Vergleichbarkeit der Methoden, ohne den hohen Aufwand und das Risiko einer Datenumwandlung oder -änderung. LUKS ist das einzige auf dem Markt verfügbare Tool, das dieses breite Spektrum an etablierten und detaillierten Methoden der Eisenbahnbetriebsforschung implementiert. In den letzten Jahren hat sich LUKS zum Standardwerkzeug für die Kapazitätsbewertung, zum Standardwerkzeug für Simulationen bei INFRA-BEL sowie zum Standardsystem zur Beantwortung von Kapazitätsfragen beim Eisenbahn-Bundesamt (EBA) entwickelt. Es wird in Finnland für Simulationszwecke, bei den Aserbaisdaischanischen Eisenbahnen CJSC für die Fahrplanerstellung eingesetzt und bei der SBB AG für Simulationen evaluiert. Mehrere Ingenieurbüros und Universitäten vervollständigen den Anwenderkreis.

CityCube, Halle A , Stand 240
www.quattron.com

LUKS: Software for railway operations research

The LUKS software suite is an integrated system for various types of railway operations research and timetable planning. It supports queueing theory approaches, simulations and timetable studies for any infrastructure network, timetable and level of technological equipment, including legacy systems, all ETCS levels and ATO-over-ETCS. By providing all these functions on the basis of a single infrastructure and timetable data model, LUKS ensures an optimal combination of different approaches to capacity assessment, as well as the direct comparability of methods, without the significant effort and risk associated with data conversion or modification. LUKS is the only tool available on the market that implements this broad spectrum of established and detailed methods from railway operations research. In recent years, LUKS has become the standard tool for capacity assessment, the standard tool for simulations at INFRA-BEL, and the standard system for addressing capacity-related queries at the Federal Railway Authority (EBA). It is used in Finland for simulation purposes, by the Azerbaijan Railways CJSC for timetable planning, and is being evaluated by SBB AG for simulations. Several engineering firms and universities round out the user base.

Quelle/Source: quattron

CityCube, Hall A, Booth 240
www.quattron.com

We are revolutionising interdisciplinary BIM for the railway

"RailCOMPLETE is simple and incredibly advanced at the same time"

Multiconsult, Norway



RailCOMPLETE®

railcomplete.com

Glasfaserinfrastruktur und Überspannungsschutz für die digitale Bahn

Leistungsfähige Glasfaserinfrastrukturen und zuverlässige Schutzlösungen sind zentrale Voraussetzungen für die Digitalisierung des Bahnverkehrs. Auf der InnoTrans präsentiert Raycap sein Portfolio aus passiven Glasfaser-Infrastrukturlösungen, Überspannungsschutzsystemen und Spannungsbegrenzungseinrichtungen (Voltage Limiting Devices, VLDs). Mit seinen Optical Distribution Frames (ODF) bietet Raycap modulare Glasfaser-Verteilergestelle für Backbone- und Access-Netze. Speziell für den Bahnbereich entwickelte 19"-Baugruppen dienen als zentrale Plattform für das Spleißen, Patchen und Managen von Glasfaserverbindungen und bilden einen zentralen Bestandteil der passiven Glasfaserinfrastruktur für Leit- und Sicherungstechnik, Betriebs- und Kommunikationssysteme sowie Fahrgastinformationssysteme. Die kompakte Lösung Slim Optical Distribution Frame (SODF) kombiniert eine sehr hohe Faserdichte mit einem geringen Platzbedarf und eignet sich insbesondere für Anwendungen mit begrenzten Platzverhältnissen, etwa in Technikräumen, Betriebszentralen und Bahnhöfen. Dank ihres modularen Konzeptes lassen sich die Glasfaserinfrastruktursysteme bedarfsgerecht erweitern und an künftige Netzanforderungen anpassen. Raycap präsentiert außerdem Lösungen zum Schutz kritischer Bahninfrastruktur. Dazu gehören Überspannungsschutzlösungen sowie Voltage Limiting Devices (VLD-F und VLD-O) zum Schutz von Personen und technischen Anlagen in Bahnanwendungen.

Halle 15.1, Stand 310
www.raycap.de

Fibre-optic infrastructure and surge protection for the digital railway

High-performance fibre-optic infrastructures and reliable protection solutions are key prerequisites for the digitalisation of rail transport. At InnoTrans, Raycap is presenting its portfolio of passive fibre-optic infrastructure solutions, surge protection systems and voltage limiting devices (VLDs). With its Optical Distribution Frames (ODFs), Raycap offers modular fibre-optic distribution frames for backbone and access networks. 19-inch modules developed specifically for the rail sector serve as a central platform for splicing, patching and managing fibre-optic connections, and form a key component of the passive fibre-optic infrastructure for control and safety technology, operations and communications systems, as well as passenger information solutions. The compact Slim Optical Distribution Frame (SODF) solution combines a very high fibre density with a small footprint and is particularly suitable for applications with limited space, such as in technical rooms, control centres and railway stations. Thanks to their modular design, the fibre-optic infrastructure systems can be expanded as required and adapted to future network requirements.

Raycap also offers solutions for protecting critical railway infrastructure. These include surge protection solutions and Voltage Limiting Devices (VLD-F and VLD-O) designed to protect people and technical equipment in railway applications.

Hall 15.1, Booth 310
www.raycap.de

Knick >

Moderne Zugsteuerungssysteme ohne zusätzliche Geschwindigkeitssensoren



Alle Achsenenden sind **bereits belegt**. Es ist kein Platz für **neue Sensoren**!



Ich habe die Lösung: rückwirkungsfreie Drehzahlsignalverdopplung.



Testen Sie unsere Lösung auf dem Messestand.



Halle 17
Stand 225



Die Lösung Slim Optical Distribution Frame (SODF) für beengte Verhältnisse
 The Slim Optical Distribution Frame (SODF) solution for confined spaces

Quelle / Source: Raycap

Siemens präsentiert Xcelerator Portfolio und Vectron X

Vier Jahre nach dem Start der Siemens-Xcelerator-Strategie für den Bahnsektor bringt Siemens Mobility seine offene digitale Geschäftsplattform nun erstmals in das Schienenfahrzeug. Mit seiner Premiere auf der InnoTrans erweitert der Vectron X das Siemens-Xcelerator-Portfolio von Signaling X, Mobility Software Suite X und Railigent X um die Lokomotive selbst und markiert damit den nächsten großen Schritt hin zu einem stärker vernetzten, softwaredefinierten Bahnsystem. Auf der InnoTrans 2026 zeigt Siemens, wie Daten und Künstliche Intelligenz dabei helfen, die Kapazität von Bahnnetzen zu steigern, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit zu verbessern, das Reiseerlebnis für Fahrgäste zu optimieren und Lebenszykluskosten zu senken.

Halle 27, Stand 230
www.siemens.com/mobility

Siemens presents the Xcelerator portfolio and Vectron X

Four years after the launch of the Siemens Xcelerator strategy for the rail sector, Siemens Mobility is now integrating its open digital business platform into a rail vehicle for the first time. Making its debut at InnoTrans, the Vectron X expands the Siemens Xcelerator portfolio – comprising Signaling X, Mobility Software Suite X and Railigent X – to include the locomotive itself, marking the next major step towards a more connected, software-defined rail system. At InnoTrans 2026, Siemens will demonstrate how data and artificial intelligence help to increase the capacity of rail networks, improve availability and reliability, optimise the passenger experience and reduce life-cycle costs.

Hall 27, Booth 230
www.siemens.com/mobility



Quelle / Source: Siemens Mobility

Sicher. Modular. Und für die digitale Schiene.

Unser sicheres und modulares Bahnsteuerungssystem PSSrail revolutioniert die Bahnindustrie und ermöglicht eine digitale Transformation. Von der Überwachung und Steuerung von Bahnübergängen bis hin zur elektrisch ortsgesteuerten Weiche (EOW) sowie dem EULYNX Object Controller bieten wir eine flexible Plattform, die sich Ihren individuellen Anforderungen anpassen lässt. Investieren Sie jetzt in die zukünftige Automatisierung der Bahn und profitieren Sie von innovativen, sicheren und digitalen Lösungen. Wir unterstützen Sie bei den Anforderungen, die die Digitalisierung der Bahnindustrie mit sich bringt.



Jetzt mehr erfahren!

PILZ
THE SPIRIT OF SAFETY

Pilz GmbH & Co. KG
Tel.: 0711 3409-0, info@pilz.de, www.pilz.de

InnoTrans

22.–25. September 2026
Halle 27 – Stand 550

Geschützte, zuverlässige Konnektivität

Auf der InnoTrans 2026 präsentiert Westermo unter anderem die Viper-8-Serie, ein Managed Backbone Routing-Switch und wie geschaffen für die Anforderungen von Schienenfahrzeugen. Hochgeschwindigkeits-GBit/s-Ports und Routing-Funktion mit voller Geschwindigkeit bewältigen hohe Bandbreiten des Backbones sowie bestehender Ring- und Endgeräte. Dank ihrer Konstruktion ist die Viper-8-Serie ideal für die rauen Betriebsumgebungen in Zügen, in denen der Switch konstanten Vibrationen, extremen Temperaturen, Feuchtigkeit und einer anspruchsvollen elektrischen Umgebung ausgesetzt ist. Eine Gore-Tex-Membran schützt vor interner Kondensation. Gewinde im Gehäuse sorgen für zusätzliche Vibrationsfestigkeit. Die hohe Isolation zwischen sämtlichen Schnittstellen ermöglicht einen direkten Anschluss an die Hilfsstromversorgung des Fahrzeugs und schützt vor Überspannung und Überschlag. IP67-Schutz verhindert das Eindringen von Wasser und Staub. Eine rundum optimierte Bauweise sorgt für ein extrem kompaktes Gehäuse in Kombination mit einer sehr hohen MTBF für eine einfache Integration und niedrige Lebenszykluskosten. Gründliche Typenprüfungen in unabhängigen, nach ISO/IEC 17025 und ILAC MRA zertifizierten Labors, die für eine Vielzahl von Normen akkreditiert sind, bestätigen, dass die Viper-8-Serie u.a. die EN 50155 erfüllt. In den modernen Westermo-Produktionsanlagen wird die Qualität jedes einzelnen Geräts u.a. durch Burn-in-Tests mit Temperaturzyklen sichergestellt.

Halle 4.1, Stand 460
www.westermo.com

Secure, reliable connectivity

At InnoTrans 2026, Westermo will be showcasing, amongst other things, the Viper-8 series, a managed backbone routing switch that is perfectly suited to the requirements of rail vehicles. High-speed GBit/s ports and full-speed routing capabilities handle the high bandwidths of the backbone as well as those of existing ring networks and end devices. Thanks to its design, the Viper-8 series is ideal for the harsh operating environments found on trains, where the switch is exposed to constant vibrations, extreme temperatures, humidity and a demanding electrical environment. A Gore-Tex membrane protects against internal condensation. Threaded holes in the housing provide additional vibration resistance. The high level of isolation between all interfaces enables direct connection to the vehicle's auxiliary power supply and protects against overvoltage and flashover. IP67 protection prevents the ingress of water and dust. A comprehensively optimised design ensures an extremely compact housing, combined with a very high MTBF, for easy integration and low lifecycle costs. Thorough type testing in independent laboratories certified to ISO/IEC 17025 and ILAC MRA, and accredited to a wide range of standards, confirms that the Viper-8 series complies with EN 50155, amongst others. At Westermo's state-of-the-art production facilities, the quality of every single unit is verified through, amongst other things, burn-in tests involving temperature cycles.

Hall 4.1, Booth 460
www.westermo.com

#DIGITISE YOURRAIL

SCHEIDT & BACHMANN 

FÜR EINE MOBILITÄT, AUF DIE MAN SICH VERLASSEN KANN.



Besuchen Sie uns!
 22.-25. September 2026
 Halle 2.1
 Stand 205

Scheidt & Bachmann Signalling Systems GmbH
 Breite Straße 132 • 41238 Mönchengladbach • Deutschland
 Tel. +49 (0) 2166 266-628 • signaltechnik@scheidt-bachmann.de
www.scheidt-bachmann.de

Jetzt entdecken unter:
digitiseyourrail.com





INTEGRIERTE BAHNPLANUNG

Alle Disziplinen. Ein Modell. Null Reibung.

Mit der neuen Oberleitungsplanung verbindet ProVI alle relevanten Bahn-Gewerke in einem gemeinsamen Modell. Die gewerkeübergreifende Planung reduziert Abstimmungen, verhindert Inkonsistenzen und minimiert doppelte Arbeit in komplexen Infrastrukturprojekten.

Damit vereint ProVI Verkehrsanlage, Leit- und Sicherungstechnik, Oberleitung und Kabeltiefbau in einer durchgängigen Planungslösung.



Erleben Sie integrierte
Bahnplanung live auf der
InnoTrans
Halle 5.2 | Stand 280

ProVI
PROVI-CAD.DE

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.

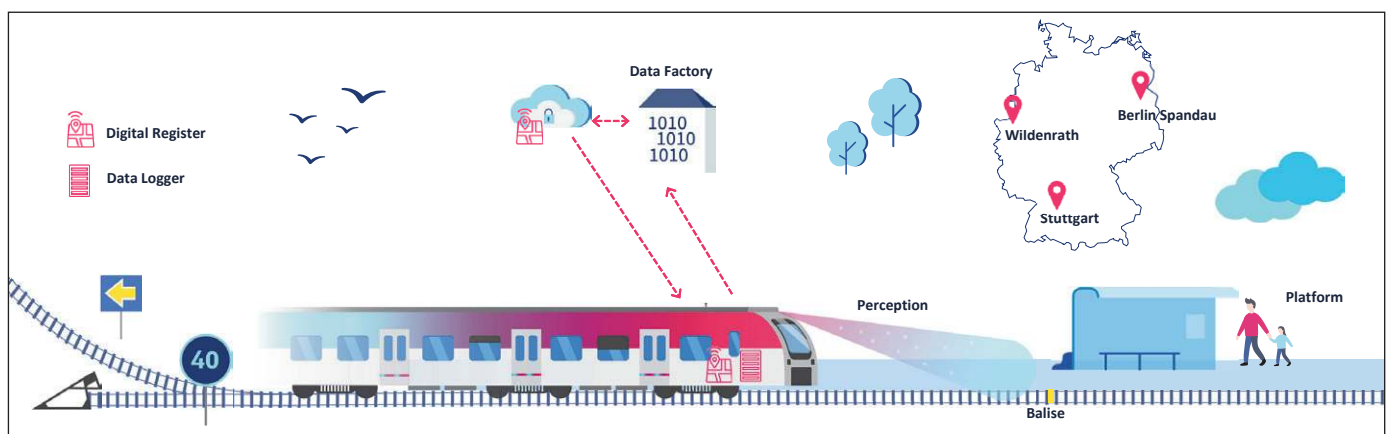


Bild 1: Use Case AutomatedTrain

Fig. 1: The AutomatedTrain use case

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

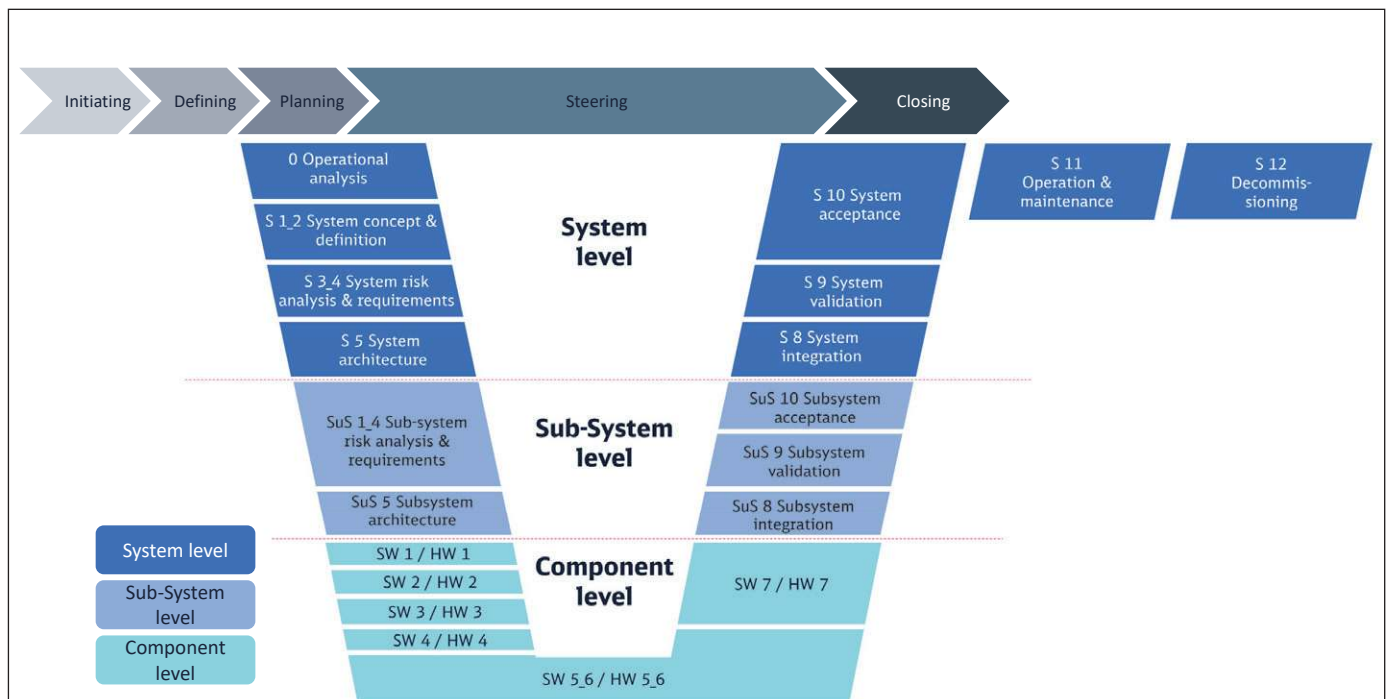


Bild 2: In AutomatedTrain angewendetes Lebenszyklusmodell

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).

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 System-

- 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-

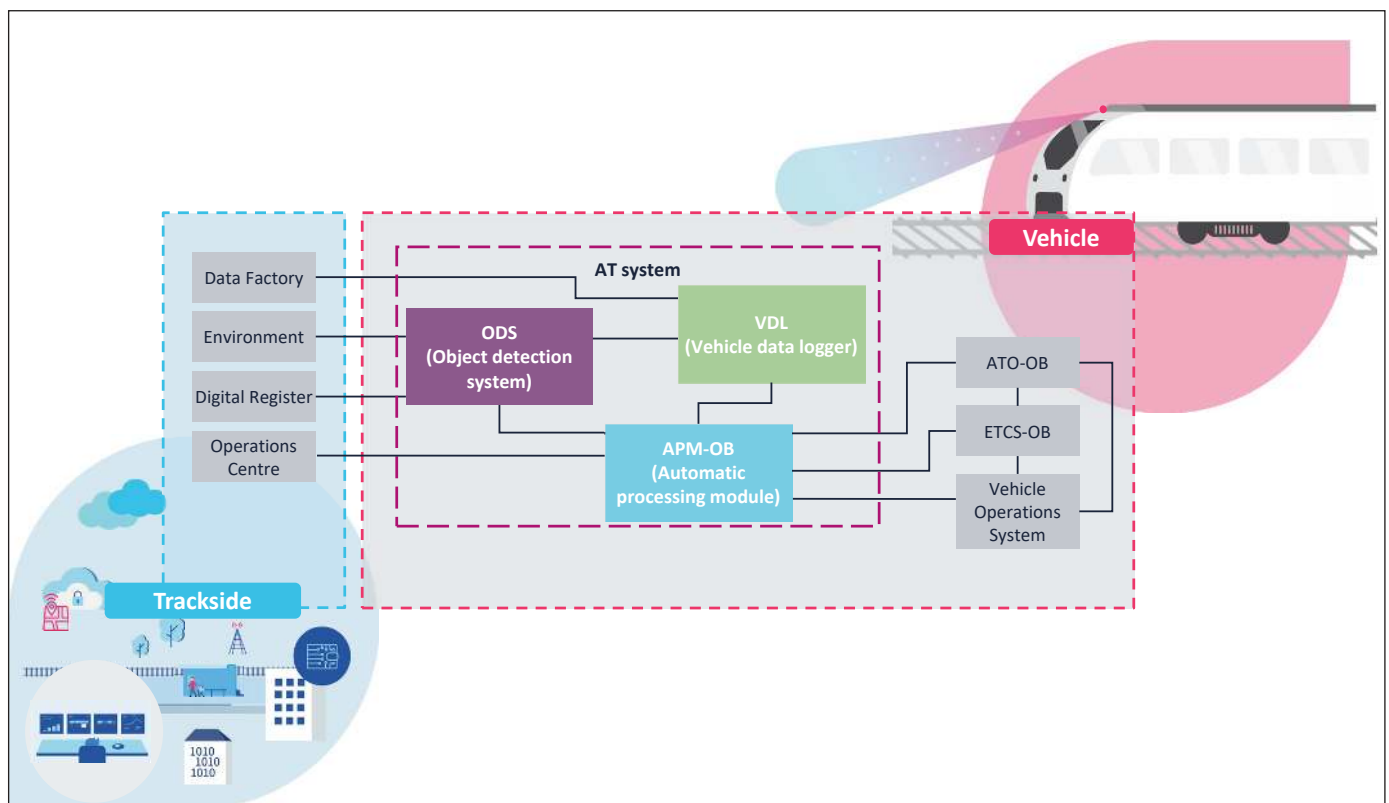


Bild 3: Schematische Darstellung der in AutomatedTrain abgeleiteten Systemarchitektur bestehend aus den drei neuen Systemelementen Objekterkennungssystem (ODS), Automatisierungsmodul (APM) und dem Vehicle Data Logger (VDL) sowie deren Schnittstellen zu Bestandssystemen

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

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 und 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.

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)

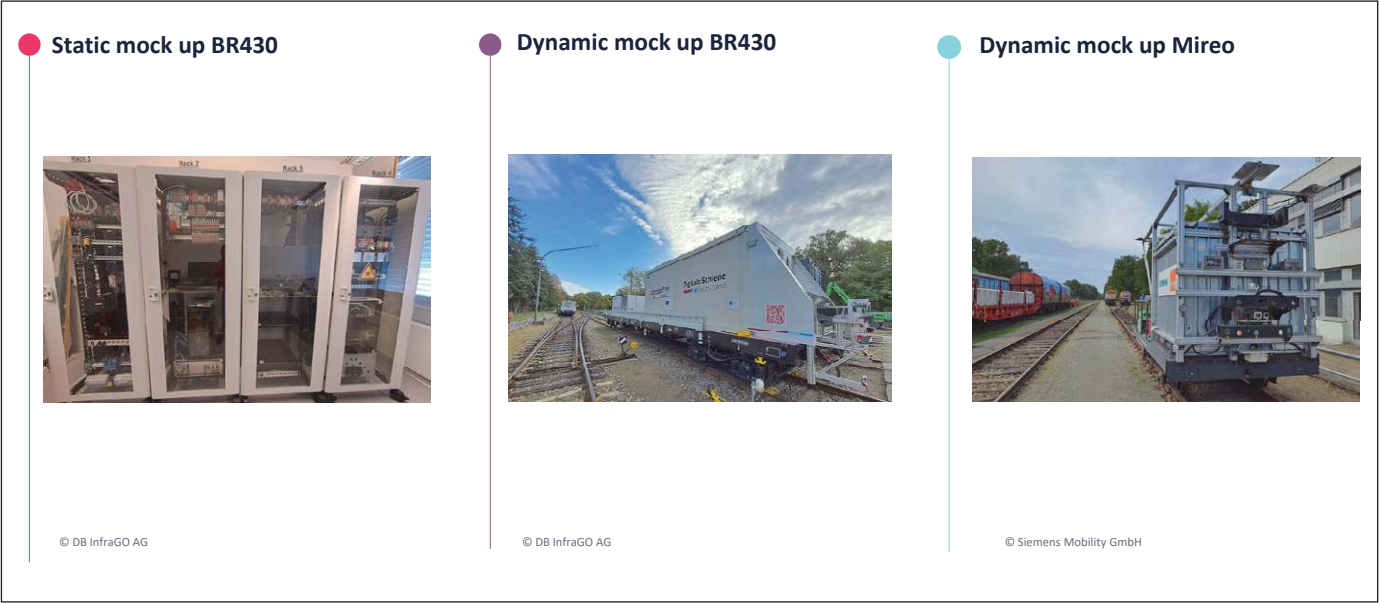


Bild 5: Laborumgebungen von AutomatedTrain, die vor der Implementation in die Fahrzeuge genutzt wurden; „Static Mock Up BR430“, „Dynamic Mock Up BR430“ und „Dynamic Mock Up Mireo“

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

der Fahrzeuge und konstruktiver Einschränkungen nur bedingt möglich war.

Bevor das AutomatedTrain System in einer Fahrzeugumgebung getestet wurde, erfolgte der Test jedes Softwareupdates 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-Spanndau. 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

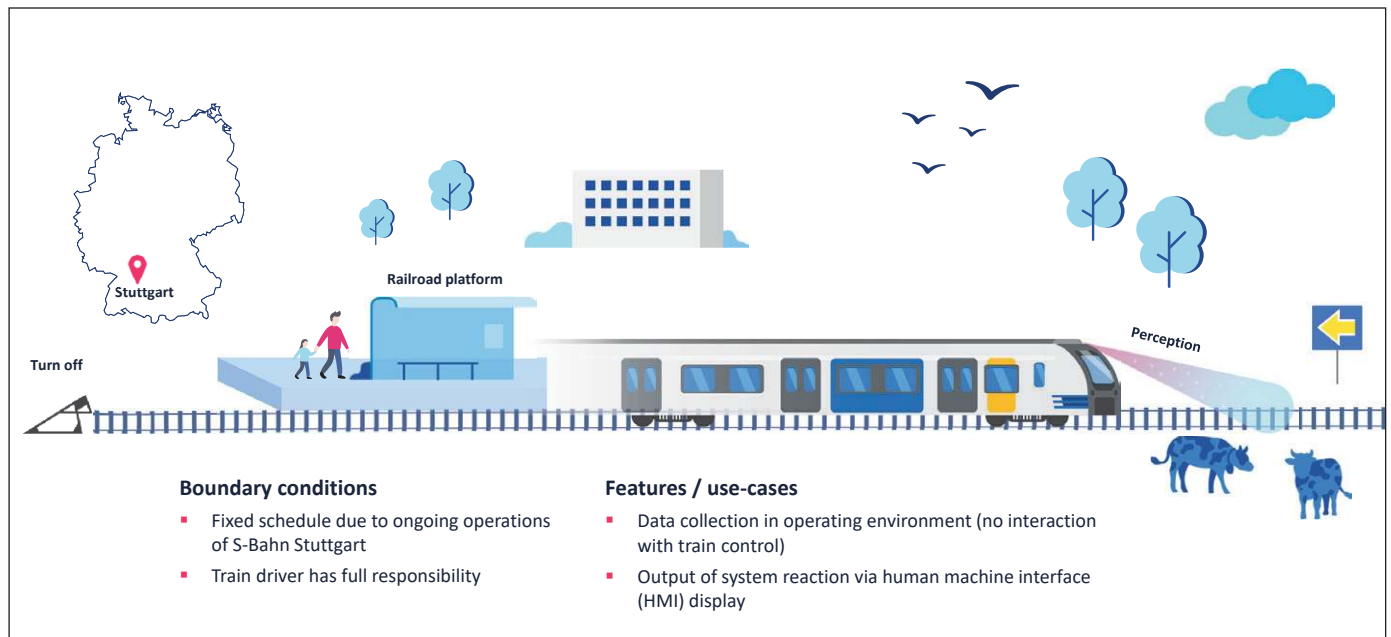


Bild 7: Testumgebung und Scope des BR 430

Fig. 7: The test environment and scope for the Class 430

in Berlin Spandau vollautomatisiert und ohne Tf zurück. Im Falle von auftretenden Hindernissen bremsst 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.

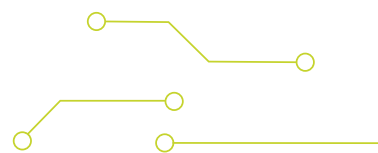
sensor data is transmitted in encrypted form to the so-called Data Touchpoint on the land side via Wi-Fi 6e at speeds of up to 4 GB/s. The data is pre-processed there: for example, an integrity check and data selection are performed. The data is then transmitted via fibre optics to the Tier-3 data centre 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-



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 | Stand 320

www.itk-engineering.de



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 zugeseitige 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 zugeseitige 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-

de auch bereits durch das anlaufende F&E Projekt RemODtrAIIn 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 5/2025, 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.; Koepfel, 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

established 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 RemODtrAIIn 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. ■

Visit Knorr-Bremse at InnoTrans 2026

Rail Mobility
Visioneers

Hall 1.2, Booth 250

Solutions for the entire rail ecosystem

Hall 27, Booth 740

Embedded Electronic Solutions



Scan for more
information



KNORR-BREMSE

Automatisierung im Schienenverkehr: Forschung und Weg zu schnellerer Innovation

Automation in rail transport: research and path to faster innovation

Lennart Asbach | Christian Meirich | Caroline Schießl | Gert Bikker

Das Eisenbahnsystem durchläuft einen fundamentalen Wandel. Der Wunsch nach Digitalisierung und Automatisierung erfordert eine Anpassung und Transformation der zugehörigen Betriebsprozesse. Damit die Bahnbranche diese Entwicklungen gemeinsam bewerkstelligen kann, begleitet auch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) diese Evolution durch gezielte Forschung. Im Zentrum steht u. a. das RailSiTe [1] als zentrale Testinfrastruktur für die Beschleunigung von Prüfungs- und Bewertungsverfahren durch simulationsbasierte Ansätze. Dieser Beitrag stellt die diesbezüglichen Forschungsthemen des DLR für den Bahnsektor vor. Der Fokus liegt dabei auf der Evolution des RailSiTe von bereits verfügbaren ETCS-Tests (European Train Control System) hin zu neuen Funktionalitäten, wie der ATO-Validierung (Automatic Train Operation) mit hochgenauen Sensormodellen. Abschließend erfolgt der Ausblick auf das geplante Testfeld Schiene.

1 Einleitung

Ehemals für die Standardisierung und Prüfung von Leit- und Sicherungstechnik (LST) aufgebaut, liegt das digitale Fundament des RailSiTe in den Interoperabilitätstests von ETCS-Komponenten und in der Kommunikation dieser untereinander. Seit dem vergangenen Jahr ist auch ein Teil des EULYNX-Standards im akkreditierten Bereich des RailSiTe abgebildet.

In den vergangenen Jahren wurde in verschiedenen Demonstrations- und Forschungsprojekten die technische Basis für den automatisierten Zugbetrieb (ATO) und Remote Train Operation (RTO) entwickelt. Testfahrzeuge wie das RailDrIVE (Bild 1) und Projekte wie ARTE [2], RemODtrAln [3] und AutomatedTrain [4] demonstrieren eindrucksvoll die Machbarkeit.

Doch zwischen technischer Realisierbarkeit und wirtschaftlichem Regelbetrieb klafft eine Lücke: die Zulassung. Durchgeführte Demonstrations- und Erprobungsprojekte wurden entweder auf abgeschlossenen Testgleisen (bspw. Betriebshöfen oder Werksgeländen) realisiert oder bei Streckenfahrten mittels sogenannter Probefahrtgenehmigungen. Mit letzteren konnten dann die Fahrzeuge bzw. die jeweilige Technik auf den Fahrzeugen auf den Strecken erprobt werden, benötigten aber in der Regel Sperrpausen, sodass keine Interaktion mit Regelzügen auf den Streckenabschnitten erfolgte. Weiter sind aktuelle Probefahrten und Genehmigungsverfahren nicht nur kosten- und zeitintensiv, sondern teilweise gar nicht vorhanden bzw. durchführbar. Dadurch wird die Einführung innovativer Lösungen blockiert. Langzeittests und Schattenbetrieb, in dem die benötigte Technik auf einem regulär eingesetzten Fahrzeug mitfährt, ohne den Triebfahrzeugführer (Tf) übersteuern

The railway system is undergoing a fundamental transformation. The drive towards digitalisation and automation requires the adaptation and transformation of the associated operating processes. In order to enable the railway sector to tackle these developments collectively, the Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) is also supporting this evolution through targeted research. A key focus of this is RailSiTe [1], a central test infrastructure designed to accelerate testing and evaluation procedures through simulation-based approaches. This article presents the DLR's research topics in this regard as they pertain to the rail sector. It focuses on the evolution of RailSiTe from existing European Train Control System (ETCS) tests towards new functionalities, such as Automatic Train Operation (ATO) validation using high-precision sensor models. The article concludes with an outlook for the planned rail test bed.

1 Introduction

Originally established for the standardisation and testing of control and signalling technology (LST), the digital foundation of RailSiTe lies in the interoperability testing of ETCS components and their communication with one another. Part of the EULYNX standard has also been implemented within the accredited RailSiTe area since last year.

In recent years, the technical basis for ATO and Remote Train Operation (RTO) has been developed in various demonstration and research projects. Test vehicles such as RailDrIVE (fig. 1) and projects such as ARTE [2], RemODtrAln [3] and AutomatedTrain [4] have impressively demonstrated the feasibility of these systems.

However, there is a gap between technical feasibility and regular commercial operations: regulatory approval. Demonstration and trial projects have either been carried out on closed test tracks (e.g. depots or factory premises) or on mainline runs using so-called test run permits. The latter allow the rolling stock or the relevant technology on the rolling stock to be tested on the lines, but generally require track closures to ensure there is no interaction with regular services on the line sections. Furthermore, current test runs and authorisation procedures are not only costly and time-consuming, but in some cases do not even exist or are not feasible. This blocks the introduction of innovative solutions. Long-term tests and shadow operations, where the required technology is carried on a vehicle in regular service without being able to override the train driver, are currently lacking in rail transport. How-

Bild 1: RailDrive im Innovationsraum der Erzgebirgsbahn 2018

Fig. 1: RailDrive at the Erzgebirgsbahn innovation centre, 2018



zu können, fehlen aktuell im Schienenverkehr. Diese sind aber essenziell, um die Schritte der Zulassung zielgerichtet anzugehen. Um diesen Herausforderungen entgegenzuwirken, liegt es daher auf der Hand, die Aufwände für ein Testen unter Realbedingungen auf ein Minimum zu beschränken, ohne dass dies jedoch zulasten der Sicherheit geht. Eine Lösung ist die Überführung von Testtagen in die virtuelle Welt mittels Simulation.

2 Bewährte Simulationsverfahren: ETCS und EULYNX im Labor

Tests für ETCS und EULYNX sind in der Simulation seit Jahren etabliert. Das RailSiTe bildet die gesamte LST sowohl für reale Hardwarekomponenten (Hardware-in-the-Loop) als auch für virtuelle Einzelkomponenten (Software-in-the-Loop) ab. Dabei können Stellwerke, Fahrzeuge und Feldelemente im Labor funktional simuliert werden.

Dadurch lassen sich Tests unabhängig von der Streckenverfügbarkeit durchführen, Sperrpausen entfallen, mehrere Testläufe sind parallel, systematisch kontrolliert und wiederholt möglich, und die Kosten sinken dadurch erheblich gegenüber Streckentests. Seit 2012 ist das RailSiTe für die Durchführung von Konformitätstests nach DIN/ISO 17025 akkreditiert und fortwährend im Einsatz. 2024 wurde die Akkreditierung auf den EULYNX-Standard erweitert. Die Forschungsarbeit des DLR fokussiert dabei auf die Erweiterung des Labors durch die Umsetzung weiterer Testmöglichkeiten sowie weitere Automatisierung des Gesamtsystems, um die Labortests zu beschleunigen und Kosten zu reduzieren.

3 Validierung durch Praxis: ESC-Tests im Vergleich

Die ETCS System Compatibility (ESC)-Tests belegen die Aussagekraft der Simulation. Im RailSiTe wurden ESC-Tests durchgeführt und die Ergebnisse mit denen von Realfahrten verglichen. Dabei wurden keine Unterschiede festgestellt, und die Verlässlichkeit

ever, they are essential for tackling the approval process in a targeted manner.

To counter these challenges, it is therefore obvious that the effort required for testing under real-world conditions should be kept to a minimum, while without compromising safety, of course. One solution is to transfer test days into the virtual world using simulations.

2 Proven simulation methods: ETCS and EULYNX in the laboratory

Tests for ETCS and EULYNX have been a well-established part of simulation for many years. RailSiTe models the entire signalling and safety system, both for real hardware components (hardware-in-the-loop) and for virtual individual components (software-in-the-loop). This enables interlockings, rolling stock and trackside equipment to be functionally simulated in the laboratory.

This allows tests to be carried out independently of track availability, eliminates the need for track closures and enables multiple test runs to be conducted in parallel, while ensuring that they are systematically controlled and reproducible and thereby significantly reducing the costs compared to track-based testing. Since 2012, RailSiTe has been accredited to carry out conformity tests in accordance with DIN/ISO 17025 and has been in continuous use. In 2024, the accreditation was extended to the EULYNX standard. The DLR's research work focuses on expanding the laboratory by implementing further testing capabilities and further automating the overall system in order to speed up laboratory tests and reduce costs.

3 Validation through practical application: a comparison of ESC tests

The ETCS System Compatibility (ESC) tests demonstrate the validity of the simulation. ESC tests have been carried out in Rail-

der Labortests konnte mehrfach nachgewiesen werden. Derartige Validierungen können mit geringem Aufwand (oft sind Aufzeichnungen von früheren Feldtests bereits vorhanden) zu Beginn einer Testkampagne durchgeführt werden. Anschließend können unterschiedliche Prüflinge (zu testende Systeme) hinsichtlich ihres digitalen Verhaltens auf der spezifischen Strecke untersucht werden, und die Ergebnisse bleiben entsprechend belastbar.

Für die Durchführung der ESC-Tests arbeitet das Labor als Hardware-in-the-Loop-Prüfstand. Es ist möglich, neben der ETCS-On-board-Unit (OBU) auch eine direkte Verbindung zum Radio Block Centre (RBC) herzustellen. Optional kann das Verhalten des RBC auch durch vorhandene Modelle simuliert und damit auch variiert werden, um bspw. unterschiedliche Zeitverhalten abzubilden. Weitere streckenseitige Infrastruktur, wie Balisen oder Class-B-Systeme (d. h. Altsysteme), werden durch das Labor simuliert. Die ESC-Tests werden i. d. R. von Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU) eingefordert, um sicherzustellen, dass ein neues (oder neu ausgerüstetes) Fahrzeug kompatibel mit einer spezifischen Strecke ist. Diese Überprüfung widerspricht offensichtlich der Grundidee von ETCS, nämlich Interoperabilität. Die Erfahrung mit Inkompatibilitäten und komplexen Fehlerfällen im Betrieb hat die EIU zu dieser Änderung bzw. Ergänzung der Netzzugangstests getrieben. Auch bei den Transitionen von den nationalen Altsystemen zu ETCS kommt es immer wieder zu Fehlerfällen, sodass durch die ESC-Tests die korrekte Funktion sichergestellt werden kann.

Durch die oben genannten Konformitätstests (Subset-076) wird der ETCS-Teil der ESC-Tests bereits abgedeckt. Hier kann es im Bit-Bereich zu marginalen Abweichungen kommen, jedoch werden so alle Funktionen von ETCS einer OBU im Subset-076 auf Konformität getestet. Bspw. werden in den Nachrichten des Subset-076 einige Bits („Bit-Bereich“) anders gesetzt, als es auf einer spezifischen Strecke der Fall wäre. Nachrichten werden beispielsweise mit einer Länderidentifikation 352 (Spanien) anstatt mit 65 (Deutschland) versehen. Dabei erfolgt die Prüfung aller ETCS-Funktionen für das Subset-076 mittels Stichproben. Unter anderem wird die richtige Interpretation einer Temporary Speed Restriction (TSR) nur mit einem Satz von Parametern getestet. Also wird genau eine bestimmte Zielgeschwindigkeit (bspw. 50 km/h) und eine bestimmte Länge (bspw. 300 m) geprüft. Andere Werte werden nicht vom Subset-076 systematisch getestet.

Dieser Stichprobenansatz gibt, wie im Nachfolgenden beschrieben, aus Sicht einer Konformitätsprüfung Sinn. Erstens soll sichergestellt werden, dass die Interpretation der Systemspezifikation korrekt ist. Zweitens wäre eine Permutation aller Parameter selbst für einen Labortest ein nahezu nicht zu bewältigender Umfang. Im Umkehrschluss ergeben sich daraus natürlich Wertkombinationen, die auf realen Strecken vorkommen, im Subset-076 aber nicht geprüft werden. Dadurch wird erhebliches zeitliches und wirtschaftliches Einsparpotenzial sichtbar. Die Parameter realer Strecken [5] müssten die Grundlage für das Subset-076 bilden, dann wären die konkreten Fragestellungen der Infrastrukturbetreiber gleichzeitig mit der Konformität zur Systemspezifikation abgedeckt, und Teile der heute durchgeführten Tests könnten entfallen. Der Weg dahin ist einfach: ESC-Tests müssen in die Labore verlagert werden, so können sie in die passenden Formate konvertiert und im nächsten Schritt in das Subset-076 integriert werden.

Insbesondere in Deutschland sind Testkapazität und Know-how in den Laboren vorhanden. Simulationen sind validiert, und nahezu mit beliebigem Anteil realer Komponenten (alle Komponenten, die nicht als Hardware eingebunden sind, werden durch Softwaremodule ersetzt) kann digitale Kompatibilität mit jeglichen Randbedingungen geprüft und letztendlich sichergestellt wer-

den. SiTe und die results compared with those from real-world runs. No differences have been found and the reliability of the laboratory tests has been demonstrated on multiple occasions. Such validations can be carried out with minimal effort (records from previous field tests are often already available) at the start of a test campaign. Subsequently, various test subjects (systems under test) can be examined in terms of their digital behaviour on a specific route and the results remain correspondingly robust. The laboratory operates as a hardware-in-the-loop test bed in order to carry out the ESC tests. In addition to the ETCS On-board Unit (OBU), it is also possible to establish a direct connection to a Radio Block Centre (RBC). Optionally, the behaviour of the RBC can also be simulated using existing models and thus varied, for example to replicate different time behaviours. Other trackside infrastructure, such as balises or Class B (legacy) systems, is simulated by the laboratory. ESC tests are generally required by railway infrastructure managers (IM) so as to ensure that a new (or newly fitted) vehicle is compatible with a specific line. This verification clearly contradicts the fundamental principle of ETCS, namely interoperability. Experience with incompatibility and complex fault scenarios during operations has led the IM to make this change or addition to the network access tests. Fault scenarios also repeatedly occur during the transitions between ETCS and national legacy systems, meaning that the ESC tests can ensure correct operations.

The ETCS component of the ESC tests is already covered by the aforementioned conformity tests (Subset-076). Marginal deviations may occur at the bit level here. However, this ensures that all the ETCS functions of an OBU have been tested for conformity within Subset 076. For example, in the messages of Subset 076, some bits („bit level“) are set differently from how they would be on a specific route. Messages are, for instance, assigned a country identification of 352 (Spain) instead of 65 (Germany). All the ETCS functions for Subset 076 are tested using spot checks, e.g. the correct interpretation of a Temporary Speed Restriction (TSR) is tested using only one set of parameters. In other words, exactly one specific target speed (e.g. 50 km/h) and one specific length (e.g. 300 m) are tested. The other values are not systematically tested by Subset 076.

This sampling approach makes sense from the perspective of a conformity assessment, as described below. Firstly, it is intended to ensure that the interpretation of the system specification is correct. Secondly, permuting all the parameters would be a task of such a scale that it would be virtually impossible to manage, even for a laboratory test. Conversely, this naturally results in combinations of values that occur on real routes but are not tested in Subset 076. This reveals considerable potential for time and cost savings. The parameters of real-world routes [5] should form the basis for Subset 076; this would mean that infrastructure operators' specific requirements would be covered at the same time as the compliance with the system specification and parts of the tests that are currently carried out could be omitted. The path to achieving this is straightforward: ESC tests must be moved to laboratories so they can then be converted into the appropriate formats and then integrated into Subset 076 in the next step.

In Germany in particular, the necessary testing capacity and expertise are available in laboratories. Simulations have been validated and digital compatibility can be tested and ultimately ensured under any boundary conditions with virtually any proportion of real components (all the components not integrated as hardware are replaced with software modules). Of course, labo-

den. Natürlich erzeugt auch ein Test im Labor Aufwand – je detaillierter die Ergebnisse sein müssen, desto mehr Aufwand muss in die Aus- und Bewertung der Testergebnisse gesteckt werden. Dieser Aufwand kann durch Künstliche Intelligenz und Automatisierung erneut maßgeblich reduziert und erhebliche Skalierungseffekte für das simulationsbasierte Testen erreicht werden. Nach dem Stand der Technik werden simulationsbasierte Tests rund um den Zulassungsprozess aber oft mehr als eine zusätzliche Last oder Herausforderung und weniger als positiver Effekt der Digitalisierung betrachtet. Oftmals steht hier das Vorurteil der fehlenden Nachvollziehbarkeit im Raum, die Prozessintegration ist hakelig und nicht ganzheitlich gedacht.

Die oben beschriebenen ESC-Tests sind ein gutes Beispiel für die mangelnde Prozessintegration. Meistens (insbesondere in Deutschland) erfordert der Zulassungsprozess neben den Labortests noch die Durchführung von mindestens einem Testfall im Feld. Mit dieser verbleibenden Durchführung im Feld wird der wesentliche Vorteil der Labortests erheblich geschmälert. Denn ein großer Teil des Gesamtaufwands liegt in Vor- und Nachbereitung sowie in Wartezeiten. Wenn schlussendlich ohnehin noch auf einen Slot im Feld mit der notwendigen Mannschaft gewartet werden muss, können dort auch mit vergleichsweise wenig Aufwand die ESC-Tests durchgeführt werden. Solange nicht der gesamte Prozessschritt ins Labor verlegt werden kann, bleiben die durchaus nennenswerten Vorteile von Labortests, deren Existenz eine Folge der Digitalisierung ist, nahezu ungenutzt.

4 Evolution des RailSiTe: Sensorik für ATO-Lösungen

Mit ATO und RTO stehen zwei Innovationen vor der Tür, die die Spielregeln für den Eisenbahnbetrieb maßgeblich ändern könnten.

Für das RailSiTe entstehen dadurch völlig neue Anforderungen. Die zentrale Fragestellung in diesem Kontext ist, ob der entsprechende Sensor, welcher für die jeweilige Ausrüstung einer ATO-Funktion benötigt wird, unter allen möglichen Umständen ein Objekt erkennt, das ein Eingreifen in die Zugdynamik erfordert. Diese Philosophie scheint relativ deckungsgleich mit derjenigen im Automotive Sektor. Hier werden viele Forschungsfragen adressiert, wie das Leben mit digitaler Infrastruktur erleichtert werden kann. Es werden Informationen aus der Infrastruktur verwendet [6], um dem Auto mitzuteilen, ob es das nächste Straßenstück sicher befahren kann. Aus unterschiedlichen Gründen ist dieses Paradigma (bspw. „Full Supervision“ in der Welt von ETCS) im Eisenbahnsystem seit jeher vorhanden und kann als Voraussetzung für automatisiertes Fahren genutzt werden. Diese Erkenntnis bildet die Ausgangslage für die Ermittlung zukünftiger Anforderungen an das RailSiTe. Die erste Anforderung an ein ATO-System ist, dass dieses mindestens genauso gut sein muss, wie die heutige manuelle, menschliche Lösung. Die Leistungsfähigkeit des letztgenannten muss folglich ermittelt werden, und dabei muss weiter berücksichtigt werden, dass der Mensch heute eine sehr individuelle Leistungsfähigkeit aufweist. Die Simulationsumgebung des RailSiTe eignet sich für die Ermittlung dieser Leistungsfähigkeit von Akteuren besonders gut. Eine 3D-Visualisierung erlaubt die Durchführung von Studien mit Tf, um eine Einschätzung ihrer Leistungsfähigkeit zu bekommen (Bild 2). Wann (zeitlich und räumlicher Abstand) werden bspw. Hindernisse erkannt, und welche Umstände (bspw. Ablenkung, Sichtbarkeit, Lichtverhältnisse, Nebenaufgaben) führen dazu, dass diese nicht erkannt werden. Im Projekt ATO-Sense [7] des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung (DZSF) wurden im RailSiTe bereits erste Studien zur Abschätzung dieser

ratory testing also involves effort: the more detailed the results need to be, the more effort must be invested in analysing and evaluating the test results. This effort can once again be significantly reduced through the use of artificial intelligence and automation, thereby enabling considerable economies of scale to be achieved for simulation-based testing. In the current state of the art, simulation-based tests relating to the type-approval process are viewed more as an additional burden or challenge than as a positive effect of digitalisation. There is often a preconception here regarding a lack of traceability; process integration is cumbersome and not conceived in a holistic manner.

The ESC tests described above are a good example of this lack of process integration. In most cases (particularly in Germany), the approval process requires not only laboratory tests but also the execution of at least one test case in the field. This remaining field test significantly diminishes the key advantage of laboratory testing, as a large proportion of the overall effort lies in preparation and follow-up work, as well as in waiting times. If, in the end, it is still necessary to wait for a slot in the field with the appropriate crew, the ESC tests can also be carried out there with comparatively little effort. As long as the entire process step cannot be moved to the laboratory, the considerable advantages of laboratory tests, the existence of which is a consequence of digitalisation, will remain virtually untapped.

4 Evolution of RailSiTe: sensor technology for ATO solutions

ATO and RTO constitute two innovations on the horizon that could significantly change the rules of the game for railway operations.

This has created entirely new requirements for RailSiTe. The key question within this context is whether the relevant sensor required for a given ATO functionality of a piece of equipment can detect an object under all the possible circumstances that require intervention in the train's dynamics. This philosophy appears to be relatively consistent with that in the automotive sector. There, many research questions are being addressed regarding how digital infrastructure can make life easier. Information from the infrastructure is used [6] to inform the car whether it can safely travel along the next section of road. For various reasons, this paradigm (e.g. „Full Supervision“ in the world of ETCS) has always been present in the railway system, and can be used as a prerequisite for automated driving. This insight forms the starting point for determining the future requirements for RailSiTe.

The first requirement for an ATO system is that it must be at least as good as the current manual, human-operated solution. The performance of the latter must therefore be determined, while also taking into account the fact that human performance today varies greatly from person to person. The RailSiTe simulation environment is particularly well suited to determining the performance of operators. A 3D visualisation enables studies to be carried out with train drivers in order to assess their performance (fig. 2). For example, when are obstacles detected (in terms of time and spatial distance) and what circumstances (e.g. distraction, visibility, lighting conditions, secondary tasks) lead to them not being detected? Initial studies to assess this performance have already been carried out at RailSiTe as part of the ATO-Sense project [7] run by the German Centre for Rail Traffic Research (DZSF). Amongst other things, the influence of different weather conditions on the performance of the test subjects / train drivers has been analysed. The simulation enabled different weather and visibility conditions to



Bild 2:
3D-Visualisierung im
RailSiTe

Fig. 2: A 3D
visualisation in RailSiTe

Leistungsfähigkeit durchgeführt. Analysiert wurde hier unter anderem der Einfluss unterschiedlicher Witterungsverhältnisse auf die Leistungsfähigkeit der Probanden/Tf. Durch die Simulation konnten unterschiedliche Witterungs- und Sichtverhältnisse systematisch und kontrolliert hergestellt, variiert und miteinander verglichen werden. Mit relativ geringem Aufwand konnte der Einfluss dieser auf die Performance einer breiten Stichprobe erfasst werden. Mit diesen Ergebnissen ist davon auszugehen, dass bei Nacht und schlechtem Wetter die Leistungsfähigkeit der Tf aufgrund geringerer Sichtweiten abnimmt.

4.1 Anwendungsfall Automatic Train Operation (ATO)

Beim automatisierten Fahren kommen durch die zuvor dargestellten Zusammenhänge insbesondere die Bereiche einer Fahrt in den Fokus, die eine besonders hohe Aufmerksamkeit des Tf verlangen. In einer Monotoniestudie [8] des DLR zeigte sich, dass die Fahrten auf freier Strecke, insbesondere mit aktivierter ETCS-Führerstandssignalisierung, eher weniger Aufmerksamkeit erfordern, während das Einfahren in Bahnhöfe, Rangieren oder Depotfahrten dies sehr viel mehr tun. Für eine sensorbasierte Steuerung liegt hier folglich eine nennenswerte Herausforderung. Auch hierfür können im RailSiTe unterschiedliche Sensormodelle eingebunden werden und ein Abbild einer spezifischen Strecke geladen werden. Je nach Aufwand kann das digitale Abbild der Strecke in verschiedenen Qualitäts- und Detailstufen erstellt werden. Dabei eignet sich ein 3D-Abbild mit geringerer Qualität bspw. für eine Anforderungsanalyse, die später für die Ausschreibung des Systems genutzt werden soll. Bild 3 zeigt eine stark vereinfachte Visualisierung des Systems. Die grünen Linien symbolisieren die Strahlengänge eines LiDAR in einer Ebene. Werden die Strahlen reflektiert, wird in der Simulation die Flugzeit des Lichts berechnet und zur Objekterkennung als Punkt einer Punktwolke weitergegeben. Geometrische und betriebliche Randbedingungen (bspw. eingeschränkte Sicht) können bereits ermittelt und daraus sehr konkrete Anforderungen abgeleitet werden. Für die dabei identifizierten sensorischen Engpässe – also diejenigen Bereiche, die nicht von einem

be systematisch und kontrollierbar erstellt, variiert und verglichen werden kann. Der Einfluss dieser Bedingungen auf die Performance einer großen Stichprobe könnte dann mit relativ wenig Aufwand beurteilt werden. Auf Basis dieser Ergebnisse lässt sich annehmen, dass die Leistungsfähigkeit der Tf bei Nacht und in schlechtem Wetter durch die reduzierte Sichtweite abnimmt.

4.1 Use case: Automatic Train Operation (ATO)

In automated driving, the relationships outlined above mean that particular focus is placed on those phases of a journey that demand a particularly high level of attention from the train driver. A monotony study [8] conducted by the DLR showed that journeys on an open track, particularly with ETCS cab signalling activated, tend to require less attention, while entering stations, shunting or depot runs demand much more. This therefore presents a significant challenge for sensor-based control systems. Here too, different sensor models can be integrated into RailSiTe and a digital representation of a specific route can be loaded. The digital representation of the route can be created at various levels of quality and detail depending on the effort involved. A lower-quality 3D representation is suitable, for example, for a requirements analysis intended for use later in the system's tender process. Fig. 3 shows a greatly simplified visualisation of the system. The green lines symbolise the ray of a LiDAR in a single plane. When the rays are reflected, the simulation calculates the time of flight of the light and passes this on as a point in a point cloud for object detection. Geometric and operating constraints (e.g. restricted visibility) can already be identified, and very specific requirements can be derived from them. Potential solutions can be investigated and evaluated for the sensory bottlenecks identified in this process, i.e. those areas not covered by a sensor on the vehicle (possibly even in different positions). In doing so, structural modifications, such as the use of fences, as well as infrastructure-based sensor systems (for example, at level crossings for pedestrians) can be modelled in the simulation and their effects determined.

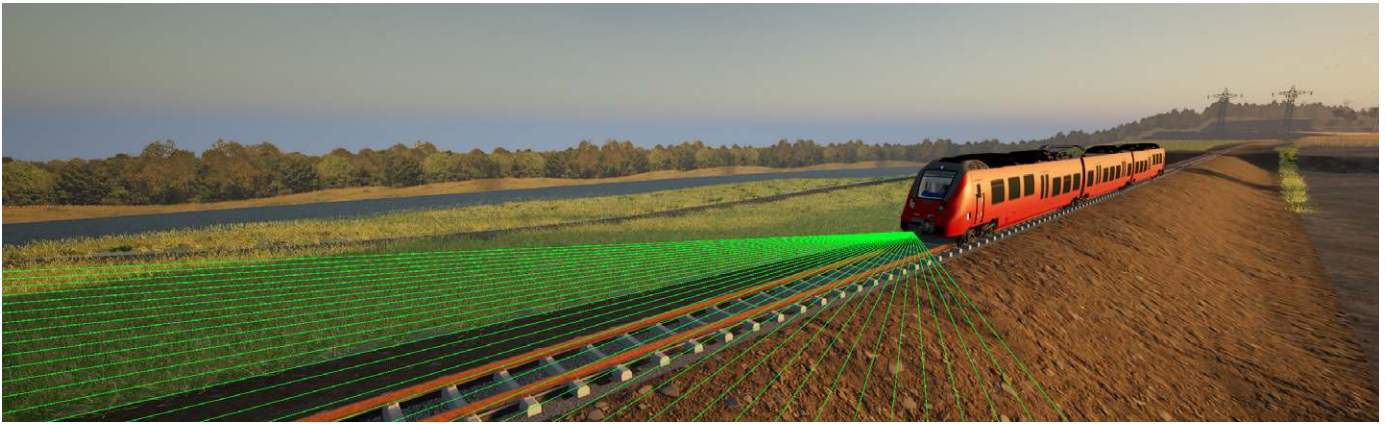


Bild 3: Vereinfachte Visualisierung der Simulation – die grünen Linien repräsentieren Laserstrahlen eines Laserscanners.

Fig. 3: A simplified visualisation of the simulation – the green lines represent laser beams from a laser scanner.

Sensor am Fahrzeug (ggf. auch in unterschiedlichen Positionen) erreicht werden – können Lösungsoptionen untersucht und bewertet werden. Dabei können bauliche Veränderungen, wie bspw. der Einsatz von Zäunen, wie auch infrastrukturseitige Sensorik, bspw. an Bahnübergängen für Fußgänger, in der Simulation abgebildet und deren Effekt ermittelt werden.

Höherwertige Modelle bringen im Wesentlichen eine größere Genauigkeit in die Ergebnisse. Unter anderem kann ermittelt werden, wie ein sensorisches System auf dem Fahrzeug und im Bahnhof ausgelegt werden muss, um gewünschte Taktraten umsetzen zu können. Je nach Modellqualität sind Genauigkeiten im Zentimeterbereich möglich, auch bei unterschiedlichen Wetter- und Lichtverhältnissen. So lassen sich mögliche Geschwindigkeiten bis auf wenige km/h ermitteln und lässt sich die Maximalleistung eines Systems bestimmen.

4.2 Anwendungsfall Remote Train Operation (RTO) und Behebung von Störfällen

RTO, also die Fernsteuerung von Zügen, ist voraussichtlich ein idealer Zwischenschritt für die Einführung des automatisierten Fahrens. Die Verantwortung bleibt beim Fahrer, und trotzdem werden einige Vorteile nutzbar, welche die Fahraufgabe vereinfachen und den Beruf deutlich kompatibler mit den Lebensentwürfen kommender Generationen machen. Hierzu gehören unter anderem wesentlich besser planbare Arbeitszeiten und -orte. Bei RTO sitzt der Tf an einem vom realen Fahrzeug entfernten Ort (remote), bspw. einem Bürogebäude, und steuert ihm zugewiesene Fahrzeuge über das Schienennetz. Aktuelle Forschungsprojekte nutzen dafür eine Funkübertragung eines oder mehrerer Videobilder [9], um die notwendige Information an den Fahrer zu übermitteln. Lösungen für nicht-optische Eindrücke, etwa Gerüche (bspw. Brände) oder Vibrationen, befinden sich gerade in der Erforschung. Im Stand der Technik ist davon auszugehen, dass auch bei Remote Operation weitere Sensoren auf den Fahrzeugen verbaut werden, um dem Fahrer ein vollständiges Lagebild bereitzustellen. Auch wenn zu Beginn der Einführung von Remote Operation voraussichtlich eine 1:1-Beziehung zwischen Fahrzeug und Tf umgesetzt wird, liegt in dieser Quote perspektivisch der Schlüssel zum Erfolg dieses Systems. Je schneller ein Operator zwischen unterschiedlichen Fahrzeugen wechseln kann, d. h. je mehr Fahrzeuge der Operator bedient, desto höher wird der Wirkungsgrad. Mit den zuvor skizzierten Technologien lassen sich im RailSiTe die damit verbundenen Einflussfaktoren und deren Wirkzusammenhänge vom Sensor bis zum Tf untersuchen. Beispielsweise muss

Higher-quality models essentially yield more accurate results. Amongst other things, it is possible to determine how a sensor system on the vehicle and at the station must be configured in order to achieve the desired update rates. Accuracies in the centimetre range are possible, even under varying weather and lighting conditions, depending on the model quality. This allows potential speeds to be determined down to a few km/h and the maximum performance of a system to be established.

4.2 Use case: Remote Train Operation (RTO) and fault rectification

RTO is expected to be an ideal intermediate step towards the introduction of automated driving. Responsibility remains with a driver, yet a number of benefits can be realised which simplify the driving task and make the profession significantly more compatible with the lifestyles of future generations. These include, amongst other things, much more predictable working hours and locations. In RTO, the train driver is situated at a location that is remote from the actual train, for example in an office building, and controls the trains assigned to them across the rail network. Current research projects utilise radio transmissions of one or more video images [9] to convey the necessary information to the driver. Solutions for non-visual inputs, such as odours (e.g. fires) or vibrations, are currently being researched. Given the current state of the art, it is reasonable to assume that, even with remote operation, additional sensors will be fitted to the vehicles to provide the driver with a complete picture of the situation. Although a 1:1 ratio between the vehicle and train driver is likely to be implemented at the start of the rollout of remote operations, this ratio holds the key to the system's long-term success. The faster an operator can switch between different vehicles, i.e. the more vehicles the operator controls, the greater the efficiency.

Using the technologies outlined above, RailSiTe enables the associated influencing factors and their interrelationships, from the sensor through to the train driver, to be investigated. For instance, the current requirement for route knowledge must be eliminated. In the simulation, studies involving future "remote operators" can be used to determine which information enables the rapid handover of a driving task and which information need not be presented in a suitable format. In the virtual world, it is possible to carry out a particularly simple yet systematically controlled evaluation of various sensor configurations of any complexity in order to determine the optimal equipment, possibly with a view to automated driving.

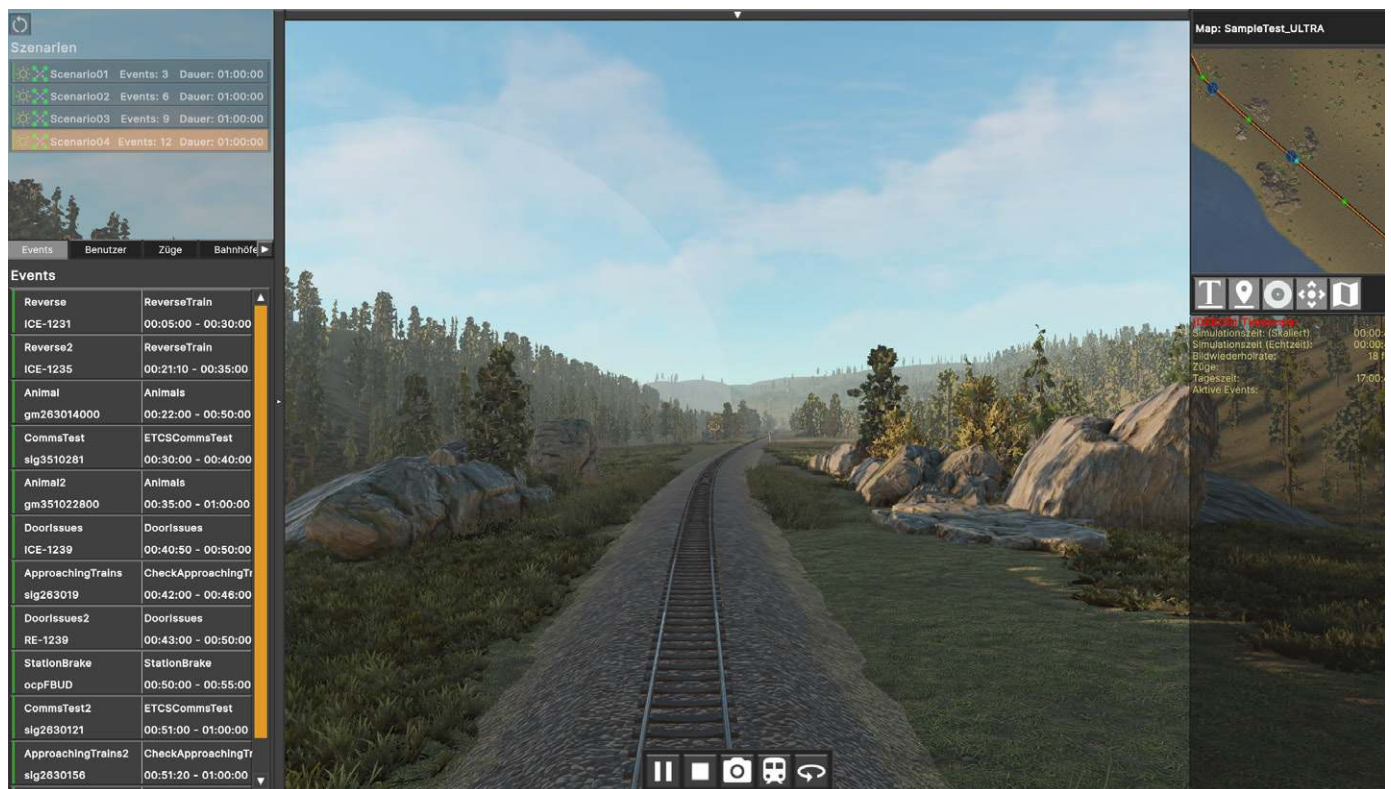


Bild 4: Ausschnitt der Benutzerschnittstelle für einen Remote Operator; Minimap oben rechts und Eventanzeige im Vordergrund. Die Abbildung stellt keinen konkreten Vorschlag dar, sondern veranschaulicht die Flexibilität für Remote Operator Arbeitsplätze.

Fig. 4: A detail of the user interface for a remote operator; the mini-map opens on the right and the event display is in the foreground. The figure does not represent a specific proposal, but illustrates the flexibility available for remote operator workstations.

dafür die aktuell notwendige Streckenkenntnis wegfällen. In der Simulation kann mittels Studien mit zukünftigen „Remote Operatoren“ untersucht werden, welche Information eine schnelle Übernahme einer Fahraufgabe ermöglicht und welche Information ggf. nicht passend aufbereitet ist. In der virtuellen Welt ist eine besonders einfache, aber systematisch kontrollierte Evaluation verschiedener, beliebig komplexer, Sensorkonstellationen möglich, um die optimale Ausstattung, ggf. bereits mit Perspektive auf das automatisierte Fahren, zu ermitteln. Bild 4 zeigt einen beispielhaften Screenshot der Testsoftware für die Oberfläche eines Remote Operators. Die „Minimap“ rechts oben zeigt dabei, wie bspw. eine digitale Karte dem Bediener eine schnelle Übersicht verschaffen kann.

5 Ausblick: Testfeld Schiene

Jede Simulation ist nur so gut wie die Glaubwürdigkeit ihrer Ergebnisse. Im RailSiTe werden validierte Sensormodelle eingesetzt, nennenswerte Abweichungen zur Realität konnten in Stichproben bislang nicht festgestellt oder entsprechend behoben werden. Diese Validierung findet am besten im Vergleich mit realen Versuchen statt, die gleichzeitig dringend benötigte Erfahrung mit Innovationen, wie dem automatisierten Fahren auf der Schiene, erzeugen können. Für diesen Zweck wird als reale Versuchsumgebung ein spezielles Testfeld benötigt, welches nicht nur zur Kalibrierung und Validierung von Simulationsergebnissen genutzt werden soll, sondern gleichzeitig – vergleichbar mit den Ansätzen beim automatisierten Fahren auf der Straße in den USA – Erfahrungen mit dem Gesamtsystem erzeugen soll.

Nebestrecken oder lange Anschlussgleise bieten voraussichtlich das größte Potenzial für Automatisierung [10]. Geringe Trans-

Fig. 4 shows an example screenshot of the test software for the remote operator's interface. The “mini-map” in the top right-hand corner shows how, for example, a digital map can provide the operator with a quick overview.

5 Outlook: the rail test bed

Any simulation is only as good as the credibility of its results. RailSiTe utilises validated sensor models; to date, no significant deviations from reality have been identified in the random checks, nor have any such issues been rectified. This validation is best carried out by means of comparisons with real-world trials, which can simultaneously generate much-needed experience with innovations such as automated rail transport. For this purpose, a specialised test track is required as a real-world test environment, which is not only intended for the calibration and validation of the simulation results, but also, similar to the approaches taken for automated driving on roads in the USA, to generate experience of the overall system.

Branch lines or long sidings are expected to offer the greatest potential for automation [10]. Low transport volumes require smaller rolling stock in order to minimise operating deficits. This, in turn, requires a large number of train drivers, who are becoming increasingly difficult to find due to the growing shortage of skilled workers and who, with smaller rolling stock, account for a larger proportion of the total costs. Automation, remote operation or a combination of both approaches promise particularly high efficiency within this context.

A rail test track must be operated as a kind of “sandbox”. Similar to the existing road test bed in Lower Saxony, infrastructure-

SIEMENS



INNOTRANS 2026

Entdecken Sie die **neue Dimension** der Bahntechnologie

Siemens Xcelerator, unsere offene und interoperable digitale Geschäftsplattform, verbindet Züge, Infrastruktur, Software und Services in einem gemeinsamen Ökosystem. Die Kombination der realen und der digitalen Welt in allen Bereichen von Engineering, Betrieb und Services ermöglicht unseren Kunden die Entwicklung integrierter, zukunftsfähiger Schienenverkehrssysteme.

Vectron X | Railigent X | Signaling X | Mobility Software Suite X

siemens.com/innotrans

Besuchen
Sie uns
in Hub 27

Berlin,
22.-25. Sept.
2026



portvolumen benötigen kleinere Gefäße, um Defizite beim Betrieb minimieren zu können. Dafür werden wiederum viele Tf benötigt, welche durch den zunehmenden Fachkräftemangel immer schwerer zu finden sind und gleichzeitig – bei kleineren Gefäßen – einen größeren Anteil der Gesamtkosten verursachen. Automatisierung, Remote Operation oder eine Kombination aus beiden Ansätzen versprechen hier einen besonders guten Wirkungsgrad. Ein Testfeld Schiene muss als eine Art Sandkasten betrieben werden. Vergleichbar mit dem vorhandenen Testfeld Niedersachsen auf der Straße wird eine infrastrukturseitige Überwachung der Strecke für einen niederschweligen Betrieb von automatisierten und ferngelenkten Fahrzeugen benötigt. Die infrastrukturseitige Ausrüstung kann bspw. über Kameras oder andere Sensortechnologien umgesetzt werden, voraussichtlich wird eine Kombination aus unterschiedlichen Sensoren, abhängig von ihrer Position, verwendet werden.

Der entscheidende und herausforderndste Punkt wird ein besonders leichter Zugang für Prototypen. Auch Fahrzeuge ohne bzw. mit eingeschränkter Zulassung müssen auf dem Testfeld betrieben werden können und zwar – natürlich ohne Einschränkung der Sicherheit – auch mit Probanden und in Dauerversuchen, um die Integration neuer Konzepte in das gesamte Mobilitätssystem (bspw. auch deren Akzeptanz) sicherzustellen. Von der Anforderungsanalyse bis zum Produkt könnte mit dem RailSiTe und einem Testfeld als Lückenschluss zwischen Demonstration und Betrieb eine nennenswerte Beschleunigung der Innovation im Eisenbahnsektor erreicht werden. ■

based monitoring of the route is required so as to enable the low-threshold operation of automated and remotely controlled vehicles. The infrastructure equipment can, for example, be implemented using cameras or other sensor technologies; it is likely that a combination of different sensors will be used, depending on their position.

The crucial and most challenging aspect will be ensuring particularly easy access for prototypes. It must be possible to operate vehicles with or without limited registration on the test track (naturally, without compromising safety), including with test subjects and in long-term trials in order to ensure the integration of the new concepts into the overall mobility system (including, for example, their acceptance). From requirements analysis through to the final product, RailSiTe and a test site could significantly accelerate innovation in the railway sector by acting as a bridge between demonstration and operational use. ■

AUTOREN | AUTHORS

Lennart Asbach

Abteilungsleitung: Schienensysteme und -technologien /
Head of Department: Railway Technologies
E-Mail: lennart.asbach@dlr.de

Dr. Christian Meirich

Abteilungsleitung: Digitalisierter Schienenverkehr und Betrieb /
Head of Department: Digitalized Rail Transport and Operations
E-Mail: christian.meirich@dlr.de

Dr. Caroline Schießl

Abteilungsleitung: Informationssysteme und Mobilitätsdienste /
Head of Department: Information Systems and Mobility Services
E-Mail: caroline.schiessl@dlr.de

Prof. Dr. Gert Bikker

Institutsdirektor: Schienensystemtechnik /
Director Rail Systems Engineering
E-Mail: gert.bikker@dlr.de

Alle Autoren / all authors:

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Verkehrssystemtechnik / Institute of Transport Systems
Anschrift / Address: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig

LITERATUR | LITERATURE

- [1] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. – Institut für Verkehrssystemtechnik: RailSiTe, online: www.railsite.de
- [2] Hofstädter, R.; Meirich, Ch.; Naumann, A.; Adebahr, F.-A.; Kapp, B.: (2025) Automatisiert fahrende Regionalzüge in Niedersachsen (ARTE). Projektbericht. 239 S. doi: 10.34657/18017
- [3] Siemens: Projektstart RemODtrAln: Konsortium entwickelt sichere Fernsteuerung mit KI-basierter Hinderniserkennung für den Betrieb im Bahndepot, online: <https://press.siemens.com/global/de/pressemitteilung/konsortium-entwickelt-sichere-fernsteuerung-mit-ki-basierter-hinderniserkennung-im>
- [4] Digitale Schiene Deutschland: AutomatedTrain | Vollautomatisierte Bereitstellungs- & Abstellungsfahrt, online: <https://digitale-schiene-deutschland.de/de/projekte/automatedtrain>
- [5] Asbach, L.; Hungar, H.; Meyer zu Hörste, M.; Lemmer, K.: Formalisierung von Tests für hochautomatisierte Testausführung, SIGNAL+DRAHT 09/2014, S. 26-34. DVV Media Group. ISSN 0037-4997
- [6] Bspw. CAR 2 CAR Communication Consortium | CAR 2 CAR Communication Consortium
- [7] Thomas-Friedrich, B.; Bosch, E. J.; Cogan, B.; Wasle, H.; Naumann, A.: Menschliche Wahrnehmung als Maßstab für zukünftige ATO-Systeme: Erste Ergebnisse der Studien im Projekt ATO-Sense zur Leistungsfähigkeit der visuellen Wahrnehmung von Triebfahrzeugführern, EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 09/2023, S. 62-66. Tetzlaff Verlag. ISSN 0013-2810
- [8] Jellentrup, N.; Feldmann, F.: (2011) Automated Deadman's Device Operation? 2nd International Conference on Driver Distraction and Inattention, 2011-09-05 - 2011-09-07, Göteborg, Schweden
- [9] Brandenburger, N.; Bier, I.; Busse, M.; Gärtner, J.; Melzer, T.: A technical demonstration of remote train operations using 5G mobile communications, SIGNAL+DRAHT 06/2023, S. 34-40. DVV Media Group. ISSN 0037-4997
- [10] Bikker, G.; Liedke, G. et al.: WhitePaper: ÖPNV der Zukunft; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (2026); online: <https://www.dlr.de/de/medien/publikationen/sonstige-publikationen/2026/oepnv-der-zukunft>

Safer rail through integrated engineering

Elemaster connects design, testing and repair into one engineering chain for rail safety – an essential integration to make artificial intelligence actually testable.



Elemaster's headquarters in Lomagna, north-east of Milan, Italy

Quelle: Elemaster

The railway industry is becoming more electronic, connected and software-intensive. New functions and architectures must be innovative, but also safe, verifiable, industrialisable and maintainable over decades-long lifecycles.

Elemaster is a global group spanning design, PCB manufacturing (Eleprint), industrialisation, production and repair, with sites across several countries on four continents. Eletech, the Group's Head of R&D division, focuses this network on hardware, embedded software, safety engineering and testing for rail, always to IRIS ISO 22163:2023, EN 50129 and EN 50657/50716 requirements. Rail has been part of Eletech's work for years, with dozens of SIL2 to SIL4 projects: fire detection and suppression, wheel-slip protection, high-voltage line monitoring for the ETR1000 high-speed train, hydrogen safety cut-off switches and automated coupler control for freight with cybersecurity design to EN 62443, plus EMC and shock/vibration validation of legacy propulsion equipment. In 2016, Eletech was also one of the eleven European partners of Safe4RAIL, the EU project on next-generation train control architectures.

For Eletech, testability is designed in from the start, not verified at the end. The flagship case is the Gap Hazard Detection System, a SIL3 control unit under development to detect a person trapped between train and platform, built on a dual-channel architecture with FMEA/FTA analysis, static analysis, unit testing, code coverage and a dedicated HIL test bench.

This same rigour continues after delivery. Through its new Repair Centre, built on the acquisition of CR&C and over 40 years of repair and remanufacturing experience across telecommunications, energy and industrial electronics, Elemaster extends testing into fault analysis, debugging and verification of restored products. This is the ground on which Elemaster is putting artificial intelligence to work today: not yet to operate the railway system, where verifica-

tion standards are still maturing, but to strengthen testing and repair, where the evidence already exists. Elemaster's position is distinctive. Owning the physical chain of verification, laboratories, HIL benches, production and its own Repair Centre, means owning the infrastructure that can generate and structure this evidence. The relevant advantage is not the best algorithm, but the data and testing depth needed to prove that it works.

Eletech, Elemaster's Automatic Test Equipment (ATE) platform engineered and certified for SIL-rated boards, natively applies AI analytics to test and signal-integrity data: a combination of certified SIL testing and AI-driven diagnostics built for railway maintenance, overhaul and manufacturing.

This is the loop Elemaster is building across its network: Eletech's R&D, production sites, Eletech benches and the Repair Centre design, verify, observe failures, repair, and feed what is learned back into products, test processes and, increasingly, into the data that trains AI itself.



Eletech: HW/SW design to EN 50129, EN 50657, EN 50128, SIL2-SIL4, FMEA/FTA, HIL testbenches

Repair Centre (CR&C): 20,000+ RMA and 25,000 units repaired per year

Meet Elemaster at InnoTrans Berlin 2026: Hall 27, Booth 300

Contact: +39 039 993 4000 | www.elemaster.com | www.elemaster.com/en/contacts



Hybridveranstaltung

26. SIGNAL+DRAHT-Kongress



12. – 13. November 2026,
Maritim Hotel, Fulda

**Jetzt
anmelden**

Einfach. Machen. Unter diesem Motto greift der 26. Signal+Draht-Kongress erfolgreiche Beispiele für eine konsequente und schnelle Umsetzung von LST-Projekten auf. Im Fokus steht neben den Erfolgsfaktoren die Frage, welche Ansätze sich für einen schnelleren Rollout neuer Technologien auch außerhalb einzelner Projekte übertragen lassen.

Konkrete Beispiele sind die ETCS-Einführung auf der Wiener Stammstrecke, die Digitalisierung bei S-Bahn und U-Bahn in Hamburg, der Pilot zur Remote Train Operation bei der S-Bahn München, der Wiederaufbau der Ahrtalbahn. Unter dem Stichwort „lessons learned“ werden außerdem Ansätze zur Beschleunigung des ETCS-Rollouts, Erfahrungen aus der ETCS-Fahrzeugumrüstung und die Verprobung der neuen Guidelines zum Cyber Resilience Act vorgestellt.

Ein weiterer Themenschwerpunkt ist die Künstliche Intelligenz: Konkrete Anwendungsfälle im Wissensmanagement bei Betreibern und Industrie sowie in der Zugdisposition zeigen exemplarische Entwicklungen im Bahnsektor auf. Ein Innovationsthema sind Stellwerke unter Nutzung von Cloud-Technologie. Von hoher Relevanz ist die Resilienz des Bahnsystems generell und im Lichte der Anforderungen für Military Mobility. Und zur kontroversen Diskussion stehen Optionen für die Einführung eines neuen Zugfunksystems.

Neben der Präsenzteilnahme vor Ort in Fulda mit der Gelegenheit zum Austausch und persönlichen Gesprächen mit den rund 300 Teilnehmenden ist alternativ auch die digitale Teilnahme am Live-stream möglich.

Jetzt anmelden unter: www.eurailpress.de/sdk2026

Organisation

Olga Freund
+49 (0) 40 237 14-351
olga.freund@dvvmedia.com

Ausstellung

Silke Härtel
Tel: +49 (0) 40 237 14-227
E-Mail: silke.haertel@dvvmedia.com

Veranstalter

**Eurail
press**

26. SIGNAL+DRAHT-Kongress Einfach. Machen.

Donnerstag, 12. November 2026		Referent/in
10:30	Begrüßung	Manuel Bosch, DVV Media Group GmbH
10:35	Einleitung	Reinhold Hundt / August Zierl, SIGNAL+DRAHT
10:40	Neues zur Organisation und Finanzierung der Digitalisierung des Schienenverkehrs in Deutschland	Florian Böhm, BMV
11:10	Einführung von ETCS ohne Signale auf der Wiener Schnellbahn-Stammstrecke	Ramo Begic, ÖBB Infrastruktur
11:40	Digitalisierung der Betriebsführung und ATO over ETCS bei der S-Bahn Hamburg	Christoph Gonçalves Alpoim, S-Bahn Hamburg
12:05	Pilot zur Remote Train Operation in der Betriebswerkstatt der S-Bahn München	René Neuhäuser, S-Bahn München
12:30	Mittagessen	
13:45	<i>Review: Erfolgreiche Inbetriebnahmen</i>	Reinhold Hundt/ August Zierl, SIGNAL+DRAHT
13:50	Wiederaufbau Ahrtalbahn – was können wir aus der Rekordgeschwindigkeit in der Krise lernen?	Benjamin Lück, DB InfraGO Dominik Oyen, Scheidt & Bachmann
14:15	Beschleunigung des ETCS-Rollouts: Übertragbarkeit erfolgreicher Projektansätze	Markus Talg, Siemens Franz Jost, Quattron
14:40	Praktische Erfahrungen für den Serienrollout: ETCS-Fahrzeugumrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart	Vincent Blateau, quattron
15:05	120 Jahre SIGNAL+DRAHT	Manuel Bosch, DVV Media Group GmbH
15:15	Kaffeepause	
15:45	Erkenntnisse aus der Praxisverprobung der europäischen Guidelines zum Cyber Resilience Act	Oliver Knapp, DB InfraGO
16:15	Digitalisierung und Automatisierung im Stadtbahnbetrieb – Einführung von GoA 2 in Frankfurt	Dr. Thomas Hempe, Verkehrsgesellschaft Frankfurt
16:45	Kontroverse: Optionen zur Ablösung von GSM-R - wie weiter mit FRMCS?	Christian Sagmeister, ÖBB Infrastruktur Emini Driton, Deutsche Telekom
17:30	Keynote: Künstliche Intelligenz	Florian Dohmann, Birds on Mars
18:30	Abend der Kommunikation	

Freitag, 13. November 2026		Referent/in
9:00	Begrüßung und Anknüpfung an die Keynote	Reinhold Hundt/ August Zierl, SIGNAL+DRAHT
9:10	Wissensmanagement und Entstörung mit KI-Unterstützung - Erste Schritte, Probleme und Herausforderungen	Anke Wiedenroth, DB InfraGO Thomas Honisch, DB InfraGO
9:20	Die ehrliche KI: Hochqualitative Antworten für Sicherheitsanwendungen	Saskia Cordier, Siemens
9:30	Von Basic Integrity zur Zukunft der sicheren KI im Bahnsektor	Joel Mwaka, Hitachi
9:45	Entwicklung eines CTMS mit KI-Unterstützung	Moritz Heimes, DB InfraGO
10:15	Kaffeepause	
10:45	Realisierung von Stellwerken mit Cloud-Technologie	Fabian Scherer, SBB
11:15	Resilienz im Bahnsystem ganzheitlich gedacht	Patric Birr, Incyde
11:45	Resilienz im Bahnsystem - ein Bericht aus der Praxis	Alexander Pavlenko, Ukrainian Railways
12:15	Abschluss	Reinhold Hundt / August Zierl, SIGNAL+DRAHT
12:30	Ende der Veranstaltung	

Akkreditierung nach ISO/IEC 17025 – Herausforderungen im Hinblick auf FRMCS

Accreditation according to ISO/IEC 17025 – the challenges pertaining to FRMCS

Jens Köcher

Akkreditierung ist die formelle Bestätigung durch eine unabhängige Stelle, dass eine Organisation definierte Qualitätsstandards und fachliche Kompetenzen erfüllt. Die wichtigste Grundlage hierfür bildet die ISO/IEC 17000-Reihe. Alle Normen, die sich hier einordnen, dienen der weltweit einheitlichen Regelung zur Kompetenz, Unparteilichkeit und Validität von Prüflaboren, Inspektions- und Zertifizierungsstellen. Sie bilden zusammen die globale Basis für Konformitätsbewertungen. Es handelt sich hierbei um ein modulares Baukastensystem, welches von der International Organization for Standardization (ISO) zusammen mit der International Electrotechnical Commission (IEC) entwickelt wurde.

1 Abbildung auf nationaler Ebene

Die Normen dienen der Stärkung des Vertrauens in die Qualität von Waren und Dienstleistungen auf internationalem Niveau. Für nationale Akkreditierungsstellen bilden sie die fundamentale Grundlage zur Akkreditierung von Konformitätsbewertungsstellen (KBS). Alle Normen der ISO/IEC 17000-Reihe zusammen bilden die ISO Committee on Conformity Assessment (CASCO) Toolbox. Mit der Anwendung der ISO/IEC 17000-Reihe wird die Konformität genau definierter Referenzexemplare von Produkten, Dienstleistungen, Prozessen oder Organisationen festgestellt. Am Beispiel der ISO/IEC 17025 [2] bedeutet dies, dass eine KBS beispielsweise befähigt ist, die Bewertung eines Produktes so vorzunehmen, dass alle relevanten Anforderungen nachweislich erfüllt sind. Mit dem Nachweis der ISO 9001-Reihe wird dagegen sichergestellt, dass ein konformes Produkt immer mit der gleichen Qualität hergestellt wird. Es erfolgt im Gegensatz zur Einzelprüfung eine kontinuierliche Qualitätsüberwachung. Auf nationaler Ebene in Deutschland ist ausschließlich die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAKKS) per Gesetz für die Bestätigung von Akkreditierungen im Bereich Konformität beauftragt. Dieser Beitrag soll sich speziell mit den Anforderungen der ISO/IEC 17025 [2] befassen, weil diese relevant ist für die Zulassung von Produkten nach DIN EN ISO 50155 [3].

2 Prozess zur Einführung eines Verfahrens

Verfahren sind Prüf- oder Kalibrierverfahren nach ISO/IEC 17025 [2]. Diese werden als Formen der Konformitätsbewertung behandelt. Diese können statisch oder flexibel akkreditiert sein. Bei einer flexiblen Akkreditierung ist die KBS automatisch für die Neuausgabe einer Norm bzw. eines Normprüfverfahrens akkreditiert, ohne ein zusätzliches Audit zu durchlaufen, wenn entsprechende

Accreditation involves formal confirmation by an independent body that an organisation has met the defined quality standards and professional competencies. The most important basis for this is the ISO/IEC 17000 series. All the standards included in this series serve to establish uniform global regulations governing the competence, impartiality and validity of testing laboratories, inspection bodies and certification bodies. Together, they form the global basis for conformity assessments. This is a modular system developed by the International Organization for Standardization (ISO) in collaboration with the International Electrotechnical Commission (IEC).

1 Implementation at national level

The standards serve to strengthen confidence in the quality of goods and services at an international level. They likewise form the fundamental basis for the accreditation of conformity assessment bodies (CABs) for national accreditation bodies. Together, all the standards in the ISO/IEC 17000 series constitute the ISO Committee on Conformity Assessment (CASCO) Toolbox. The ISO/IEC 17000 series establishes the conformity of products, services, processes or organisations with precisely defined reference standards. Taking ISO/IEC 17025 [2] as an example, this means that a CAB is, for instance, capable of assessing a product in such a way that all the relevant requirements have been demonstrably met. The ISO 9001 series, on the other hand, ensures that a compliant product is always manufactured to the same standard of quality. Unlike individual testing, this involves continuous quality monitoring. At a national level, the German Accreditation Body (DAKKS) is the sole body mandated by law in Germany to confirm accreditations in the field of conformity assessment. This article focuses specifically on the requirements of ISO/IEC 17025 [2] due to their relevance for the approval of products in accordance with DIN EN ISO 50155 [3].

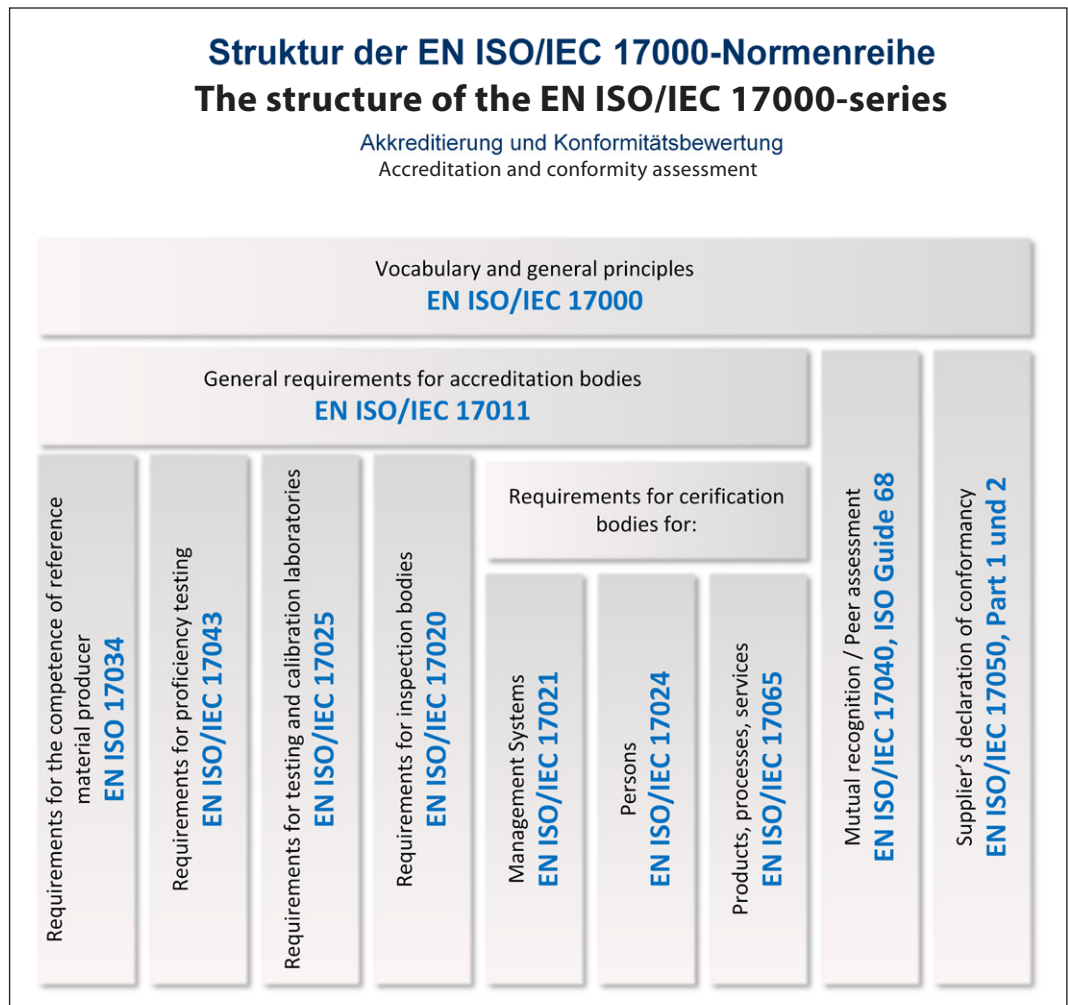
2 The process for introducing a procedure

Testing or calibration procedures are treated as forms of conformity assessment under ISO/IEC 17025 [2]. These may be accredited on a static or flexible basis. In the case of flexible accreditation, the CAB is automatically accredited for a newly issued version of a standard or standard test procedure without having to undergo an additional audit, provided the relevant procedures are publicly available and are being developed by standardisation

Bild 1: Struktur der EN ISO/IEC 17000-Normenreihe

Fig. 1: The general structure of the EN ISO/IEC 17000-series;

Quelle / Source: [1]



Verfahren öffentlich verfügbar sind und von Standardisierungsgremien bearbeitet werden (z. B. 3GPP, ETSI, UIC etc.). Für eine flexible Akkreditierung muss die KBS einige zusätzliche Anforderungen erfüllen. Nicht flexibel sind alle Verfahren, die beispielsweise von der KBS selbst entwickelt wurden oder anderweitige, nicht normierte Verfahren. Hier muss nach jeder Änderung am Verfahren eine Bewertung durch die Akkreditierungsstelle erfolgen. Die allgemeinen Anforderungen der ISO/IEC 17000-Reihe beziehen sich auf die grundsätzliche Eignung von Personal, das Vorhandensein von Einrichtungen im weitesten Sinne, also von Räumlichkeiten über Mess- und Prüfgeräte und Materialien des täglichen Umgangs. Ziel ist die Unabhängigkeit von anderen Unternehmensprozessen und Personen. Die Forderung nach Unabhängigkeit stellt eine zentrale Anforderung der gesamten Normenreihe dar und muss im Einzelnen, je nach Norm, bis hin zu persönlichen Beziehungen in einer Risikoanalyse bewertet werden, um eine höchstmögliche Unabhängigkeit zu erreichen. Ein weiterer, wichtiger Punkt ist die Unparteilichkeit. Die Mitarbeiter der KBS stehen in der Verantwortung, auch Entscheidungen treffen zu müssen, die einer positiven Konformitätsbewertung entgegenstehen. Daraus dürfen ihnen keine persönlichen oder beruflichen Nachteile entstehen. Es werden aber auch Details geregelt, z. B. Regelungen im Umgang mit Dokumenten und Aufzeichnungen, das Aussehen oder der Inhalt der ausgestellten Zertifikate. Da der Fokus für den Beitrag auf dem CASCO Baustein ISO/IEC 17025 [2] liegt, bezeichnet im Folgenden der Begriff „Verfahren“ immer ein Prüf- oder Kalibrierverfahren. Für die Einführung eines

bodies (e.g. 3GPP, ETSI, UIC, etc.). The CAB must meet several additional requirements in the case of flexible accreditation. Procedures that are not flexible include, for example, those developed by the CAB itself or other non-standardised procedures. In such cases, an assessment must be carried out by the accreditation body following any change to the procedure.

The general requirements of the ISO/IEC 17000 series relate to the fundamental suitability of personnel and the availability of facilities in the broadest sense, i.e. from the premises to the measuring and testing equipment and the materials used daily. The aim is independence from any other business processes and individuals. This is a requirement that runs throughout the entire series of standards. Depending on the specific standard, this independence must be assessed in a risk analysis in detail, including any personal relationships, so as to ensure the highest possible level of independence. Another important point is impartiality. The CAB staff have a responsibility to make decisions that may run counter to a positive conformity assessment. This must not result in any personal or professional disadvantages for them. However, the details are also regulated, e.g. the rules regarding the handling of documents and records, the appearance and content of the issued certificates and similar matters.

As this article focuses on the ISO/IEC 17025 CASCO module [2], the term “procedure” is used throughout to refer specifically to a testing or calibration procedure. When introducing a procedure, the CAB must follow a self-defined workflow that includes the following key points. The standard does not prescribe the

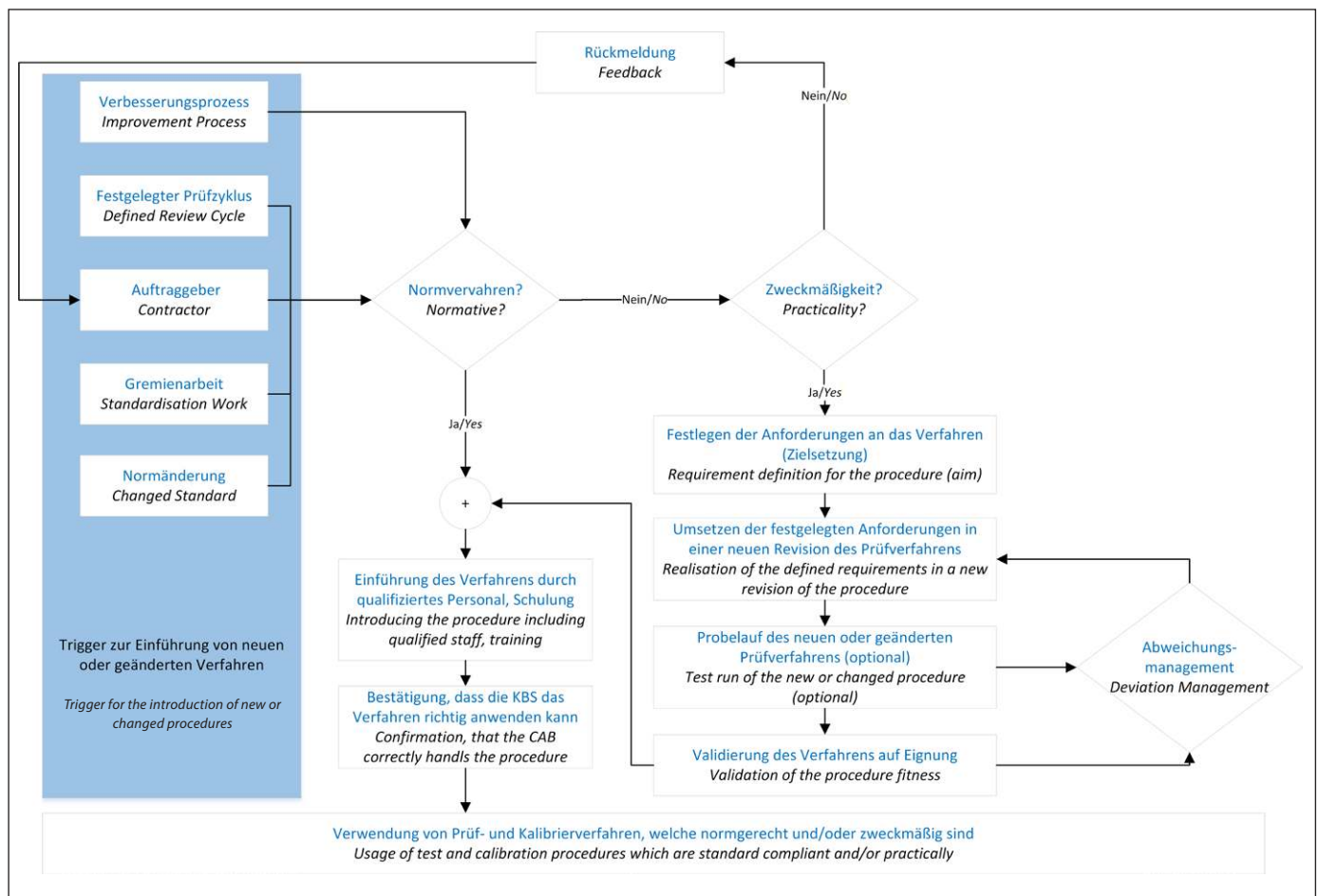


Bild 2: Ablaufdiagramm zur Einführung oder Änderung von Verfahren

Fig. 2: A flowchart for the introduction or modification of procedures

Quelle / Source: Funkwerk

Verfahrens muss die KBS einem selbstdefinierten Ablaufschema folgen, welches nachstehende, wesentliche Punkte beinhaltet. Das Schema selbst ist durch die Norm nicht vorgegeben, lediglich Anforderungen daran. Bild 2 zeigt eine mögliche Struktur:

- Bewerten der Anforderungen an ein Prüf- oder Kalibrierverfahren. Hier spielen Kundenanforderungen, Standards, aber auch eine kontinuierliche Prüfung auf Änderungen eine Rolle.
- Feedback beschreibt die Interaktion mit dem Auftraggeber.
- Fehler- bzw. Abweichungsmanagement. Dies ist wichtig, um Abweichungen und Beobachtungen korrekt einordnen zu können.
- Qualifizierung und Schulung des Personals.
- Überprüfung auf Eignung. Ist das Verfahren geeignet, um die Anforderungen an das Produkt prüfen zu können?
- Probelauf und Validierung. Ist die KBS in der Lage, das Verfahren korrekt umzusetzen?
- Einführen des Verfahrens auch in den Qualitätssicherungsdokumenten.

3 Gründe für eine Akkreditierung und Dauer der Akkreditierungsprozedur

Akkreditierung ist ein Business-Case. Eine KBS wird immer nur Verfahren einreichen, die Vorteile versprechen. Diese Vorteile sind vielfältig, lassen sich aber im Wesentlichen in fünf Kategorien einteilen, hier wieder in Bezug auf die ISO/IEC 17025 [2]:

- Gesetzliche und Regulatorische Anforderungen. Durch die europäische Regulierung ist vorgegeben, dass alle Produkte im

procedure itself, but only sets out the requirements for it. Fig. 2 shows a possible structure:

- Assessment of the requirements for a test or calibration procedure. Customer requirements, standards and ongoing monitoring for changes all play a role here.
- Feedback describes the interaction with the customer.
- Error and non-conformity management. This is important so as to be able to classify any deviations and observations correctly.
- Personnel qualification and training
- A suitability assessment. Is the procedure suitable for verifying that the product meets the requirements?
- The trial run and validation. Is the CAB capable of executing the procedure correctly?
- Incorporating the procedure into the quality assurance documents.

3 The reasons for accreditation and the duration of the accreditation process

Accreditation is a business case. A CAB will only ever submit procedures that promise benefits. These benefits are varied, but can essentially be divided into five categories, again with reference to ISO/IEC 17025 [2]:

- Legal and regulatory requirements. European regulations stipulate that all the products in the railway sector must be able to show that they have met the approval criteria in

Eisenbahnsektor die Zulassungskriterien in akkreditierten Laboratorien erfolgreich nachweisen müssen. Hierdurch können hohe Kosten entstehen. Durch eine Akkreditierung einer herstellereigenen KBS kann erreicht werden, dass die Zulassungskosten der eigenen Produkte und Dienstleistungen gesenkt werden. Bei Funkwerk war dieser Punkt ausschlaggebend, um 2012 eine Akkreditierung anzustreben. Die Zulassungskosten konnten in erheblichem Maß gesenkt und Testabläufe harmonisiert werden. Zunehmend spielt auch das Interesse externer Kunden, die KBS von Funkwerk als Referenz einzusetzen, eine Rolle.

- Vertrauen und Glaubwürdigkeit. Dieser Punkt betrifft nicht nur das Vertrauen in das geprüfte Produkt, sondern auch die Expertise, die eine KBS in Bezug auf die Problemanalyse bereitstellt. Diese Kompetenz ist wichtig in Bezug auf die Analyse von möglichen Abweichungen, die das Produkt außerhalb der kontrollierten Laborumgebung unter realen Betriebsbedingungen zeigen könnte. Gerade im Bahnumfeld variieren die Bedingungen in den realen Arbeitsumgebungen und können zu abweichendem Produktverhalten führen. Dieser Prozess ist wechselseitig, d.h. es können sowohl Abweichungen in der Produktivumgebung des Kunden als auch unzureichende Prüfprozeduren der KBS zugrunde liegen. Die KBS kann unterstützen, um auch im Feld die Problemanalyse voranzutreiben und profitiert gleichzeitig von den Erkenntnissen, die zur Verbesserung der eigenen Prüfprozesse führen.
- Qualitätssicherung. Für den Kunden der KBS ist es wichtig, die Produktqualität, also die Erfüllung der relevanten Anforderungen, bestätigt zu bekommen, bevor die Serienproduktion beim Kunden beginnen kann. Eine akkreditierte KBS muss stets auch offen für externe Kunden sein. Für das Labor ist es deshalb wichtig, die Aufzeichnungen aus früheren Prüfungen (z.B. Vergleichsdaten über den Messaufbau) als Analysematerial verfügbar zu haben, um bei Abweichungen eine entsprechende Ursache identifizieren zu können.
- Internationale Anerkennung. Die Leistungen (z.B. in der Standardisierungsarbeit), Verfahren und Expertisen (z.B. in Bezug auf messtechnische Herausforderungen, Grenzwerte, langjährige Messreihen etc.) können auf internationalem Niveau präsentiert und verglichen werden. Das bedeutet, dass die Berichte zur Konformität eines Produktes international anerkannt werden. Damit eröffnet sich ein weltweiter Markt.
- Wettbewerbsvorteil. Die Akkreditierung kann für ein Unternehmen einen Vorteil darstellen, da Produkte sehr früh den strenger Qualitätsanforderungen eines akkreditierten Prüflabors unterzogen werden.

Die Dauer für die Akkreditierung eines neuen Verfahrens beträgt nach Antragstellung etwa sieben bis acht Monate. Der erste Schritt ist der Antrag bei der Akkreditierungsstelle. Die für die Antragstellung erforderlichen Unterlagen können elektronisch eingereicht werden. Die Vorbereitungszeit der Akkreditierungsstelle beträgt etwa drei bis vier Monate, denn es müssen fachlich geeignete Begutachter gefunden werden. Diese sichten die eingereichten Dokumente und stimmen mit der KBS einen Begutachtungstermin ab. Nach dem Audit hat die KBS Zeit, festgestellte Abweichungen zu beseitigen:

- Einen Monat für kritische Abweichungen
 - Zwei Monate bei normalen Abweichungen zu existierenden Verfahren
 - Drei Monate bei Abweichungen zu neu eingeführten Verfahren.
- Danach werden die Teilbegutachtungsberichte im Ausschuss der Akkreditierungsstelle bewertet. Erst dann erfolgt die Bestätigung

akkreditierter Laboratorien. This can result in high costs. It is possible to reduce the approval costs for a company's products and services if the manufacturer has its own accredited CAB. This was the decisive factor for Funkwerk when deciding to seek accreditation in 2012. The approval costs have been significantly reduced, while the testing procedures have also been standardised. The interest shown by external customers in using the Funkwerk CAB as a reference is also playing an increasingly important role.

- Trust and credibility. This point concerns not only confidence in the product, but also the expertise that a CAB provides in terms of problem analysis. This expertise is important when it comes to analysing potential deviations that the product might exhibit outside the controlled laboratory environment, under real-world operating conditions. In the railway sector in particular, conditions in real-world operating environments vary and can lead to deviations in product behaviour. This process is reciprocal; in other words, it may be caused by either deviations in the customer's operating environment or inadequate testing procedures on the part of the CAB. The CAB can also help to drive problem analysis in the field forward, while at the same time benefiting from the insights gained, which then lead to improvements in its own testing processes.
- Quality assurance. It is important for the CAB's clients to have the product quality (that is, the compliance with the relevant requirements) confirmed before series production can begin at the client's premises. An accredited CAB must always be open to external clients. It is therefore important for the laboratory to have the records from previous tests (e.g. comparative data on the measurement setup) available as analytical data, so that it can identify the causes of any deviations.
- International recognition. The achievements (e.g. in the standardisation work), procedures and expertise (e.g. regarding metrological challenges, limit values, long-term measurement series, etc.) can be presented and compared at an international level. This means that reports on a product's conformity are recognised internationally. This opens up the global market.
- Competitive advantage. Accreditation can be an advantage for a company, as products can be subjected to the stricter quality requirements of an accredited testing laboratory at a very early stage.

The accreditation process for a new procedure takes around seven to eight months. The first step is to apply to the accreditation body. The necessary documents can be submitted electronically. The accreditation body's preparation time is approximately three to four months, as technically suitable assessors must be found, they must review the submitted documents and an assessment date must be agreed upon. Following the audit, the CAB has time to rectify any identified non-conformities:

- one month for critical non-conformities,
- two months for normal non-conformities with existing procedures
- three months in the event of any deviations from newly introduced procedures.

The partial assessment reports are then evaluated by the accreditation body's committee; only then is the accreditation confirmed. A procedural accreditation has no expiry date. Where there are compelling reasons, the accreditation must subsequently be withdrawn or revoked [4].

der Akkreditierung. Die Akkreditierung eines Verfahrens hat kein Ablaufdatum. Bei Vorliegen wichtiger Gründe muss die Akkreditierung entzogen bzw. widerrufen werden [4].

4 Umsetzung im Labor

Von Anfang an muss die Einführung eines neuen Verfahrens, z. B. zum Nachweis funktionaler Anforderungen aus dem Future Railway Mobile Communication System (FRMCS), auch organisatorisch begleitet werden. Das bedeutet, dass alle räumlichen, technischen und personellen Ressourcen überprüft werden müssen. Die kommerziellen Aufwände müssen in den Budgets geplant und in Einzelprojekten realisiert werden. Dabei ist die Einhaltung aller Vorgaben aus dem Qualitätsmanagement-Handbuch der KBS elementar wichtig. Das beinhaltet die Festlegung von Berichtsvorgaben ebenso wie die Integration und Dokumentation der Infrastruktur, dass Konfigurationen und Backups gesichert sowie Arbeitsschutz- und Schulungsmaßnahmen durchgeführt und dokumentiert werden.

Dieser organisatorische Rahmen spannt sich bis zur Akkreditierung, also der Anerkennung des neuen Verfahrens durch die Akkreditierungsstelle.

Für das einzuführende Verfahren spielt es dabei keine Rolle, welchen Status (z. B. Stable Draft, Revision, Release Version etc.) es hat. Wichtig aus Sicht der KBS ist, dass die erwähnten Merkmale für eine flexible Akkreditierung vorliegen. Für FRMCS ist dies der Fall. Alle relevanten Spezifikationen wurden im Rahmen verschiedener Standardisierungsgremien erstellt. Ein Standard muss auch nicht vollständig umgesetzt werden. Es ist zulässig, Einschränkungen zu deklarieren. So können also verschiedene Kapitel oder Normenteile aus dem Anwendungsbereich entfernt werden. Sollten Kapitel oder Normenteile zunächst aus der Akkreditierung ausgeschlossen worden sein, bedeutet eine nachträgliche Aufnahme dieser Punkte in den Anwendungsbereich für die KBS, dass eine erneute Auditierung der geänderten Bestandteile durchgeführt werden muss.

Der grundsätzlichen Akkreditierung von FRMCS-Prüfverfahren steht aus heutiger Sicht nichts im Wege.

Funkwerk hat die ersten, wichtigen Schritte auf dem Weg zur Akkreditierung von FRMCS-Prüfverfahren bereits beschritten. Über die Anbindung zu verschiedenen Laboren von Lieferanten relevanter Teilkomponenten wie 5G-Netz, FRMCS-Server oder Dispatcher können bereits verschiedenste Funktionen getestet werden. Der technische Teil, die Einrichtung, ist damit unter Kontrolle und kann einer Akkreditierung unterzogen werden. Bei den Verfahren sind vor allem diejenigen interessant, die den FRMCS-Client bzw. das mobile Funkgerät betreffen. Diese Verfahren werden gerade identifiziert. In einem nächsten Schritt muss der Prozess der Prüfung beschrieben und im Labor ausgeführt werden. Das bedeutet, dass erfahrene Testexperten die Prüfungen im Probelauf im Detail durchgehen müssen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf den Reifegrad wichtig, um frühzeitig mögliche Einschränkungen feststellen oder die Entwicklung begleitender Verfahren vorantreiben zu können. Erst wenn dieser Schritt erfolgreich durchlaufen ist, ist eine Anmeldung bei der Akkreditierungsstelle erfolgversprechend.

Um einen Stand der technischen Kompetenz analog zu GSM-R im Labor zu erreichen, ist die Umsetzung folgender Punkte notwendig: 1. 5G NR Radio Performance. In der 3GPP TS 38.101-1 [5] sind speziell die 5G-Core-Konformitätstests abgebildet. Es ist jedoch noch nicht eindeutig geregelt, inwieweit die Tests eingeschränkt werden können. Im Fokus der KBS steht die Zulassung des Produktes, z. B. MTC18 (Funkmodem mit Switch und integrierter Stromversorgung speziell für FRMCS in den 5G Bändern

4 Implementation in the laboratory

From the outset, the introduction of a new process (for example, to verify the functional requirements from the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS)) must also be supported by the appropriate organisational measures. This means that all the spatial, technical and human resources must be reviewed. The commercial costs must be planned for in the budgets and implemented in individual projects. In doing so, compliance with all the requirements set out in the CAB Quality Management Manual is of fundamental importance. This includes establishing reporting requirements, as well as the integration and documentation of the infrastructure, thereby ensuring that the configurations and backups have been secured and that the health and safety measures and training programs have been carried out and documented.

This organisational framework extends to accreditation, i.e. the recognition of the new procedure by the accreditation body.

The process status (e.g. Stable Draft, Revision, Release Version, etc.) does not play a role with regard to it being introduced. From the CAB perspective, what matters is that the characteristics for flexible accreditation are present. This is the case for FRMCS. All the relevant specifications have been developed within the framework of the various standardisation bodies. A standard does not have to be implemented in full. It is permissible to declare restrictions. This means that various chapters or sections of the standard may be excluded from the scope of the application. If any chapters or sections of the standard were initially excluded from the accreditation, their subsequent inclusion within the scope of application for the CAB means that a new audit of the amended sections must be carried out.

From today's perspective, there is nothing standing in the way of the fundamental accreditation of the FRMCS test procedures. Funkwerk has already taken the first crucial steps towards the accreditation of the FRMCS procedures. A wide range of functions can already be tested by connecting to various laboratories belonging to the suppliers of relevant sub-components (such as 5G networks, FRMCS servers or dispatchers). The technical aspect, i.e. the setup, is therefore under control. The procedures relating to the FRMCS client or the mobile radio are of particular interest. They are currently being identified. The test process must be described and carried out in the laboratory during the next step. This means that experienced test specialists must go through the tests in detail during the trial run. This is particularly important in terms of the level of maturity, so that any potential limitations can be identified at an early stage or the development of the supporting procedures can be driven forward. Only once this step has been successfully completed is an application to the accreditation body likely to be successful.

The following points must be implemented in order to achieve a level of technical capability in the laboratory equivalent to that of GSM-R:

1. 5G NR Radio Performance. 3GPP TS 38.101-1 [5] specifically sets out the 5G Core conformance tests. However, it is not yet clearly defined to what extent these tests may be restricted. The CAB focuses on product certification, e.g. MTC18 (the radio modem including the switch and the integrated power supply for FRMCS in the 5G n100/n101 radio bands). The chipset itself and the built-in modem are components that already hold radio certification. This further limits the scope of the certification-relevant tests, in line with GSM-R.

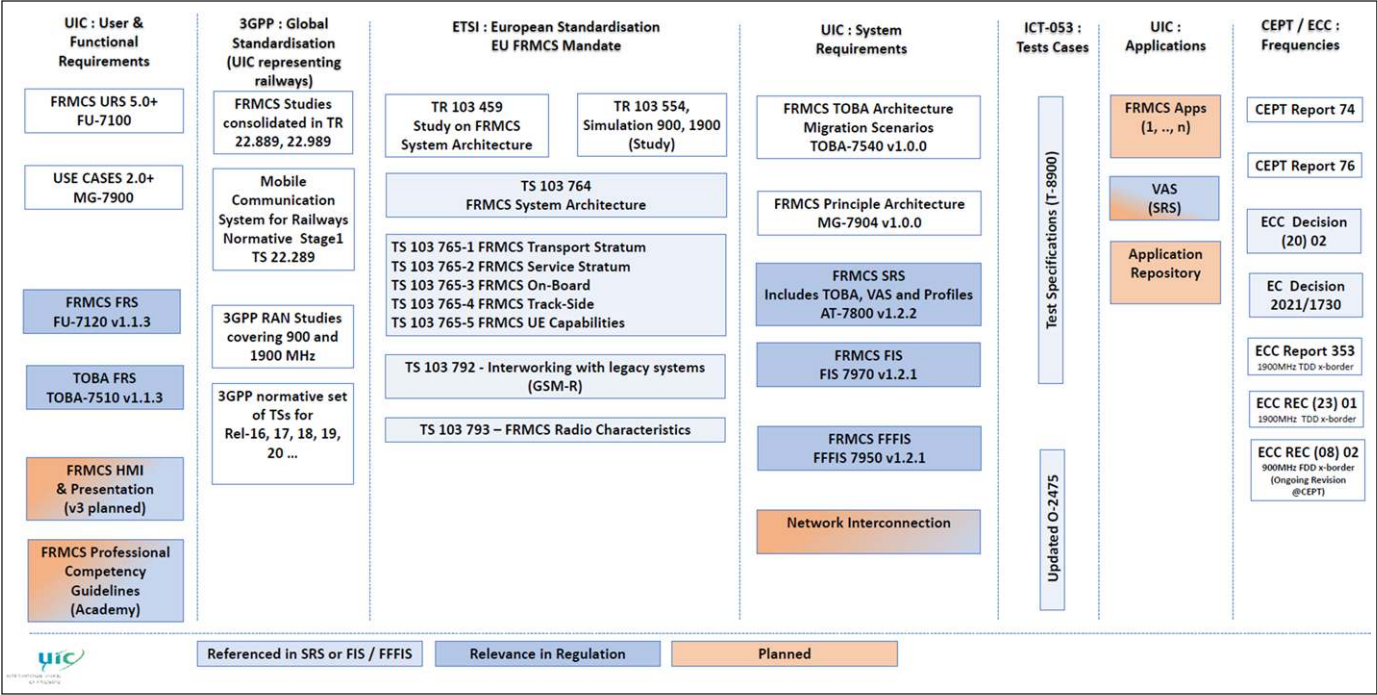


Bild 3: Spezifikationslandschaft FRMCS

Fig. 3: The FRMCS specification landscape

Quelle / Source: [9]

n100/n101). Der Chipsatz selbst und das verbaute Modem sind Lieferteile, die bereits eine Funkzulassung besitzen. Damit reduziert sich der Umfang der zulassungsrelevanten Prüfungen, analog zu GSM-R.

2. Die ETSI TS 103 765-Serie [6] beschäftigt sich mit den funktionalen FRMCS-Anforderungen. Hier muss auf jeden Fall eine zu GSM-R vergleichbare Infrastruktur geschaffen werden. Dazu läuft zurzeit die Analyse nach Referenzkomponenten, die sich konform zu den Spezifikationen verhalten. Dadurch, dass die Spezifikationen noch sehr jung sind, wird erwartungsgemäß eine hohe Dynamik in der Implementierung auftreten.

2. The ETSI TS 103 765 series [6] deals with the functional FRMCS requirements. An infrastructure compliant with GSM-R must be established here in any case. To this end, an analysis is currently underway to identify the reference components that comply with the specifications. As the specifications are still very new, a high degree of dynamism is expected in the implementation.

Fig. 3 shows the specification landscape for FRMCS, including the standards still in the planning stage. In December 2024, FRMCS was introduced by the European Union Agency for Railways (ERA) as a technical opinion (ERA/OPI/2024-10, [7]);

Sichere Digitalisierungslösungen für die Mobilität!

Bahnbetriebliche IP-Netze

Cybersecurity für Bahn & ÖPNV

Übertragungsnetz-lösungen

Digitalisierung durch sichere Vernetzung

Lassen Sie uns sprechen!

22.-25. September 2026



Halle 4.1 | Stand 440



service • commitment • value
www.telent.de

Wir stellen die Weichen auf Zukunft!

Bild 3 zeigt die Spezifikationslandschaft für FRMCS, einschließlich noch geplanter Standards. Im Dezember 2024 wurde FRMCS durch die Eisenbahnagentur der Europäischen Union (ERA) als „Technische Stellungnahme“ (ERA/OPI/2024-10, [7]) eingeführt, im Mai 2025 erweitert. Aktuell bildet FRMCS im Stand Version 2.2 die Grundlage für MORANE2 [8]. Geplant sind neben Arbeiten zu Testspezifikationen unter anderem auch Labortests, statische und dynamische Feldtests. Bei MORANE2 handelt es sich um eine Initiative im Rahmen von „Horizon Europe“. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Erprobung und Weiterentwicklung von FRMCS unter realen Bedingungen in ganz Europa. Mit dem Ende des MORANE2 Projektes 2027 wird FRMCS auf einem Stand sein, mit dem ein operativer Roll-Out möglich ist.

5 Fazit

Die Akkreditierung von Prüfverfahren zum Nachweis der FRMCS-Konformität von Produkten nach ISO/IEC 17025 [2] ist ein formaler Akt. Aktuell gibt es noch einige technische Hürden zu überwinden. Diese sind mit dem für 2027 geplanten Abschluss des MORANE2 Projektes unter Kontrolle, sodass auch eine erfolgreiche Akkreditierung ab diesem Zeitpunkt möglich ist. Entsprechende Vorarbeiten laufen bereits.

In der Übergangszeit zwischen stabilen Anforderungen und dem Erreichen der Akkreditierung werden in Bezug auf mögliche, frühzeitige Zulassungen die Prüfungen in der Laborumgebung in direkter Begleitung der Gutachter stattfinden. Dies ist kostenintensiver, als die fertigen Berichte begutachten zu lassen, wenn bereits Vertrauen in die Kompetenz der KBS besteht. Als KBS wird hier allerdings auch eine wichtige Schulungsmaßnahme für die Gutachter erbracht, da unter kontrollierten Bedingungen praktische Erfahrung gesammelt und technische Details eingehend beleuchtet werden können. ■

it was expanded in May 2025. FRMCS, currently in version 2.2, forms the basis for MORANE2 [8]. Plans include test specification work and laboratory tests, as well as static and dynamic field tests. MORANE2 is an initiative under the “Horizon Europe” program. The focus is on testing and further developing FRMCS under real-world conditions across Europe. By the end of the MORANE2 project in 2027, FRMCS will have reached a stage at which an operational rollout is possible.

5 Conclusion

The accreditation of test procedures to demonstrate the FRMCS conformity of products in accordance with ISO/IEC 17025 [2] is a formal process. At present, there are still several technical hurdles to overcome. These will be brought under control with the planned completion of the MORANE2 project in 2027, meaning that successful accreditation will be possible from that point onwards. The necessary preparatory work is already underway. During the transitional period between the establishment of the stable requirements and the attainment of accreditation, tests will be carried out in the laboratory environment under the direct supervision of the assessors regarding potential provisional approvals. This is more costly than having the final reports assessed once confidence in the CAB's competence has been established. However, the CAB also provides an important training opportunity for the assessors here, as practical experience can be gained under controlled conditions and the technical details can be examined in depth. ■

LITERATUR | LITERATURE

- [1] SO-Casco-Toolbox-Source; <https://www.researchgate.net/profile/Antonio-Vilhena/publication/342275137/figure/fig2/AS:903793902379013@1592492666609/SO-Casco-Toolbox-Source-ISO.png> (17.07.2026 08:32)
- [2] DIN EN ISO/IEC 17025:2018; Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017)
- [3] DIN EN 50155*VDE 0115-200; Bahnanwendungen – Fahrzeuge – Elektronische Betriebsmittel; Deutsche und Englische Fassung prEN 50155:2024
- [4] R-17025-PL; Regel zur Akkreditierung von Prüflaboratorien nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018; Link: Dokument – DAKKS – Deutsche Akkreditierungsstelle (17.07.2026 08:36)
- [5] ETSI TS 138 101-1 Version 19.6.0; 5G; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (3GPP TS 38.101-1 version 19.6.0 Release 19)
- [6] ETSI TS 103 765-x; Rail Telecommunications (RT); Future Railway Mobile Communication System (FRMCS) Building Blocks and Functions; Part 1: Transport Stratum; Part 2: Service Stratum; Part 3: Train On-Board functions and interfaces; Part 4: Trackside functions and interfaces; Part 5: User Equipment (UE) capabilities; Part 6: FRMCS Multipath Function
- [7] ERA/OPI/2024-10; <https://www.era.europa.eu/content/opinion-era-opi2024-10-european-union-agency-railways-regarding-version-2-future-railway> (20.07.2026 08:02)
- [8] FP2-MORANE-2 | Future Railway Mobile Communication System (17.07.2026 09:36)
- [9] UIC Homepage FRMCS; FRMCS | UIC – International union of railways (17.07.2026 08:32)

AUTOR | AUTHOR

Jens Köcher
 Laborleiter / Laboratory Supervisor
 Funkwerk Systems GmbH
 Anschrift / Address: Im Funkwerk, D-99085 Kölleda
 E-Mail: jens.koecher@funkwerk.com

Post Quantum Security in der Leit- und Sicherungstechnik

Post-quantum security for railway signalling and safety technology

Daniel Zelle | Stefan Katzenbeisser

Quantencomputer bedrohen die Sicherheit klassischer asymmetrischer kryptografischer Verfahren wie RSA und ECC-Algorithmen, auf denen Authentifizierung und Schlüsselaustausch in modernen Systemen der Leit- und Sicherungstechnik (LST) beruhen. Dieser Beitrag diskutiert fünf Migrationsoptionen von klassischer Kryptografie hin zu standardisierten Verfahren, die auch Angriffen durch Quantencomputer standhalten, sogenannte Post-Quanten-Verfahren (PQC). Zugleich wird die Bedrohung durch Harvest-now-decrypt-later (HNDL)-Angriffe, bei denen heute verschlüsselte Daten abgegriffen und zu späterer Entschlüsselung aufbewahrt werden, differenziert bewertet: Für kurzlebige Steuersignale ist diese Angriffsform in der Regel nicht relevant. Schutzbedarf besteht primär bei kryptografischem Schlüsselmaterial, welches zum Signieren von Zertifikaten und Konfigurationsdaten oder zum Schlüsselaustausch verwendet wird. Empfohlen wird eine hybride, crypto-agile Strategie in Kombination mit einer schrittweisen Migration.

1 Einleitung

Die Entwicklung leistungsfähiger Quantencomputer stellt eine der bedeutendsten sicherheitstechnischen Herausforderungen für Kritische Infrastrukturen dar. Insbesondere asymmetrische kryptografische Verfahren, die auf der Schwierigkeit der Faktorisierung großer Zahlen (RSA) oder der Lösung diskreter Logarithmusprobleme (ECC) basieren, sind durch Quantencomputer über Shors Algorithmus prinzipiell angreifbar. Der Algorithmus nach Grover reduziert überdies das erreichbare Sicherheitsniveau bei symmetrischer Kryptografie. Gleichzeitig bedroht der sogenannte „Harvest now, decrypt later“-Angriff bereits heute gespeicherte verschlüsselte Kommunikation, da aufgezeichnete Daten zu einem späteren Zeitpunkt mit einem hinreichend leistungsfähigen Quantencomputer entschlüsselt werden könnten.

Einsatzfeld	Aktuelle Verfahren	Quantenvulnerabilität
Authentifizierung (ETCS Euroradio)	RSA-2048, X.509-Zertifikate	Hoch (Shor)
Schlüsselaustausch (TLS/DTLS)	ECDH, DH	Hoch (Shor)
Digitale Signaturen (Firmware)	ECDSA, RSA	Hoch (Shor)
Symmetrische Datenverschlüsselung	AES-128/256	Mittel (Grover)
Hashfunktionen (Integrität)	SHA-256/384	Gering (Grover)

Tab. 1: Kryptografische Verfahren in Systemen der Leit- und Sicherungstechnik

Quantum computers pose a threat to the security of classic asymmetric cryptographic methods such as RSA and ECC algorithms, on which the authentication and key exchange in modern railway signalling and safety systems are based. This article discusses five migration options from classic cryptography to standardised methods that can withstand attacks by quantum computers, known as post-quantum cryptography (PQC). At the same time, the threat posed by “harvest-now-decrypt-later” (HNDL) attacks (in which currently encrypted data is intercepted and stored for later decryption) is evaluated on a case-by-case basis. This type of attack is generally not relevant for short-lived control signals. The need for protection primarily concerns cryptographic key material used to sign certificates and configuration data or for key exchanges. A hybrid, crypto-agile strategy combined with a phased migration is recommended.

1 Introduction

The development of powerful quantum computers poses one of the most significant security challenges for critical infrastructures. Asymmetric cryptographic schemes based on the difficulty of factoring large numbers (RSA) or solving discrete logarithmic problems (ECC) are, in principle, particularly vulnerable to attack by quantum computers using Shor’s algorithm. Furthermore, Grover’s algorithm also reduces the achievable level of security in symmetric cryptography. At the same time, the so-called “harvest now, decrypt later” attack already poses a threat to stored encrypted communications today, since the recorded data could be decrypted at a later date using a sufficiently powerful quantum computer.

Signalling and safety systems are embedded safety-critical systems with typical operating lifespans of 20 to 50 years. The cryptographic methods used in these systems (in particular

Area of application	Current methods	Quantum vulnerability
Authentication (ETCS Euroradio)	RSA-2048, X.509 certificates	High (Shor)
Key exchange (TLS/DTLS)	ECDH, DH	High (Shor)
Digital signatures (firmware)	ECDSA, RSA	High (Shor)
Symmetric data encryption	AES-128/256	Medium (Grover)
Hash functions (integrity)	SHA-256/384	Low (Grover)

Tab. 1: The cryptographic methods used in signalling and safety systems

Systeme der LST sind eingebettete sicherheitskritische Systeme mit heute typischen Betriebslaufzeiten von 20 bis 50 Jahren. Die in diesen Systemen eingesetzten kryptografischen Verfahren – insbesondere für die Authentifizierung der Kommunikationsteilnehmer, den Schlüsselaustausch sowie den Schutz der Integrität von Nachrichten über digitale Signaturen – müssen über diesen gesamten Zeitraum Schutz bieten. Dies macht eine frühzeitige, planvolle Migration zu quantensicheren Verfahren unumgänglich.

2 Kryptografie in der LST: Einsatzfelder und Bedrohungen

Moderne Systeme der LST nutzen Kryptografie in verschiedenen Schichten der Systemarchitektur. Tab. 1 gibt einen Überblick über die zentralen Einsatzfelder und die derzeit eingesetzten Verfahren. Die aktuelle Risikoeinschätzung führender Behörden – darunter das Bundesamt für Sicherheit in der Informatik (BSI) [7], die Agentur der Europäischen Union für Cybersicherheit (ENISA) [5] sowie die amerikanische Standardisierungsbehörde NIST [3] – geht davon aus, dass kryptografisch relevante Quantencomputer (Cryptographically Relevant Quantum Computers, CRQC) mit hoher Wahrscheinlichkeit innerhalb der nächsten zehn bis 15 Jahre realisierbar sein werden. Für Infrastrukturen mit Betriebslaufzeiten jenseits dieser Zeitspanne besteht damit bereits heute Handlungsbedarf.

In der allgemeinen Cybersicherheitsdiskussion wird häufig der sogenannte HNDL-Angriff als zentrales Argument für eine sofortige PQC-Migration angeführt: Angreifer zeichnen heute verschlüsselte Kommunikation auf und entschlüsseln sie retrospektiv, sobald ein CRQC verfügbar ist. Im Kontext des digitalen Bahnbetriebs ist diese Bedrohung jedoch differenziert zu bewerten.

Steuersignale (Stellbefehle für Weichen, Fahrterlaubnisse, Signalbefehle) sind sogenannte „ephemere“ Daten: Eine abgefangene und gespeicherte Fahrterlaubnis von vor zehn Jahren hat keinerlei operativen Wert – sie kann nicht wiederverwendet werden und enthüllt keine schützenswerten Langzeitgeheimnisse. HNDL ist daher für die operative Datenkommunikation bei der LST in aller Regel nicht relevant. Schutzbedürftig gegenüber HNDL sind hingegen beispielsweise:

- Kryptografisches Schlüssel- sowie Zertifikatsmaterial (wie private kryptografische Schlüssel etc.)
- Langlebige Konfigurationsdaten mit sicherheitsrelevanten Parametern
- Firmware-Signierschlüssel (ermöglicht spätere Impersonation von Komponenten).

Der primäre Treiber für PQC-Migration in Bahnsicherungssystemen ist daher nicht HNDL, sondern die Sicherheit der Authentifizierung der Kommunikationspartner sowie der Integrität der übertragenen Nachrichten zum Zeitpunkt des Betriebs eines CRQC: Ein leistungsfähiger Quantencomputer könnte RSA- und ECC-basierte Signaturen in Echtzeit brechen und so die Impersonation legitimer Systemkomponenten ermöglichen oder die Integrität der übertragenen Daten gefährden. Dies stellt eine unmittelbare Betriebsgefahr dar. Daneben bleibt die Langzeitsicherheit kryptografischen Schlüsselmaterials – etwa von Stammerzertifikaten mit jahrzehntelanger Gültigkeitsdauer – ein realer HNDL-Angriffsvektor, der durch geeignete Schlüsselmanagementpraktiken adressiert werden muss (Tab. 2).

3 Post-Quanten-Kryptografie: Stand der Standardisierung

Das NIST [1, 2] hat nach einem mehrjährigen Evaluierungsprozess im Jahr 2024 die ersten Standards für PQC verabschiedet. Diese

für authenticating the communication participants, key exchanges and message integrity protection via digital signatures) must provide protection throughout this entire period. This makes an early, planned migration to quantum-secure methods essential.

2 Cryptography in signalling and safety technology: areas of application and threats

Modern signalling and safety systems utilise cryptography in various layers of the system architecture. Tab. 1 provides an overview of the key application areas and the methods currently in use.

The current risk assessment by leading authorities, including the Federal Office for Information Security (BSI) [7], the European Union Agency for Cybersecurity (ENISA) [5] and the US National Institute of Standards and Technology (NIST) [3], assumes that cryptographically relevant quantum computers (CRQCs) will most probably become a reality within the next ten to 15 years. There is therefore a need for action today with regard to those infrastructures with operating lifespans extending beyond this timeframe.

In the general discussion on cybersecurity, the so-called “harvest-now-decrypt-later” attack is frequently cited as a key argument for immediate migration to PQC: attackers record encrypted communication today and decrypt it retroactively as soon as a CRQC becomes available. However, this threat must be assessed on a case-by-case basis within the context of digital railway operations.

Control signals (commands for points, movement authorisations and signal indications) are known as “ephemeral” data: a movement authorisation from ten years ago that has been intercepted and stored has no operational value, as it cannot be reused and does not reveal any long-term secrets worthy of protection. HNDL is therefore generally not relevant to operational data communication in CCS (Control-Command and Signalling). By contrast, the following items require protection against HNDL, for example:

- cryptographic keys and certificate material (such as private cryptographic keys, etc.)
- long-lived configuration data containing security-relevant parameters
- firmware signing keys (enabling the subsequent impersonation of components).

The primary driver for PQC migration in railway signalling systems is therefore not HNDL, but rather the authentication security of communication partners and the integrity of the transmitted messages at the time a CRQC is in operation: a powerful quantum computer could break RSA and ECC based signatures in real time, thereby enabling the impersonation of legitimate system components or compromising the integrity of the transmitted data. This poses an immediate operating risk. In addition, the long-term security of cryptographic key material, such as root certificates with a validity period spanning decades, remains a real HNDL attack vector that must be addressed through appropriate key management practices (tab. 2).

3 Post-quantum cryptography: the status of standardisation

The NIST [1, 2] adopted the first standards for PQC in 2024 following a multi-year evaluation process. They form the basis for migrations in security-critical systems:

- FIPS 203 (ML-KEM, based on CRYSTALS-Kyber): Key encapsulation and key exchange
- FIPS 204 (ML-DSA, based on CRYSTALS-Dilithium): Digital signatures, primary recommendation

Datentyp / Angriffsfläche	HNDL-Relevanz	Dominanter Bedrohungsvektor
Steuersignale, Fahrerlaubnisse (MA)	Keine / sehr gering	Datenauthentizität / -integrität
Weichen- / Signalstellbefehle	Keine	Datenauthentizität / -integrität
Sitzungsschlüssel (TLS-Session)	Gering (kurzlebig)	Echtzeit-Entschlüsselung
Zertifikate & CA-Schlüssel	Hoch (langlebig)	HNDL + Impersonation
Firmware-Signierschlüssel	Hoch	Langfristige Impersonation
Konfigurationsdaten (langfristig)	Mittel-hoch	HNDL

Tab. 2: Differenzierte Bedrohungsbewertung nach Datentyp

bilden die Grundlage für eine Migration in sicherheitskritischen Systemen:

- FIPS 203 (ML-KEM, basierend auf CRYSTALS-Kyber): Schlüsselkapselung und Schlüsselaustausch
- FIPS 204 (ML-DSA, basierend auf CRYSTALS-Dilithium): Digitale Signaturen, Primärempfehlung
- FIPS 205 (SLH-DSA, basierend auf SPHINCS+): Digitale Signaturen, hashbasiert, konservativere Sicherheitsannahmen
- FIPS 206 (FN-DSA, basierend auf FALCON): Digitale Signaturen, besonders kompakte Signaturen

Das BSI empfiehlt in seiner technischen Richtlinie BSI TR-02102 [1] ergänzend den Einsatz von Verfahren FrodoKEM (konservativer gitterbasierter Ansatz) für hochsicherheitsrelevante Anwendungen sowie von Classic McEliece, ML-KEM und HQC. Im europäischen Bahnbereich sind die Empfehlungen der ERA (European Union Agency for Railways) und die Fortschreibung der ETCS-Spezifikationen (System Requirement Specification, SRS) zu berücksichtigen. Letztgenannte werden durch die EU Rail System Pillar Cybersecurity Domain vorangetrieben und sehen Grundlagen für die PQC-Integration bereits vor. Hier wird kryptografische Agilität (siehe Option 3) vorgesehen.

Für die LST stellt die Migration hin zu PQC aufgrund ihrer Eigenschaften eine besondere Herausforderung dar: So sind die kryptografischen Schlüssel, Signaturen und Zertifikate meist länger als in klassischen Verfahren, der Rechenaufwand auf eingebetteten Prozessoren ist oft höher, und die Kompatibilität mit bestehenden Protokollen ist nur eingeschränkt gegeben.

Im Rahmen des Forschungsprojekts QUDIS [14], finanziert durch das Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR), wurden verschiedene grundlegende Migrationsstrategien identifiziert und bewertet. Die Wahl der geeigneten Option hängt von der Systemarchitektur, dem Lebenszyklusstadium, den verfügbaren Ressourcen und den regulatorischen Anforderungen ab.

3.1 Option 1: Big-Bang-Migration

Bei dieser Strategie wird das gesamte kryptografische Fundament der betreffenden Systeme in einem einzigen Schritt vollständig auf PQC-Algorithmen umgestellt. Alle Zertifikate, Schlüsselmaterial und Protokollimplementierungen werden gleichzeitig ersetzt. Dies kann auch den Tausch eines eingesetzten Hardwaresicherheitsmoduls (HSM) erfordern, sofern es die PQC-Verfahren nicht unterstützt.

Diese Option bietet konzeptionelle Klarheit, ist in der Praxis für sicherheitskritische Bahnanlagen jedoch mit erheblichen Risiken verbunden: Die Komplexität der simultanen Umstellung über mehrere Systemgrenzen hinweg, die notwendige Koordination

Data type / attack surface	HNDL relevance	Dominant threat vector
Control-signals, Movement Authority (MA)	None / very low	Data authenticity / integrity
Points and signal control commands	None	Data authenticity / integrity
Session key (TLS session)	Low (short-lived)	Real-time decryption
Certificates & CA keys	High (long-lived)	HNDL + impersonation
Firmware signing key	High	Long-term impersonation
Configuration data (long-term)	Medium-high	HNDL

Tab. 2: A differentiated threat assessment by data type

- FIPS 205 (SLH-DSA, based on SPHINCS+): Digital signatures, hash-based, more conservative security assumptions
- FIPS 206 (FN-DSA, based on FALCON): Digital signatures, particularly compact signatures

The BSI also recommends the use of the FrodoKEM method (a more conservative lattice-based approach) for applications with high security requirements, as well as Classic McEliece, ML-KEM and HQC, in its BSI TR-02102 technical guideline [1]. In the European rail sector, the recommendations of the ERA (European Union Agency for Railways) and the updates to the ETCS specifications (System Requirement Specification, SRS) must also be taken into account. The latter are being driven forward by the EU Rail System Cybersecurity Domain Pillar and have already laid the groundwork for the integration of PQC. Cryptographic agility (see Option 3) is envisaged here.

The migration to PQC poses a particular challenge for CCS due to its characteristics: for instance, the cryptographic keys, signatures and certificates are usually longer than in traditional methods, the computational load on the embedded processors is often higher and the compatibility with existing protocols is limited.

Various fundamental migration strategies have been identified and evaluated under the QUDIS research project [14] funded by the Federal Ministry of Research, Technology and Space (BMFTR). The choice of the appropriate option depends on the system architecture, the lifecycle stage, the available resources and the regulatory requirements.

3.1 Option 1: Big-Bang migration

Under this strategy, the entire cryptographic foundation of the systems in question is completely migrated to PQC algorithms in a single step. All the certificates, key material and protocol implementations are replaced simultaneously. This may also require the replacement of any hardware security modules (HSMs) in use, provided they do not support PQC schemes.

While this option offers conceptual clarity, in practice it entails considerable risks for safety-critical railway systems: the complexity of a simultaneous migration across multiple system boundaries, the necessary coordination of all the system suppliers and the significant validation and approval effort involved make this option impractical for existing systems. However, it may be considered for entirely new developments.

3.2 Option 2: hybrid migration (recommended)

Hybrid migration combines classic and post-quantum algorithms within a single cryptographic protocol. A hybrid key ex-

aller Systemlieferanten sowie der hohe Validierungs- und Zusageaufwand machen diese Option für Bestandssysteme wenig praktikabel. Sie kann jedoch für vollständige Neuentwicklungen in Betracht gezogen werden.

3.2 Option 2: Hybride Migration (empfohlen)

Die hybride Migration kombiniert klassische und Post-Quanten-Algorithmen in einem gemeinsamen kryptografischen Protokoll. Ein hybrides Schlüsselaustauschverfahren nutzt beispielsweise sowohl klassische als auch quantensichere Verfahren, wobei die resultierende Sitzungsschlüsselableitung beide Algorithmen einschließt. Ein Angriff erfordert das simultane Brechen beider Verfahren.

Dieser Ansatz ermöglicht eine schrittweise Einführung, bei der zunächst hybride Zertifikatsketten und Protokolle eingeführt und erst in einem späteren Schritt die klassischen Komponenten deaktiviert werden. Gleichzeitig bietet er das höchste Sicherheitsniveau während der Übergangsphase, da er gegen klassische und quantenmechanische Angriffe gleichermaßen schützt. Die IETF-Standards für hybrides TLS [6] und die BSI-Leitlinien unterstützen diesen Ansatz ausdrücklich.

3.3 Option 3: Kryptografische Agilität (empfohlen)

Kryptografische Agilität bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, kryptografische Algorithmen ohne tiefgreifende Systemänderungen austauschen zu können. Dies erfordert eine konsequente Abstraktion kryptografischer Operationen in der eingesetzten Hardware und Software sowie die Vermeidung spezifischer fest vorgegebener Parameter in Protokollimplementierungen und Zertifikatsketten.

Im Bahnkontext bedeutet dies: Kryptografische Algorithmen sowie deren Parameter (wie Schlüssellängen oder Zertifikatsformate) werden konfigurierbar gestaltet und sind über gesicherte Update-Mechanismen aktualisierbar. Eine kryptografisch agile Architektur ermöglicht es, auf zukünftige Erkenntnisse zur PQC-Sicherheit zu reagieren – etwa wenn einzelne standardisierte Algorithmen kryptoanalytisch geschwächt oder gebrochen werden. Wir empfehlen die kryptografische Agilität als grundlegendes Architekturprinzip für alle neuen und erneuerten Systeme der LST.

3.4 Option 4: Stufenweise Migration

Bei der stufenweisen Migration werden Komponenten und Teilsysteme priorisiert und sequenziell migriert. Ausgangspunkt ist eine Risikobewertung: Welche kryptografischen Verbindungen schützen langlebiges Schlüsselmaterial oder ermöglichen Authentifizierung? Welche Systemteile nähern sich ohnehin einem Erneuerungszeitpunkt?

Dieser Ansatz erlaubt eine flexible Planung und verteilt den Migrationsaufwand über mehrere Projektzyklen. Er birgt jedoch das Risiko, heterogene Übergangszustände zu schaffen, in denen quantenvulnerable und quantensichere Komponenten parallel betrieben werden müssen. Geeignete Interoperabilitätsprotokolle und klare Schnittstellendefinitionen sind daher unabdingbar.

3.5 Option 5: Kanalweise Migration über Blau- / Grau-Redundanz (stellwerksspezifisch)

Digitale Stellwerke sind in ihrer Architektur grundsätzlich redundant ausgelegt. Die Kommunikation zwischen dem Stellwerk selbst und den Feldelementen erfolgt typischerweise über zwei voneinander unabhängige Datenkanäle – typischerweise als Blau-Kanal und Grau-Kanal bezeichnet. Beide Kanäle übertragen iden-

change scheme, for example, utilises both classic and quantum-secure methods with the resulting session key derivation incorporating both algorithms. An attack would require both methods to be simultaneously broken.

This approach enables a phased rollout, in which the hybrid certificate chains and protocols are introduced first, with the classic components only being deactivated at a later stage. At the same time, this offers the highest level of security during the transition phase, as it provides protection against both classic and quantum attacks. The IETF standards for hybrid TLS [6] and the BSI guidelines explicitly support this approach.

3.3 Option 3: cryptographic agility (recommended)

Cryptographic agility refers to a system's ability to replace cryptographic algorithms without requiring any far-reaching system changes. This requires the consistent abstraction of cryptographic operations in the used hardware and software, as well as the avoidance of any specific, hard-coded parameters in protocol implementations and certificate chains.

Within the railway context, this means that cryptographic algorithms and their parameters (such as key lengths or certificate formats) are designed to be configurable and to be updated via secure update mechanisms. A cryptographically agile architecture makes it possible to respond to any future findings regarding PQC security: for example, if individual standardised algorithms are found to have been cryptographically weakened or broken. We recommend cryptographic agility as a fundamental architectural principle for all new and upgraded CCS systems.

3.4 Option 4: phased migration

In a phased migration, components and subsystems are prioritised and migrated sequentially. The starting point is a risk assessment: which cryptographic connections protect long-lived key material or enable authentication? Which system components are approaching a renewal date anyway?

This approach allows flexible planning and spreads the migration effort across several project cycles. However, it carries the risk of creating heterogeneous transitional states in which quantum-vulnerable and quantum-secure components must be operated in parallel. Suitable interoperability protocols and clear interface definitions are therefore essential.

3.5 Option 5: channel-by-channel migration via blue / grey redundancy (interlocking-specific)

Digital interlockings are fundamentally designed with redundancy in their architecture. The communication between the interlocking itself and the field elements typically takes place via two independent data channels, usually referred to as the blue channel and the grey channel. Both channels transmit identical control information. This inherent channel redundancy opens up a migration option that is unique to the CCS sector.

The idea is as follows: only the blue channel is initially migrated to PQC algorithms. The grey channel continues to use traditional cryptographic methods for the time being. During ongoing operations, both channels continue to be used in parallel; field elements that do not yet support a PQC implementation continue to communicate validly via the grey channel. Following a defined trial phase for the migrated blue channel, the grey channel is also migrated to PQC in a second step.

This offers several advantages from an operating perspective. Not only is it possible to fall back on the grey channel in the event

Migrations-option	Komplexität	Sicherheits-niveau	Zulassungsaufwand	Betriebsrisiko	Empfehlung
Big-Bang-Migration	Sehr hoch	Sofort hoch	Vollständig neu	Sehr hoch	X
Hybride Migration	Mittel	Sehr hoch	Erweiterung	Mittel	★★
Krypto-Agilität	Mittel-hoch	Flexibel	Einmalig + Updates	Niedrig	★★
Stufenweise Migration	Niedrig-mittel	Graduell	Inkrementell	Mittel	○
Kanalweise Migration (Blau / Grau)	Niedrig-mittel	Hoch (mit Fallback)	Inkrementell	Sehr niedrig	★★★

Tab. 3: Vergleich der Migrationsoptionen

Migration option	Complexity	Safety level	Approval effort	Operating risk	Recommendation
Big-Bang migration	Very high	High from the outset	Completely new	Very high	X
Hybrid migration	Medium	Very high	Extension	Medium	★★
Crypto-agility	Medium-high	Flexible	One-off + updates	Low	★★
Phased migration	Low-medium	Gradual	Incremental	Medium	○
Channel-by-channel migration (blue / grey)	Low-medium	High (with fallback)	Incremental	Very low	★★★

Tab. 3: A comparison of the migration options

tische Steuerinformationen. Diese inhärente Kanalredundanz eröffnet eine im Bereich der LST einzigartige Migrationsmöglichkeit. Die Idee: In einem ersten Schritt wird ausschließlich der Blau-Kanal auf PQC-Algorithmen umgestellt. Der Grau-Kanal verwendet zunächst weiter die klassischen kryptografischen Verfahren. Im laufenden Betrieb werden beide Kanäle weiterhin parallel genutzt; Feldelemente, die noch keine PQC-Implementierung unterstützen, kommunizieren weiterhin valide über den Grau-Kanal. Nach einer definierten Erprobungsphase des migrierten Blau-Kanals wird in einem zweiten Schritt auch der Grau-Kanal auf PQC umgestellt.

Aus betrieblicher Sicht hat dies mehrere Vorteile. Nicht nur bleibt bei Problemen mit der PQC-Migration im Blau-Kanal der Rückfall auf den Grau-Kanal möglich. Sondern auch könnte so mit geringen Sperrzeiten eine Migration durchgeführt werden.

Voraussetzung ist, dass die Kanalarchitektur des jeweiligen Stellwerkssystems eine unabhängige kryptografische Konfiguration je Kanal erlaubt und dass die Sicherheitsnachweisführung für den Mischbetrieb (ein Kanal bereits PQC, ein Kanal noch klassisch) im Safety Case abgebildet werden kann.

Tab. 3 fasst die oben besprochenen fünf Optionen anhand wesentlicher Bewertungskriterien zusammen.

4 Auswirkungen auf die Zulassung

Digitale Stellwerke unterliegen in Deutschland und Europa einem umfassenden Zulassungsregime. Für Übertragungssysteme der LST ist primär die EN 50159 [11,12] zu nennen, die unter anderem beschreibt, wie sicherheitsgerichtete Kommunikation über offene Netze erfolgen kann. Kann eine gezielte Manipulation von Nachrichten nicht ausgeschlossen werden, fordert diese den Einsatz kryptografischer Verfahren als Schutzmaßnahme. Die Norm ist jedoch algorithmenneutral formuliert und schreibt keine spezifischen Verfahren vor. Dies eröffnet grundsätzlich die Möglichkeit, PQC-Algorithmen als Ersatz oder Ergänzung einzusetzen.

Jede Änderung an einem zulassungspflichtigen System der LST löst in der Regel erneute Zulassungsschritte aus. Um die bei der Nutzung von Kryptografie sowie Komponenten der IT-Sicherheit nötigen schnelleren Entwicklungszyklen abbilden zu können, sieht die aktuelle Sektorleitlinie für die Zulassungsbewertung von Signal-, Telekommunikations- und elektrotechnischen Anlagen

of any problems with the PQC migration in the blue channel, but the migration can also be carried out with minimal downtime.

A prerequisite is that the channel architecture of the given interlocking system allows for an independent cryptographic configuration per channel and that the safety case can demonstrate the safety of mixed operations (one channel already using PQC, one channel still using the traditional method).

Tab. 3 summarises the five options discussed above on the basis of the key evaluation criteria.

4 The impact on approval

Digital interlockings are subject to a comprehensive approval regimen in Germany and Europe. The primary standard for CCS transmission systems is EN 50159 [11,12], which, amongst other things, describes how safety-critical communication can take place over open networks. If the targeted manipulation of messages cannot be ruled out, this standard requires the use of cryptographic methods as a protective measure. However, the standard is formulated in an algorithm-neutral manner and does not prescribe any specific methods. This, in principle, opens the possibility of using PQC algorithms as a replacement or supplement. Any change to a CCS system subject to approval generally triggers a new approval process. In order to accommodate the faster development cycles required when using cryptography and IT security components, the current sector guideline for the approval assessment of signalling, telecommunications and electrical systems [13] provides for the separation of the assessment from the perspectives of functional safety and IT security.

In the case of products that have already been assessed in accordance with the new sector guideline, a change to the used cryptographic methods will generally only require a reassessment of the IT security if the change can be implemented via a software update. The use of algorithms standardised by the NIST (FIPS 203–206) and the recommendations of the BSI (TR-02102-1) provide a robust basis for a positive assessment.

The sector guideline also stipulates that the process for an “IT security patch” must be defined at the time of the authorisation assessment; this serves to ensure the ongoing maintenance of IT security and enables a patch to be applied as part of routine maintenance without the need for a new expert assessment. One

[13] eine Trennung der Bewertung aus den Gesichtspunkten der funktionalen Sicherheit sowie der IT-Sicherheit vor.

Bei Produkten, die bereits nach der neuen Sektorleitlinie zugelassen wurden, wird eine Änderung der genutzten kryptografischen Verfahren in der Regel nur eine Neubewertung der IT-Sicherheit erfordern, wenn die Änderung durch ein Softwareupdate erfolgen kann. Die Nutzung von durch die NIST standardisierten Algorithmen (FIPS 203–206) sowie die Empfehlungen des BSI (TR-02102-1) schaffen eine belastbare Grundlage für eine positive Begutachtung.

Die Sektorleitlinie sieht zudem vor, dass bereits bei der Zulassungsbewertung ein Prozess für einen "IT-Security Patch" definiert wird, der der dauerhaften Aufrechterhaltung der IT-Sicherheit dient und der ein Einspielen eines Patches im Rahmen einer Instandhaltungsarbeit ohne neuerliche gutachterliche Bewertung ermöglicht. Voraussetzung ist unter anderem, dass der Patch lediglich die IT-Sicherheit betrifft und bereits bei der initialen Zulassungsbewertung die notwendigen Prüfschritte festgelegt wurden, die die Eignung des Patches feststellen und die garantieren, dass durch das Einspielen des Patches die Funktion des Systems nicht beeinträchtigt wird (Rückwirkungsfreiheit auf die funktionale Sicherheit). Als "IT-Security Patch" kann prinzipiell auch der Tausch der genutzten kryptografischen Verfahren im Sinne der kryptografischen Agilität umgesetzt werden.

Eine besondere Herausforderung stellen Hardware Security Module (HSM) und kryptografisch zertifizierte Komponenten dar. Bestehende etwa FIPS 140-2/3-zertifizierte HSM müssen PQC-Algorithmen nicht notwendigerweise unterstützen. Die Nutzung eines neuen, für PQC ausgelegten HSM kann daher eine neue Komponentenzulassung und – je nach Integrationstiefe – eine angepasste Systemzulassung erfordern. Wir empfehlen, bei der Planung neuer Beschaffungen die Unterstützung normierter PQC-Verfahren explizit als Anforderungskriterium für HSM und kryptografische Co-Prozessoren aufzunehmen. Bereits heute bieten viele Hersteller HSM-Produkte mit PQC-Unterstützung an oder haben entsprechende Roadmaps kommuniziert.

Zu beachten sind auch Aspekte der europäischen Interoperabilität: Eine PQC-Migration auf nationaler Ebene muss daher die Fortschreibung der ERA-Spezifikationen und der TSI ZZS berücksichtigen. Die ERA hat beispielsweise bereits 2024 eine Arbeitsgruppe zur Evaluierung von PQC im Kontext von ETCS eingesetzt. Bis zur vollständigen Verankerung in den europäischen Spezifikationen empfehlen wir, nationale Migrationsmaßnahmen so auszugestalten, dass Rückwärtskompatibilität mit bestehenden Systemen über Übergangsfristen sichergestellt bleibt.

5 Handlungsempfehlungen

Auf Basis der bisherigen Erkenntnisse werden folgende Maßnahmen für Systemverantwortliche und Hersteller empfohlen:

1. Krypto-Inventur mit Datenkategorisierung: Alle genutzten kryptografischen Verfahren erfassen und je nach Schutzbedarf klassifizieren, wobei insbesondere zwischen langlebigem Schlüssel- und Zertifikatsmaterial (hohe Priorität) und ephemeren Steuersignalen (nachrangige Priorität) unterschieden werden sollte.
2. Kryptografische Agilität als Designprinzip verankern: Kryptografische Abstraktion in Neu- und Erneuerungsprojekten verbindlich vorschreiben und Systeme so gestalten, dass ein Wechsel der kryptografischen Algorithmen mit geringem Aufwand möglich ist. Security-by-design ist die nach IEC 62443 verbreitete Design-Grundlage, um dies umzusetzen.
3. Hybride Einführungsstrategie planen: Neue Verfahren zunächst zusätzlich einführen, bevor klassische Verfahren schrittweise zurückgenommen werden.

of the prerequisites is that the patch relates solely to IT security and that the necessary verification steps were already defined during the initial authorisation assessment; these steps determine the suitability of the patch and guarantee that applying the patch will not impair the system's functionality (no adverse effects on functional safety). In principle, the replacement of the used cryptographic methods, in the spirit of cryptographic agility, can also be implemented as an "IT security patch".

Hardware Security Modules (HSMs) and cryptographically certified components present a particular challenge. Existing HSMs, such as those certified to FIPS 140-2/3, do not necessarily support PQC algorithms. The use of a new HSM designed for PQC may therefore require a new component certification and, depending on the level of integration, an adapted system certification. When planning new procurements, we recommend explicitly including support for standardised PQC schemes as a requirement for HSMs and cryptographic co-processors. Many manufacturers already offer HSM products with PQC support or have announced corresponding roadmaps.

The aspects of European interoperability must also be taken into account: a PQC migration at a national level must therefore consider any updates to the ERA specifications and the TSI for Signalling and Traffic Control. For example, the ERA already set up a working group in 2024 to evaluate PQC within the context of ETCS. Until PQC is fully incorporated into the European specifications, we recommend that national migration measures be designed in such a way as to ensure backward compatibility with the existing systems throughout the transitional periods.

5 Recommendations for action

Based on the findings to date, the following measures are recommended for system operators and manufacturers:

1. Cryptographic inventory with data categorisation: record all the cryptographic methods in use and classify them according to the protection requirements, making a particular distinction between long-lived key and certificate material (high priority) and ephemeral control signals (lower priority).
2. Embed cryptographic agility as a design principle: make cryptographic abstraction mandatory in new and renewal projects and design systems in such a way that cryptographic algorithms can be changed with minimal effort. "Security by design" is the design principle widely adopted to implement this in accordance with IEC 62443.
3. Plan a hybrid implementation strategy: first introduce the new procedures in addition to the existing ones, before gradually phasing out any traditional procedures.
4. Coordinate the authorisation strategy at an early stage: initiate dialogue with the Federal Railway Authority (EBA), the ERA and the national authorities.
5. Immediately issue procurement tenders that are PQC-capable: PQC capability should already be a key criterion, particularly for HSMs, PKI components, update infrastructure and communication gateways.

6 Conclusion and outlook

The migration to PQC in signalling and safety systems is not a question of "if", but only of "when" and "how". The primary driver of the migration is not, as is often simplistically portrayed, the harvest-now-decrypt-later attack on control signals, but rather the authentication of communication partners and

4. Zulassungsstrategie frühzeitig abstimmen: Dialog mit Eisenbahn-Bundesamt (EBA), ERA und nationalen Behörden aufnehmen.

5. Beschaffungen sofort PQC-fähig ausschreiben: Besonders bei HSM, PKI-Komponenten, Update-Infrastruktur und Kommunikationsgateways sollte PQC-Fähigkeit bereits jetzt ein wichtiges Kriterium sein.

6 Fazit und Ausblick

Die Migration zur PQC in Systemen der LST ist keine Frage des Ob, sondern nur des Wann und Wie. Der primäre Treiber der Migration ist nicht – wie häufig vereinfacht dargestellt – der HNDL-Angriff auf Steuersignale, sondern die Authentifikation der Kommunikationspartner und die Integrität von Nachrichten: Sobald ein kryptografisch relevanter Quantencomputer existiert, können RSA- und ECC-basierte Identitätsnachweise in Echtzeit gebrochen werden, was die Impersonation von kritischen Systemkomponenten oder die Manipulation übermittelter Daten ermöglicht. Dieser Bedrohungsvektor erfordert proaktives Handeln innerhalb des laufenden Systemlebenszyklus.

Im laufenden Projekt QUDIS [14] werden Strategien zur Migration klassischer kryptografischer Verfahren auf PQC-Verfahren erforscht und praktisch in einem Testfeld erprobt. Der Fokus der Arbeiten liegt dabei nicht nur auf der technischen Integration, sondern auch in der Berücksichtigung betrieblicher und regulatorischer Aspekte. So ist auch die Entwicklung eines Leitfadens für Bahnbetreiber geplant. Die Ergebnisse sollten 2027 vorliegen und werden Vorschläge und Erkenntnisse an relevante Standardisierungs- und Normungsgremien (EU System Pillar, CENELEC TC9X, ERA) und Behörden herantragen. ■

message integrity: as soon as a cryptographically relevant quantum computer exists, RSA and ECC based identity verifications can be broken in real time, thereby enabling the impersonation of critical system components or the manipulation of transmitted data. This threat vector requires proactive action within the ongoing system lifecycle.

The ongoing QUDIS project [14] is investigating strategies for migrating traditional cryptographic methods to PQC methods and testing them in practice in a test environment. The focus of the work is not only on technical integration, but also on taking the operating and regulatory aspects into account. Plans are therefore in place to develop a guide for rail operators. The results are expected to be available in 2027 and will present proposals and findings to the relevant standardisation bodies (EU System Pillar, CENELEC TC9X, ERA) and authorities. ■

LITERATUR | LITERATURE

- [1] NIST: Post-Quantum Cryptography – FIPS Approved / FIPS 203–205. National Institute of Standards and Technology, 2024. <https://csrc.nist.gov/news/2024/postquantum-cryptography-fips-approved>
- [2] NIST: Post-Quantum Cryptography Standardization Process – FIPS 206 in Entwicklung, Stand Juni 2026. National Institute of Standards and Technology, laufend. <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/post-quantum-cryptography-standardization>
- [3] NIST IR 8547 (Draft): Transition to Post-Quantum Cryptography Standards. National Institute of Standards and Technology, 2024. <https://csrc.nist.gov/pubs/ir/8547/ipd>
- [4] BSI: TR-02102-1 – Kryptographische Verfahren: Empfehlungen und Schlüssellängen, Version 2026-01. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2026. https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Publications/TechGuidelines/TG02102/BSI-TR-02102-1.pdf?__blob=publicationFile&v=14
- [5] ENISA: Post-Quantum Cryptography: Current State and Quantum Mitigation. European Union Agency for Cybersecurity, 2021. <https://www.enisa.europa.eu/publications/post-quantum-cryptography-current-state-and-quantum-mitigation>
- [6] IETF: Hybrid Key Exchange in TLS 1.3. Internet Engineering Task Force, 2026. <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-ietf-tls-hybrid-design/>
- [7] BSI: Migration zu Post-Quanten-Kryptografie – Handlungsempfehlungen. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2020. <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Krypto/Post-Quanten-Kryptografie.html>
- [8] ERA: SUBSET-146 – ERTMS End-to-End Security, Version 4.0.0. European Union Agency for Railways, 05.07.2023. <https://www.era.europa.eu/era-folder/1-ccs-tsi-appendix-mandatory-specifications-etcs-b4-r1-rmr-gsm-r-b1-mr1-frmcs-b0-ato-b1>
- [9] ERA: SUBSET-137 – On-line Key Management FFFIS, Version 4.0.0. European Union Agency for Railways, 05.07.2023. <https://www.era.europa.eu/era-folder/1-ccs-tsi-appendix-mandatory-specifications-etcs-b4-r1-rmr-gsm-r-b1-mr1-frmcs-b0-ato-b1>
- [10] ERA: System Requirements Specification for ETCS, Baseline 3 Release 2. European Union Agency for Railways, 2023. <https://www.era.europa.eu/era-folder/1-ccs-tsi-appendix-mandatory-specifications-etcs-b4-r1-rmr-gsm-r-b1-mr1-frmcs-b0-ato-b1>
- [11] EN 50159:2010+A1:2020: Railway Applications – Communication, Signalling and Processing Systems – Safety-Related Communication in Railway Systems. CENELEC
- [12] EN 50129:2018: Railway Applications – Communication, Signalling and Processing Systems – Safety Related Electronic Systems for Signalling. CENELEC
- [13] Eisenbahn-Bundesamt: Sektorleitlinie für die Zulassungsbewertung von Signal-, Telekommunikations- und Elektrotechnischen Anlagen, Ausgabe 2.0. Eisenbahn-Bundesamt, 2024. https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Infrastruktur/AllgemeineVorschriften/VV_GluV/Sektorleitlinie/22_Sektorleitlinie.html
- [14] QUDIS – Quantensichere Digitale Schiene. Verbundprojekt, <https://www.qudis.de/>

AUTOREN | AUTHORS

Dr.-Ing. Daniel Zelle

Senior Security Expert

Incyde GmbH

Anschrift/Address: Rheinstraße 16a, D-64283 Darmstadt

E-Mail: daniel.zelle@incyde.com

Prof. Dipl.-Ing. Dr. Stefan Katzenbeisser

Founder and Head of Railway Security Research

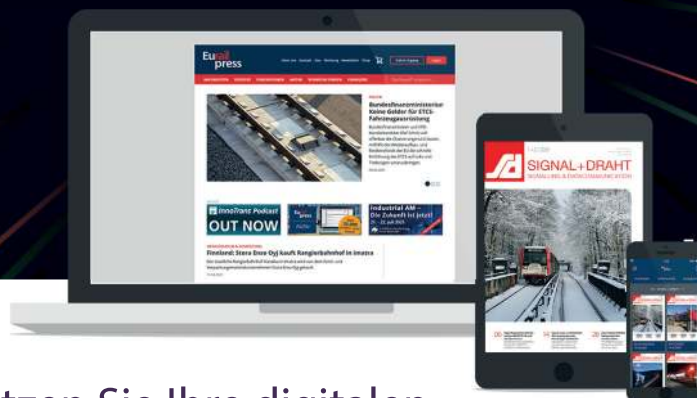
Incyde GmbH

Anschrift/Address: Herzog-Wilhelm-Straße 19x, D-80331 München

E-Mail: stefan.katzenbeisser@incyde.com

DIGITAL

IST EINFACH SCHNELLER



Nutzen Sie Ihre digitalen
SIGNAL+DRAHT-Services
und -Leistungen und lesen Sie bereits
am Vortag die Neuigkeiten von morgen.

JETZT FREISCHALTEN

www.eurailpress.de/sd-digital



Normkonforme Werkzeugvalidierung – zielgerichtet und effizient

Standard-compliant tool validation – targeted and efficient

Katharina Prochazka | David Seider | Benedikt Wenzel

Die Normen EN 50129 und EN 50716 fordern eine Qualifizierung von Entwicklungswerkzeugen im Bahnbereich, um Fehler im Endprodukt zu verhindern. Grundlagen dazu erläutert ein vorangegangener Beitrag der Autoren [1]. Die Werkzeugvalidierung ist eine anerkannte Qualifizierungsmethode für kritische T2/T3-Werkzeuge. Der vorliegende Beitrag beschreibt die normativen Anforderungen, veranschaulicht die praktische Umsetzung anhand zweier Beispiele und gibt Tipps für eine zielgerichtete Durchführung.

1 Einleitung

Bei der Entwicklung von Bahnanwendungen (im Bahnumfeld eingesetzten Systemen bzw. Softwareanwendungen) werden häufig Werkzeuge (Tools) genutzt, die bestimmte Funktionen im Entwicklungsprozess ausführen oder unterstützen. Insbesondere bei sicherheitsrelevanten Anwendungen ist es daher wichtig, dass diese Werkzeuge keine Fehler in das Endprodukt einbringen, weshalb auch die Normen EN 50129 [2] und EN 50716 [3] für sicherheitsrelevante Anwendungen Anforderungen an die Werkzeugnutzung definieren. Die EN 50129 befasst sich dabei mit Werkzeugen in der Systementwicklung, die EN 50716 mit Werkzeugen in der Softwareentwicklung. Die Vorgaben sind in beiden Normen vergleichbar, allerdings sind die Anforderungen der EN 50716 an einigen Stellen detaillierter. Zudem verweist die EN 50129 für Softwareaspekte auf die damalige Softwareentwicklungsnorm EN 50128 [4]; diese wurde inzwischen durch die EN 50716 abgelöst. Daher konzentriert sich dieser Beitrag auf EN 50716.

Werkzeugklasse	Definition	Beispiele
T1	Werkzeug ohne Einfluss auf die Bahnanwendung.	Texteditor ohne Codegenerierung, Dateiablagensystem, Werkzeuge für Konfigurationsmanagement.
T2 (in EN 50129: Werkzeuge, die die Sicherheit indirekt beeinflussen)	Werkzeug, das für Tests oder Verifizierung der Bahnanwendung oder Prüfung von Konfigurationsdaten der Bahnanwendung genutzt wird. → Fehler im Werkzeug verursachen keinen Fehler in der Bahnanwendung, aber könnten einen eventuell bestehenden Fehler nicht aufdecken.	Werkzeug für statische Codeanalyse, Testwerkzeuge, Prüfwerkzeuge für Planungs-/Projektiierungsdaten.
T3 (in EN 50129: Werkzeuge, die die Sicherheit direkt beeinflussen)	Werkzeug mit direktem Einfluss auf die Bahnanwendung bzw. ihre Daten. → Fehler im Werkzeug können unmittelbar zu Fehlern in der Bahnanwendung führen.	Entwurfswerkzeuge, Compiler, Codegenerator, Werkzeuge zur Berechnung von Parametern/Projektiierungsdaten für sicherheitsrelevante Funktionen.

Tab. 1: Werkzeugklassen gemäß EN 50716 mit Beispielen

The EN 50129 and EN 50716 standards require the qualification of development tools in the railway sector so as to prevent errors in the final product. The fundamentals of this topic have already been explained in a previous article by the authors [1]. Tool validation is a recognised qualification method for critical T2/T3 tools. This article describes the normative requirements, illustrates the practical implementation using two examples and provides guidance for targeted and efficient accomplishment.

1 Introduction

Tools are often utilised to perform or support specific functions in the development process during the development of railway applications (i.e. systems or software applications used in the railway environment). It is therefore important for safety-relevant applications in particular that these tools do not introduce any errors into the final product, which is why the EN 50129 [2] and EN 50716 [3] standards also set requirements for tool usage in safety-relevant applications. EN 50129 deals with tools in system development, while EN 50716 deals with tools in software development. The specifications in both standards are comparable, although the requirements of EN 50716 are more detailed in some places. Furthermore, EN 50129 refers, for software aspects, to the then-applicable software development standard EN 50128 [4], which has since been replaced by EN 50716. This article will, therefore, focus on EN 50716.

Class	Definition	Examples
T1	a tool with no influence on the railway application.	a text editor without code generation, file storage system, tools for configuration management.
T2 (in EN 50129: tools that indirectly influence safety)	a tool used for testing or verifying a railway application or for checking the configuration data in a railway application. → an error in the tool does not cause an error in the railway application, but could fail to detect a potentially existing error.	a static code analysis tool, test tools, checking tools for planning / configuration data.
T3 (in EN 50129: tools that directly influence safety)	a tool with direct influence on the railway application or its data. → errors in the tool can lead directly to errors in the railway application.	design tools, compilers, code generators, tools for calculating parameters / configuration data for safety-relevant functions.

Tab. 1: The tool classes according to EN 50716 with examples

Die Softwareentwicklungsnorm EN 50716, welche neben der Norm EN 50128 [4] auch die EN 50657 [5] abgelöst hat, klassifiziert Werkzeuge je nach ihrem Einfluss auf die Bahnanwendung bzw. deren Daten als Werkzeuge der Klasse T1, T2 und T3 (Tab. 1). Für jede Toolklasse stellt die Norm Anforderungen, die zusätzlich berücksichtigen, ob die Werkzeuge für die Entwicklung von Funktionen mit Sicherheits-Integritätslevel (Safety Integrity Level, SIL) 1–4 oder Basisintegrität verwendet werden.

Für T3-Werkzeuge und unter Umständen auch für T2-Werkzeuge, die bei der Entwicklung von Funktionen mit SIL 1–4 verwendet werden, ist eine Werkzeugqualifizierung erforderlich. Die Qualifizierung ist der Prozess, der nachweist, dass ein Werkzeug geeignet ist und korrekt funktioniert; dies beinhaltet die Begründung, warum das Werkzeug geeignet ist und wie geplant im Entwicklungsprozess eingesetzt werden darf.

Die EN 50129 und EN 50716 lassen verschiedene Wege für die Qualifizierung zu, darunter die Argumentation auf Basis erfolgreicher Nutzungshistorie („proven in use“), Tooldiversität (Verwendung zweier verschiedener Tools und Vergleich der Ergebnisse) oder die Verifizierung des Werkzeug-Outputs bei jeder Verwendung. Ein weiterer Ansatz, der auf die Absicherung des Werkzeugs selbst abzielt, ist die Werkzeugvalidierung. Bei der Validierung wird das Werkzeug einer umfassenden Prüfung in Form von Tests und Analysen unterzogen. Sie ist besonders in folgenden Fällen sinnvoll:

- bei Werkzeugen, bei denen eine positive Nutzungshistorie nicht verfügbar oder nachweisbar ist (z. B. wegen geringer Einsatzhäufigkeit bahnspezifischer Funktionen)
- bei Werkzeugen, die in mehreren Entwicklungsprojekten mit verschiedenen Toolketten eingesetzt werden sollen
- bei eigens neu entwickelten Werkzeugen, für die eine Spezifikation mit moderatem Aufwand erstellt werden kann
- bei komplexen Werkzeugen mit einem hohen Risiko der Fehlfunktion, für die konkrete, prüfbare Anforderungen existieren
- bei Werkzeugen, für welche keine der anderen Qualifizierungsmethoden mit einem angemessenen Aufwand anwendbar ist (siehe Abschnitt 3.1.1).

2 Normative Vorgaben zur Werkzeugvalidierung

Die zentralen Anforderungen an die Werkzeugvalidierung sind in der Norm EN 50716 im Abschnitt 6.7.4.5 (bzw. in der EN 50129 im Abschnitt 6.3 unter dem Punkt „c) Analyse und Tests der Tools“) festgelegt. Die Norm gibt dabei folgende Punkte vor, lässt aber bewusst Spielraum für die konkrete Umsetzung:

- Angabe des Umfangs der Validierung: Das validierte Werkzeug und die zugehörige Dokumentation (z. B. Handbuch) müssen mit ihren konkreten Versionen identifiziert werden. Außerdem muss angegeben werden, welche Funktionen des Werkzeugs geprüft wurden.
- Testfälle: Bei der Validierung genutzte Testfälle und deren Ergebnisse müssen aufgezeichnet werden.
- Prüfumgebung: Die bei der Werkzeugvalidierung genutzten Werkzeuge und Geräte sind anzugeben.
- Validierungsbericht: Die Aktivitäten und Ergebnisse der Validierung müssen in einem Bericht dokumentiert werden inklusive eines abschließenden Urteils über die Eignung des Werkzeugs. Falls die Validierung nicht bestanden ist, sind die Gründe anzuführen.

Diese Vorgaben zeigen, dass eine sorgfältige Dokumentation aller durchgeführten Schritte entscheidend ist. Es muss eine zum Werkzeug passende Validierungsstrategie gewählt werden, z. B. ein Testkonzept für die systematische Abdeckung der Anforderungen. Tests sind ein zentraler Bestandteil, da sie im Allgemeinen einen stärkeren

The EN 50716 software development standard, which has replaced the EN 50128 [4] and EN 50657 [5] standards, classifies tools as Class T1, T2 and T3 tools according to their influence on a railway application or its data (tab. 1). The standard sets out requirements for each tool class that also consider whether the tools are used for the development of functions with Safety Integrity Level (SIL) 1–4 or Basic Integrity.

Tool qualification is required for T3 tools and, under certain circumstances, also for T2 tools used in the development of functions with SIL 1–4 classification. Qualification is a process that demonstrates that a tool is suitable and functioning correctly; this includes the justification for why the tool is suitable and that it may be used as planned in the development process.

EN 50129 and EN 50716 permit various qualification paths, including argumentation based on a successful use history (“proven in use”), tool diversity (using two different tools and comparing the results) or the verification of the tool output with each use. Another approach, which aims to secure the tool itself, involves tool validation. During validation, the tool is subjected to a comprehensive examination in the form of tests and analyses. This is particularly useful in the following cases:

- for tools where a positive use history is not available or cannot be proven (e.g. due to the infrequent use of railway-specific functions).
- for tools that are to be used in multiple development projects with different toolchains.
- for newly developed tools for which a specification can be created with moderate effort.
- for complex tools with a high risk of incorrect operation, for which concrete, testable requirements exist.
- for tools where none of the other qualification methods is applicable with reasonable effort (see section 3.1.1).

2 Normative requirements for tool validation

The central requirements for tool validation are defined in section 6.7.4.5 of the EN 50716 standard (and in section 6.3 of EN 50129 under item “c) Tool proven by analysis and testing”). The standard specifies the following points, but deliberately leaves room for the specific implementation:

- specifying the validation scope: the validated tool and its associated documentation (e.g., manual) must be identified with its specific versions. The tested tool functions must also be stated.
- the test cases: the test cases used for tool validation and their results must be documented.
- the test environment: the tools and equipment used for the tool validation must be specified.
- the validation report: the validation activities and results must be documented in a report, including a final judgment on the suitability of the tool. If the validation is not passed, the reasons must be stated.

These requirements show that careful documentation of all the performed steps is crucial. A validation strategy must be chosen that is appropriate for the tool, for example, a test concept for the systematic coverage of the requirements. Tests are the central component, as they, in general, provide stronger evidence than purely static analyses. At the same time, it is often not practical to test every conceivable function of a complex tool.

ren Nachweis als rein statische Analysen liefern. Gleichzeitig ist es oft nicht praktikabel, jede erdenkliche Funktion eines komplexen Werkzeugs zu testen.

3 Praxisbeispiele

Um die Umsetzung der normativen Vorgaben in der Praxis zu veranschaulichen, werden im Folgenden zwei Beispiele für Werkzeugvalidierungen beschrieben, wobei das erste systematisch dargestellt wird, während beim zweiten der Fokus auf zusätzliche Besonderheiten gelegt wird.

3.1 Validierung des Tools „Gamma-sim“ zur Berechnung von ETCS-Bremskurvenparametern nach EN 17997

Das erste Beispiel betrachtet die Validierung des Tools „Gamma-sim“, welches bei der Firma quattron GmbH intern entwickelt wurde (siehe Projektbeschreibung [6]). Es ist Teil des Prozesses zur Erstellung von ETCS-Bremskurvenparametern für sogenannte Gamma-Züge.

3.1.1 Werkzeug und Anwendungsfall

Das Tool „Gamma-sim“ wird genutzt, um mittels Monte-Carlo-Simulationen ETCS-Bremskurvenparameter für Gamma-Züge zu berechnen. Die Berechnungen basieren auf den mathematischen Grundlagen der Norm EN 17997 [7]. Konkret leitet „Gamma-sim“ den fahrzeugspezifischen Korrekturfaktor $K_{dry}(C,V,EBCL)$ für trockene Schienen unter Berücksichtigung stochastischer Schwankungen ab. Dieser Faktor gibt das Verhältnis der sicheren zur nominalen Schnell-

3 Real-world examples

Two real-world examples of tool validations are described below in order to illustrate the implementation of the normative requirements in practice. The first example is described in detail, while the second one focuses on additional specifics.

3.1 Validating the “Gamma-sim” tool for calculating ETCS braking curve parameters according to EN 17997

The first example considers the validation of the “Gamma-sim” tool, which has been developed internally at quattron GmbH. It is part of the process for creating ETCS braking curve parameters for so-called gamma trains (see project description [6]).

3.1.1 The tool and its use

The “Gamma-sim” tool is used to calculate ETCS braking curve parameters for Gamma trains by means of Monte Carlo simulations. The calculations are based on the mathematical principles of the EN 17997 [7] standard. Specifically, “Gamma-sim” derives the rolling stock correction factor $K_{dry}(C,V,EBCL)$ for dry rails while considering the stochastic deviations. This factor indicates the ratio of the safe to the nominal emergency brake deceleration. Technically, the tool is implemented as a Python script via a Docker container (fig. 1).

The following assumptions were made given that the “Gamma-sim” tool calculates the parameters for train braking performance:

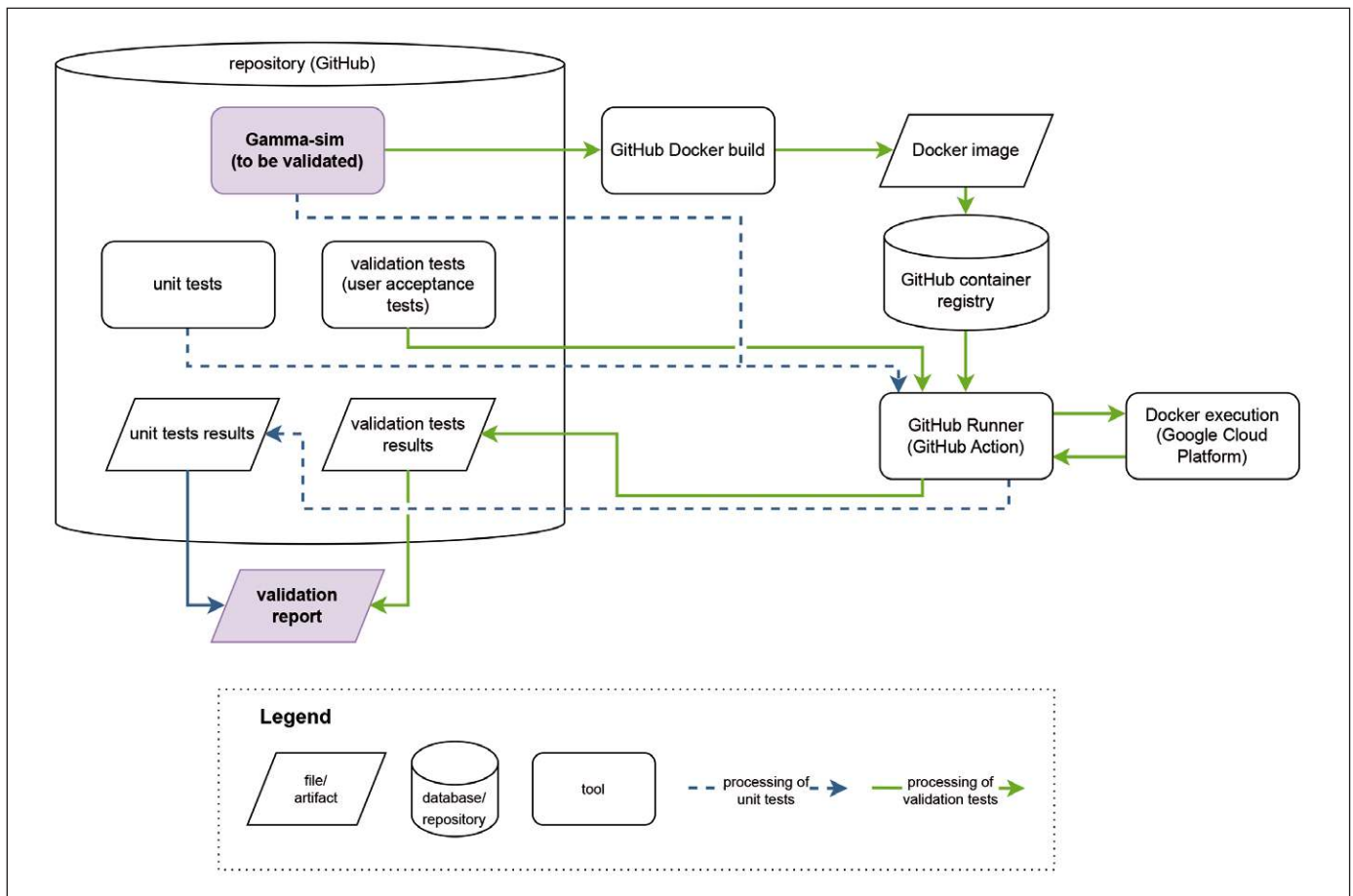


Bild 1: Validierungsaufbau und Werkzeugkette für das Tool „Gamma-sim“

Fig. 1: The validation setup and toolchain for the “Gamma-sim” tool

bremsverzögerung an. Technisch ist das Tool als Python-Skript in einem Docker-Container umgesetzt (Bild 1).

Da das Tool „Gamma-sim“ Parameter für das Bremsvermögen eines Zuges berechnet, wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Das Werkzeug hat einen direkten Einfluss auf das Endprodukt (Bremskurvenparameter des Zuges) und wird daher gemäß EN 50716 als Werkzeugklasse T3 eingestuft.
- Das Werkzeug wird im Entwicklungsprozess für eine Funktion mit SIL 1 oder höher eingesetzt.

Für die daher notwendige Qualifizierung wurde die Methode der Werkzeugvalidierung gewählt, da sich alternative Methoden der EN 50716 als nicht geeignet erwiesen:

- Eine Chronik erfolgreicher Verwendungen war nicht vorhanden für diese Neuentwicklung.
- Tooldiversität war wegen der stochastischen Natur der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation nicht mit vertretbarem Aufwand nutzbar.
- Eine Konformität des Entwicklungsprozesses des Werkzeugs mit einem bestimmten SIL erschien im Hinblick auf das Verhältnis von Aufwand und Nutzen nicht zielführend.
- Verifizierung des Werkzeug-Outputs war durch die Randomisierung ebenfalls nicht praktikabel.

3.1.2 Umsetzung der Validierung

Die Validierung von „Gamma-sim“ wurde in mehreren Schritten durchgeführt (Bild 2), um die normativen Anforderungen effizient zu erfüllen:

- The tool has a direct influence on the final product (the train's braking curve parameters) and is therefore classified as a T3 tool according to EN 50716.

- The tool is used in the development process for a function with SIL 1 or higher.

Since qualification is mandatory for this tool, the tool validation method was chosen, as the alternative methods from EN 50716 proved to be unsuitable:

- A history of successful use was not available for this newly developed tool.
- Due to the stochastic nature of the Monte Carlo simulation results, tool diversity could not be implemented with reasonable effort.
- Compliance of the tool's own development process with a specific SIL was not deemed cost-effective.
- Verification of the tool output was also not considered practical due to the randomisation.

3.1.2 Performing the validation

The validation of „Gamma-sim“ was carried out in several steps so as to efficiently meet the normative requirements (fig. 2):

1. Creating the basic documentation: First, a requirements specification for the tool and a software development plan were created. This established a traceable basis for all further activities.

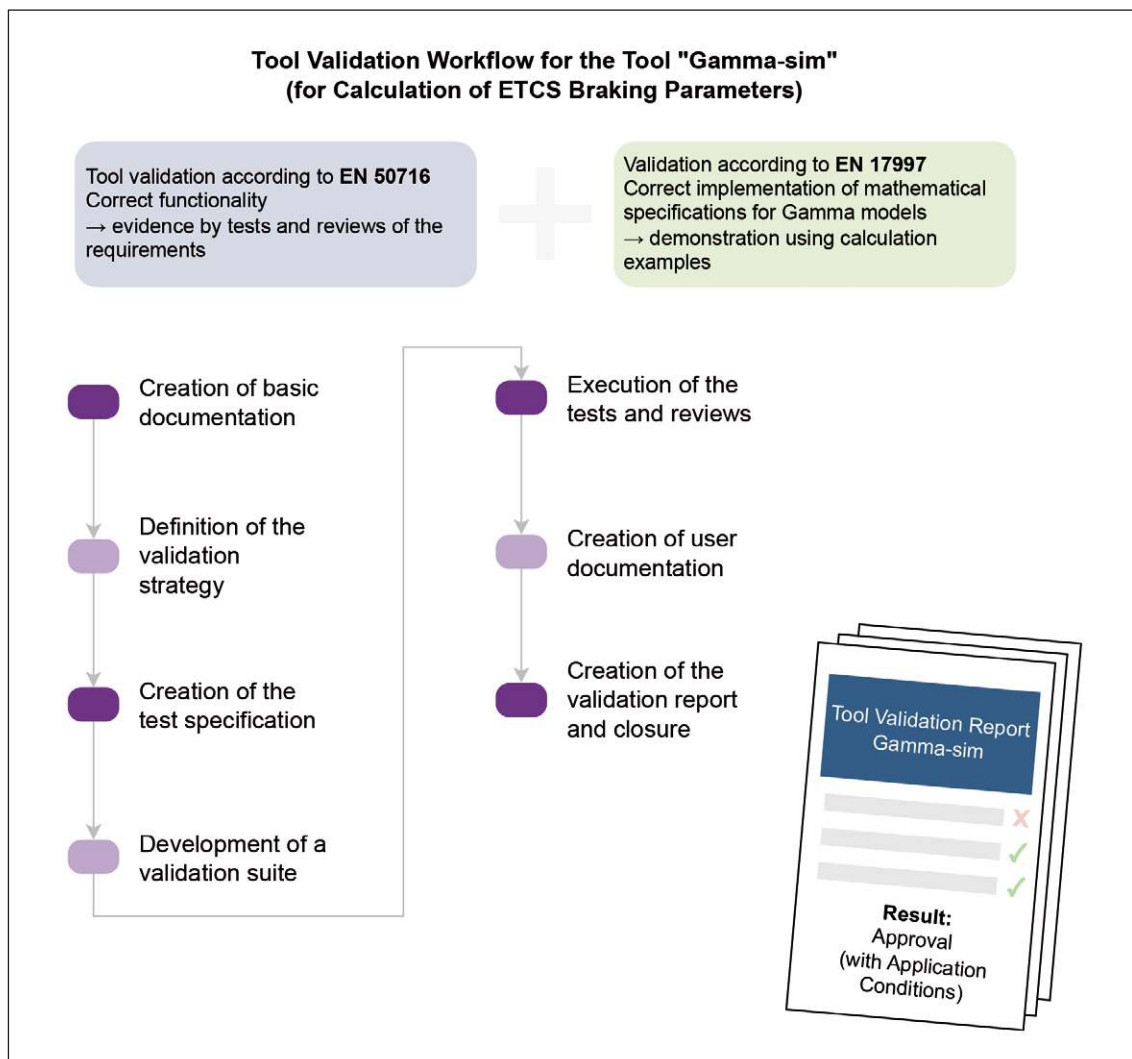


Bild 2: Ablauf der Werkzeugvalidierung für das Tool „Gamma-sim“

Fig. 2: The steps in the tool validation for „Gamma-sim“

1. Erstellung der grundlegenden Dokumentation: Zunächst wurden eine Anforderungsspezifikation für das Werkzeug und ein Softwareentwicklungsplan erstellt. Dies schuf eine nachvollziehbare Grundlage für alle weiteren Aktivitäten.
2. Festlegung der Validierungsstrategie: Als Nachweismethode wurde eine Kombination von Tests und Reviews gewählt. Dabei wurden zwei Aspekte berücksichtigt:
 - Validierung nach EN 50716 (Korrekte Funktionalität des Werkzeugs): Der Nachweis erfolgt durch Tests und Reviews.
 - Validierung nach EN 17997 (Korrekte Umsetzung der mathematischen Vorgaben für Gamma-Modelle): Der Nachweis erfolgt anhand von Rechenbeispielen für Zugkonfigurationen. Die einzuhaltende Validierungsprozedur ist in Kapitel 10 der EN 17997 beschrieben.
3. Erstellung der Testspezifikation: Für jede Anforderung wurde die Nachweismethode (Test / Review) festgelegt, mit Präferenz für Tests. Nicht testbare Anforderungen wurden per Code-Review geprüft. Aus den Anforderungen wurden Testfälle und Review-Vorgaben abgeleitet und in einer Testspezifikation zusammengefasst. Die Testfälle wurden so konzipiert, dass Positiv- und Negativtests durchgeführt wurden.
4. Entwicklung einer Validierungssuite (Sammlung von implementierten Testfällen gemäß Testspezifikation inkl. Testumgebung): Um die Tests effizient und wiederholbar zu gestalten, wurde eine weitgehend automatisierte Validierungssuite entwickelt. Diese umfasst die Testfälle selbst und eine Umgebung für die Ausführung und Auswertung von Tests. Die Validierungssuite wurde in den bestehenden Workflow zur Nutzung des Tools eingefügt (Bild 1).
5. Durchführung der Prüfungen: Tests und Reviews wurden durchgeführt und in einem Testbericht dokumentiert.
6. Erstellung der Nutzerdokumentation: Parallel zu den Prüfaktivitäten wurden ein Handbuch und ein Release-Notes-Dokument erstellt. Aus den in Schritt 5 gefundenen Abweichungen oder Auffälligkeiten wurden Anwendungsbedingungen für einen sicheren Einsatz des Werkzeugs abgeleitet und in der Nutzerdokumentation erfasst. Das Release-Notes-Dokument gibt u.a. die Werkzeugversion an und referenziert alle zugehörigen Dokumente.
7. Erstellung des Validierungsberichts und Abschluss der Validierung: Nach erfolgreicher Durchführung aller Tests und Reviews wurden die Ergebnisse im Werkzeugvalidierungsbericht zusammengefasst. Zusätzlich zu den Tests / Reviews wurden folgende Aspekte bewertet:
 - Eignung der Dokumentation
 - Erfüllung der Anforderungen
 - Einhaltung des Softwareentwicklungsplans
 - Einhaltung der Normvorgaben (EN 50716 und EN 17997)

Der Bericht dient für die validierte Toolversion als zentraler Nachweis, dass das Werkzeug für den vorgesehenen Einsatzzweck geeignet ist. Das Ergebnis war eine Freigabe des Tools inkl. Anwendungsbedingungen.

Alle Dokumente wurden als Teil des Release-Packages für das Werkzeug abgelegt, um das Ergebnis der Werkzeugvalidierung einfach zugänglich zu machen. Dadurch ist auch auf den ersten Blick sichtbar, dass es sich um eine validierte Werkzeugversion handelt.

3.2 Validierung einer Werkzeugkette aus Modellierungstool, Codegenerator und Compiler

Ein weiteres typisches Szenario ist der Einsatz einer Kette von kommerziell erworbenen Werkzeugen („Commercial Off-The-Shelf“ / COTS) beispielsweise für die modellbasierte Entwicklung.

2. Defining the validation strategy: A combination of tests and reviews was chosen as the method for providing evidence. Two aspects were considered:

- Validation according to EN 50716 (the correct functionality of the tool): the evidence is provided by tests and reviews.
- Validation according to EN 17997 (the correct implementation of the mathematical specifications for gamma models): the evidence is provided using calculation examples for train configurations. The validation procedure to be followed is described in Chapter 10 of EN 17997.

3. Creating the test specification: The verification method (test / review) was defined for each requirement, with a preference for tests. Non-testable requirements were checked by code review. The test cases and review guidelines were derived from the requirements and summarised in a test specification. The test cases were designed to include positive and negative tests.

4. Developing a validation suite (a set of implemented test cases according to the test specification, including the test environment): A largely automated validation suite was developed so as to make the tests efficient and repeatable. This included the test cases themselves and an environment for executing and evaluating tests. The validation suite was integrated into the existing tool workflow (fig. 1).

5. Executing the checks: Tests and reviews were carried out and documented in a test report.

6. Creating the user documentation: A manual and release notes document were created in parallel with the testing activities. The application conditions for the safe usage of the tool were derived and documented from the findings in Step 5. The release notes document specifies the tool version and references all the associated documents.

7. Creating the validation report and completing the validation: Once all the tests and reviews had been successfully completed, the results were summarised in the tool validation report. The following aspects were evaluated in addition to the tests / reviews:

- the suitability of the documentation
- the fulfilment of the requirements
- the compliance with the software development plan
- the compliance with the standard specifications (EN 50716 and EN 17997)

The tool was finally approved (together with a set of application conditions to be considered whenever the tool is used). The report serves as the central evidence that the validated tool version is suitable for its intended purpose.

All the documents were stored as part of the tool's release package in order to make the results of the tool validation easily accessible. This also makes it immediately apparent that it is a validated tool version.

3.2 Validating a toolchain comprising a modelling tool, a code generator and compilers

Another typical scenario is the use of a chain of commercial off-the-shelf (COTS) tools, for example for model-based development. This anonymised example illustrates the validation of such a toolchain.

3.2.1 The toolchain and its use

A model-based approach was adopted within the context of developing safety-related system functions (SIL 1 or higher).

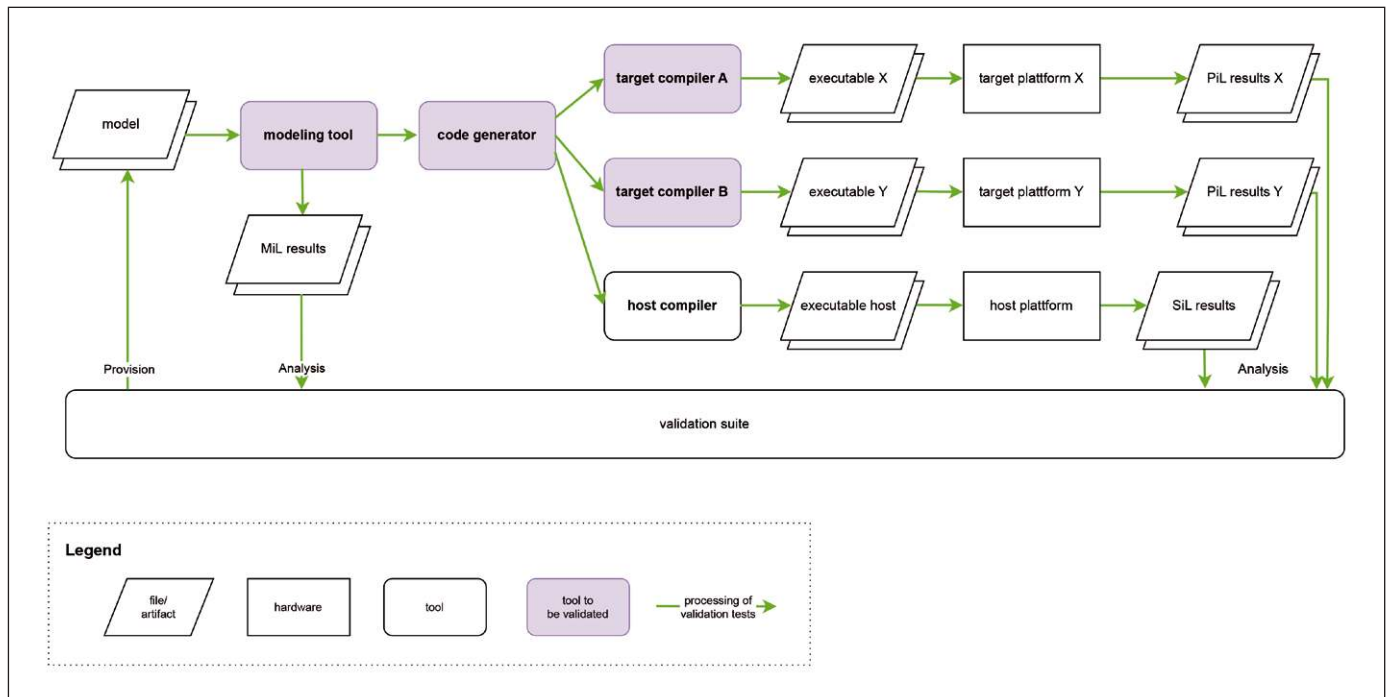


Bild 3: Validierungsaufbau und Werkzeugkette mit zu validierenden Tools

Fig. 3: The validation setup and toolchain with tools to be validated

Dieses anonymisierte Beispiel illustriert die Validierung einer solchen Toolkette.

3.2.1 Werkzeuge und Anwendungsfall

Im Rahmen der Entwicklung von sicherheitsrelevanten Systemfunktionen (SiL 1 oder höher) wurde auf eine modellbasierte Vorgehensweise gesetzt.

Dabei kam eine Werkzeugkette zum Einsatz, die aus einem kommerziellen Modellierungstool, einem darauf abgestimmten Codegenerator und verschiedenen Compilern bestand (Bild 3). Der Prozess sah vor, dass aus den in der Entwicklungsumgebung erstellten Modellen C/C++-Code generiert wurde. Dieser Code wurde anschließend für mehrere unterschiedliche Zielplattformen für Steuergeräte kompiliert, um ihn dort bereitzustellen und auszuführen. Da sowohl der Codegenerator als auch die Compiler direkten Einfluss auf den ausführbaren Code hatten und das Modellierungstool die Grundlage für die Codegenerierung bildete, war eine Qualifizierung zwingend erforderlich.

3.2.2 Umsetzung der Validierung

Für die Qualifizierung wurde die Methode der Werkzeugvalidierung gewählt. In der Umsetzung waren insbesondere eine detailliert ausgearbeitete Validierungsstrategie und ein hoher Automatisierungsgrad von zentraler Bedeutung.

Die Validierungsstrategie zielte darauf ab, die Korrektheit der gesamten Kette – vom Modell bis zum ausführbaren Code auf der Zielhardware – nachzuweisen. Um die „kombinatorische Explosion“ möglicher Testfälle zu vermeiden, wurden geeignete und explizit beschriebene Heuristiken angewendet. Der Fokus lag auf folgenden Aspekten:

- Mathematische Operationen: Prüfung aller relevanten verwendeten mathematischen Funktionen und Operationen unter Berücksichtigung der möglichen Anzahl der Operanden.
- Datentypen: Abdeckung relevanter Kombinationen von Datentypen.

A toolchain consisting of a commercial modelling tool, a corresponding code generator and various compilers was used (fig. 3). The process involved generating C/C++ code from models created in the development environment. This code was then compiled for several different control-unit target platforms on which it was deployed and executed.

The qualification was mandatory, as both the code generator and the compilers had a direct influence on the executable code and the modelling tool formed the basis for code generation.

3.2.2 Performing the validation

The tool validation method was chosen for the qualification. A particularly detailed validation strategy and a high degree of automation were of central importance for executing the validation efficiently.

The validation strategy aimed to prove the correctness of the entire chain, from the model to the executable code on the target hardware. Suitable and explicitly described heuristics were applied so as to avoid a “combinatorial explosion” of the possible test cases. The focus was on the following aspects:

- mathematical operations: testing all the relevant mathematical functions and operations, considering the potential number of operands.
- data types: coverage of the relevant data type combinations.
- experience-based test cases: including test cases based on experience, such as special cases in fixed-point arithmetic.
- comparisons at different levels: the systematic comparison of the results at various levels, i.e. MiL (Model-in-the-Loop), SiL (Software-in-the-Loop) and PiL (Processor-in-the-Loop), in order to precisely locate any deviations.

A largely automated validation suite was developed so as to make the validation efficient and repeatable. This suite handled the central tasks in the validation process:

- the automatic generation of most of the test cases (models) based on a formal specification.

- Erfahrungsbasierte Testfälle: Einbeziehung von Testfällen, die auf Erfahrungen beruhen, wie beispielsweise Sonderfälle bei der Fixpunkt-Arithmetik.
- Vergleich auf verschiedenen Ebenen: Systematischer Vergleich der Ergebnisse auf verschiedenen Ebenen: MiL (Model-in-the-Loop), SiL (Software-in-the-Loop) und PiL (Processor-in-the-Loop), um Abweichungen präzise lokalisieren zu können.

Um die Validierung effizient und wiederholbar zu gestalten, wurde eine weitgehend automatisierte Validierungssuite entwickelt. Diese Suite übernahm zentrale Aufgaben des Validierungsprozesses:

- Automatische Generierung eines Großteils der Testfälle (Modelle) aus einer formalen Spezifikation.
- Automatisierte Ausführung der Tests über die gesamte Werkzeugkette, inklusive Codegenerierung, Kompilierung und – für PiL-Tests – Flashen auf den Zielprozessor, Testlauf sowie Erfassung der Ergebnisse.
- Intelligenter Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Ebenen bzw. Plattformen.
- Zusammenfassende Darstellung der Testergebnisse und Unterstützung der Fehleranalyse durch Filterfunktionen.

Die Durchführung systematischer Tests führte zur Aufdeckung von Abweichungen. Diese wurden analysiert, um das verursachende Werkzeug (Modellierungstool, Codegenerator oder Compiler) zu identifizieren. Die gefundenen Fehler wurden an die jeweiligen Hersteller gemeldet und führten zu einer deutlichen Verbesserung der Werkzeuge. Sogar in den als sehr reif eingeschätzten Compilern wurden Fehler aufgedeckt.

Alle Ergebnisse, die Analysen der Abweichungen sowie die daraus abgeleiteten Anwendungsbedingungen für den sicheren Werkzeugeinsatz wurden in einem detaillierten Werkzeugvalidierungsbericht dokumentiert. Dieser Bericht enthielt eine abschließende Freigabeempfehlung. Durch die Validierung wurde somit der Einsatz der gesamten Werkzeugkette abgesichert.

4 Good practices

Um die Werkzeugvalidierung effizient und zielgerichtet zu gestalten, haben sich in der Praxis einige Vorgehensweisen bewährt. Die folgenden Empfehlungen können dabei helfen, den Aufwand moderat zu halten und gleichzeitig die Qualität und Sicherheit zu maximieren.

4.1 Bewährte Dokumentenvorlagen nutzen

Die Verwendung von erprobten Dokumentenvorlagen für den Werkzeugvalidierungsplan und den Werkzeugvalidierungsbericht ist ein entscheidender Effizienzfaktor. Solche Vorlagen fungieren als Checkliste und stellen sicher, dass alle normativ geforderten und für die Nachweisführung relevanten Aspekte berücksichtigt werden. Eine klare Trennung zwischen dem Validierungsplan, der die Strategie und das Vorgehen festlegt, und den Validierungsberichten, welche die Durchführung der Werkzeugvalidierung und deren Ergebnisse dokumentieren, hat sich ebenfalls als vorteilhaft erwiesen.

4.2 Eine durchdachte Validierungsstrategie entwickeln

Der größte Hebel zur Effizienzsteigerung liegt in einer sorgfältig ausgearbeiteten Validierungsstrategie. Anstatt zu versuchen, jede erdenkliche Funktion zu testen, sollte der Fokus auf den tatsächlich im Projekt genutzten und relevanten Funktionen liegen. Dabei muss eine bewusste Entscheidung getroffen werden, welche Anforderungen durch Tests und welche durch Reviews nachgewiesen werden. Um eine „kombinatorische Explosion“ bei der Anzahl der Testfälle zu vermeiden, ist es essenziell, nachvollziehbare

- the automated execution of the tests across the entire tool-chain, including code generation, compilation, and – for PiL tests – flashing to the target processor, test execution and result collection.
- smart comparisons of the results from the different levels or platforms.
- a summarised presentation of the test results and support for error analysis through appropriate filtering.

The execution of the systematic tests led to the discovery of deviations. These were analysed to identify the causative tool (modelling tool, code generator or compiler). The identified errors were reported to the respective manufacturers and led to a significant improvement in the tools. Errors were even discovered in some compilers that were considered very mature.

All the results, the analyses of the deviations and the derived application conditions for the safe application of the tools were documented in a detailed tool validation report. This report included a final release recommendation. As such, the validation safeguarded the use of the entire toolchain.

4 Good practices

Some procedures have proven effective in practice so as to make tool validation efficient and targeted. The following recommendations can help to keep the effort moderate while maximising quality and safety.

4.1 Use proven document templates

The use of proven document templates for the tool validation plan and the tool validation report is a crucial efficiency factor. Such templates serve as a checklist and ensure that all the aspects that are required by the standard and are relevant for providing evidence have been considered. A clear separation between the validation plan, which defines the strategy and procedure, and the validation reports, which document the execution of the tool validation and its results, has also proven to be advantageous.

4.2 Develop a carefully crafted validation strategy

The greatest lever for increasing efficiency lies in a carefully crafted validation strategy. Instead of trying to test every conceivable function, the focus should be on the functions that are actually used and are relevant in the project. A conscious decision must be made as to which requirements are to be verified by tests and which by reviews. It is essential to apply comprehensible and clearly documented heuristics to the test case selection so as to avoid a “combinatorial explosion” in the number of test cases.

4.3 Automate the validation using a validation suite

The development of an automated validation suite is recommended for all the tests that can be performed automatically. Such a suite not only increases the efficiency of the initial validation, but is also invaluable when tool updates are pending and re-validations must be performed. Furthermore, synergies can arise by reusing parts of the validation suite for other assurance activities in the development process.

4.4 Create a basis for validation in the case of insufficient manufacturer documentation

Sometimes the specifications or manual provided by the tool manufacturer constitute an insufficient basis for validation. In

und klar dokumentierte Heuristiken für die Testfallauswahl anzuwenden.

4.3 Validierung durch eine Validierungssuite automatisieren

Für alle maschinell durchführbaren Tests empfiehlt sich die Entwicklung einer automatisierten Validierungssuite. Eine solche Suite steigert nicht nur die Effizienz der erstmaligen Validierung, sondern ist besonders dann von unschätzbarem Wert, wenn Werkzeug-Updates anstehen und Re-Validierungen durchgeführt werden müssen. Darüber hinaus können sich Synergien ergeben, indem Teile der Validierungssuite auch für andere Absicherungsaktivitäten im Entwicklungsprozess wiederverwendet werden.

4.4 Validierungsgrundlagen bei unzureichender Herstelldokumentation schaffen

Manchmal ist die vom Hersteller bereitgestellte Spezifikation oder das Handbuch eines Werkzeugs ungenügend, um eine Validierung darauf aufzubauen. In solchen Fällen ist es notwendig, diese Grundlage selbst zu schaffen, indem eine eigene Beschreibung der relevanten Funktionen und ihres erwarteten Verhaltens erstellt wird. Dieses Dokument dient dann als Referenz für die Test- und Review-Aktivitäten bei der Werkzeugvalidierung.

4.5 Gestaltungsmöglichkeiten bei Eigenentwicklungen nutzen

Wird ein Werkzeug eigens entwickelt, bieten sich zusätzliche Möglichkeiten, die Validierung von Beginn an zu unterstützen und die Werkzeugqualität zu steigern:

- Geeignetes Entwicklungsvorgehen: Die Anwendung eines strukturierten Entwicklungsprozesses ist fundamental. Dazu gehören das Formulieren von Anforderungen, die Umsetzung einer modularen Software-Struktur mit klaren Schnittstellen (Inputs/Outputs) und die Möglichkeit einer Ansteuerung des Tools über die Kommandozeile. Mindestens sollten Tests des Werkzeugs vorgesehen werden, welche die Hauptfunktionen prüfen und deren erfolgreiche Durchführung eine Voraussetzung für die Freigabe einer Werkzeugversion ist (Releasetests).
- Frühe Erprobung des Handbuchs: Das Benutzerhandbuch sollte frühzeitig von Personen erprobt werden, die nicht an der Entwicklung beteiligt waren. Dies entspricht einem frühen „User-Acceptance-Test“ und hilft, die Verständlichkeit und Anwendbarkeit zu verbessern.
- Frühzeitige Einbindung des Werkzeugvalidierers: Der für die Validierung verantwortliche Experte sollte bereits während der Werkzeugentwicklung einbezogen werden. Durch parallel laufende Validierungsaktivitäten kann die Qualität des Werkzeugs signifikant verbessert werden.

5 Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- Werkzeugvalidierung ist in einigen Fällen die normkonforme Qualifizierungsmethode, die ökonomisch, fachlich und personell am sinnvollsten ist.
- Die Methode ist flexibel einsetzbar, sowohl für Einzelwerkzeuge (selbst entwickelte oder zugekaufte Tools) als auch für komplexe, heterogene Werkzeugketten.
- Durch Verwendung bewährter Dokumentenvorlagen und Auswahl einer geeigneten Validierungsstrategie lässt sich der Aufwand einer Werkzeugvalidierung moderat halten.
- In einigen Fällen ist es möglich, Synergien dadurch zu nutzen, dass ein Teil der Maßnahmen auch zur generellen Qualitätssi-

such cases, it is necessary to create this basis by preparing a separate description of the relevant functions and their expected behaviour. This document then serves as a reference for the test and review activities during tool validation.

4.5 Leverage the opportunities in in-house tool development

If a tool is developed in-house, there are additional opportunities to support the validation from the outset and to increase the tool's quality:

- a suitable development process: the application of a structured development process is fundamental. This includes formulating requirements, implementing a modular software structure with clear interfaces (inputs/outputs) and the ability to control the tool via a command-line interface. At a minimum, tool tests should be planned to check the main functions and their successful execution should be a prerequisite for the release of a tool version (release tests).
- early testing of manual: the user manual should be tested early by individuals who were not involved in the development. This corresponds to an early “User Acceptance Test” and helps to improve clarity and usability.
- early tool validator involvement: the expert responsible for the validation should be involved during the tool's development. The quality of the tool can be significantly improved through parallel validation activities.

5 Conclusion

To summarise:

- In some cases, tool validation is the standard-compliant qualification method that makes the most sense economically, technically and from a staffing perspective.
- The method can be used flexibly both for individual tools (self-developed or commercial tools) and for complex, heterogeneous toolchains.
- The effort can be kept moderate by using proven document templates and selecting a suitable validation strategy.
- In some cases, it is possible to leverage synergies by using some of the measures for general quality assurance as well (e.g. when testing the railway application under development).
- Tool validation provides evidence of the correct functionality of the used tools, which leads to high application efficiency through the demonstrated inherent reliability of the tools, as, for example, the complex verification of the tool output with each individual use can be omitted.

Thus, tool validation makes a sustainable contribution to increasing safety and efficiency in the development and use of systems for the railway sector. ■

cherung dienen kann (z.B. beim Testen der zu entwickelnden Bahnanwendung).

- Werkzeugvalidierung stellt die korrekte Funktionalität der eingesetzten Werkzeuge sicher und führt durch die nachgewiesene Zuverlässigkeit der Tools zu einer hohen Anwendungseffizienz, da beispielsweise auf eine aufwendige Verifizierung des Werkzeug-Outputs bei jeder einzelnen Nutzung verzichtet werden kann.

Damit leistet die Werkzeugvalidierung einen nachhaltigen Beitrag zur Steigerung von Sicherheit und Effizienz in der Entwicklung und dem Einsatz von Systemen für den Bahnbereich. ■

AUTOREN | AUTHORS

Dr. Katharina Prochazka

Systemingenieurin / System Engineer
quattron Austria GmbH

Anschrift / Address: Marxergasse 1b, A-1030 Wien
E-Mail: katharina.prochazka@quattron.com

Dr. David Seider

Software Consultant
quattron GmbH

Anschrift / Address: Herzog-Wilhelm-Straße 19, D-80331 München
E-Mail: david.seider@quattron.com

Dr.-Ing. Benedikt Wenzel

Partner, Leitung quattron engineering / Partner, Head of quattron engineering
quattron GmbH

Anschrift / Address: Unter den Linden 21, D-10117 Berlin
E-Mail: benedikt.wenzel@quattron.com

LITERATUR | LITERATURE

[1] Prochazka, K., Seider, D., Wenzel, B.: „Normkonforme Qualifizierung unterstützender Werkzeuge – zielgerichtet und effizient“, Eisenbahntechnische Rundschau 6/2026

[2] DIN EN 50129:2019 Bahnanwendungen – Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme – Sicherheitsbezogene elektronische Systeme für Signaltechnik; Deutsche Fassung EN 50129:2018 + AC:2019

[3] DIN EN 50716:2024 Bahnanwendungen – Anforderungen für die Softwareentwicklung; Deutsche Fassung EN 50716:2023 inkl. Berichtigung 1

[4] DIN EN 50128:2012 Bahnanwendungen – Telekommunikationstechnik, Signaltechnik und Datenverarbeitungssysteme – Software für Eisenbahnsteuerungs- und Überwachungssysteme; Deutsche Fassung EN 50128:2011 + DIN EN 50128/A1:2020 + DIN EN 50128/A2:2020

[5] DIN EN 50657:2017 Bahnanwendungen – Anwendungen für Schienenfahrzeuge – Software auf Schienenfahrzeugen; Deutsche Fassung EN 50657:2017 + DIN EN 50657/A1:2024

[6] Projekt Bremssimulation als Werkzeug der Klasse T3 für SIL > 0 nach EN 50716, <https://www.quattron.com/referenz/bremssimulation-als-werkzeug-der-klasse-t3-fuer-sil-0-nach-en-50716/>, 05.08.2026 um 13:37 Uhr

[7] DIN EN 17997:2025 Bahnanwendungen – Bremsen – Bestimmung der ETCS-Bremskurvenparameter für Gamma-Züge; Deutsche Fassung EN 17997:2025

Eurail
press

Archiv

-  Komfortable Merkliste
-  laufende Aktualisierung
-  individuelle Suchoptionen
-  Volltextsuche
-  Sofort-Download

Ohne Umwege
zu Ihren Fachartikeln



EI
DER
EISENBAHN
INGENIEUR

ETR
ELEKTROTECHNISCHE
RUNDschau

EIK
ELEKTROINSTRUMENTEN
KOMPENDIUM

A
ANLAGEN

Rail
FACHZEITUNG

GUTERBAHNEN
FACHZEITUNG

DER NAHVERKEHR
FACHZEITUNG

bahn manager

www.eurailpress.de/fachartike

Erste Implementierung einer virtualisierten LST-Architektur bis SIL4

The first implementation of a virtualised railway signalling architecture up to SIL4

Jonas Rebstadt | Martin Mitzkus | Sonja Steffens | Patrick Marsch

Heutige digitale Leit- und Sicherungstechnik (DLST) basiert überwiegend auf spezialisierter Hardware und bahnspezifischen Lösungen. Dies führt zu erhöhten Kosten, Obsoleszenzrisiken und ineffizienter Instandhaltung. Eine Abstraktion von Hard- und Software durch Virtualisierung und der Einsatz von Commercial-Off-The-Shelf (COTS)-Komponenten verspricht erhebliche Vorteile. Im Projekt Cloud4Rail wurde nun erstmalig eine Safety-Integrity-Level 4 (SIL4)-Bahnanwendung über Virtualisierung und COTS-Komponenten umgesetzt und der Native Hardware Access (NHA) als notwendige sektorspezifische Komponente als Open Source implementiert.

1 Motivation und Einführung

Die europäischen Eisenbahninfrastrukturunternehmen (EIU), darunter auch die DB InfraGO AG (DB InfraGO), befinden sich in einem umfassenden Modernisierungsprozess ihrer Leit- und Sicherungstechnik (LST). Aufgrund der evolutionären Entwicklung der Systeme basieren diese heute (z. B. im Kontext der Umsetzung von Stellwerks-Zentraleinheiten in digitalen Technikzentralen, DTZ) aber noch in hohem Maße auf bahnspezifischer Spezialhardware und Legacy-Architekturen mit enger Verzahnung von Software und Hardware. Dies führt nicht nur zu hohem Platzbedarf in Rechenzentren (DTZ), sondern auch zu herstellereinspezifischen Abhängigkeiten in Betrieb und Wartung sowie zu zunehmenden Herausforderungen durch Obsoleszenz.

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen gehen zahlreiche LST-Hersteller dazu über, ihre Architekturen auf marktübliche, d. h. COTS-Hardware umzustellen. Bei SIL4-Systemen ist dies nur möglich, wenn die sicherheitsgerichteten Funktionen der Hardware softwareseitig ersetzt werden. Diese können in einem sogenannten Software-Safety-Layer (siehe Kapitel 3) gekapselt werden, der die funktionale Sicherheit der sicherheitskritischen Anwendungen bei potenziellen Fehlern in der Hardware oder in nicht sicherheitskritischer Software wie z. B. Open-Source-Betriebssystemen gewährleistet.

Der europäische Bahnsektor geht noch einen Schritt weiter und strebt eine vollständige Abstraktion der Software von der Hardware durch Virtualisierung an (siehe Zielbild in Bild 1). Dieser Schritt ist für die DB InfraGO und viele andere europäische EIU von zentraler Bedeutung, um einen generischen Hardwarepool zu ermöglichen, auf dem mehrere LST-Anwendungen mit unterschiedlichen SIL-Anforderungen und Betriebssystemen gemeinsam mit Basis-IT-Diensten wie z. B. einer Public Key Infrastructure (PKI) laufen können.

DB InfraGO erhofft sich hiervon u. a.:

Today's digital railway control, command and signalling (CCS) technology still largely relies on specialised hardware and railway-specific solutions. This leads to higher costs, significant obsolescence risks and inefficient maintenance processes. Virtualisation, the separation of software from hardware and the use of commercial-off-the-shelf (COTS) hardware promise substantial benefits. A safety integrity level 4 (SIL4) railway application has now been implemented using virtualisation and COTS hardware for the very first time in the Cloud4Rail project. A key sector-specific component required for this approach, known as Native Hardware Access (NHA), has been implemented and published as open-source software (OSS).

1 Motivation and introduction

European railway infrastructure managers (IMs), including DB InfraGO AG (DB InfraGO), are currently undertaking a major modernisation of their CCS systems. Their evolutionary development means that these systems (e.g. within the context of interlocking central units at Digital Technology Centres, DTZ) still depend heavily on railway-specific hardware and legacy architectures where software and hardware are tightly coupled. This results not only in large data centre (DTZ) footprints but also in vendor-specific operations and maintenance, as well as increasing obsolescence risks.

In order to address these issues, many signalling vendors are now moving toward COTS hardware. Hardware-based safety functions must be replaced with software equivalents in systems with the highest safety integrity level 4. These are typically encapsulated within a Software Safety Layer (see Chapter 3), which ensures safe operations even in the presence of hardware faults or non-safety-critical software such as open-source operating systems.

The European rail sector is taking this idea one step further and aiming for the full abstraction of software from hardware through virtualisation (the target image is shown in fig. 1). This is the key to enabling a shared hardware pool where multiple signalling applications with varying safety requirements and operating systems can operate alongside standard IT services such as public key infrastructure (PKI).

For DB InfraGO and other infrastructure operators, this approach promises:

- lower capital and operating costs
- strongly reduced obsolescence risks
- simplified and standardised maintenance

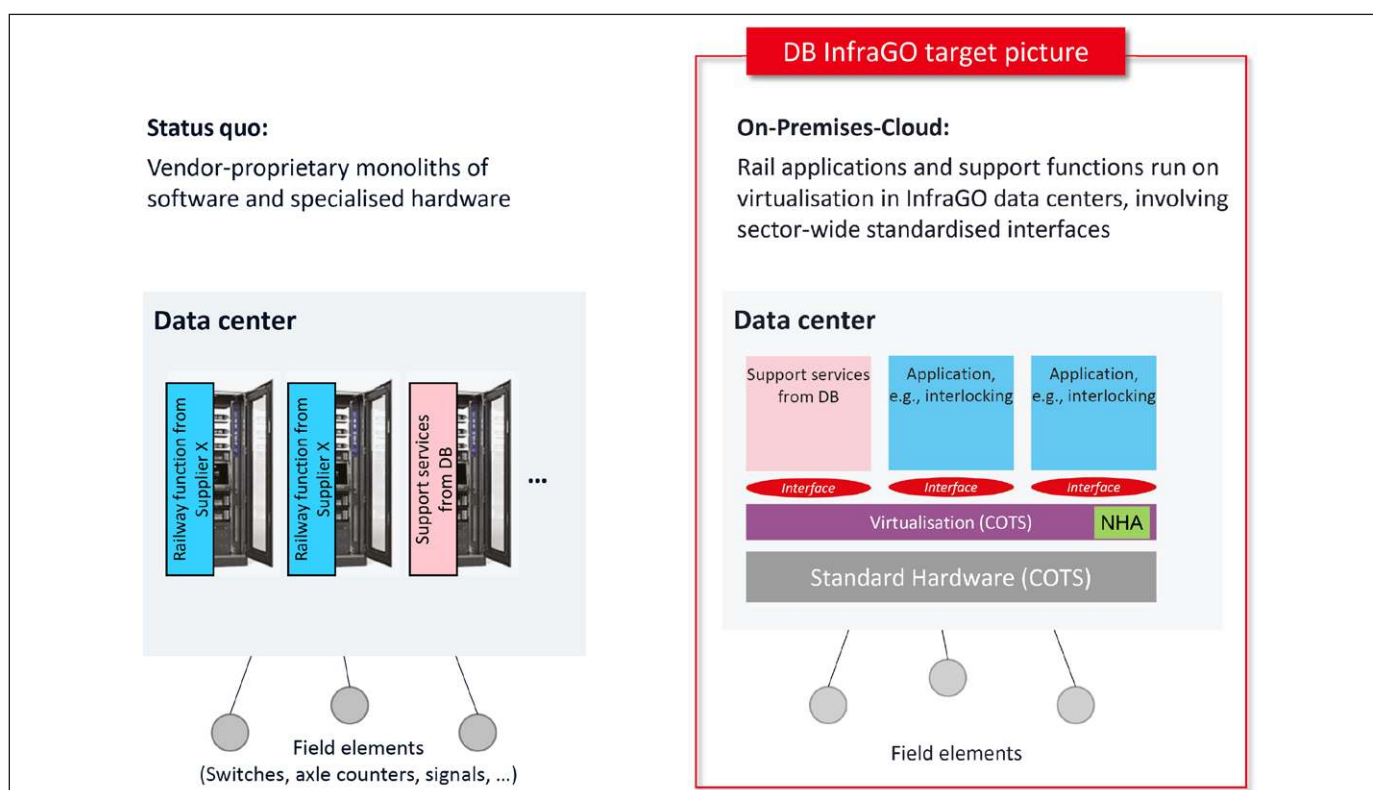


Bild 1: Vom Status Quo monolithischer Lösungen zur Zielarchitektur On-Premises-Cloud der DB InfraGO

Fig. 1: From the current state of monolithic solutions to the target architecture for an on-premises cloud at DB InfraGO

Quelle / Source: DB InfraGO

- reduzierte Invest- und Betriebskosten
- deutlich reduzierte Obsoleszenzrisiken
- vereinfachte, da standardisierte Instandhaltung
- mehr Flexibilität und dadurch Beschleunigung des LST-Rollouts.

Die hierbei für SIL4-Anwendungen notwendigen Architektur Anpassungen wurden im Förderprogramm Europe's Rail gemeinsam mit anderen europäischen Bahnen und Herstellern grundlegend erarbeitet [1]. Im Förderprojekt Cloud4Rail ist nun erstmalig in einer F&E-Kollaboration zwischen DB InfraGO und Siemens Mobility eine Umsetzung der in Europe's Rail spezifizierten Architektur erfolgt und damit die Machbarkeit des Konzeptes bestätigt worden. Zudem wurde eine hierfür erforderliche Komponente „Native Hardware Access“ erstmalig implementiert, welche nun dem Sektor als Open Source Software (OSS) zur Verfügung gestellt wird.

Aufsetzend auf einer kurzen Einleitung zu On-Premises-Clouds im Bahnsektor wird im Folgenden die grundlegende Architektur von IT-Plattformen für SIL4-Anwendungen wie Stellwerkskernen oder ETCS-Zentraleinheiten (Radio Block Centres, RBC) vorgestellt, um danach auf die Potenziale von Open-Source-Entwicklung im Bahnsektor einzugehen und den NHA als exemplarische initiale Open-Source-Komponente vorzustellen. Abgerundet wird der Beitrag durch ein Kapitel zur technischen Machbarkeit virtualisierter LST-Funktionen bis SIL4 sowie einem abschließenden Ausblick.

2 On-Premises-Cloud für Applikationen bis SIL4

Im Bahnsystem gibt es eine Vielzahl von Bahnanwendungen mit unterschiedlichen Anforderungen an die darunterliegenden IT-Plattformen, mit der Konsequenz, dass verschiedene Ausprägungen von Plattformen zum Einsatz kommen bzw. eingeführt werden. So macht es z. B. einen großen Unterschied, ob Bahnanwendungen sogenannte Basisintegrität oder z. B. SIL4 erfüllen und somit höheren

- greater flexibility and faster deployment of signalling systems. The required SIL4 architecture principles have been developed collaboratively with other European railways and suppliers under the Europe's Rail program [1]. Within the Cloud-4Rail project, specifically in collaboration among DB InfraGO and Siemens Mobility, this architecture was now implemented for the first time, and its feasibility was demonstrated. A central component, the NHA, has also been implemented and made available as OSS.

The following sections introduce the concept of on-premises clouds in the rail sector, outline the architecture for SIL4 applications such as interlockings or Radio Block Centres (RBC), discuss the potential of open source in the rail sector and present the NHA component as a first example. The paper concludes with a chapter on the technical feasibility of virtualised LST functions up to SIL4, as well as an outlook.

2 An on-premises cloud for applications up to SIL4

There is a wide range of railway applications within the rail system, each with different requirements on the underlying IT platforms. As a result, multiple platform variants have been used or introduced. For example, it makes a significant difference whether applications only need to meet basic integrity requirements or must comply with higher functional safety standards such as SIL4. Approval and certification processes also vary depending on the application, as do the immediate consequences that a system failure may have on railway operations. Reference [2] identifies the key railway application characteristics, from which four distinct types of railway IT platforms can be derived.

It should be emphasised that DB InfraGO plans to implement all the dispositive and operational railway functions exclusive-

Anforderungen an funktionale Sicherheit genügen müssen. Auch spielt es eine Rolle, welche Freigabe- und Zulassungsprozesse für die jeweiligen Anwendungen zu befolgen sind und welche unmittelbaren Auswirkungen der Ausfall einer Anwendung auf den Bahnbetrieb hat. In [2] wurden die wesentlichen Eigenschaften von Bahnanwendungen aufgelistet, aus denen sich vier Ausprägungen von bahnbetrieblichen IT-Plattformen ergeben.

Es sollte betont werden, dass DB InfraGO plant, für dispositive und operative bahnbetriebliche Funktionen ausschließlich IT-Plattformen als DB-Eigentum und in der vollen rechtlichen und funktionalen Hoheit der DB umzusetzen – in der Form von On-Premises-Clouds im eigenen Hause, wie z.B. in den Betriebszentralen und DTZ der InfraGO. Dies rührt daher, dass regulatorische, normative und rechtliche Vorgaben im bahnbetrieblichen Kontext die Nutzung nicht-Bahn-eigener Cloud-Infrastruktur sehr einschränken bzw. die Wirtschaftlichkeit einer solchen Nutzung sehr fraglich erscheinen lassen. Hinzu kommen vergaberechtliche, strategische und auch geopolitische Gründe, die für On-Premises-Clouds sprechen.

In diesem Beitrag ist der Fokus auf bahnbetriebliche Anwendungen mit den stringentesten Anforderungen, nämlich Stellwerks- und ETCS-Zentraleinheiten, welche SIL4 erfordern, und welche, so wie alle dispositiven und operativen bahnbetrieblichen Funktionen, künftig in On-Premises-Clouds umgesetzt werden sollen.

3 Safety-Architektur für SIL4-Anwendungen in einer On-Premises-Cloud

Für die Verwendung einer On-Premises-Cloud für sicherungstechnische Applikationen – etwa Stellwerks- oder ETCS-Zentraleinheiten – sind eine neue Safety-Architektur und mehrere technologische Schritte erforderlich. In [3] ist ein Vergleich zweier grundsätzlich möglicher Ansätze erfolgt; in der hier beschriebenen Implementierung ist nun die dort genannte „Safety-Architektur 1“ umgesetzt worden.

Zunächst bedarf es eines softwarebasierten Safety-Layers, der auf COTS-Hardware betrieben werden kann und die Einbindung nicht sicherheitsrelevanter Softwarekomponenten – beispielsweise eines handelsüblichen Betriebssystems (z.B. Linux) sowie eines Security-Stacks – ermöglicht. Ein solcher Safety-Layer basiert typischerweise auf etablierten Sicherheitsprinzipien:

- Mehrkanaligkeit auf separater Hardware,
- Diversität der Kanäle,
- sicherer Kanalvergleich sowie
- zusätzliche Redundanz zur Gewährleistung der Verfügbarkeit.

Der Safety-Layer stellt dabei nicht nur die sichere Ablaufumgebung für die sicherungstechnische Applikation bereit, sondern ist auch für deren zeitlich korrekten Ablauf verantwortlich. Er muss einen sicheren Systemtakt zur zeitlichen Steuerung der Applikation bereitstellen. Auch für diesen Systemtakt gelten die genannten Sicherheitsprinzipien – insbesondere Mehrkanaligkeit, separate Hardware und sicherer Vergleich. Konkret werden hierzu Systemtakte aus Quarzoszillatoren separater Hardwarekomponenten herangezogen und unter Berücksichtigung möglicher Drifts gegeneinander verglichen. Diese Prinzipien bilden die wesentliche Grundlage eines softwarebasierten Safety-Layers.

Soll ein solcher Safety-Layer in einer On-Premises-Cloud betrieben werden, sind im nächsten Schritt weitere Maßnahmen erforderlich, um die zusätzlichen Gefährdungen zu beherrschen, die sich aus der Verwendung nicht sicherungstechnisch qualifizierter Virtualisierungstechnologie ergeben:

- Hardwareseparation der Kanäle:** Der Ablauf der einzelnen Kanäle auf separater physikalischer Hardware ist nicht hinreichend sicher gewährleistet, da Virtualisierungsumgebungen Funktionen

ly on IT platforms that are owned by DB and fully under its legal and functional control, specifically in the form of on-premises clouds hosted within its own facilities, such as operations control centres and DTZ. This approach is driven by regulatory, normative and legal constraints in the railway domain, which significantly limit the use of non-railway-owned cloud infrastructure or render its economic viability questionable. In addition, procurement and strategic and geopolitical considerations further support the pursuit of on-premises cloud solutions.

This article focuses on the most demanding applications such as interlocking and ETCS central units, which require SIL4 and which, like all dispositive and operational railway functions, are to be implemented in on-premises clouds in the future.

3 The safety architecture for SIL4 applications in an on-premises cloud

A new safety architecture and several technological steps are required so as to enable the use of an on-premises-cloud for safety-critical applications, such as interlockings or ETCS central units. Reference [3] compares two fundamentally possible approaches; the implementation described here follows what is referred to therein as “Safety Architecture 1.”

At its core, this approach requires a software-based safety layer that can run on COTS hardware and allows the integration of non-safety-critical software components, such as a standard operating system (e.g. Linux) and a security stack. Such a safety layer typically relies on well-established safety principles:

- multi-channel operations on separate hardware
- channel diversity
- secure channel output comparison
- additional redundancy so as to ensure availability.

The safety layer not only provides a secure execution environment for the safety-critical application but is also responsible for ensuring its correct behaviour. This must include a reliable system clock to control the application's execution. The system clock must also adhere to the same safety principles, particularly a multi-channel design, hardware separation and secure comparison. In practice, system clocks derived from quartz oscillators on separate hardware components are compared against each other while accounting for any potential drift. These principles form the foundation of a software-based safety layer.

When such a safety layer is operated within an on-premises cloud, additional measures are required to address any new risks introduced by virtualisation technologies that have not been inherently safety-certified:

- the hardware separation of the channels:** the reliable running of the channels on separate physical hardware cannot be fully guaranteed, as virtualisation platforms allow applications to be migrated between machines (e.g. live migration).
- the integrity of the system clock:** the use of the physical hardware clock cannot be fully trusted, since virtualisation environments can simulate or manipulate time information.
- hardware transparency:** any information about the underlying hardware or its use (required for the safety concept) is no longer directly accessible from within the virtualised environment.

A computing environment architecture that includes the NHA software component has been defined within the context of Europe's Rail Joint Undertaking [1] in order to address these challenges. This component runs natively at the host operating sys-

zur Migration von Applikationen auf andere Hardware bereitstellen (z. B. Live-Migration).

- b) **Integrität des Systemtakts:** Die Nutzung des Systemtakts der physikalischen Hardware ist nicht hinreichend sicher gewährleistet, da Virtualisierungsumgebungen Funktionen zur Simulation von Zeitinformationen bieten.
- c) **Hardwaretransparenz:** Weitere für das Sicherheitskonzept notwendige Informationen über die zugrunde liegende Hardware bzw. deren Nutzung sind aus der virtualisierten Umgebung heraus nicht mehr direkt zugänglich.

Zur Behandlung dieser Aspekte wurde im Rahmen von Europe's Rail Joint Undertaking eine Computing-Environment-Architektur mit einer NHA-Softwarekomponente definiert [1]. Diese Komponente wird unterhalb der Virtualisierungsschicht auf Ebene des Host-Betriebssystems nativ ausgeführt und stellt dem Safety-Layer (innerhalb der virtuellen Maschine) folgende erforderlichen Hardwareinformationen bereit:

- a) eine eindeutige Identifikation der verwendeten physikalischen Hardware,
- b) einen Systemtakt, der unmittelbar aus dem physikalischen Quarz-oszillator der verwendeten Hardware abgeleitet wird, sowie
- c) bei Bedarf weitere Informationen über die Hardware bzw. deren Nutzung.

Diese Informationen ergeben sich aus den herstellerspezifischen Sicherheitskonzept(en) der Safety-Layer.

4 Open Source im Bahnsektor

Wie zuvor beschrieben, ist eine wesentliche Prämisse der angestrebten Architektur eine weitestmögliche Nutzung von COTS-Komponenten. In manchen Fällen sind Bahnsektor-spezifische Lösungen wie die NHA-Komponente aber nicht vermeidbar. Es ist zu erwarten, dass auch das Management, Update und Konfiguration einer On-Premises-Cloud für den Bahnbetrieb, inkl. der automatisierten Reaktion auf Hardwareausfälle, bahnspezifische Aspekte beinhalten wird.

tem level, beneath the virtualisation layer, and provides the safety layer (within the virtual machine) with the following essential hardware-related information:

- a) unique identification of the physical hardware in use,
- b) a system clock derived directly from the hardware's physical quartz oscillator, and
- c) additional hardware or usage information, if required.

These requirements stem from the manufacturer-specific safety concepts of the safety layer. Fig. 2 illustrates the general safety architecture for a two-channel system, where synchronisation between the channels is achieved via IP-based communication between the safety layer instances.

When selecting a virtualisation technology, it is essential to ensure that it supports the integration of an NHA component at the host operating system level. Moreover, the combined architecture, i.e. the virtualisation together with the NHA, must be reflected in the system-specific safety concepts defined by the manufacturers.

4 Open source in the railway sector

As described earlier, a key premise of the proposed architecture involves the extensive use of COTS components. However, in some cases, railway-specific solutions, such as the NHA component, are unavoidable. It can also be expected that the management, update and configuration of an on-premises cloud for railway operations, including any automated responses to hardware failures, will involve domain-specific requirements.

An OSS approach appears to be a highly suitable solution [4] to ensuring that any such railway-specific functions remain cost-efficient and sustainably available across the sector.

While OSS has been firmly established in traditional IT for many years, safety-critical domains have historically faced greater challenges in adopting it. In the railway sector, especially within operational technology (OT), systems control

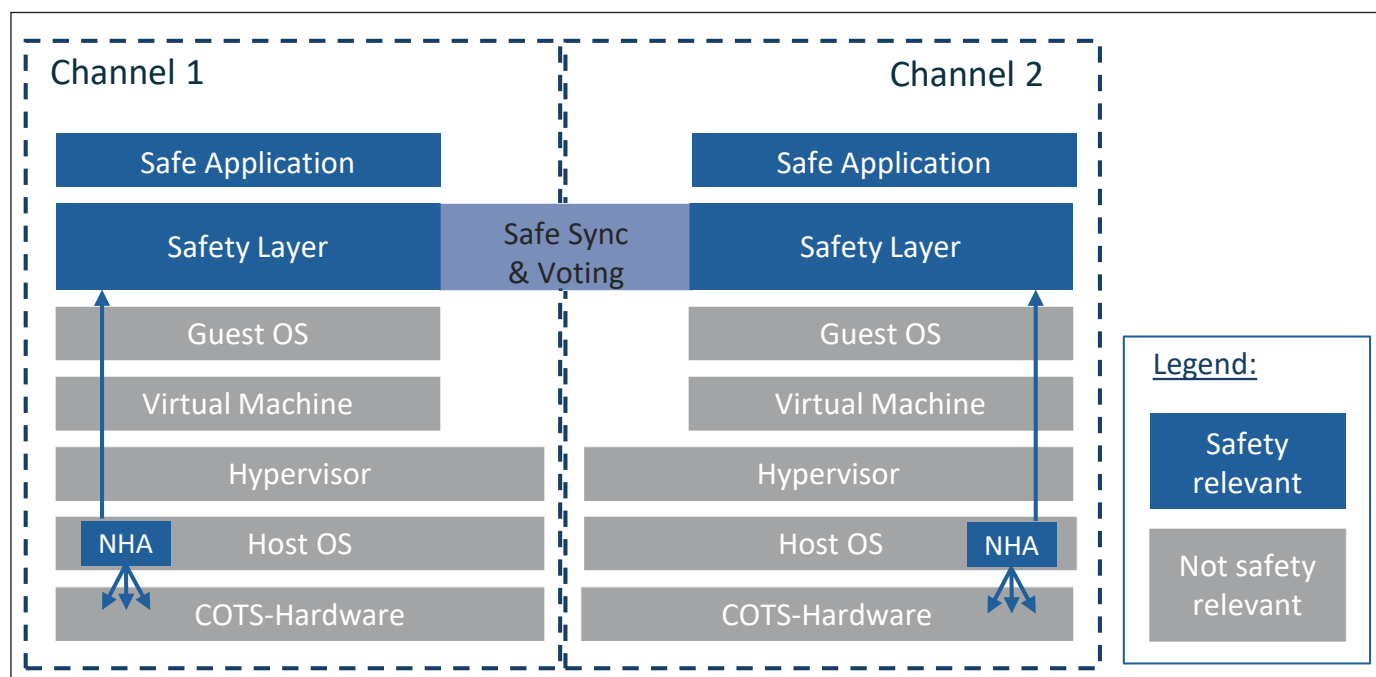


Bild 2: Darstellung eines zweikanaligen Systems mit Nutzung von Safety-Layer und NHA

Fig. 2: A representation of a two-channel system using a safety layer and NHA

Quelle / Source: Siemens Mobility

Um sicherzustellen, dass auch diese bahnspezifischen Funktionen kostengünstig und nachhaltig im Sektor zur Verfügung stehen, erscheint ein OSS-Ansatz hier sinnvoll [4].

Während OSS in der klassischen IT bereits seit Jahren etabliert ist, stehen Domänen mit Safety-Anforderungen traditionell vor größeren Herausforderungen. Im Bahnsektor und vor allem im Kontext von Operational Technology (OT) existieren durch die Steuerung physischer Prozesse und erheblicher Auswirkungen von Fehlern auf Menschen, Umwelt und Infrastruktur Rahmenbedingungen, die sich merklich von klassischen IT-Systemen unterscheiden [4]. Entsprechend unterliegen sicherungstechnische Applikationen – etwa Stellwerks- oder RBC-Logik – langen Lebenszyklen, strengen Zulassungsverfahren und höchsten Anforderungen an Nachvollziehbarkeit und Sicherheit.

Trotz dieser Herausforderungen zeigen sich bereits in Domänen wie der Raumfahrt (Ingenuity Helicopter der NASA [5]) oder dem Automotive Sektor (z.B. Eclipse S-CORE [6]) erste Erfolgsgeschichten hin zur kollaborativen, offenen Entwicklung von Software. Offener Quellcode kann hierbei Transparenz, unabhängige Prüfung und gemeinschaftliche Weiterentwicklung ermöglichen, wodurch neue Ansätze zur Risikokontrolle und Sicherheits-Governance entstehen können [4]. Gerade in Zeiten geopolitischer Anspannungen kann die kollaborative Open-Source-Entwicklung zudem die Souveränität der (IT-)Infrastruktur und der Lieferketten stärken.

Um diese Schritte auch im Bahnsektor erfolgreich gehen zu können, müssen monolithische Systemarchitekturen modularisiert und muss eine saubere Trennung von Komponenten mit hohem eigenem Wertschöpfungsanteil und Basiskomponenten ohne zentrale Intellectual Property (IP) vorgenommen werden. Während Erstere auch in anderen Sektoren in der individuellen Entwicklung der jeweiligen Hersteller verbleiben, bieten gerade grundlegende Plattformtechnologien ein großes Potenzial für Kosteneinsparungen durch kollaborative Entwicklung und Pflege. Hierdurch können Innovationszyklen beschleunigt, Wartbarkeit verbessert und Sicherheitsargumentationen langfristig stabilisiert werden. Gleichzeitig erfordert der nachhaltige Einsatz von Open Source aber auch klare Verantwortlichkeiten einer Mindestzahl von Kontributoren, geeignete Governance-Strukturen und langfristige Pflege.

physical processes and failures can have significant consequences for people, the environment and infrastructure. As a result, the underlying conditions differ significantly from those in classic IT systems [4]. Accordingly, safety-critical applications, such as interlocking or RBC logic, are subject to long lifecycles, strict certification processes and the highest traceability and safety requirements.

Despite these challenges, successful examples of collaborative and open software development are already emerging in domains such as aerospace (e.g. NASA's Ingenuity helicopter [5]) and the automotive sector (e.g. Eclipse S-CORE [6]). Open source can enhance transparency, enable independent verification and foster collective development, thereby creating new approaches to risk control and safety governance [4]. Particularly in times of geopolitical tension, collaborative open-source development can also strengthen the sovereignty of IT infrastructure and supply chains.

Monolithic system architectures must first be modularised and a clear separation must be established between those components with high proprietary value creation and foundational components without any critical intellectual property (IP) in order to achieve similar progress in the railway sector. While the former typically remain within the responsibility of individual manufacturers, core platform technologies offer significant potential for cost savings through collaborative development and maintenance. This can accelerate innovation cycles, improve maintainability and stabilise safety arguments over the long term. At the same time, the sustainable use of OSS requires clear responsibilities among a core group of contributors, appropriate governance structures and long-term maintenance commitments.

A key factor for successfully establishing open source in OT environments is precisely this separation between competitively differentiating components and fundamentally standardised system components. The ongoing sector-wide standardisation efforts and central role played by safety cases, in-

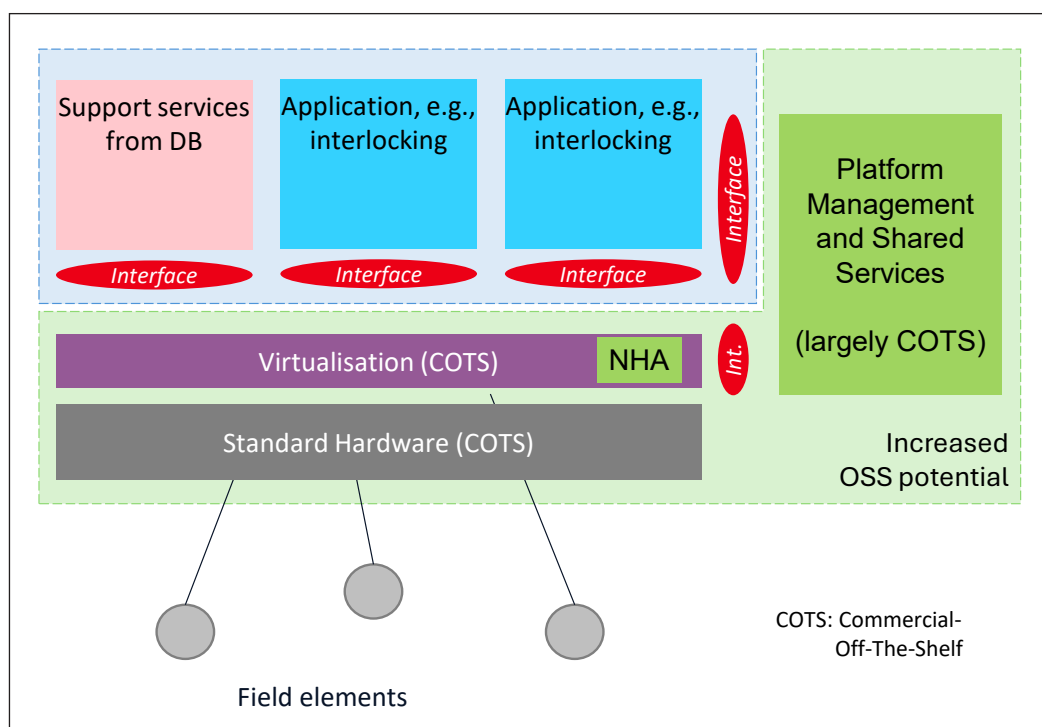


Bild 3: Virtualisierte DLST-Architektur inklusive OSS-Potenzialen in grün

Fig. 3: A virtualised digital signalling architecture (DLST), including the OSS potential highlighted in green

Quelle / Source: DB InfraGO

Zentral für die erfolgreiche Etablierung von Open Source im Bereich der OT ist wie genannt eine saubere Abgrenzung der wettbewerblich differenzierenden Komponenten von den grundlegend einheitlichen Komponenten des Systems. Bedingt durch die sektorweit vorangetriebene Standardisierung und die – auch im Hinblick auf die IP – zentralen Safety-Cases ergibt sich hierbei für bahnbetriebliche IT-Plattformen im OT-Kontext die in Bild 3 dargestellte Aufteilung. Während der hellblaue Teil oben sowohl die funktionalen Bestandteile inkl. der herstellerspezifischen Safety-Logik enthält, baut der hellgrüne Anteil inklusive Plattformmanagement und Shared Services weitestgehend auf auch in anderen Sektoren verbreiteten Komponenten auf.

Entsprechend existiert bei den Komponenten unterhalb des Safety-Layers ein hohes Potenzial zur Nutzung von COTS-Komponenten oder – bei Sektorspezifika – der sektorweiten OSS-Entwicklung.

Unter Letztere fällt auch die NHA-Komponente, die in Cloud4Rail erstmalig implementiert wurde. Auch wenn diese ggf. abhängig von der Umsetzung des Safety-Layers unterschiedliche Informationen bereitstellen muss, ist eine unternehmensübergreifende Nutzung und Weiterentwicklung aufgrund der überschaubaren Komplexität sehr vielversprechend.

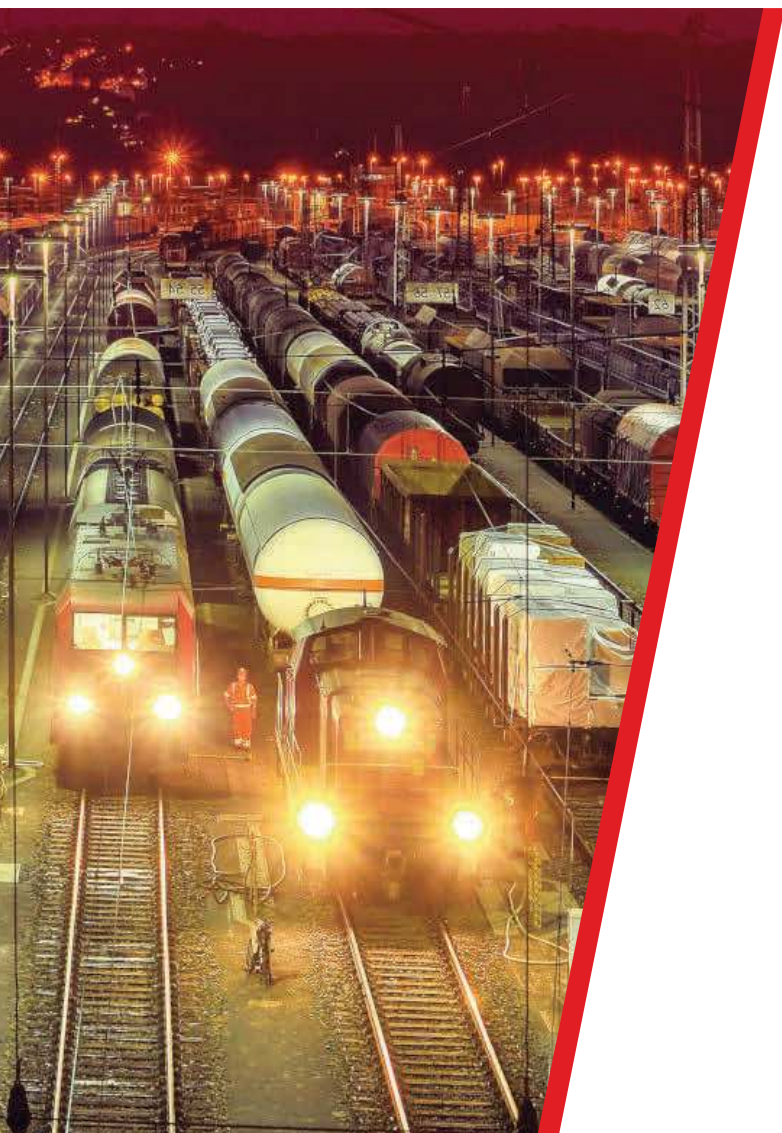
In einem ersten Schritt wurde die implementierte NHA-Komponente über den GitHub-Account der DB-InfraGO unter einer permissiven Lizenz dem Sektor zur Verfügung gestellt [7]. Im Anschluss soll gemeinsam mit interessierten Unternehmen z.B. innerhalb der Open Rail Association [8] eine auf die Bedürfnisse des Sektors ausgerichtete Gover-

cluding considerations of intellectual property, mean that railway IT platforms within the OT context can be structured as shown in fig. 3. The upper (light blue) layer here contains the functional elements, including the manufacturer-specific safety logic, while the lower (light green) layer, including the platform management and shared services, relies largely on components that are also widely used in other industries.

Accordingly, there is significant potential below the safety layer to use COTS components or, where sector-specific adaptations are required, to develop them collaboratively as open-source solutions.

The NHA component, initially implemented in the Cloud-4Rail project, is one such example. Although it may need to provide different types of information depending on the specific safety layer implementation, its relatively low complexity renders cross-company use and collaborative development highly promising.

The implemented NHA component has been made publicly available to the sector under a permissive licence via the DB InfraGO GitHub account [7] as an initial step. Going forward, a governance structure tailored to the sector's needs is planned in collaboration with interested stakeholders, for example within the Open Rail Association [8], so as to ensure long-term sustainability, predictability and joint development opportunities for participating organisations.



PINTSCH
Safety for Rail

Systemlösungen für die Bahninfrastruktur

PINPROTEGIO. Bahnübergangstechnik.

PINCLIRIO. Achszähltechnik.

PINMOVIO. Stellwerks- und Rangiertechnik.

PINMOVIO. Weichenantrieb.

PINLUXON. Signale.

PINPOSITON. Fördertechnik.

PINCALIO. Weichenheizungen.

PINDIAGON. Diagnose.



VISIT US
22.-25.9.26
HALLE 27
STAND 710

nance-Struktur aufgesetzt werden, um damit auch eine langfristige Planbarkeit sowie eine potenzielle gemeinsame Weiterentwicklung für die beteiligten Unternehmen sicher zu stellen.

5 Nachweis technischer Machbarkeit

Im Projekt Cloud4Rail erfolgte der Nachweis der technischen Machbarkeit mit Fokus auf der technischen Integration in die Umgebungsbedingungen des Betreibers. Die Machbarkeit wurde hierbei auf der technischen Ebene ohne die Übernahme von sicherungstechnischen Aufgaben und ohne Zulassungen gezeigt, und dies erfolgte in drei Schritten:

- **Funktionale Integration:** Hierbei wurde sichergestellt, dass die Funktionalität der RBC auf der COTS-Hardware und im Zusammenspiel mit der Siemens Software-Safety-Plattform unter dem Produktnamen „Distributed Smart Safe System, DS3,“ die vorhandene Funktionalität bereitstellt. Anschließend wurde die RBC-Anwendung mit der DS3-Plattform in eine virtuelle Maschine integriert, um die Trennung von Hardware und Software zu vervollständigen. In diesem Schritt wurde auch die Funktionalität der NHA-Komponente integriert, welche Voraussetzung für eine zukünftige Anwendung mit Sicherheitsverantwortung ist.
- **Technische Integration in die On-Premises-Cloud der DB InfraGO:** Ein wesentliches Ziel der Forschungskooperation war die Implementierung einer sektorweit nutzbaren NHA-Komponente. Diese Komponente wurde in der Cloud der DB InfraGO mit einer Standard-Virtualisierungslösung installiert, um eine SIL4-fähige Rechnerinfrastruktur zu erzeugen. Wichtig war dabei, dass in dieser Infrastruktur die Rahmenbedingungen zum Betrieb von SIL4-Anwendungen geschaffen wurden, allerdings keine Sicherheitsnachweise oder Begutachtungen der Hardware- und Softwarekomponenten erforderlich sind. Ebenso können in dieser Infrastruktur virtuelle Anwendungen mit unterschiedlichen SIL-Anforderungen genauso wie Anwendungen ohne Sicherheitsbezug betrieben werden. Die Integration der NHA-Komponente in die Virtualisierung schafft die Voraussetzungen, um SIL4-Anwendungen zu betreiben, behindert aber keine Anwendungen, die diese Anforderungen nicht stellen. Anschließend wurde die virtualisierte RBC-Anwendung in dieser SIL4-fähigen Rechnerinfrastruktur betrieben. Ziel war dabei, verschiedene Hardwareausfälle und Recovery-Mechanismen zu erproben, um die Betriebsführung einer virtualisierten SIL4-Anwendung zu testen.
- **Betrieblicher Test in praktischer Umgebung:** Nach der Integration in die SIL4-fähige Infrastruktur der DB InfraGO wurde das RBC im Digitalen Testfeld Bahn im Erzgebirge in eine reale Bahnumgebung gebracht. In diesem Testschritt ging es darum, die Integration einer virtuellen RBC-Anwendung im Zusammenspiel mit den Komponenten der Streckeninfrastruktur (z.B. der Funkausrüstung) und der Züge zu erproben und zu demonstrieren. Das Ziel dieser technischen Machbarkeitsstudien war es, Erfahrungen zu sammeln, um On-Premises-Cloud-Lösungen in zukünftigen Technikgenerationen der DB InfraGO als Referenzarchitektur für die zentralen Systeme der LST festzulegen. Dabei lag der Fokus darauf, Erfahrungen mit den grundlegenden Fragen zur Wartung und Instandhaltbarkeit von virtualisierten SIL4-Anwendungen zu sammeln. Das Ziel dieses Projekts war die Schaffung einer Referenz, die im gesamten Sektor genutzt werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Einführung einer standardisierten Trennung von Bahnanwendungen und IT-Plattformen mithilfe von Virtualisierung und der Aufbau moderner (On-Premises-)Cloud-Infrastruktur sind essenziell für den effizienten Rollout und Betrieb digitalisierter LST, mit

5 Proof of technical feasibility

Technical feasibility has been demonstrated in the Cloud4Rail project with a focus on the integration into the operator's existing environment. This feasibility was proven purely at a technical level, i.e. without taking on any safety responsibilities or obtaining any formal certifications, and undertaken in three steps:

- **Functional integration:** this step ensured that the RBC functionality could run on COTS hardware in combination with the Siemens' software safety platform, the "Distributed Smart Safe System" (DS3), while delivering the existing functionality. The RBC application, together with the DS3 platform, was then integrated into a virtual machine in order to complete the separation of hardware and software. The functionality of the NHA component, which is a prerequisite for future safety-critical deployment, was also integrated at this stage.
- **Technical integration into DB InfraGO's on-premises cloud:** a key objective of the research collaboration was to implement an NHA component that can be used across the entire sector. This component was deployed in the DB InfraGO cloud using a standard virtualisation solution to create a SIL4 capable computing infrastructure. Importantly, this infrastructure provides the necessary conditions for operating SIL4 applications but does not require any formal safety certification or an assessment of the underlying hardware and software components. At the same time, it also supports the operation of virtual applications with different safety integrity levels, as well as applications without any safety requirements. The integration of the NHA component into the virtualisation environment enables the use of SIL4 applications while not posing any burden to non-safety-critical applications. The virtualised RBC application was then operated within this SIL4 capable infrastructure. The objective was to test various hardware failure scenarios and recovery mechanisms in order to evaluate the operation of a virtualised SIL4 application.
- **Operational testing in a real-world environment:** following the integration into the SIL4 capable infrastructure, the RBC was deployed in DB's Digital Test Field in the Erzgebirge region, i.e. in a real operating environment. This testing phase focused on validating and demonstrating the interaction of the virtualised RBC with the trackside infrastructure components (such as the radio equipment) and trains. The goal of these technical feasibility studies was to gather experience that would enable on-premises cloud solutions to become the standard platform for central signalling systems in future generations of DB InfraGO technology. In particular, the focus was on gaining insights into the maintenance and serviceability aspects of the virtualised SIL4 applications. Ultimately, the project aimed to establish a reference architecture that could be adopted and utilised across the railway sector.

6 Summary and outlook

The introduction of a standardised separation between railway applications and IT platforms through virtualisation, together with the deployment of modern (on-premises) cloud infrastructure, is essential for the efficient rollout and operation of digital signalling systems. This approach offers significant cost advantages, increased flexibility and consequently faster deployment.

erheblichen Kostenvorteilen sowie einem Zugewinn an Flexibilität und damit Geschwindigkeit im Rollout.

Im Projekt Cloud4Rail wurde erstmals, aufbauend auf dem Sektorkonsens in Europe's Rail, die avisierte Gesamtarchitektur aus Bahnanwendung, Safety-Layer, Virtualisierung und Hardware umgesetzt und damit die technische Machbarkeit einer virtualisierten SIL4-Applikation nachgewiesen. Hierzu erfolgte auch erstmalig die Umsetzung einer sogenannten NHA-Komponente, die nun permissiv dem Sektor zur Verfügung gestellt wird und einen initialen Schritt in Richtung einer kollaborativen OSS-Entwicklung für unvermeidbare bahnspezifische Komponenten darstellt.

Die Arbeiten in Cloud4Rail dienen nun als Grundlage für die geplante Pilotierung eines ersten Stellwerkskerns in einer On-Premises-Cloud der DB InfraGO. Ergänzt werden sollen die Arbeiten durch die weitere Spezifikation und Implementierung von Diensten, die für das automatisierte Deployment, Konfiguration und Update von bahnbetrieblichen Funktionen und der darunterliegenden Cloud benötigt werden: Es ist geplant, den OSS-Gedanken im Förderprojekt FP2 R2DATO-2 ab Oktober 2026 in Partnerschaft mehrerer Bahnen und Bahnhersteller fortzuführen. ■

Danksagung

Die vorliegende Publikation sowie zugrundeliegende Arbeiten sind im Rahmen des im IPCEI-CIS geförderten Projekts Cloud4Rail entstanden. Das Projekt ist gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages sowie finanziert von der Europäischen Union.

The target architecture (comprising the railway application, safety layer, virtualisation and hardware) has been implemented for the first time within the Cloud4Rail project building on the sector-wide consensus established in Europe's Rail. This has successfully demonstrated the technical feasibility of a virtualised SIL4 application. As part of this work, a so-called Native Hardware Access component was also implemented for the first time. It has now been made available to the sector under a permissive license, representing an initial step toward collaborative open-source development for unavoidable railway-specific components.

The work carried out in Cloud4Rail is now serving as the foundation for the planned pilot deployment of an initial interlocking core within an on-premises cloud environment at DB InfraGO. These efforts will be supplemented by the further specification and implementation of the services required for the automated deployment, configuration and update of railway operations functions and the underlying cloud infrastructure. This follow-up work is scheduled to begin in October 2026 within the FP2 R2DATO-2 funding project, in partnership with multiple railway operators and industry manufacturers and will continue to embrace the aforementioned open-source approach. ■

Acknowledgement

This publication and the underlying work have been carried out within the framework of the Cloud4Rail project, funded under the IPCEI-CIS initiative. The project is supported by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy following a resolution of the German Bundestag and is co-financed by the European Union.

AUTOREN | AUTHORS

Dr. Jonas Rebstadt

IT Platform Architect
DB InfraGO AG
Anschrift / Address: EUREF-Campus 17, D-10829 Berlin
E-Mail: jonas.rebstadt@deutschebahn.com

Sonja Steffens

Product Manager Safety Platforms
Siemens Mobility GmbH
Anschrift / Address: Ackerstraße 22, D-38126 Braunschweig
E-Mail: sonja.steffens@siemens.com

Dr. Martin Mitzkus

System Manager DLST
Siemens Mobility GmbH
Anschrift / Address: Ackerstraße 22, D-38126 Braunschweig
E-Mail: martin.mitzkus@siemens.com

Dr. Patrick Marsch

Head of Technical System Architecture,
Technology Foundations and IT Platforms
DB InfraGO AG
Anschrift / Address: EUREF-Campus 17, D-10829 Berlin
E-Mail: patrick.marsch@deutschebahn.com

LITERATUR | LITERATURE

- [1] Fox, M.; Mayer-Buschmann, O.; Marsch, P.; Wissmann, J.; König, N.; Ventas, I. A.; Venturi, G.; Inzirillo, F.; Rozijn, P.; Martin, T.; Steffens, S.; Bernburg, T.: „D26.3 – Final Modular Platform requirements, architecture and specification“, 25.07.2025. [Online]. Available: <https://rail-research.europa.eu/wp-content/uploads/2025/04/D26.3-%E2%80%93-Final-Modular-Platform-requirements-architecture-and-specification.pdf>. [Zugriff am 06.02.2026]
- [2] Heine, A.; Marsch, P.; Rebstadt, J.: „Die Migration der Leit- und Sicherungstechnik in ein modernes IT- und Cloud-System“, SIGNAL+DRAHT 11/2025, S. 45-53
- [3] Ansar, Z.; Wissmann, J.: „Virtualisierte Safety-Architekturen in der Leit- und Sicherungstechnik“, SIGNAL+DRAHT 4/2026, S. 14-20
- [4] Rebstadt, J.; Schumacher, C.; Hetze, S.: „Einsatz von Open-Source-Software im Eisenbahnsektor“, Deine Bahn 05/2026
- [5] Finley, K.: „github.com“, 14.04.2021. [Online]. Available: <https://github.com/readme/featured/nasa-ingenuity-helicopter>. [Zugriff am 02.06.2026]
- [6] VDA, „Pressemitteilung VDA“, 07.01.2026. [Online]. Available: https://www.vda.de/de/presse/Pressemeldungen/2026/260107_PM_Innovation-im-Automotive-Sektor-durch-offene-Zusammenarbeit. [Zugriff am 06.02.2026]
- [7] DB InfraGO AG, „Official GitHub organisation of DB InfraGO AG“, [Online]. Available: <https://github.com/dbinfra>. [Zugriff am 26.05.2026].
- [8] OpenRail Association, [Online]. Available: <https://openrailassociation.org/>. [Zugriff am 06.02.2026]

Einsatz von Risikoanalysen in der Anforderungsermittlung

Using risk analyses as a basis for specification

Fabian Gaebler | Carsten Trog

Bewegliche Eisenbahnbrücken sind besondere Bauwerke und erfordern individuelle Lösungen zur sicheren Einbindung in die Leit- und Sicherungstechnik (LST) der Bahn. Dieser Beitrag zeigt, wie bewährte Prozesse der Systementwicklung und die in Deutschland für die Zulassungsbewertung etablierten Prozesse der Sektorleitlinie [1] für das System der elektrischen Schnittstelle zwischen der Maschinentechnik der Brücke und der LST angewendet werden können – mit Risikoanalysen als zentralem Instrument, um angemessene Anforderungen abzuleiten. Die folgenden Abschnitte zeigen die Praxiserfahrungen und den konkreten Nutzen des Prozesses für Anwender: von der Systemkonzeption über die Risikobewertung bis zur Zulassung. Schwerpunkt des Beitrags sind die Lebenszyklusphasen 1 bis 4 nach DIN EN 50126-1 [2].

1 Grundlagen

1.1 Bewegliche Brücken – Sonderfall in der Infrastruktur

Bewegliche Eisenbahnbrücken sind Sonderfälle in der Eisenbahninfrastruktur – in Deutschland existieren weniger als 30, im Netz der DB InfraGO AG weniger als zehn [5].

Grundsätzlich lassen sich dabei folgende Brückentypen unterscheiden [6]:

- Hubbrücke
- Drehbrücke
- Hub-Dreh-Brücke
- Klappbrücke
- Rollklappbrücke.

Für den Bahnverkehr ist insbesondere die Schnittstelle – der Schienenübergang – zwischen festem und beweglichem Brückenteil relevant.

1.2 Sektorleitlinie

Die Sektorleitlinie [1] ist eine technische Vorschrift für die Zulassungsbewertung von Signal-, Telekommunikations- und Elektrotechnischen Anlagen im Zuständigkeitsbereich des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA). Sie beschreibt die Prozesse der Zulassungsbewertung, die für die Beantragung einer „Genehmigung zum Inverkehrbringen und Verwenden“ nach § 27 EIGV (Verordnung über die Erteilung von Inbetriebnahmegenehmigungen für das Eisenbahnsystem) notwendig sind. Die Sektorleitlinie umfasst die Aspekte Safety und IT Security. Im folgenden Beitrag wird ausschließlich auf die funktionale Sicherheit signaltechnischer Anlagen Bezug genommen.

Für die nachfolgenden Ausführungen sind die Prozesse der Zulassungsbewertung im Vorfeld der Beantragung einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) relevant. Eine ZiE ist erforderlich, wenn von technischen Vorschriften abgewichen werden muss oder keine Vorschrift

Movable railway bridges are special structures and require individual solutions for their safe integration into the control-command and signalling (CCS) systems. This article shows how proven system development processes and the procedures established in Germany for the approval process in the Sektorleitlinie [1] can be applied to the electrical interface system between the bridge machinery and the CCS system using risk analyses as the central instrument to derive the appropriate requirements. The following sections outline the practical experience and highlight the benefits of the process for users, covering all the phases from the system design and risk assessment through to the approval. This article focuses on lifecycle Phases 1 to 4 according to EN 50126-1 [2].

1 The fundamentals

1.1 Movable bridges – a special infrastructure case

Movable railway bridges are special cases within the railway infrastructure. Fewer than 30 exist in Germany, while there are fewer than ten in the DB InfraGO AG network [5].

In principle, the following bridge types can be distinguished [6]:

- lift bridge
- swing bridge
- lift-swing bridge
- bascule bridge
- rolling bascule bridge.

For railway operations, the interface between the fixed and movable bridge section, i.e. the rail joint, is of particular relevance.

1.2 Sektorleitlinie

The German Sektorleitlinie [1] is a technical regulation for the approval process applied to the signalling, telecommunications and electrical installations that fall within the responsibility of the German Federal Railway Authority (EBA). It describes the approval processes required for applying for “authorisation to introduce a product for placing on the market” in accordance with Section 27 of the EIGV (Ordinance on the granting of authorisations for placing on the market into the railway system). The Sektorleitlinie covers the aspects of safety and IT security. This article exclusively addresses the functional safety of signalling systems.

The approval processes prior to the authorisation application in individual cases (“Zustimmung im Einzelfall” – ZiE) are relevant for the following deliberations. A ZiE is required whenever a new technical solution or adaptation has to be developed for a



Bild 1: Der Neubau der Friesenbrücke als Hub-Dreh-Brücke

Fig. 1: The new construction of the Friesenbrücke as a lift-swing bridge

Quelle / Source: eigenes Foto / own photograph

ten bestehen. Für die im Beitrag beschriebenen Sachverhalte ist dies der Fall. Die wenigen beweglichen Brücken besitzen unterschiedliche Randbedingungen, wofür kein Regelwerk definiert ist. In diesen Fällen ist eine ZiE Typ B erforderlich, da gesonderte Entwicklungen für Einzelfälle durchgeführt werden. Die Entwicklungs- und Prüftätigkeiten enden mit der Prüferklärung des Freigabeverantwortlichen als Ergebnis der Prüfungen für die ZiE Typ B.

1.3 Risikoanalysen

Unter Risikobewertung wird gemäß CSM-VO [4] der aus Risikoanalyse und Risikoevaluierung bestehende Gesamtprozess verstanden. Die Risikoanalyse ist dabei die systematische Auswertung aller verfügbaren Informationen zur Ermittlung von Gefährdungen und Abschätzung von Risiken.

Die Durchführung von Risikobewertungen selbst ist kein Bestandteil der Sektorleitlinie. Es stehen hierfür verschiedene Verfahren zur Verfügung. Geeignete Methoden sind beispielsweise in der im Bahnsektor etablierten Norm DIN EN 50126-1 [2] für die Systementwicklung beschrieben und als Bestandteil der Phase 3 des Entwicklungsprozesses definiert.

Der risikobasierte, prozessorientierte Ansatz ist seit der Einführung der CENELEC Normen, wie der DIN EN 50126, in den 1990er Jahren etabliert und wird seit vielen Jahren in Projekten angewendet. Gleichwohl zeigt die Praxis, dass dieser Ansatz in Deutschland nicht in allen Projekten konsequent umgesetzt wird.

Seit 2009 verlangt die CSM-VO [4] die Bewertung von Änderungen am Eisenbahnsystem. Die Risikoanalyse der Auswirkungen der Änderungen ist dabei ein zentraler Bestandteil.

1.4 Relevante Normen

Für die Schnittstelle zwischen Eisenbahn und Brücke sind unterschiedliche Normen relevant. Der Prozess für die Entwicklung und

single application. This applies to the cases described in this article. The few existing movable bridges have different boundary conditions, for which no common guidelines or specifications have been established. In these cases, a ZiE Typ B is required, as specific development is carried out for each individual bridge. The development process ends with the declaration of the person responsible for release, the “Freigabeverantwortlicher”.

1.3 Risk analysis

In accordance with the CSM Regulation [4], risk assessment is understood to mean the overall process comprising a risk analysis and a risk evaluation. Risk analysis means the systematic use of all available information to identify hazards and estimate risks.

The execution of risk assessments itself does not constitute part of the Sektorleitlinie. Various methods may be used. For example, appropriate system development methods are described and established in the EN 50126-1 railway standard [2] where they are defined as Phase 3 of the development process.

The risk-based, process-oriented approach has been established since the introduction of the CENELEC standards such as EN 50126 in the 1990s and has been applied in projects for many years. Nevertheless, practical experience has shown that this approach has not been consistently implemented in all the projects in Germany.

The CSM Regulation [4] has required the assessment of any changes to the railway system since 2009. The risk analysis of the impact of the changes is a core element within this context.

1.4 The relevant standards

Different standards are relevant for the interface between the railway and the bridge. The process for the development and au-

Zulassung des betrachteten Systems (siehe nächster Abschnitt) folgt den Vorgaben der Bahnnorm DIN EN 50126, die somit für das Teilsystem Stellwerk und den Gesamtprozess anzuwenden ist. Bewegliche Brücken unterliegen der Maschinenrichtlinie [7] bzw. Maschinenverordnung [8] der Europäischen Union, in denen einheitliche Anforderungen an die Sicherheit und das Inverkehrbringen von Maschinen festgelegt sind. Daher ist für den Teil der elektrischen Schnittstelle der Brücke zur LST die DIN EN ISO 13849-1 [9] für sicherheitsrelevante Steuerungsfunktionen anzuwenden. Beide Normen beziehen sich unter anderem auf Vorgaben zur Gewährleistung der funktionalen Sicherheit von Systemen und sind domänenspezifische Ausprägungen der DIN EN 61508. In Teilen existieren Unterschiede zwischen den Normen wie bei der Bestimmung von Sicherheitsanforderungen oder -integritätsstufen (SIL / PL) sowie den Anforderungen an die Prozessdokumentation. Die Performance Level (PL) werden gemäß DIN EN ISO 13849-1 [9] festgelegt (Tab. 1). Die DIN EN 50126-2 [3] ordnet den tolerierbaren funktionalen Ausfallraten (TFFR) Sicherheits-Integritätslevel (SIL) zu (Tab. 2).

PL und SIL können nicht gleichgesetzt werden, da unterschiedliche Anforderungen an den Sicherheitsprozess gestellt werden. Es wird festgestellt, dass für SIL 4 nach DIN EN 50126-2 [3] kein PL gemäß DIN EN ISO 13849-1 [9] existiert.

Performance Level (PL)	Mittlere Häufigkeit eines gefährbringenden Ausfalls (PFH) je Stunde [1/h]
a	$10^{-5} \leq PFH < 10^{-4}$
b	$3 \times 10^{-6} \leq PFH < 10^{-5}$
c	$10^{-6} \leq PFH < 3 \times 10^{-6}$
d	$10^{-7} \leq PFH < 10^{-6}$
e	$PFH < 10^{-7}$

Tab. 1: Definition Performance Level Quelle / Source: [9]

tolerierbare funktionale Ausfallrate [1/h]	SIL-Zuordnung
$10^{-9} \leq TFFR < 10^{-8}$	4
$10^{-8} \leq TFFR < 10^{-7}$	3
$10^{-7} \leq TFFR < 10^{-6}$	2
$10^{-6} \leq TFFR < 10^{-5}$	1
$> 10^{-5}$	Basisintegrität

Tab. 2: Zuordnung TFFR und Sicherheits-Integritätslevel Quelle / Source: [3]

1.5 Betrachtetes System

Im Rahmen dieses Beitrags wird das System „Bahnbetriebliche Steuerung der Brücke“ betrachtet. Das System wird in Folge eines Brücken- und/oder Stellwerksneubaus geändert und in Teilen neu entwickelt, wobei Änderungen gegenüber der Bestandslösung entstehen. Das System stellt sicher, dass Züge nur dann die Brücke und die Schienenübergänge befahren dürfen, wenn diese in Endlage überwacht sind. Dafür soll das betrachtete System mindestens die folgenden Anwendungsfälle beherrschen:

- Regelfall: Durchführung der Zugfahrt, Öffnung und Schließung der Brücke sowie des Schienenübergangs
- Störfall: Durchführung der Zugfahrt bei Störung der Verbindungen zwischen Brücke und Stellwerk.

Bild 2 zeigt eine vereinfachte Systemdefinition. Mit dem System können verschiedene Akteure interagieren: der Triebfahrzeug-

thorisation of the system under consideration (see the next section) follows the requirements of the EN 50126 railway standard and is therefore applicable to the interlocking subsystem and to the overall process.

Movable bridges are subject to the European Union’s Machinery Directive [7] and Machinery Regulation [8], which define harmonised requirements for the safety of machinery and placing machinery on the market. Therefore, EN ISO 13849-1 [9] should be applied to the safety-related control functions pertaining to the part of the electrical interface between the bridge and the CCS system.

Both standards refer to requirements for ensuring the functional safety of the systems and represent domain-specific implementations of IEC 61508. Differences exist between the standards in some respects, for example in the determination of safety requirements or safety integrity levels (SIL / PL), as well as in the requirements for process documentation. Performance Levels (PL) are defined in accordance with EN ISO 13849-1 [9] (tab. 1), while EN 50126-2 [3] assigns Safety Integrity Levels (SIL) to the tolerable functional failure rates (TFFR) (tab. 2).

The PL and SIL cannot be equated, as different requirements apply to the safety process. It should be noted that no PL

Performance Level (PL)	Probability of Dangerous Failure (PFH) per Hour [1/h]
a	$10^{-5} \leq PFH < 10^{-4}$
b	$3 \times 10^{-6} \leq PFH < 10^{-5}$
c	$10^{-6} \leq PFH < 3 \times 10^{-6}$
d	$10^{-7} \leq PFH < 10^{-6}$
e	$PFH < 10^{-7}$

Tab. 1: The definition of the performance levels Quelle / Source: [9]

Tolerable Functional Failure Rate (TFFR) [1/h]	SIL allocation
$10^{-9} \leq TFFR < 10^{-8}$	4
$10^{-8} \leq TFFR < 10^{-7}$	3
$10^{-7} \leq TFFR < 10^{-6}$	2
$10^{-6} \leq TFFR < 10^{-5}$	1
$> 10^{-5}$	basic integrity

Tab. 2: The allocation of TFFR and Safety Integrity Levels Quelle / Source: [3]

equivalent according to EN ISO 13849-1 [9] exists directly for SIL 4 according to EN 50126-2 [3].

1.5 The system under consideration

The “railway operational control of the bridge” system is considered within the context of this article. The system is modified as part of a new bridge and/ or interlocking installation and is partly newly developed, resulting in changes compared to the existing solution.

The system ensures that trains are only permitted to travel over the bridge and the rail joints when they are monitored at their end position. The system under consideration must therefore at least support the following use cases for this purpose:

- regular operations: the execution of train movements, the opening and closing of the bridge and of the rail joint

fürer im Zug, die Schifffahrt, Fußgänger, Radfahrer sowie der Straßenverkehr.

Menschliche Rollen im betrachteten System sind insbesondere der Brückenwärter, der Fahrdienstleiter sowie Wartungs- und Instandhaltungspersonal. Dabei können Brückenwärter und Fahrdienstleiter am selben Ort arbeiten und auch eine Person sein.

Die Brückensteuerung steuert die Brückenantriebe für die Bewegung und umfasst unter anderem den Bedienplatz für den Brückenwärter.

Die Brückenschnittstelle ist ein von der Brückensteuerung unabhängiges System. Sie überwacht die Endlage des Schienenübergangs und verwaltet die Freigabe aus dem Stellwerk (wie die Energieeinschaltung für die Brückenantriebe).

2 Einbindung beweglicher Brücken in die LST

2.1 Grundsätzliche Anforderung

Gemäß der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) [10] § 14 Abs. 6 müssen bewegliche Brücken örtlich durch Signale so gesichert werden, dass die Signale in Haltstellung verschlossen sind, solange die Brücke entriegelt ist, und dass die Brücke bei Fahrtstellung der Signale nicht entriegelt werden kann.

2.2 Sicherheitsziele

Für die Einbindung der Brücke in die LST sind grundsätzlich die folgenden zwei Gefährdungen maßgebend:

- degraded operations: the execution of train movements in the event of a failure of the connections between the bridge and the interlocking.

Fig. 2 shows a simplified system definition. Various actors can interact with the system: the train driver in the train, shipping traffic, pedestrians, cyclists and road traffic.

The human roles within the system are mainly the bridge operator, the signaller and the maintenance personnel. The bridge operator and signaller may work at the same location and may be the same person.

The bridge control system controls the bridge drive units for movement and includes, amongst other things, the operator workstation for the bridge operator.

The bridge interface is a system that is independent of the bridge control system. It monitors the end position of the rail joint and manages the authority from the interlocking (such as the power supply activation for the bridge drive units).

2 Integrating movable bridges into the CCS system

2.1 The fundamental requirement

According to section 14, subsection 6 of the German Railway Construction and Operating Regulation (EBO) [10], movable bridges must be protected locally by signals in such a way that the signals are locked in the stop aspect as long as the bridge



BBL Bahnbau Lüneburg
Unternehmensgruppe

**WIR
BEWEGEN
WAS**

Besuchen Sie uns an
unserem Stand auf der
InnoTrans 2026.

**Halle 25, Stand 240B
22.- 25.09.2026, Berlin**

bbl-unternehmensgruppe.de



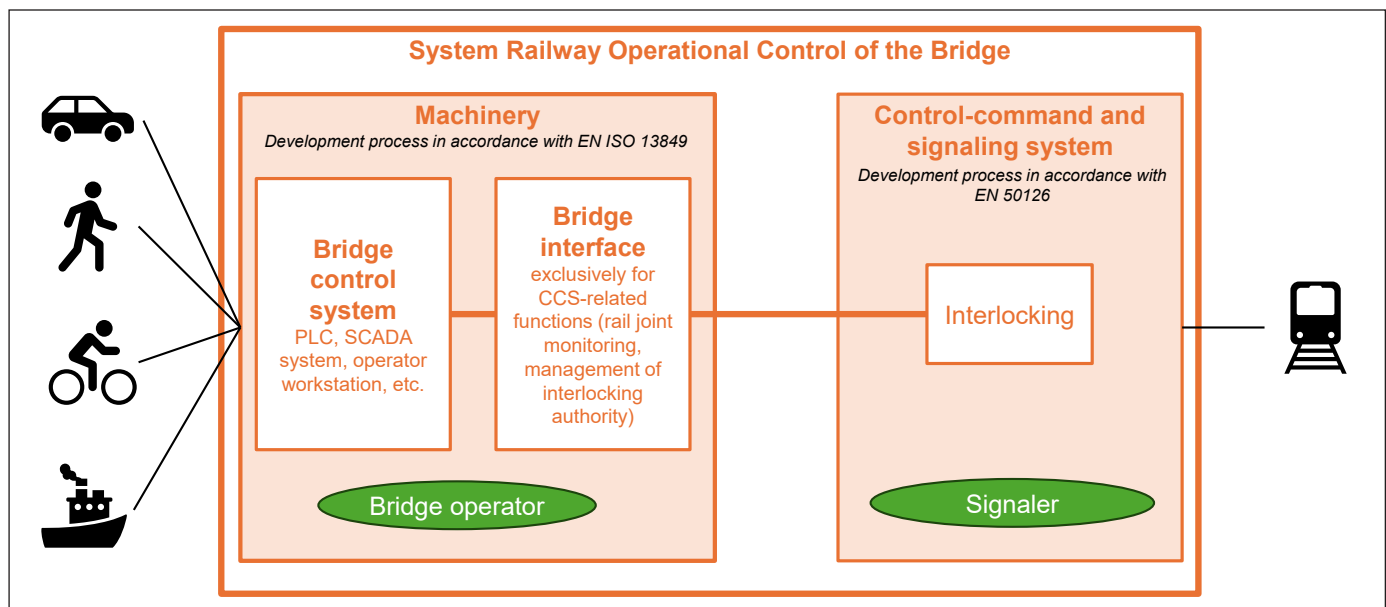


Bild 2: Vereinfachte Systemdefinition

Fig. 2: A simplified system definition

Quelle / Source: eigene Darstellung / own image

- Signalfahrtstellung, obwohl Brücke und Schienenübergang nicht in Endlage überwacht sind
- Öffnen der Brücke, obwohl sich ein Zug auf der Brücke befindet. Hieraus folgt, dass die Überwachung der Endlage des Schienenübergangs von zentraler Bedeutung ist, da bei Überfahrt eines Zuges unmittelbar die Gefahr der Entgleisung besteht. Aufgrund der potenziell katastrophalen Unfallfolgen ist für die Fahrt eines Zuges über den Schienenübergang das Sicherheitsziel SIL 4 nach DIN EN 50126-2 [3] zu erreichen.

2.3 Herausforderungen aus Sicht LST

Für die Einbindung der Brücke in die LST können grundsätzlich mindestens die folgenden Stellwerksfunktionen genutzt werden:

- Schlüsselsperre
- Nahstellbereich
- Weiche
- Bahnübergang.

Die Wahl einer der genannten Funktionen ist nicht trivial, da mindestens die folgenden weiteren Fragestellungen zu berücksichtigen sind, welche mögliche Lösungen einschränken:

- Welche Stellwerksbauart ist vorhanden? Stehen alle Funktionen zur Verfügung, d. h. sind sie bereits entwickelt und zugelassen?
- Befindet sich die Brücke auf der freien Strecke oder im Bahnhof?
- Wie können die brückendeckenden Signale angeordnet werden?
- Erfolgt eine Auswertung der Gleisfreimeldung vor Abgabe der Hoheit an die Brücke?
- Bestehen weitere Abhängigkeiten (z. B. gemeinsame Nutzung der Brücke mit dem Straßenverkehr)?

Im nächsten Abschnitt wird ein beispielhaftes Vorgehensmodell erläutert, das sich in der Praxis bewährt hat.

3 Vorgehensweise in der Praxis

3.1 Prozess

Wie zuvor eingeführt, folgt die Entwicklung den Vorgaben der DIN EN 50126-1 [2]. Zum Start des konkreten Projekts werden daher zur Planung der (sicherheitlichen) Aktivitäten Prozessdokumente erstellt. Dazu gehören mindestens:

is unlocked and so that the bridge cannot be unlocked when the signals display a proceed aspect.

2.2 Safety targets

The following two hazards are fundamentally decisive for the integration of a bridge into the CCS system:

- signals displaying proceed although the bridge and rail joint are not monitored at their end positions
- opening the bridge although a train is located on the bridge. It follows that monitoring the end position of the rail joint is of central importance, since there is an immediate risk of derailment when a train passes over it. Due to the potentially catastrophic consequences of an accident, the SIL 4 safety target according to EN 50126-2 [3] must be achieved for train movements over the rail joint.

2.3 The challenges from the CCS perspective

The type of interlocking matters for the integration of the bridge into the CCS system. In the case of interlockings based on route tables, the integration can be handled rather flexibly. As DB InfraGO mainly uses geographical interlockings, it is advantageous to use the existing technical solutions for the interface so as to avoid any long-lasting development for single applications. At least the following interlocking functions can be used in principle:

- key lock
- local control area ("Nahstellbereich")
- points
- level crossing.

The selection of one of these functions is not trivial, as the following questions that constrain possible solutions must then be considered:

- Which interlocking type is available? Are all the functions available, i.e. already developed and approved?
- Is the bridge located on an open line or within a station?
- How can the signals protecting the bridge be arranged?
- Is the track vacancy detection evaluated before the authority is transferred to the bridge?

- Sicherheitsplan
- Qualitätsmanagementplan
- Dokumentenmanagementplan.

3.2 Systemdefinition

Zu Beginn erfolgt die Systemdefinition. Das betrachtete System wurde bereits zuvor beschrieben. Insbesondere ist auf eine klare Abgrenzung zwischen den verschiedenen Teilsystemen und Zuständigkeiten zu achten. Die Systemdefinition schafft Klarheit hinsichtlich der zu lösenden Aufgaben.

3.3 Signifikanz

Auf Basis der Systemdefinition kann die Bewertung der Änderung nach CSM-VO [4] erfolgen. In den bisherigen Projekten ergab sich dabei stets eine sicherheitsrelevante signifikante Änderung. Dies erfordert die Durchführung des Risikomanagementverfahrens nach CSM-VO.

3.4 Risikobewertung

Aufbauend auf der Signifikanzbewertung wird im nächsten Schritt die Risikobewertung, bestehend aus Risikoanalyse und Risikoevaluation, durchgeführt. Die Vorgehensweise besteht grundsätzlich aus folgenden Arbeitsschritten:

1. Die Gefährdungen werden ermittelt und identifiziert.
2. Die Gefährdungen werden klassifiziert, d. h. die Konsequenzen der zuvor ermittelten Gefährdungen werden analysiert.
3. Die Beurteilung der Risiken erfolgt durch die Ermittlung der Häufigkeiten der Gefährdungen.
4. Abschließend werden Maßnahmen zur Gefährdungsbeherrschung festgelegt und die Sicherheitsverantwortung auf Funktionen und Teilsysteme aufgeteilt.

Die Dokumentation erfolgt im Gefährdungsprotokoll und Risikobewertungsbericht. Bei der Durchführung der Risikobewertung ist zu berücksichtigen, dass

- jede Brücke und ihre Einbindung in die LST Einzelfälle sind,
- kein Regelwerk besteht,
- bisherige Bestandslösungen stark heterogen sind,
- bisherige Bestandslösungen in Teilen auf veralteten Techniken basieren und daher eher nicht als Referenzsysteme geeignet sind,
- kaum Daten existieren (z. B. in Bezug auf gefährliche Ereignisse),
- vorhandene Risikobewertungen für weitere Teilsysteme wie der Maschinenteknik berücksichtigt werden müssen,
- menschlich-organisatorische Faktoren (Betriebsregeln, Instandhaltung) in der Bewertung mitbetrachtet werden müssen und
- das betrachtete System ein Zusammenspiel zwischen mechanischen und elektronischen Systemen ist.

Aus diesen Gründen kann weder der Risikoakzeptanzgrundsatz „Anwendung der Regelwerke“ noch „Ähnliche Referenzsysteme“ nach CSM-VO [4] gewählt werden. Es wird daher die Risikoakzeptanz „explizite Risikoabschätzung mit qualitativem Expertenurteil“ gewählt. Für quantitative oder semiquantitative Verfahren fehlen belastbare Daten. Zudem wird gemäß DIN EN 50126-2 [3] darauf verwiesen, dass unter anderem beim Einsatz mechanischer Komponenten oder bei der Beurteilung von Betriebsregeln der qualitative Ansatz zu verwenden ist.

3.5 Anforderungsspezifikation

Die Sektorleitlinie fordert für die ZiE die Erstellung einer gemeinsamen Spezifikation mit allen Beteiligten (Hersteller und Betreiber). In der Praxis hat sich der Begriff „Aufgabenstellung“ durch-

- Do any further dependencies exist (for example, shared use of the bridge with road traffic)?

The next section provides an example of a procedural model that has proven successful in practice.

3 The approach in practice

3.1 The process

As stated above, the development follows the requirements of EN 50126-1 [2]. At the start of the specific project, process documents are created to plan the (safety-related) activities. These include at least:

- a safety plan
- a quality management plan
- a document management plan.

3.2 System definition

The process begins with the system definition. The system under consideration has already been described above. Particular attention must be paid to the clear separation of the different subsystems and responsibilities. The system definition delivers a clear focus on the tasks to be resolved.

3.3 Significance

The assessment of the change in accordance with the CSM Regulation [4] can be carried out based on the system definition. In previous projects, this has constantly resulted in a significant change with an impact on safety. This requires the application of a risk management process in accordance with the CSM Regulation.

3.4 Risk assessment

Building on the significance assessment, the next step is to carry out the risk assessment consisting of a risk analysis and a risk evaluation. The procedure essentially consists of the following steps:

1. hazard identification
2. hazard classification, i.e. an analysis of any consequences
3. a risk evaluation involving the determination of the hazard frequency
4. a definition of the risk control measures and the allocation of safety responsibilities to functions and subsystems

Documentation is provided in the hazard log and the risk assessment report. The following aspects must be taken into account when carrying out the risk assessment:

- each bridge and its integration into the CCS system constitutes an individual case,
- no code of practice exists,
- the existing legacy solutions are highly heterogeneous,
- the existing legacy solutions are in part based on obsolete technologies and are therefore scarcely suitable as reference systems,
- hardly any data exists (for example regarding hazardous events),
- existing risk assessments for other subsystems such as the machinery must be taken into account,
- human and organisational factors (operating rules, maintenance) must be included in the assessment and
- the system under consideration constitutes an interaction between mechanical and electronic systems.

For these reasons, neither the “codes of practice” nor “similar reference system(s)” risk acceptance principles according to the CSM

gesetzt. In der Aufgabenstellung werden die in der Risikobewertung identifizierten Sicherheitsanforderungen und weitere (nicht-funktionale) Anforderungen spezifiziert. Bewährt hat sich die Erstellung mehrerer Teilspezifikationen („Lastenhefte“) für die verschiedenen Adressaten: Hersteller Brückenschnittstelle, Hersteller Stellwerk sowie Instandhaltung / Betrieb.

3.6 Nachweisführung

Nach Abschluss der Anforderungsspezifikation in Phase 4 erfolgen die Umsetzung und Dokumentation durch die Hersteller, d.h. der Nachweis der Erfüllung der (Sicherheits-)Anforderungen. Dies beinhaltet beispielsweise Schaltpläne, Pflichtenheft, Design-Spezifikation, Testdokumentation und Validierungsbericht. Die Aktivitäten der Hersteller eines Teilsystems werden jeweils mit einem Gutachten abgeschlossen. Der Betreiber erstellt das betriebliche Regelwerk. Auf Gesamtsystemebene folgt das Integrationsgutachten, welches alle Aspekte zusammenführt. Die betriebliche Integration schließt insbesondere die betrieblichen Regelwerke wie Bedienungsanweisungen für den Brückenwärter oder örtliche Zusätze für den Fahrdienstleiter mit ein.

4 Erkenntnisse

Signon setzt das beschriebene Vorgehen seit mehreren Jahren in verschiedenen Projekten zur Einbindung beweglicher Eisenbahnbrücken in die LST erfolgreich ein.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Vorgehensweise und die gewonnenen Erfahrungen lassen sich auf ähnlich gelagerte Vorhaben übertragen. Eine hohe Wiederverwendbarkeit besteht insbesondere bei Prozessdokumenten, Methoden der Risikobewertung sowie bei der Struktur von Anforderungsspezifikationen. Prozess und Dokumentation können an die jeweilige Projektsituation angepasst werden. Inhaltliche Anpassungen sind jedoch aufgrund der Einzigartigkeit jedes Projektes stets erforderlich.

Obwohl eine Entwicklung nach DIN EN 50126 mit einem nicht zu unterschätzenden Dokumentationsaufwand einhergeht, ermöglicht sie eine saubere und langfristig nachvollziehbare Systemdokumentation.

Die in diesem Beitrag eingeführte vereinfachte Systemdefinition mit klarer Trennung der Verantwortlichkeiten zwischen Maschinenteknik und LST wird empfohlen. Sie erleichtert den Entwicklungs- und Zulassungsprozess ebenso wie den späteren Betrieb. Maßgebend ist dabei die Unabhängigkeit der Brückenschnittstelle von der Brückensteuerung: Änderungen an der Brückensteuerung erfordern keine Anpassungen bei der Einbindung der Brücke in die LST und ermöglichen so eine lange Lebensdauer ohne erneute Zulassung.

Es wird nicht empfohlen, die Entwicklung und Zulassung der Brückenschnittstelle gemäß DIN EN 50126 durchzuführen. Die Praxis zeigt, dass die DIN EN 13849 passender ist. Empfohlen wird, den Gesamtprozess nach DIN EN 50126 zu strukturieren. Die geforderten Sicherheitsziele können über das vorgestellte Vorgehen erreicht werden.

Die Erfahrung zeigt, dass bereits in den Phasen 1 bis 4 die vorgesehene Realisierung mitberücksichtigt werden sollte, da sich die spezifischen Funktionen auf Basis der gewählten Einbindung unterscheiden. Eine generische Beschreibung bietet daher kaum einen Vorteil: Zum einen gibt es in Deutschland nur wenige bewegliche Brücken, zum anderen ist stets eine Anpassung an die konkrete Situation erforderlich. So beeinflusst beispielsweise die konstruktive Ausführung des Schienenübergangs die ermittelten Sicherheitsanforderungen.

Regulation [4] can be applied. The “explicit risk estimation with qualitative expert judgement” risk acceptance principle is therefore chosen. Reliable data for quantitative or semi-quantitative methods is not available. In addition, EN 50126-2 [3] states, amongst other things, that a qualitative approach is to be used when mechanical components are employed or when operating rules are assessed.

3.5 The requirements specification

The Sektorleitlinie requires a joint specification with all the parties involved (manufacturers and infrastructure managers) for approval in individual cases (ZiE). The term “Aufgabenstellung” has been established from practice. “Aufgabenstellung” specifies the safety requirements identified during the risk assessment as well as any additional (non-functional) requirements. It has proven effective to create several sub-specifications for the different addressees: the bridge interface manufacturer, the interlocking manufacturer and maintenance / operations.

3.6 Demonstrating compliance

Following the completion of the system requirements specification in Phase 4, the implementation and documentation are carried out by the manufacturers in order to demonstrate compliance with the (safety) requirements. This includes, for example, circuit diagrams, functional specifications, design specifications, test documentation and the validation report. The activities of a subsystem manufacturer are each concluded with an assessment report. The infrastructure manager prepares the operating rules. An integration assessment consolidates all the aspects at the system level. Operational integration particularly includes the operating rules such as operating instructions for the bridge operator or the local instructions for the signaller.

4 Findings

Signon has been successfully applying the described approach in various projects involving the integration of movable railway bridges into the CCS system for several years.

The approach and experience presented in this article can be transferred to similar projects. High reusability particularly exists for process documents, risk assessment methods and the structure of the requirements specifications. The processes and documentation can be adapted to specific project situations. However, content-related adaptations are always necessary due to the uniqueness of each project.

Although the development according to EN 50126 is associated with a considerable documentation effort, it enables clean and long-term traceable system documentation.

The simplified system definition introduced in this article, which provides clear separation of the responsibilities between the machinery and CCS, is recommended. It facilitates both the development and approval process as well as any subsequent operations. The independence of the bridge interface from the bridge control system is crucial as potential changes to the bridge control system do not require any modifications to the integration of the bridge into the CCS system and thus enable a long service life without any re-authorisation.

It is not recommended to carry out the development and approval of the bridge interface in accordance with EN 50126. Practical experience has shown that EN 13849 is more appropriate. However, the overall process should be structured according to EN 50126. The required safety targets can be achieved using the approach presented.

Es zeigt sich, dass die in der Risikobewertung ermittelten Gefährdungen und Risikominderungsmaßnahmen zwischen verschiedenen Brückenprojekten grundsätzlich ähnlich sind, im Detail aber deutliche Unterschiede bestehen. Es ist wichtig, das Expertenwissen verschiedener Akteure für die angemessene Bewertung der Risiken zu nutzen und eine heterogene Zusammensetzung der Expertenteams anzustreben.

Die Weiternutzung von Bestandlösungen als anerkannte Regel der Technik ist nicht zwangsläufig mit Sicherheitsvorteilen verbunden, da risikobasierte Ansätze und Risikobewertungen zur Ableitung angemessener Sicherheitsanforderungen in der Vergangenheit weniger ausgeprägt waren. Im Gegenteil, Risikobewertungen zeigen in Einzelfällen, dass bestimmte Teile von aufwendigen Bestandlösungen nur einen geringen Beitrag zur Sicherheit leisten.

5 Fazit

Dieser Beitrag beschreibt ein in der Praxis bewährtes Vorgehen für die Entwicklung und Zulassung der Einbindung beweglicher Eisenbahnbrücken in die LST. Das Vorgehensmodell bietet Anwendern einen hohen Nutzen, da es auf weitere Projekte übertragbar ist.

Der Beitrag zeigt, dass mit dem vorhandenen „Werkzeugkasten“ zur Systementwicklung (wie den CENELEC-Normen) und zur Systemzulassung (wie der Sektorleitlinie) auch spezielle Einzelfälle mit unterschiedlichen Zuständigkeiten und Normen spezifiziert und zugelassen werden können. Die vorhandenen Prozesse sind hinreichend beschrieben.

Die Durchführung der Risikobewertung als explizite Risikoabschätzung auf Basis qualitativer Expertenurteile führt zu angemessenen Sicherheitsanforderungen. Dies ist von großer Bedeutung, um die Komplexität der Systeme nicht unnötig zu erhöhen. Der Ansatz hat sich auch in anderen Projekten bewährt. Frühzeitige Realisierungsnähe, interdisziplinäre Expertenteams und eine vollständige, nachvollziehbare Nachweisführung sind wesentliche Erfolgsfaktoren.

Die Vorgehensweise führt zu Lösungen, deren Umsetzung ohne Entwicklungsaufwände am Stellwerk auskommt. Für ausführen-

Experience has shown that the intended implementation should already be considered in Phases 1 to 4, since the specific functions differ depending on the chosen integration solution. A generic description therefore offers hardly any advantages: on the one hand, there are only a few movable bridges in Germany; on the other hand, adaptation to the specific situation is always necessary. For example, the structural design of the rail joint influences the derived safety requirements.

While the hazards and risk mitigation measures identified during the risk assessment are generally similar across different bridge projects, it should be noted that there are significant differences in detail. It is essential to use expert knowledge from various parties for an appropriate risk assessment and to aim for a heterogeneous composition of the expert teams.

Reusing existing solutions as a code of practice is not necessarily associated with safety benefits, since risk-based approaches and risk assessments for deriving appropriate safety requirements were less pronounced in the past. On the contrary, risk assessments in individual cases have shown that certain parts of complex existing solutions make only a minor contribution to safety.

5 Conclusion

This article describes a practical and proven approach for the development and approval of the integration of movable railway bridges into the CCS system. The approach provides high value to users, as it can be transferred to other projects.

The article shows that the existing “toolbox” for system development (such as the CENELEC standards) and for system approval (such as the German Sektorleitlinie) can be used to specify and approve even special individual cases with differing responsibilities and standards. The existing processes are sufficiently defined.

Performing the risk assessment as an explicit risk estimation based on qualitative expert judgement leads to appropriate safety requirements. This is essential in order to avoid any unnecessary system complexity. The approach has also prov-



Systemanbieter in der Bahnelektrifizierung

Als ein führender **Elektrifizierungsspezialist** errichten wir die Lebensader der Bahn. In vielen Ländern **Europas** – und das schon seit Jahrzehnten.

Wir bieten das gesamte Leistungsspektrum in der Bahnelektrifizierung – sowohl im **Nahverkehr** als auch im **Fernverkehr**:

- Consulting und Engineering
- Installation und Wartung
- Produktentwicklung und Vertrieb

www.powerlines-group.com

**BESUCHEN
SIE UNS**

InnoTrans 2026
Stand 340
Halle 22

Electrifying Transitions



de Projekte resultieren daraus geringere Kosten und kürzere Projektlaufzeiten. Eindeutige Verantwortlichkeiten ermöglichen eine effiziente Entwicklung, da die Maschinentechnik keine Bahnnormen anwenden muss. Die klare Trennung bietet über den gesamten Lebenszyklus Vorteile für Betrieb und Instandhaltung. Bei Änderungen an der Maschinentechnik ist keine Anpassung an der Brückenschnittstelle und somit der Zulassung notwendig. Das geforderte Sicherheitsziel für die Fahrt eines Zuges über den Schienenübergang mit SIL 4 kann über das vorgestellte Vorgehen erreicht werden. ■

en effective in other projects. Early consideration of the implementation aspects, interdisciplinary expert teams and the complete, traceable demonstration of compliance are key success factors.

The presented approach leads to solutions that can be implemented without any development effort on the interlocking side. For implementation projects, this results in lower costs and shorter project durations. Clear responsibilities enable efficient development, as the bridge machinery does not have to apply railway standards. This clear separation offers advantages for operations and maintenance throughout the entire life-cycle. In the event of any changes to the bridge machinery, no adaptation of the bridge interface and thus of the authorisation will be necessary. The required SIL 4 safety objective for train movements over the rail joint can be achieved using the presented approach. ■

LITERATUR | LITERATURE

- [1] Sektorleitlinie für die Zulassungsbewertung von Signal-, Telekommunikations- und Elektrotechnischen Anlagen (Technische Vorschrift). Version 2.0. 17.3.2024
- [2] DIN EN 50126-1:2025-09 Bahnanwendungen – Spezifikation & Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) – Teil 1: Generischer RAMS-Prozess; Deutsche Fassung EN 50126-1:2017 + A1:2024
- [3] DIN EN 50126-2:2025-07 Bahnanwendungen – Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) – Teil 2: Systembezogene Sicherheitsmethodik; Deutsche Fassung EN 50126-2:2017 + A1:2024
- [4] DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) Nr. 402/2013 DER KOMMISSION vom 30. April 2013 über die gemeinsame Sicherheitsmethode für die Evaluierung und Bewertung von Risiken und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 352/2009. Geändert durch: Durchführungsverordnung (EU) 2015/1136 der Kommission vom 13. Juli 2015. Berichtigt durch: Berichtigung, ABl. L 70 vom 16.3.2016, S. 38 (2015/1136)
- [5] Wikipedia: Liste beweglicher Brücken in Deutschland. https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_beweglicher_Br%C3%BCcken_in_Deutschland, abgerufen am 27.3.2026
- [6] Kögel, J.: „Bewegliche Brücken bei der Deutschen Bahn“, in: 6. Symposium Eisenbahnbrücken und KIB (2020)
- [7] RICHTLINIE 2006/42/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung), zuletzt geändert am 8.11.2024 durch Richtlinie (EU) 2024/2749
- [8] VERORDNUNG (EU) 2023/1230 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 14. Juni 2023 über Maschinen und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und der Richtlinie 73/361/EWG des Rates
- [9] DIN EN ISO 13849-1:2023-12 Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO 13849-1:2023); Deutsche Fassung EN ISO 13849-1:2023
- [10] Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung vom 8. Mai 1967 (BGBl. 1967 II S. 1563), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 5. April 2019 (BGBl. I S. 479) geändert worden ist

AUTOREN | AUTHORS

Dipl.-Ing. Fabian Gaebler

Spezialist Systems und Safety Engineering LST, I.I-SIG-VR/
Specialist Systems and Safety Engineering CCS, I.I-SIG-VR
Signon Deutschland GmbH
Anschrift / Address: Berliner Straße 7, D-01067 Dresden
E-Mail: fabian.gaebler@signon-group.com

Dipl.-Ing. Carsten Trog

Experte Systems und Safety Engineering LST, I.I-SIG-VR/
Expert Systems and Safety Engineering CCS, I.I-SIG-VR
Signon Deutschland GmbH
Anschrift / Address: Europaplatz 2, D-10557 Berlin
E-Mail: carsten.trog@signon-group.com



BESUCHEN SIE UNS AUF DER **INNOTRANS 2026**
IN **HALLE 4.2 | STAND 115**

WISSEN, WAS BAHNEN BEWEGT



Attraktive
Messeangebote
+
Gewinnspiel mit
hochwertigen
Preisen

www.eurailpress.de/innotrans2026



Modularer Ansatz zur Entwicklung sicherer Anwendungen

A modular approach to developing safe applications

Freek van Capelle | Jenny Skarman

Bei der Digitalisierung der Eisenbahninfrastruktur stehen Systemanbieter und Integratoren vor der Herausforderung, wie die Modernisierung der Stellwerkstechnik reibungslos und wirtschaftlich gelingen kann. Sichere Steuerungslösungen auf Basis speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS) bieten dafür die Flexibilität und Offenheit. Dieser Beitrag stellt eine SPS (PSSrail) des Automatisierungsexperten Pilz mit Safety Integrity Level (SIL) 4 sowie Eisenbahnzertifizierung vor, präsentiert bereits realisierte Anwendungsbeispiele und gibt einen Ausblick auf die zukünftigen Möglichkeiten einer digitalisierten Eisenbahninfrastruktur.

1 Einleitung

Im Rahmen von Modernisierungsmaßnahmen ersetzt leistungsfähige Digitaltechnik die bisher eingesetzte verschleißanfällige und verkabelungsintensive Relastechnik. Voraussetzung für den Einsatz dieser Lösungen ist, dass sie den hohen Sicherheitsanforderungen nach den CENELEC-Normen EN 50XXX im Schienenverkehr genügen. Während dies früher kostspielige, teils kundenspezifische Hardware bedeutete, die speziell für den Bahnbereich entwickelt wurde, zeichnen sich SPS aus der Industrie dank des Einsatzes von standardisierten und somit bewährten Komponenten durch niedrigere Beschaffungskosten aus. Solche Systeme mit hohen, praxiserprobten Mean Time Between Failures (MTBF)-Werten sind nun auch in bahnzertifizierten Varianten erhältlich und vereinen Sicherheit und Flexibilität mit Wirtschaftlichkeit. So können etwa kleinere Stellwerke oder Bahnübergänge schrittweise digitalisiert und Abläufe für die Zukunft effizienter gestaltet werden. Nach der Installation genügt ein einfacher Software-Download, um die Sicherheitslogik zu aktualisieren. Diese in der Industrie bewährten Lösungen finden sich bereits in verschiedenen Anwendungen und zeigen, dass sie den erforderlichen Reifegrad erreicht haben, um in einer modernen Bahninfrastruktur ohne Anpassungen eingesetzt zu werden.

2 Modernisierung mit speicherprogrammierbaren Steuerungen

Der Modernisierungsprozess bietet die Gelegenheit, bestehende Abläufe zu überprüfen und neue Funktionen zu integrieren. Dabei gilt es abzuwägen, ob die Leit- und Sicherungstechnik komplett erneuert oder schrittweise modernisiert wird. Im Mittelpunkt steht die Verfügbarkeit, ohne dabei die Sicherheit in irgendeiner Weise zu beeinträchtigen. Für die schrittweise Modernisierung bahntechnischer Steuerungs- und Überwachungsinfrastruktur im Bahnbetrieb weist das sichere, modulare Bahnsteuerungssystem PSSrail verschiedene Lösungsansätze

When digitalising the railway infrastructure, system providers and integrators face the challenge of how to modernise interlocking technology smoothly and economically. Safe control solutions based on programmable logic controllers (PLCs) provide the flexibility and openness necessary for this. This article introduces a PLC (PSSrail) from the Pilz automation expert with Safety Integrity Level (SIL) 4 and railway certification, presents application examples that have already been implemented and looks ahead to the future possibilities of a digitalised railway infrastructure.

1 Introduction

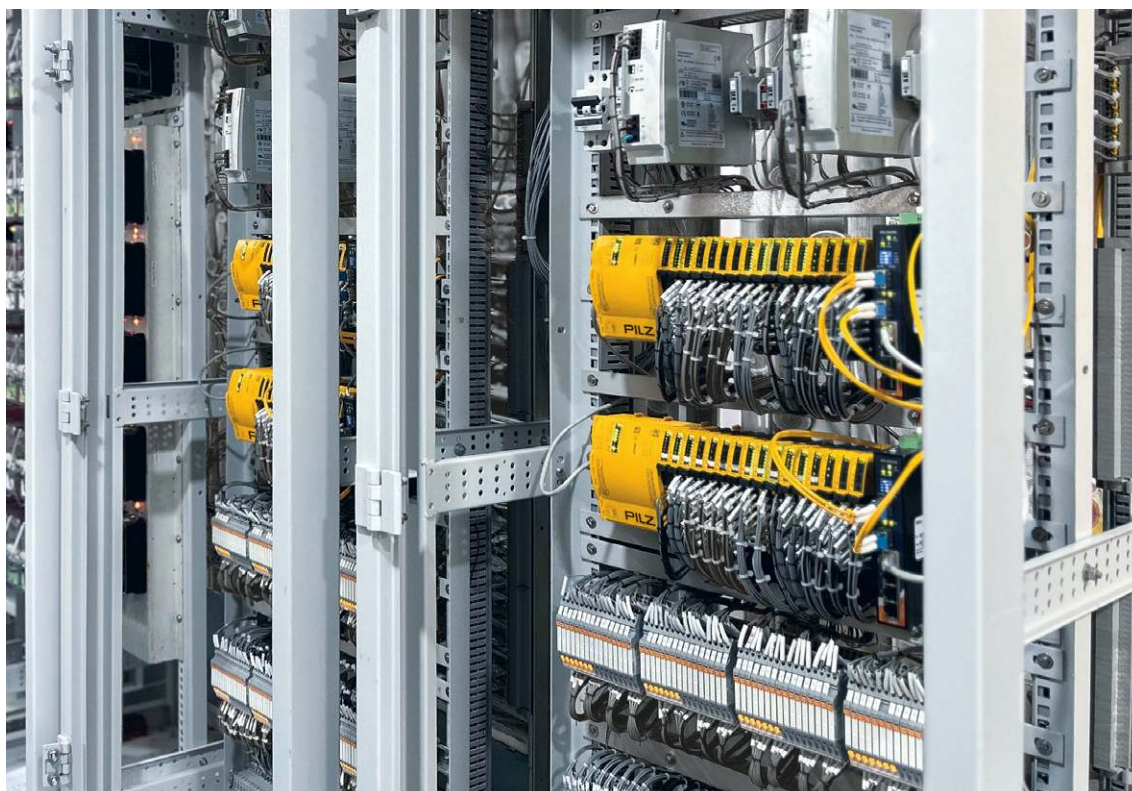
High-performance digital technology is replacing the wear-prone and cable-intensive relay technology previously traditionally used in railway applications as part of the modernisation measures. The prerequisite for the use of these solutions is that they meet the high safety requirements set out in the CENELEC EN 50XXX standards for railway applications. While this used to mean expensive, sometimes customised hardware developed specifically for the railway sector, industrial PLCs are characterised by lower procurement costs thanks to the use of standardised and therefore well-tried components. Such systems have high, field-proven Mean Time Between Failures (MTBF) values and are now also available in railway-certified versions that combine safety and flexibility with cost-effectiveness. As such, smaller interlockings or level crossings can be digitalised gradually, thus making the processes more efficient for the future. Once installed, a simple software download is all that is needed to update the safety logic. These industry-proven solutions are already being used in various applications and are demonstrating that they have reached the level of maturity required to be deployed in an unmodified form in a modern railway infrastructure.

2 Modernisation using programmable logic controllers

The modernisation process provides an opportunity to review the existing processes and integrate new functions. It is important to consider whether the control and safety technology should be replaced completely or modernised gradually. The focus is on availability without compromising safety in any way. The safe PSSrail modular railway control system offers a range of solutions for a wide variety of applications, thereby supporting the phased modernisation of railway control and monitoring infrastructure during railway operations. It has the neces-

Bild 1: Das Bahnsteuerungssystem PSSrail ist modular aufgebaut: Die Basis bildet eine Steuerungseinheit, die mit bis zu 32 Hardwaremodulen in beliebiger Konfiguration erweitert werden kann.

Fig. 1: The PSSrail railway control system has a modular design: it is based on a control unit, which can be expanded with up to 32 hardware modules in any configuration.



für eine Vielzahl von Anwendungen auf. Es verfügt über die erforderlichen bahnspezifischen Zertifizierungen und kann in Applikationen bis SIL 4 eingesetzt werden (Bild 1).

Das Bahnsteuerungssystem ist modular aufgebaut: Die Basis bildet eine Steuerungseinheit, die mit bis zu 32 Hardwaremodulen in beliebiger Konfiguration erweitert werden kann. Eine zusätzliche Erweiterung ist durch den Einsatz von bis zu 64 Remote-I/O-Kopfmodulen möglich. Zu den verfügbaren Erweiterungskomponenten gehören verschiedene I/O-Module für sichere und nicht-sichere Funktionen, einschließlich eines CAN-Moduls für die einfache Integration in bestehende Systeme. Damit kann das System individuell an die Anforderungen verschiedenster Applikationen angepasst werden. Es ist robust gegenüber elektromagnetischen Störungen, extremen Temperaturen und mechanischen Belastungen, wie sie an der Strecke typischerweise auftreten (1 m bis 3 m vom Gleis entfernt, EN 50125-3). Da die modulare Technologie hochgradig standardisiert ist und Module leicht ausgetauscht werden können, wird die durchschnittliche Reparaturzeit deutlich verkürzt. Die Kopfmodule kommunizieren untereinander über das SafetyNET p Echtzeit-Ethernet-Kommunikationssystem. SafetyNET p kann auf standardisierten Netzwerkkomponenten wie Ethernet-Switches oder DSL-Modems genutzt werden und bietet so einen hohen Freiheitsgrad in Ausdehnung und Topologie. Zusätzlich zu diesem Sicherheitsprotokoll können Daten mit anderen Geräten ausgetauscht werden, unter Verwendung von Kommunikationsprotokollen wie TCP/IP, Modbus/TCP und UDP, die die Grundlage für bahnspezifische Protokolle wie Rail Safe Transport Application (RaSTA), Frauscher Safe Ethernet (FSE) und EULYNX bilden.

3 Sicherheit und Automatisierung für verschiedene Anwendungsbereiche

Der Vorteil des Bahnsteuerungssystems PSSrail besteht darin, dass es Aspekte der Automatisierung und der funktionalen Sicherheit (Safety) in einem einzigen System vereint. Intern sind sichere und nicht sichere

sary railway-specific certifications and can be used in applications up to SIL 4 (fig. 1).

The railway control system has a modular design: it is based on a control unit that can be expanded with up to 32 hardware modules in any configuration. Further expansion is possible using up to 64 remote I/O head modules. The available expansion components include various I/O modules for safety and non-safety-related functions, including a CAN module for easy integration into the existing systems.

As a result, the system can be adjusted to suit the individual requirements of the widest range of applications. It is resistant to the electromagnetic interference, extreme temperatures and mechanical stresses that typically arise along the line (1 m to 3 m from the track, EN 50125-3). The mean repair time is also significantly reduced, as the modular technology is highly standardised and the modules can be easily replaced.

The head modules communicate with each other via the SafetyNET p real-time Ethernet communication system. SafetyNET p can be used on standardised network components such as Ethernet switches or DSL modems, thus offering a high degree of freedom in terms of extension and topology. In addition to this safety protocol, data can also be exchanged with other devices using communication protocols such as TCP/IP, Modbus/TCP and UDP, which form the basis for railway-specific protocols such as Rail Safe Transport Application (RaSTA), Frauscher Safe Ethernet (FSE) and EULYNX.

3 Safety and automation for a variety of application areas

The advantage of the PSSrail railway control system lies in the fact that it combines aspects of automation and functional safety into a single system. The safety and non-safety-related functions are internally physically combined but are logically separate from one another: so any safety-related functions are processed inde-

re Funktionen physisch kombiniert, aber logisch voneinander getrennt: Die Verarbeitung sicherheitsrelevanter Funktionen ist somit unabhängig von den Vorgängen im nicht sicheren Speicherbereich, während die Hardwarekosten auf ein Minimum beschränkt bleiben.

Ein SPS-basiertes Bahnsteuerungssystem ermöglicht es Systemanbietern und Integratoren, Digitalisierungsprojekte im Bereich der Signaltechnik und der Eisenbahninfrastruktur einfach, schnell und damit wirtschaftlich umzusetzen. Dies umfasst ein breites Spektrum an Anwendungen in der Signaltechnik, darunter elektrisch ortgesteuerte Weichen oder Bahnübergänge sowie digitale Stellwerke.

In den folgenden Abschnitten gibt der Beitrag einen Überblick über verschiedene Arten von Bahnübergängen, die von SPS gesteuert werden, und bietet einen tieferen Einblick in die Umsetzung der sicheren Datenübertragung an Beispielen in Indien und Schweden.

3.1 Modernisierung von Bahnübergängen

Obwohl Bahnübergänge weltweit unterschiedliche Sicherheitsfunktionen erfordern, kann PSSrail diese Aufgaben dank seines modularen Aufbaus erfüllen. Die E/A-Konfiguration lässt sich problemlos an verschiedene Optionen anpassen, wie beispielsweise die Anzahl der Gleise, Schranken und Ampeln. Die Einsatzmöglichkeiten reichen von eingleisigen Bahnübergängen in abgelegenen Gebieten bis hin zu komplexeren Anwendungen, bei denen ausgefallene Funktionen erforderlich sind. Ein Beispiel ist ein Bahnübergang in unmittelbarer Nähe eines Rangierbahnhofs: Wenn sich der letzte Weichenpunkt des Rangierbahnhofs nahe am oder hinter dem Einfahrtspunkt des Bahnübergangs befindet, können ein zusätzlicher Schlüsselschalter einfach an einen extra konfigurierten Eingang und ein Absperrlicht an einen Ausgang angeschlossen werden, um die Aktivierung des Bahnübergangs zu übersteuern und so eine Beeinträchtigung des Straßenverkehrs zu verhindern, während der Zug rangiert, ohne den Bahnübergang zu überqueren. Eine solche Konfiguration ist in einigen Ländern vorgeschrieben, während sie in anderen verboten ist. Diese Flexibilität des Systems, eine geringe Anzahl von Ein- und Ausgängen hinzuzufügen, ermöglicht es Systemintegratoren, vollständige und weitgehend standardisierte Pa-

pendently of the operations occurring in the non-safety-related memory area, while hardware costs are kept to a minimum.

A PLC-based railway control system enables system providers and integrators to implement digitalisation projects in signalling technology and railway infrastructure simply, quickly and therefore economically. This covers a wide range of applications in signalling technology, including locally operated electric points or level crossings, as well as digital interlockings.

In the sections below, this article provides an overview of the various types of level crossings controlled by PLC and offers a more in-depth look at the implementation of safe data transfer using examples from India and Sweden.

3.1 Modernising level crossings

Level crossings around the world require different safety functions, but PSSrail is able to perform these tasks thanks to its modular design. The I/O configuration can easily be adapted to a variety of options, such as the number of tracks, barriers and light signals. The possible applications range from single-track level crossings in remote areas to more complex applications requiring more sophisticated functions. One example is a level crossing in the immediate vicinity of a marshalling yard: if the last set of points in the marshalling yard is located close to or behind the entry point to the level crossing, an additional key switch can be simply connected to an extra configured input and a barrier light to an output, so as to override the activation of the level crossing and thus prevent any disruption to road traffic when a train is shunting without crossing the level crossing. Such a configuration is mandatory in some countries, while it is prohibited in others. The system's flexibility, i.e. the ability to add a small number of inputs and outputs, enables system integrators to offer comprehensive and largely standardised packages for the safe control of level crossings, while the solution remains open enough to be adapted to individual requirements in different countries.



Bild 2: Die SIL-4-Plattformlösung FNmux von Deltron basiert auf der sicheren, modularen Bahnsteuerung PSS-rail und überwacht in Indien Stellwerke, Bahnübergänge und Signale effizient.

Fig. 2: The FNmux SIL 4 platform solution from Deltron is based on the safe, modular PSSrail railway control system and reliably monitors interlockings, level crossings and signals in India.

keten für die sichere Steuerung von Bahnübergängen anzubieten, wobei die Lösung offen genug bleibt, um sie an individuelle Anforderungen in verschiedenen Ländern anzupassen.

3.2 Sichere Datenübertragung in Indien

Für die Modernisierung der Eisenbahninfrastruktur hat der indische Signaltechnikhersteller Deltron den Failsafe Network Multiplexer (FNmux) entwickelt (Bild 2). Er steuert selbsttätige Streckenblöcke in Indien. Die auf PSSrail basierende SIL-4-Plattformlösung überwacht Bahnübergänge und Signale in automatischen Streckenabschnitten auf besonders kosteneffiziente Weise. Zur Anwendung kommt das Multiplexverfahren, bei dem mehrere Signale gleichzeitig über Glasfaser übertragen werden. Damit ermöglicht FNmux Technologieoffenheit, was in der schnell wachsenden indischen Infrastruktur eine entscheidende Anforderung ist. In der Modularität der Lösung steckt die Innovation: Über die Ein- und Ausgänge der Bahnsteuerung kann die Lösung flexibel an verschiedene Anwendungen im umfassenden Netz der Indischen Eisenbahnen angepasst und einfach konfiguriert werden. Mit seiner Echtzeitreaktion, Redundanz und Zuverlässigkeit bietet die SPS-Bahnsteuerung zusätzliche Stärken in dieser Lösung. Für dieses Projekt erhielt der Systemintegrator Deltron während des gesamten Zulassungsprozesses bei der indischen Aufsichtsbehörde RDSO volle Unterstützung von Pilz, einschließlich der Bereitstellung der erforderlichen Sicherheitsdokumentation und Referenzen. Dennoch hat Deltron die Anwendung eigenständig konzipiert: Die Auswahl der Module und die Entwicklung der Software erfolgten entsprechend den spezifischen Anforderungen in Indien. FNmux hat im Jahr 2025 die erforderliche Eisenbahnzulassung erhalten und leistet nun einen entscheidenden Beitrag zur Digitalisierung der indischen Eisenbahninfrastruktur.

3.3 Sichere Kommunikation in Schweden von Kupfer- auf Glasfaserkabel umgestellt

Ein Beispiel aus Schweden zeigt, wie der Übergang von Kupfer- zu Glasfaserkabeln erfolgreich gestaltet werden kann, ohne die bestehende Technik nennenswert zu beeinträchtigen. Mit „Safe Relay Messages over Opto“ (SRO) hat die schwedische Verkehrsbehörde Trafikverket ausdrücklich eine Ausschreibung für eine COTS (Commercial of the Shelf) SPS-basierte Lösung mit SIL 4 zur Modernisierung seiner Hauptstrecken veröffentlicht. Dies umfasste den Austausch der FST-Modems (Fail Safe Transmission), die bisher zur Übertragung der Signaldaten über große Entfernungen verwendet wurden. Eine Lösung auf Basis des Bahnsteuerungssystems PSSrail übernimmt nun die Kommunikation zwischen Stellwerken und Schaltschränken entlang der Strecke – basierend auf dem Echtzeit-Ethernet-Protokoll SafetyNET p, das den Anforderungen der EN 50159 Kat. 1 und 2 entspricht. So können beispielsweise Informationen zur Streckenkapazität weitergegeben oder Signale gesteuert werden. Die digitalen E/A-Signale werden über Glasfaserverbindungen über große Entfernungen übertragen und gewährleisten einen sicheren Betrieb gemäß EN 50126 SIL 4. Die Modernisierung wird im laufenden Betrieb durchgeführt. Die Feldtestphase wurde im April 2026 erfolgreich abgeschlossen, die generische Zulassung folgte im Juni 2026.

Die Funktionsweise ist mit einem Kabel vergleichbar: SRO bietet eine Plattform zur sicheren Übertragung von Relaisnachrichten von Punkt A nach Punkt B. Das System ist in der Lage, sichere Relaisnachrichten in digitale Signale umzuwandeln, die über Glasfaserkabel übertragen werden. Auf der Empfängerseite wird das digitale Signal wieder in sichere Relaisnachrichten umgewandelt. Die Lösung erfordert keine Konfiguration durch den Anwender, da die SRO-Einheit über einen dedizierten Glasfaserkanal ohne zwischengeschaltetes

3.2 Safe data transfer in India

Deltron, an Indian signalling technology manufacturer, has developed the Failsafe Network Multiplexer (FNmux) to modernise the railway infrastructure (fig. 2). It controls automatic line blocks in India. The SIL 4 platform solution is based on PSS-rail and monitors level crossings and signals on automated track sections in a way that is particularly cost-effective. The multiplex method is used, whereby several signals are transferred simultaneously via optical fibre. FNmux thus enables technological openness, which is a crucial requirement in the rapidly growing Indian infrastructure. The innovation lies in the solution's modularity: the solution can be adapted flexibly to a variety of applications in the extensive Indian Railways network via the railway control system's inputs and outputs and is easily configured. With its real-time response, redundancy and reliability, the PLC railway control system also offers additional strengths as part of this solution. For this project, the Deltron system integrator received full support from Pilz throughout the entire approval process with the Indian RDSO regulatory authority, including the provision of the necessary safety documentation and references. And yet Deltron designed the application entirely independently: the modules were selected and the software developed in line with the specific requirements in India. FNmux received the necessary railway certification in 2025 and is now making a significant contribution to the digitalisation of India's railway infrastructure.

3.3 Safe communication in Sweden converted from copper to fibre-optic cable

An example from Sweden demonstrates how the transition from copper to fibre-optic cables can be managed successfully and without significantly affecting the existing technology. With „Safe Relay Messages over Opto“ (SRO), the Swedish Trafikverket transport administration issued an explicit call for tenders for a COTS (commercial off-the-shelf) PLC-based solution with SIL 4 to modernise its main lines. This included replacing the FST modems (fail-safe transmission) that had previously been used to transmit signal data over long distances. Now, a solution based on the PSSrail railway control system handles the communications between the interlockings and control cabinets along the line based on the real-time SafetyNET p Ethernet protocol, which meets the requirements of EN 50159 Categories 1 and 2. For example, this allows information on line capacity to be forwarded or signals to be controlled. The digital I/O signals are transmitted over long distances using fibre-optic connections, thereby guaranteeing safe operations in accordance with EN 50126 SIL 4. The modernisation will be carried out while the line remains in operation. The field test phase was completed successfully in April 2026 and generic approval followed in June 2026.

It works in a similar way to a cable: the SRO provides a platform to transfer relay messages safely from point A to point B. The system is able to convert safe relay messages into digital signals that are transmitted via fibre-optic cables. At the receiving end, the digital signal is then converted back into safe relay messages. The solution requires no configuration by the user, as the SRO unit communicates directly via a dedicated fibre-optic channel without an intermediate network and has no internal interlocking logic. Pilz assembles and installs the devices prior to dispatch, including the logic for the I/O integrity checks and the validation of the data transfer, so that Trafikverket can deploy the pre-configured devices immediately without the need for



Bild 3: Je nach Anwendung können die vorkonfigurierten Geräte direkt und ohne weitere Konfiguration eingesetzt werden. Dies ermöglicht eine Modernisierung ohne langwierige Gleissperrungen, da die Umstellung auf die SPS-basierte Lösung über Nacht erfolgen kann.

Fig. 3: The pre-configured devices can be used immediately without any further configuration, depending on the application. This enables the system to be modernised without any lengthy track closures, as conversion to the PLC-based solution can take place overnight.

Netzwerk direkt kommuniziert und keine interne Verriegelungslogik besitzt. Pilz montiert und installiert die Geräte, inklusive der Logik für E/A-Integritätsprüfungen und einer Validierung der Datenübertragung, vor dem Versand, sodass Trafikverket die vorkonfigurierten Geräte direkt und ohne weitere Konfiguration einsetzen kann. Dies ermöglicht eine Modernisierung ohne langwierige Gleissperrungen, da die Umstellung auf die SPS-basierte Lösung über Nacht erfolgt (Bild 3).

Die bisher verwendete Signaltechnik bleibt weiterhin im Einsatz: So finden sich in den Kiosk-Gebäuden entlang der Strecke weiterhin Relais, die ihre Signale an die SPS senden. Die Hochgeschwindigkeits-Datenübertragung erfolgt über Layer-1-Ethernet-zu-Glasfaser-Medienkonverter. Beide Endpunkte verfügen über eine gemeinsame eindeutige ID, sodass nur diese beiden miteinander kommunizieren. Der Master sendet Ausgangsdaten von den Objekten entlang der Strecke an den Slave, während der Slave dem Master die Eingangsdaten von den Relais liefert.

Dadurch entsteht ein klar definierter Datenfluss entlang der modernisierten Bahnstrecke, der schnell und einfach umgesetzt werden kann. Dieser minimale Eingriff in die bestehende, voll funktionsfähige Signaltechnik und Relaislogik reduziert die mit den Modernisierungsarbeiten verbundenen Risiken erheblich und gewährleistet so einen reibungslosen Übergang. Da die Einheiten zudem keine Stellwerkslogik enthalten, die je nach Standort und Anwendungsfall variieren könnte, ist der Bahninfrastrukturbetreiber in der Anwendung sogar flexibler; eine Softwareanpassung für jeden Standort ist nicht erforderlich. Das Projektteam kann das SRO-System so entwerfen und nutzen, als handle es sich um ein tatsächliches 32- oder sogar 96-adriges Kupferkabel.

Trafikverket benötigte eine generische Steuerungslösung, die mit minimalen Anpassungen auf der gesamten Strecke eingesetzt werden kann. Die Anforderungen der Norm EN 50716 müssen nicht berücksichtigt werden, da diese vollständig im generischen Sicher-

any further configuration. This enables the system to be modernised without any lengthy track closures, as conversion to the PLC-based solution takes place overnight (fig. 3).

The existing interlocking equipment remains in use: for example, the kiosk buildings along the line still contain the relays that send their signals to the PLC. High-speed data transfer takes place via Layer 1 Ethernet-to-fibre-optic media converters. Both endpoints share a unique ID, ensuring that only these two communicate with one another. The Master sends the Slave output data from the objects along the line, while the Slave supplies the Master with input data from the relays.

This creates a clearly defined data flow along the modernised railway line that can be implemented quickly and easily. Minimal intervention in the existing, fully functional signalling technology and relay logic significantly reduces the risks associated with the modernisation work, thus guaranteeing a smooth transition. Additionally, the rail infrastructure operator actually has greater flexibility in their application given that the units do not contain any interlocking logic that might vary depending on the location and specific application; there is no need to adapt the software to each location. The project team can design and use the SRO system as if it were an actual 32 or even 96-wire copper cable.

Trafikverket required a generic control solution that could be used along the entire line with minimum adjustments. The requirements of the EN 50716 standard did not need to be taken into account, as they had already been fully covered by the generic safety case for the SRO product. On this basis, Trafikverket carried out its own tests between 2023 and 2025 before the technology was installed on the line for field trials. The subsequent generic approval and inclusion in Trafikverket's railway component catalogue enables the technology to be introduced nationwide with significantly reduced approval costs. The modular de-

heitsnachweis des SRO-Produkts abgedeckt sind. Auf dieser Grundlage führte Trafikverket zwischen 2023 und 2025 eigene Tests durch, bevor die Technologie für Feldversuche auf der Strecke installiert wurde. Die anschließende generische Zulassung und Aufnahme in den Eisenbahnkomponentenkatalog von Trafikverket ermöglicht die landesweite Einführung der Technologie bei deutlich reduzierten Zulassungskosten. Der modulare Aufbau der SPS ermöglichte eine einfache Anpassung von den ursprünglichen sechs Ein- und Ausgängen auf acht und im weiteren Projektverlauf sogar auf 24 E/A-Punkte ohne großen Zusatzaufwand. Dies bietet Flexibilität bei der Anwendung, ist aber vor allem wirtschaftlicher, da je nach Funktionsumfang die passende Anzahl an E/A ausgewählt werden kann, anstatt auf ein starres Steuerungssystem angewiesen zu sein. Im Falle einer Störung kann Trafikverket die Steuerungseinheit schnell austauschen.

3.4 Ausblick: EULYNX

Derzeit erfolgt die Kommunikation über SafetyNET p, doch PSSrail lässt sich problemlos erweitern, um beispielsweise im Rahmen künftiger Digitalisierungsprozesse den EULYNX-Standard zu nutzen. Denn das sichere und modulare Bahnsteuerungssystem ist ebenso wie bei der Hardwareerweiterung auch softwaretechnisch erweiterbar. Mit den richtigen Softwarefunktionsblöcken kann PSSrail mit dem EULYNX-Standard kompatibel gemacht und somit als Objektcontroller eingesetzt werden. Damit kann das Bahnsteuerungssystem eine Schlüsselkomponente für die schnelle Umsetzung einer länder- und herstellerübergreifenden Digitalisierung in der Steuerungs- und Sicherheitstechnik sein.

4 Ferndiagnose und zertifizierte Softwarebausteine

Neben dem modularen Aufbau bieten SPS-Bahnsteuerungen weitere Vorteile, die eine Vielzahl von Anwendungen optimieren können. Im Falle einer Wartung oder einer Störung können Wartungstechniker mithilfe der Ferndiagnose feststellen, welche Komponente ausgetauscht werden muss, und die erforderlichen Ersatzteile direkt zum Einsatzort mitbringen. Diese Verkürzung der Diagnosezeit führt

sign of the PLC made it easy to adapt from the original six inputs and outputs to eight, and later in the project even to 24 I/O points, without much additional effort. This offers flexibility of use, but above all is more economical, as you can select the appropriate number of I/Os based on the required functionality, rather than having to rely on a rigid control system. Trafikverket can replace the control unit quickly in the event of a fault.

3.4 Outlook: EULYNX

The communication is currently realised using SafetyNET p, but PSSrail can easily be expanded to use the EULYNX standard, for example, as part of future digitalisation processes. This is because it is not just the hardware that can be expanded on the safe, modular railway control system, but the software too. With the right software function blocks, PSSrail can be made compatible with the EULYNX standard and can therefore be used as an object controller. As a result, the railway control system can be a key component in the rapid implementation of cross-national and cross-manufacturer digitalisation in control and safety technology.

4 Remote diagnostics and certified software blocks

In addition to their modular design, PLC-based railway control systems also offer additional benefits that can optimise a wide range of applications. In the event of maintenance or a fault, maintenance engineers can use remote diagnostics to identify which component needs replacing and bring the necessary spare parts directly to the site. This reduction in diagnostic time significantly reduces repair and maintenance times, while also improving the system's availability at the same time.

With its various editors and blocks, the PAS4000 software platform is available to create, configure and set the parameters for a safety-related application and then download them to the controller. Development engineers can use the STL, IL and LD languages from IEC 61131-3. The railway-certified function blocks are stored in a program library, thereby enabling simple, fast-

Progress Rail

A Caterpillar Company

High Wide Load Detection

RFID Tag Reader

Wheel Impact Load & Weigh in Motion Detection

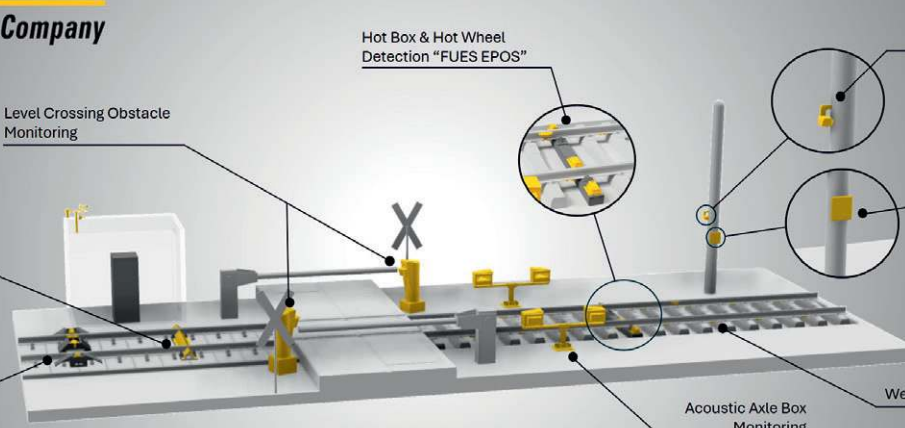
Acoustic Axle Box Monitoring

Hot Box & Hot Wheel Detection "FUES EPOS"

Level Crossing Obstacle Monitoring

Dragging Equipment Detection

Hot Box & Hot Wheel Detection (Slab Track)



InnoTrans 2026 | Hall 2.2, Booth 130

zu einer deutlichen Reduzierung der Reparatur- und Wartungszeiten. Gleichzeitig wird die Systemverfügbarkeit verbessert.

Für Erstellung, Konfiguration und Parametrierung einer sicherheitsrelevanten Anwendung sowie deren Übertragung an die Steuerung steht die Softwareplattform PAS4000 mit verschiedenen Editoren und Bausteinen bereit. Entwicklungsingenieure können die IEC 61131-3-Sprachen STL, IL und LD verwenden. In einer Programmbibliothek sind bahnzertifizierte Funktionsblöcke hinterlegt, die eine einfache und schnellere Implementierung ermöglichen. Um neue Funktionen an der Strecke auszurollen, wird die passende Software heruntergeladen und innerhalb weniger Minuten eingerichtet. Im Vergleich dazu dauert eine solche Anpassung mit relaisbasierter Technologie Tage oder sogar Wochen.

Ein zentraler Vorteil liegt in der Nutzung zertifizierter Softwareblöcke, die bereits validierte Sicherheitsfunktionen enthalten. Diese reduzieren den Aufwand für die Entwicklung und Prüfung sicherheitsrelevanter Logik erheblich und beschleunigen die Umsetzung von Anwendungen bis SIL 4. Auch der bürokratische Aufwand bei der Zulassung der Lösung wird so reduziert. Beispiele für diese Funktionsblöcke sind die Überwachung von Ausgängen oder die Auswertung zweikanaliger Eingangssignale. Die Bausteine der Softwareplattform PAS4000 vereinfachen die Erstellung von Automatisierungsprogrammen maßgeblich. So können Projekte auch funktional gegliedert und strukturiert werden. Nicht zuletzt können alle Änderungen an der Software dokumentiert und zentral verwaltet werden. Dies gewährleistet nicht nur ein hohes Maß an Wiederverwendbarkeit, was letztlich zu Kosteneinsparungen führt, sondern unterstützt auch den Verifizierer und Validierer bei der Sicherheitsnachweisführung und dem Änderungsmanagement.

5 Unabhängige Konfiguration

PAS4000 bietet Editoren für die in EN/IEC 61131-3 definierten Programmiersprachen. Sowohl für nicht-sichere als auch sicherheitsrelevante Aufgaben kommen standardisierte Editoren für PSSrail zum Einsatz. Gängige Kommunikationsprotokolle wie RaSTA oder FSE können ebenfalls integriert werden. Die Konfiguration des Steuerungssystems ist nicht von Pilz abhängig und kann vom Infrastrukturbetreiber selbst – oder von einem externen Engineering-Dienstleister – übernommen werden. Damit behalten Infrastrukturbetreiber während des gesamten Systemlebenszyklus die Kontrolle über die Konfiguration. Folglich bleiben sie unabhängig vom Hardwareanbieter, was wirtschaftliche Vorteile bietet und auch für den Schutz der eigenen Daten von Bedeutung sein kann.

6 Zusammenfassung

Um die Digitalisierung des Eisenbahnsektors voranzutreiben, spielen offene Technologien eine Schlüsselrolle bei der Umsetzung einer grenzüberschreitenden digitalisierten Eisenbahninfrastruktur. Sie lassen sich flexibel an die Anforderungen des digitalen Schienennetzes anpassen und verfügen über die erforderlichen bahntechnischen Zulassungen. Für effizientere Betriebsprozesse bieten SIL4-SPS wie PSSrail wichtige Zusatzfunktionen wie Echtzeitdiagnose. Der modulare Aufbau der Steuerungslösung bietet einen hohen Standardisierungsgrad, der sowohl maßgeschneiderte Anpassungen an spezifische Aufgaben als auch eine nahtlose Übertragung auf andere Projekte ermöglicht. Betreiber können veraltete, relaisgesteuerte Stellwerke schrittweise modernisieren und die Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit des Schienenverkehrs steigern. ■

er implementation. The relevant software required to roll out new functions on the line is downloaded and set up within a few minutes. By comparison, making such an adjustment using relay-based technology takes days or even weeks.

One key benefit is the use of certified software blocks that already contain validated safety functions. These significantly reduce the work involved in developing and testing safety-related logic and speed up the implementation of applications up to SIL 4. The administrative burden involved in approving the solution is also reduced as a result. Examples of these function blocks include the monitoring of outputs or the evaluation of dual-channel input signals. The blocks in the PAS4000 software platform make it considerably easier to create automation programs. Projects can be organised and structured by function. Last but not least, all the changes to the software can be documented and managed centrally. Not only does this guarantee a high degree of reusability, which ultimately leads to cost savings, but it also supports the verifier and validator when managing the safety case and during change management.

5 Independent configuration

PAS4000 provides editors the programming languages defined in EN/IEC 61131-3. The editors standardised for PSSrail are used for both safety-related and non-safety-related tasks. Common communication protocols such as RaSTA or FSE can also be integrated. The configuration of the control system is not dependent on Pilz and can be carried out by the infrastructure operators themselves or by an external engineering service provider. This ensures that infrastructure operators retain control over the configuration throughout the system's entire lifecycle. As a result, they remain independent of the hardware supplier, which offers economic benefits and may also be important for the protection of their own data.

6 Summary

Open technologies play a key role in driving forward the digitalisation of the railway sector and implementing a cross-border digitalised railway infrastructure. They are flexible and can be adapted to the requirements of the digital rail network, as well as having the necessary railway approvals. For more efficient operating processes, SIL 4 PLCs such as PSSrail offer important additional functions such as real-time diagnostics. The modular design of the control solution offers a high degree of standardisation, thereby enabling tailor-made adjustments to suit specific tasks as well as a seamless transfer to other projects. Operators can gradually modernise outdated, relay-controlled interlockings and improve the reliability and performance of rail transport. ■

AUTOREN | AUTHORS

Freek van Capelle
Team Lead Engineering
E-Mail: f.vancapelle@pilz.nl

Jenny Skarman
Senior Public Relations Manager
E-Mail: j.skarman@pilz.de

Beide Autoren / both authors:
Pilz GmbH & Co. KG
Anschrift / Address: Felix-Wankel-Straße 2, D-73760 Ostfildern

Vom Achszählsystem zur universellen Feldelementeplattform

From axle counting systems to a universal field device platform

Woloszyk Przemyslaw | Marek Kucinski | René Berger

Voestalpine Railway Systems entwickelt auf Basis des bewährten Achszählsystems UniAC[2] eine universelle Object Controller Platform (UniOC). Die Plattform vereint alle EULYNX-Feldelemente – Weichen (UniOC[P]), generische Ein- und Ausgänge (UniOC[IO]), Lichtsignale (UniOC[LS]) und Bahnübergänge (UniOC[LC]) – auf einer gemeinsamen, SIL-4-zertifizierten Hardware- und Softwareplattform. Das UniOC[P] wurde 2025 als erstes System dieser Art in Europa von TÜV SÜD nach CENELEC SIL 4 gegen EULYNX Baseline 4 Release 3 (BL4R3) zertifiziert. Der Beitrag beschreibt den Technologietransfer aus der Achszählung, die Plattformarchitektur, die hauseigenen EMV- und Security-Tests, die EULYNX-Konformitätssimulation sowie die Zertifizierungsstrategie für die übrigen Produkte.

1 Hintergrund: Digitalisierung der Bahninfrastruktur

Die europäische Bahninfrastruktur befindet sich in einem grundlegenden Wandel. Steigende Verkehrsmengen und schrumpfende Instandhaltungsfenster zwingen die Betreiber dazu, ihre Anlagen nicht nur technisch zu modernisieren, sondern ihre betrieblichen Prozesse von Grund auf neu zu denken. Die Antwort der Branche ist die Digitalisierung der Leit- und Sicherungstechnik – mit EULYNX als zentralem, herstellerunabhängigem Schnittstellenstandard.

EULYNX definiert standardisierte Kommunikationsschnittstellen zwischen Stellwerken und Feldelementen und entkoppelt damit erstmals die Lebenszyklen von Stellwerk und streckenseitigen Systemen. Object Controller, die örtlichen Steuerrechner für Weichen, Signale, Achszähler, Ein- / Ausgänge und Bahnübergänge, kommunizieren über standardisierte digitale Protokolle mit dem übergeordneten Stellwerk. Damit werden die Feldelemente herstellerunabhängig: Sie lassen sich unabhängig vom Stellwerk beschaffen, betreiben und austauschen.

Für einen Hersteller mit tiefem Fach-Know-how in der Sicherungstechnik und den Außenanlagen ist dies eine historische Chance: Wer die Elektronik-, Safety- und Security-Kompetenz für SIL-4-Systeme aufgebaut hat, kann eine vollständige, plattformbasierte Produktfamilie entwickeln, die das gesamte Spektrum der EULYNX-Objekte abdeckt. Diesen Weg geht voestalpine Railway Systems mit der Object Controller Platform.

2 Das Achszählsystem UniAC[2] als Technologieanker

2.1 Produkthistorie und Systemarchitektur

Die Entwicklung der Achszählung geht auf unser System UniAC[1] zurück, dem ersten vollständig eigenentwickelten Achszählsystem.

Voestalpine Railway Systems is developing a universal Object Controller Platform (UniOC) based on the proven UniAC[2] axle counting system. The platform unifies all EULYNX field elements – points (UniOC[P]), generic inputs and outputs (UniOC[IO]), light signals (UniOC[LS]) and level crossings (UniOC[LC]) – on a shared, SIL 4-certified hardware and software platform. The UniOC[P] was certified in 2025 as the first such system in Europe to CENELEC SIL 4 against EULYNX Baseline 4 Release 3 (BL4R3) by TÜV SÜD. This article describes the technology transfer from axle counting, the platform architecture, in-house EMC and security testing, EULYNX conformance simulation and the certification strategy for the remaining products.

1 Background: digitalisation of railway infrastructure

European railway infrastructure is undergoing a fundamental transformation. Rising traffic volumes and shrinking maintenance windows are forcing operators not only to modernise their assets technically but to rethink operational processes from the ground up. The industry's response is the digitalisation of control and signalling technology – with EULYNX as the central, vendor-independent interface standard.

EULYNX defines standardised communication interfaces between interlockings and field elements, for the first time decoupling the interlocking and wayside asset lifecycles. Object controllers – the local control computers for points, signals, axle counters, IO's and level crossings – communicate with the higher-level interlocking via standardised digital protocols. This makes field devices vendor-independent: they can be procured, operated and replaced independently of the interlocking.

For a manufacturer with deep domain expertise in signalling technology and field assets, this represents a historic opportunity: those who built the electronics, safety and security competence for SIL 4 systems are positioned to develop a complete, platform-based product family covering the full range of EULYNX objects. This is the path voestalpine Railway Systems is pursuing with the Object Controller Platform.

2 The UniAC[2] axle counting system as a technology anchor

2.1 Product history and system architecture

Our axle counting development dates back to the UniAC[1], the first fully proprietary Axle Counting System.

The UniAC[2] Axle Counting System (fig. 1) is a consistent development of the system architecture, structured around two



Bild 1:
UniAC[2] EULYNX
Object Controller TDS
 Fig. 1: UniAC[2] EULYNX
 Object Controller TDS

Das UniAC[2] Achszählsystem (Bild 1) ist eine konsequente Weiterentwicklung der Systemarchitektur, die auf zwei grundlegenden Designprinzipien aufbaut: Security by Design und Availability by Design, letztere realisiert durch integrierte Redundanz und Mechanismen zur frühzeitigen Fehlererkennung. Beide Grundsätze werden in die Object Controller Platform übernommen und verankern Sicherheitsintegrität und betriebliche Resilienz fest in der Architektur, statt sie als nachträgliche Ergänzung zu behandeln.

Das UniAC[2] lässt sich sowohl zentral im Stellwerksraum als auch dezentral entlang der Strecke betreiben, was kurze Kabelwege zwischen Radsensor (Außenanlage) und Auswerteelektronik (Innenanlage) ermöglicht. Physische Gleisfreimeldeabschnitte können mit virtuellen Abschnitten (Master-Reset-Abschnitten) überlagert werden, die bei einer Störung eine automatische Grundstellung auslösen und so die Systemverfügbarkeit deutlich erhöhen. Darüber hinaus unterstützt die neueste Systemgeneration die Geschwindigkeitserfassung in SIL-4-Qualität mit nur einem einzigen Radsensor und ersetzt an geeigneten Standorten aufwendige Konfigurationen mit zwei Sensoren.

2.2 EULYNX-Konformität und Cybersecurity im Achszähler

Das UniAC[2] ist vollständig EULYNX-Baseline-4-konform und erfüllt alle standardisierten Schnittstellenanforderungen für Safety (SCI), Security (SSI), Diagnose (SDI) und Instandhaltung (SMI). Prägend war insbesondere die Entscheidung, den kryptografischen Schutz direkt in das System zu integrieren, statt externe Crypto-Boxen einzusetzen. Dieser Ansatz, Security by Design statt als nachträgliche Ergänzung, reduziert die Komplexität, beseitigt Schwachstellen an den Schnittstellen zu externer Security-Hardware und vereinfacht die Zertifizierung.

Der Product Security Lifecycle wird als kontinuierlicher Prozess umgesetzt. Schwachstellendatenbanken werden laufend überwacht und Stücklisten regelmäßig mit neuen Einträgen abgeglichen, ein Vorgehen, das durch Vorfälle wie Heartbleed im IT-Sektor unverzichtbar geworden ist. Der Übergang zu EULYNX BL4R3 und 4 wurde bereits während der Entwicklung proaktiv adressiert, sodass der Achszähler die neuen Anforderungen von Anfang an erfüllte, ein Vorteil, der sich bei der Weiterentwicklung hin zur Object Controller Platform als entscheidend erwies.

3 Vom Achszählsystem zur universellen Plattform – der Technologietransfer

Die Object Controller Platform ist kein Projekt, das auf der grünen Wiese gestartet wurde. Sie ist das unmittelbare Ergebnis eines systematischen Wissenstransfers aus der Achszähltechnik in ein breiteres Produktportfolio. Zwei zentrale Felder der Entwicklungserfahrung aus dem UniAC[2] bilden das Fundament der neuen Plattform.

fundamental design streams: Security by Design and Availability by Design, the latter realized through integrated redundancy and early failure detection mechanisms. Both streams are carried forward into the Object Controller Platform, embedding safety integrity and operational resilience into the architecture rather than treating them as add-ons.

The UniAC[2] can be operated both centrally within a signalling room and decentrally along the line, enabling short cable runs between wheel sensor (outdoor) and evaluation electronics (indoor). Physical track vacancy sections can be overlaid with virtual ones (master-reset sections) that trigger an automatic reset on a fault, significantly increasing system availability. Additionally, the latest system generation supports speed measurement in SIL 4 grade using a single wheel sensor, replacing complex dual-sensor configurations at applicable locations.

2.2 EULYNX conformance and cybersecurity in the axle counter

The UniAC[2] is fully compliant with EULYNX Baseline 4 and meets all standardised interface requirements for safety (SCI), security (SSI), diagnostics (SDI) and maintenance (SMI). Particularly formative was the decision to integrate cryptographic protection directly into the system, rather than employing external Crypto Boxes. This approach – Security by Design rather than as an overlay – reduces complexity, eliminates vulnerabilities at the interfaces to external security hardware and simplifies certification.

The product security lifecycle is implemented as a continuous process. Vulnerability databases are monitored continuously and component lists (bills of materials) are regularly cross-referenced against new entries – an approach made essential by incidents such as Heartbleed in the IT sector. The transition to EULYNX BL4R3 and 4 was addressed proactively during development, ensuring the axle counter met the new requirements from the outset – an advantage that proved decisive in the evolution towards the Object Controller Platform.

3 From axle counting system to a universal platform – the technology transfer

The Object Controller Platform is not a greenfield project. It is the direct result of a systematic transfer of knowledge from axle counting technology into a broader product portfolio. Two core areas of engineering experience gained through the UniAC[2] form the foundation of the new platform.

3.1 Hardware-Design und modulare Elektronikarchitektur

Jedes SIL-4-System stellt höchste Anforderungen an die Hardwareentwicklung: Redundanzkonzepte, Watchdog-Mechanismen, Spannungsüberwachung, weite Temperaturbereiche, IP-Schutzarten sowie eine mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen (MTBF) von über einer Million Betriebsstunden. Diese Anforderungen wurden beim UniAC[2] bereits ab den ersten Releases erfüllt und im Feldeinsatz validiert. Die Object Controller Platform übernimmt dieses Hardwarefundament und führt die bewährte Modularität weiter: Ein Hauptmodul stellt die Schnittstellen zum Stellwerk bereit und versorgt die übrigen Module mit Energie und Kommunikation. Je nach Objekttyp werden spezifische Controller-Module bestückt, die Weichenantriebe ansteuern bzw. deren Endlagenprüfer überwachen oder die entsprechende Peripherie für Signale, EA-Schnittstellen oder Bahnübergänge bedienen. Grundlage ist ein Gehäuse mit Schutzart bis IP67 und werkzeuglose Steckverbinder für eine schnelle Installation.

3.2 Kryptografie und Security-Architektur

Das zweite zentrale Erfahrungsfeld betrifft Kryptografie und Cybersecurity. Die Entscheidung, den kryptografischen Schutz vollständig und ohne externe Hardware in die Systembaugruppe des UniAC[2] zu integrieren, war ein Pionierschritt in der Eisenbahn-Sicherungstechnik. Sie erforderte die Auswahl kryptografischer Hardware-Cores, ein sicheres Schlüsselmanagement, Secure-Boot-Konzepte sowie die Integration in die sichere Kommunikation gemäß EN 50159. Auf der Plattform wird dieser Ansatz auf alle Produkttypen ausgeweitet: Jede UniOC-Variante enthält dieselbe integrierte Krypto-Engine, die IEC 62443 sowie EULYNX Baseline 4 und den System Pillars entspricht. Die Defence-in-Depth-Architektur trennt Safety- und Security-Funktionen, ohne separate Hardware zu erfordern, das senkt die Komplexität und entspricht dem aktuellen Stand der Technik in der Eisenbahn-Cybersecurity.

3.1 Hardware design and modular electronics architecture

Every SIL 4 system places extreme demands on hardware engineering: redundancy concepts, watchdog mechanisms, voltage monitoring, wide temperature ranges, IP protection ratings, and a mean time between failures (MTBF) exceeding one million operating hours. These requirements were met from first releases on the UniAC[2] and validated through field experience. The Object Controller Platform adopts this hardware foundation and extends the proven modularity: a main module provides the interfaces to the interlocking and supplies power and communications to them. Depending on the object type, specific controller modules are fitted to drive and monitor point machines/monitor end position detectors or the corresponding peripherals for signals, IO interfaces or level crossings. It is based on a housing with up to IP67 protection rating and tool-free plug-in connectors for rapid installation.

3.2 Cryptography and security architecture

The second key area of experience concerns cryptography and cybersecurity. The decision to integrate cryptographic protection fully into the system board of the UniAC[2] without external hardware was a pioneering step in railway signalling, requiring the selection and qualification of cryptographic hardware cores, secure key management, secure boot concepts and integration into the safety communication channel per EN 50159. On the platform, this approach extends to all product types: every UniOC variant incorporates the same integrated cryptography engine, conforming to IEC 62443 and EULYNX Baseline 4 and System Pillars. The defence-in-depth architecture separates safety and security functions without requiring separate hardware, reducing complexity whilst reflecting current best practice in railway cybersecurity.

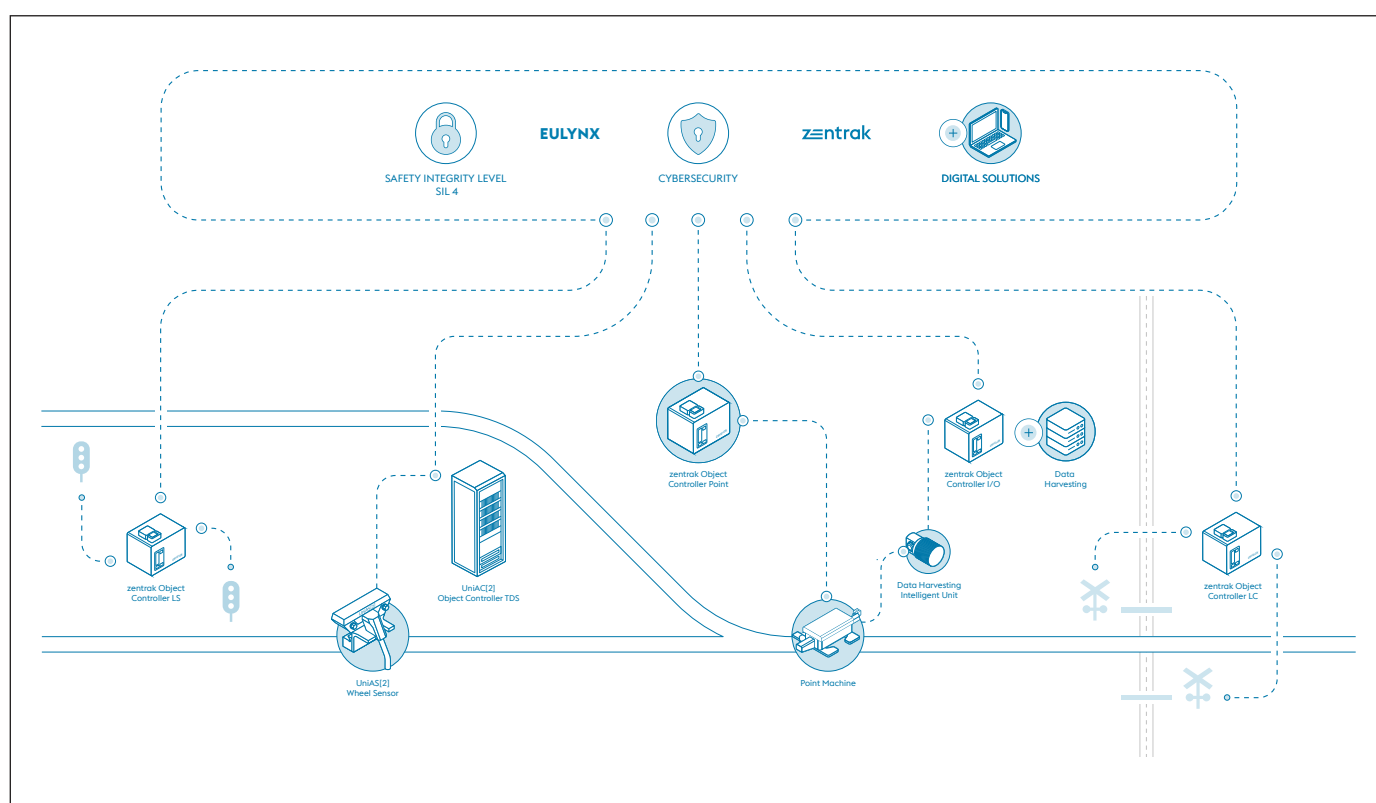


Bild 2: Überblick der voestalpine EULYNX Object Controller Platform

Fig. 2: Overview of the voestalpine EULYNX Object Controller Platform

4 Die Object Controller Platform – Architektur und Produktfamilie

4.1 Plattformprinzip: eine Basis, vier Objekttypen

Das Kernprinzip der Plattform (Bild 2) ist maximale Wiederverwendung auf Plattformebene, kombiniert mit gezielter Spezialisierung auf Ebene der Controller-Module. Alle UniOC-Varianten nutzen dieselbe Hauptbaugruppe, dasselbe Betriebssystem, dieselbe Safety-Ausführungsplattform, dieselbe Krypto-Engine und dieselbe Diagnosearchitektur. Unterschiedlich sind allein die spezifischen Controller-Module, die auf den jeweiligen Feldelementtyp zugeschnitten sind.

Das hat weitreichende Folgen: Einmal erbrachte Sicherheitsnachweise (Safety Cases) gelten für alle auf der Plattform aufbauenden Varianten, und Plattformänderungen wie Security-Patches können für alle Produkte gleichzeitig und einheitlich ausgerollt werden.

4.2 UniOC[P] – Object Controller für Weichen

Der UniOC[P] ist das erste vollständig zertifizierte Mitglied der Produktfamilie. 2025 wurde es als erstes EULYNX-BL4R3-konformes Object-Controller-System in Europa vom TÜV SÜD nach CENELEC SIL 4 zertifiziert. Dies zeigt, dass sich die Standardspezifikation in einem realen Produkt zur Ansteuerung und Überwachung von Weichenantrieben praktisch umsetzen lässt.

Entscheidend für Bestandsstrecken: Der UniOC[P] lässt sich sowohl in EULYNX-konformen Neuanlagen als auch als direkter 1:1-Ersatz in bestehenden Stellwerkstopologien einsetzen. Damit ist es der ideale Migrationspartner für Betreiber, die einen sofortigen Systemwechsel nicht durchführen können oder wollen.

4.3 UniOC[IO] – Object Controller für generische Ein- und Ausgänge

Der UniOC[IO] ist die universelle Schnittstelle der Plattform zur physischen Außenwelt. Es stellt sicherheitsrelevante digitale Ein- und Ausgangskanäle bereit, mit denen sich beliebige Systeme ansteuern oder auswerten lassen, die nicht von den spezifischen Objekttypen Weiche, Signal oder Bahnübergang abgedeckt sind.

Das UniOC[IO] schließt eine wesentliche Lücke im EULYNX-Ökosystem: Bislang mussten Betreiber für solche Funktionen proprietäre Einzellösungen einsetzen, weder EULYNX-konform noch auf einer gemeinsamen Diagnoseplattform abbildbar.

4.4 UniOC[LS] – Object Controller für Lichtsignale

Lichtsignale gehören zu den sicherheitskritischsten Elementen der Bahninfrastruktur. Das UniOC[LS] gewährleistet die sichere Ansteuerung und Überwachung von Haupt-, Vor- und Rangiersignalen sowie Balisen nach EULYNX-Standard.

Im Vergleich zur herkömmlichen relaisbasierten Steuerung ermöglicht der UniOC[LS] eine vollständige Ferndiagnose des Signalzustands ohne einen Vor-Ort-Einsatz an der Strecke.

4.5 UniOC[LC] – Object Controller für Bahnübergänge

Bahnübergänge sind technisch die komplexesten Objekte im EULYNX-Universum: Sie vereinen Einschaltkriterium, Schrankensteuerung, Blinklichtsignale, akustische Warneinrichtungen und, je nach nationaler Regelung, unterschiedliche Auslöse- und Sicherheitslogiken. Der UniOC[LC] bündelt diese Funktionen auf der gemeinsamen OC-Hardware und stellt sie dem übergeordneten System über standardisierte EULYNX-Schnittstellen bereit.

Die Verfügbarkeit eines EULYNX-konformen Bahnübergangs-Steuergeräts ist für viele europäische Netze eine dringende Beschaffungsfrage: Ältere Bahnübergangs-Steuerungen sind häufig die letzte In-

4 The Object Controller Platform – architecture and product family

4.1 Platform principle: one foundation, four object types

The platform's core principle (fig. 2) is maximum reuse at platform level combined with targeted specialisation at controller module level. All UniOC variants share the same main board, operating system, safety execution platform, cryptography engine and diagnostics architecture. What differs are the specific controller modules tailored to each field element type.

This has far-reaching consequences: safety cases established once apply to all variants built upon the platform, and platform changes such as security patches roll out to all products simultaneously and consistently.

4.2 UniOC[P] – object controller for points

The UniOC[P] is the first fully certified member of the product family. In 2025 it became the first EULYNX BL4R3-compliant object controller system in Europe to receive CENELEC SIL 4 certification from TÜV SÜD. It demonstrates that the standard specification is practically implementable in a real product controlling and monitoring point machines.

Crucially for legacy lines: the UniOC[P] can be deployed both in EULYNX-compliant new installations and as a drop-in replacement within existing interlocking topologies, making it the ideal migration partner for operators who cannot or do not wish to undertake an immediate system replacement.

4.3 UniOC[IO] – object controller for generic inputs and outputs

The UniOC[IO] is the platform's universal interface with the physical outside world. It provides safety-relevant digital input and output channels that can control or evaluate any field device not covered by the specific object types of points, signals or level crossings.

The UniOC[IO] closes a significant gap in the EULYNX ecosystem: previously, operators had to employ proprietary individual solutions for such functions – neither EULYNX-compliant nor representable on a common diagnostics platform.

4.4 UniOC[LS] – object controller for light signals

Light signals are among the most safety-critical elements of railway infrastructure. The UniOC[LS] assures safe control and monitoring of main signals, distant signals and shunting signals and balises to the EULYNX standard.

Compared with conventional relay-based control, the UniOC[LS] enables complete remote signal-state diagnostics without a line visit.

4.5 UniOC[LC] – object controller for level crossings

Level crossings are technically the most complex objects in the EULYNX universe: they combine activation input, barrier control, flashing light signals, audible warning devices and – depending on national regulations – varying trigger and safety logic. The UniOC[LC] consolidates these functions on the shared OC hardware and presents them to the higher-level system via standardised EULYNX interfaces.

The availability of a EULYNX-compliant level crossing controller is a pressing procurement issue for many European networks: older level crossing controllers are frequently the last island of proprietary technology standing in the way of a complete EULYNX migration. The UniOC[LC] closes this fi-

sel proprietärer Technik, die einer vollständigen EULYNX-Migration im Weg steht. Der UniOC[LC] schließt diese letzte Lücke und rundet die Produktfamilie zu einem stimmigen Systemangebot ab.

5 Prüfinfrastruktur: das hauseigene EMV-Labor

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) ist eine zentrale Entwurfsanforderung für LST-Systeme. Das Betriebsumfeld, Rückströme der Traktion, Schalttransienten und hochfrequente Störeinflüsse, stellt deutlich höhere Anforderungen an die Feldtechnik als typische industrielle Anwendungen.

Um dem zu begegnen, wurde ein hauseigenes EMV-Labor aufgebaut. Es erlaubt EMV-Untersuchungen bereits während der Entwicklung statt erst bei der abschließenden Zertifizierung und ermöglicht so schnellere Entwurfsiterationen und eine frühere Validierung von Hardware-Entscheidungen.

Da das Labor unmittelbar in den Entwicklungsprozess eingebunden ist, lassen sich neue Leiterplattenrevisionen frühzeitig bewerten, so dass Filterauslegung, Schirmung und Layout schon vor der formalen Prüfung optimiert werden können. Das wirkt sich für die Plattform besonders stark aus: Weil alle UniOC-Varianten auf einer gemeinsamen Hardwarebasis beruhen, lassen sich EMV-Erkenntnisse vom UniOC[P] direkt auf die anderen Produkttypen übertragen, das steigert die Entwicklungseffizienz und die plattformweite Robustheit.

6 Cybersecurity: Investition in Know-how und Prozesse

6.1 Security als Systemanforderung

Cybersecurity galt in der Sicherungstechnik lange als nachrangiges Thema; die physische Netzwerktrennung wurde als ausreichend erachtet. Das genügt nicht mehr: Die zunehmende Vernetzung unter EULYNX und die Einbindung des Condition Monitoring in übergeordnete Systeme haben potenzielle Angriffsflächen geschaffen.

Das EULYNX Security Cluster hat dieses Problem mit einer einheitlichen Security-Spezifikation für das digitale Stellwerk adressiert. Baseline 4 verlangt von jedem Feldgerät die Umsetzung einer standardisierten Security-Schnittstelle (SSI), die kryptografische Authentifizie-

nal gap und completes the product family into a coherent system offering.

5 Test infrastructure: the in-house EMC laboratory

Electromagnetic compatibility (EMC) is a core design requirement for railway signalling systems. The operating environment – traction return currents, switching transients and radio-frequency interference – places significantly higher demands on field equipment than typical industrial applications.

To address this, an in-house EMC laboratory has been established, allowing EMC investigations during development rather than only at final qualification and enabling faster design iterations and earlier validation of hardware decisions.

Integrated directly into the development process, the laboratory allows new board revisions to be assessed early, so filter design, shielding and layout can be optimised before formal testing. This has particular leverage for the platform: because all UniOC variants share a common hardware basis, EMC findings from the UniOC[P] transfer directly to the other product types, improving development efficiency and platform-wide robustness.

6 Cybersecurity: investment in expertise and process

6.1 Security as a system requirement

Cybersecurity was long treated as a secondary issue in railway signalling, with physical network isolation considered sufficient. This is no longer adequate: the growing interconnection under EULYNX and the integration of condition monitoring into higher-level systems have created potential attack surfaces. The EULYNX Security Cluster has addressed this with a uniform security specification for digital interlocking. Baseline 4 requires every field device to implement a standardised security interface (SSI) supporting cryptographic authentication, telegram integrity protection and secure configuration management, increasingly without external hardware; the other inter-



ERTMS | ETCS – Solutions

signalling4you.com



Reliable & cost-effective
Fixed and Controlled **Eurobalises**



Interoperable
LEU Coder



Hardware protected, air gap
Programming Tool

Visit us at:
hub 27
stand 520



rung, Telegrammintegritätsschutz und ein sicheres Konfigurationsmanagement unterstützt, zunehmend ohne externe Hardware. Auch die übrigen Schnittstellen (SCI/SDI/SMI) definieren Schutzmechanismen, die ihren Einsatz in Netzen der Kategorie 3 ermöglichen.

6.2 Security by Design: Umsetzung auf der Plattform

Baseline 4 wurde nicht als externe Vorgabe, sondern als Entwurfsprinzip übernommen. Am deutlichsten zeigt sich das an der integrierten Krypto-Engine, die eine externe Cryptobox überflüssig macht und bahntaugliche Hardware-Sicherheitsmodule (HSM) erfordert, die eng mit der Safety-Ausführungsebene verzahnt sind. Die OC-Plattform setzt eine Defense-in-Depth-Architektur über die Kommunikations-, Anwendungs- und Hardwareebene hinweg um. Sie nutzt TLS (Transport Layer Security) mit gegenseitiger Authentifizierung und Zertifikatsmanagement, trennt sicherheitskritische und nicht sicherheitsrelevante Prozesse auf Firmware-Ebene und erzwingt Secure Boot, um nicht signierte Firmware zu blockieren. Zudem ist ein OPC-UA-Secure-Channel nach aktuellem Stand der Technik implementiert; erkennt das System eine Kompromittierung, geht es in den sicheren Zustand über. Firmware-Aktualisierungen werden als abgesicherte Feld-Updates unterstützt. Jedes Update ist kryptografisch signiert und wird vor der Installation verifiziert; unvollständige oder manipulierte Updates lösen ein Rollback auf die letzte gültige Firmware-Version aus.

6.3 IEC 62443 und der Product Security Lifecycle

Über die unmittelbaren EULYNX-Anforderungen hinaus wurde ein strukturierter Security-Entwicklungsprozess nach IEC 62443 implementiert. Diese Norm definiert Anforderungen an die sichere Entwicklung industrieller Steuerungssysteme und wird für den Bahnsektor, durch nationale und europäische Regulierung sowie innerhalb von EULYNX und den System Pillars, zunehmend verbindlich.

faces (SCI/SDI/SMI) also define protection techniques making them usable in Category 3 networks.

6.2 Security by Design: implementation on the platform

Baseline 4 has been adopted as a design principle rather than an external requirement. Its clearest expression is the integrated cryptography engine, eliminating the need for an external cryptobox and requiring railway-suitable hardware security modules (HSMs) closely integrated with the safety execution layer.

The OCP applies a defence-in-depth architecture across communication, application and hardware layers. It uses TLS (Transport Layer Security) with mutual authentication and certificate management, separates safety-critical and non-safety processes at firmware level, and enforces secure boot to block unsigned firmware. A state-of-the-art OPC UA Secure Channel is also implemented, and on detecting a compromise the system transitions to the safe state. Firmware updates are supported as secured field updates. Each update is cryptographically signed and verified before installation; incomplete or manipulated updates trigger rollback to the last valid firmware version.

6.3 IEC 62443 and the product security lifecycle

Beyond the immediate EULYNX requirements, a structured security development process to IEC 62443 was implemented. IEC 62443 defines requirements for secure development of industrial control systems and is increasingly mandatory for the railway sector through national and European regulation – and within EULYNX and System Pillars.

To this end, a dedicated security engineering team has been established, responsible for both technical implementation and process qualification to IEC 62443. Across many elements of this product security lifecycle, the organisation has already achieved certified maturity level 3.



Bild 3: UniOC[P], der erste SIL-4-zertifizierte Object Controller Point basierend auf EULYNX Baseline 4 Release 3

Fig. 3: UniOC[P], the first SIL 4-certified Object Controller Point based on EULYNX Baseline 4 Release 3

Dafür wurde ein eigenes Security-Engineering-Team aufgebaut, das sowohl für die technische Umsetzung als auch für die Prozessqualifizierung nach IEC 62443 verantwortlich ist. Für viele Elemente dieses Product Security Lifecycle hat das Unternehmen bereits den zertifizierten Reifegrad 3 erreicht.

7 EULYNX-Konformität: hauseigene Simulation als Instrument der Qualitätssicherung

7.1 Die Herausforderung der EULYNX-Konformitätsprüfung

EULYNX-Konformität ist keine binäre Eigenschaft, die sich durch einfache Schnittstellentests abschließend nachweisen ließe; eine vollständige manuelle Prüfung aller möglichen Protokollabläufe ist weder praktikabel noch methodisch hinreichend.

Das EULYNX-Konsortium hat darauf selbst reagiert: Ab BL4R 2 wurden offizielle Zertifizierungs-Prüfkataloge veröffentlicht und mit jedem Release erweitert; sie decken alle spezifizierten SCI-Schnittstellen ab (SCI-P, SCI-LS, SCI-IO, SCI-TDS, SCI-LX, SCI-LC). Zusätzlich stellt das Konsortium seine Spezifikationen in maschinenlesbarer Form als SysML-Modelle und ReqIF-Dateien bereit, mit denen sich die modellierten Anforderungen validieren lassen.

7.2 Der hauseigene EULYNX-Simulator

voestalpine Railway Systems hat einen hauseigenen EULYNX-Simulator für Entwicklung, Konformitätsnachweis und Regressionstests der Plattform entwickelt. Abgeleitet aus den veröffentlichten SysML-Modellen und Prüfkatalogen des Konsortiums, ermöglicht er eine systematische, reproduzierbare Validierung des Protokollverhaltens einschließlich Fehler- und Grenzfällen. Da alle UniOC-Varianten dieselbe Kommunikations- und Safety-Architektur nutzen, bietet der Simulator einen wiederverwendbaren Rahmen zur Konformitätssicherung über die gesamte Produktfamilie hinweg.

8 Zertifizierungsstrategie und normative Grundlage

Die SIL-4-Zertifizierung des UniOC[P] (Bild 3) durch TÜV SÜD in Braunschweig gegen EULYNX BL4R3 war ein komplexes, ressourcenintensives Vorhaben und zugleich die Grundlagenarbeit, auf der alle nachfolgenden Produkte aufbauen. Die Zertifizierung einer SIL-4-Plattform nach EN 50126, 50128, 50129 und 50159 ist im Wesentlichen ein Systemnachweis: Der Nachweis, dass Entwicklungsprozesse, Qualitätsmanagement, Prüfmethodik und Aufbau des Sicherheitsnachweises die normativen Anforderungen erfüllen, gilt für alle Produkte der Plattform.

Für die Entwicklung von UniOC[IO], UniOC[LS] und UniOC[LC] bedeutet das eine erhebliche Beschleunigung des Zertifizierungswegs: Die auf Plattformebene erbrachten Nachweise für Prozesse, Safety-Ausführungsebene, Kryptografie und grundlegendes Hardware-Design müssen nicht erneut erbracht werden; die produktspezifische Begutachtung durch den TÜV SÜD konzentriert sich auf die jeweiligen Controller-Module und deren Sicherheitsfunktion. Genau das ermöglicht den ambitionierten Zertifizierungsplan: Funktionsfähige Prototypen für UniOC[IO], UniOC[LS] und UniOC[LC] liegen bereits vor; SIL-4-Begutachtungen werden je nach Marktnachfrage innerhalb eines Jahres ermöglicht.

9 Erste Einsätze und Marktausblick

Die Markteinführung der Produktlinie UniAC[2] nimmt durch strategische Partnerschaften und globale Einsätze bereits konkrete Gestalt an. Ein prominentes Beispiel ist der langfristige Rahmenvertrag mit der Schweizerische Bundesbahnen AG (SBB) mit einer Laufzeit von bis zu 20

7 EULYNX conformance: in-house simulation as a quality assurance instrument

7.1 The challenge of EULYNX conformance testing

EULYNX conformance is not a binary property that can be conclusively established through simple interface tests; complete manual verification of all possible protocol sequences is neither practicable nor methodologically adequate.

The EULYNX Consortium has itself addressed this: from BL4R2 onwards, official certification test catalogues have been published and extended with each release, covering all specified SCI interfaces (SCI-P, SCI-LS, SCI-IO, SCI-TDS, SCI-LX, SCI-LC). It additionally supplies its specifications in machine-readable form as SysML models and ReqIF files for validating the modelled requirements.

7.2 The in-house EULYNX simulator

voestalpine Railway Systems has developed an in-house EULYNX simulator for development, conformance verification and regression testing of the platform. Derived from the published SysML models and test catalogues of the Consortium, it enables systematic, reproducible validation of protocol behaviour, including fault and edge-case scenarios. Because all UniOC variants share the same communications and safety architecture, the simulator provides a reusable conformance assurance framework across the product family.

8 Certification strategy and normative basis

The SIL 4 certification of the UniOC[P] (fig. 3) by TÜV SÜD in Braunschweig against EULYNX BL4R3 was a complex, resource-intensive undertaking – and the foundational work upon which all subsequent products build. Certifying a SIL 4 platform to EN 50126, 50128, 50129 and 50159 is largely a systems demonstration: proof that development processes, quality management, test methodology and safety case structure meet the normative requirements applies across all products on the platform.

The consequence for the development of UniOC[IO], UniOC[LS] and UniOC[LC] is a substantial acceleration of the certification path: platform-level demonstrations for processes, safety execution layer, cryptography and fundamental hardware design do not need to be re-established; the product-specific assessment by TÜV SÜD focuses on the respective controller modules and their safety function. This is precisely what enables the ambitious certification plan: working prototypes for UniOC[IO], UniOC[LS] and UniOC[LC] exist today; SIL 4 assessments are expected based on market demand within a year.

9 Initial deployments and market outlook

The market introduction of the UniAC[2] product line is already taking shape through strategic partnerships and initial deployments. A prominent example is the long-term framework agreement with Swiss Federal Railways, covering up to 20 years. This partnership underscores the strategic importance of UniAC[2], includes cybersecurity solutions and highlights the strength of the integrated product approach internationally.

In parallel, the first planned deployments of the UniOC[P] are located in Poland and on the Rail Baltica corridor, one of Europe's most ambitious railway projects, connecting Tallinn, Riga, Vilnius and Warsaw along a new high-speed line. As a

Jahren. Diese Partnerschaft unterstreicht die strategische Bedeutung des UniAC[2], umfasst Cybersecurity-Lösungen und verdeutlicht die Stärke des integrierten Produktansatzes im internationalen Maßstab. Parallel dazu liegen die ersten geplanten Einsätze des UniOC[P] in Polen und im Korridor Rail Baltica, einem der ambitioniertesten Bahnprojekte Europas, das Tallinn, Riga, Vilnius und Warschau entlang einer neuen Hochgeschwindigkeitsstrecke verbindet. Als Greenfield-Projekt, das von Anfang an auf EULYNX-konforme Lösungen ausgelegt ist, bietet Rail Baltica ein ideales Umfeld für den ersten Einsatz der Plattform. Für die Plattform bedeutet das eine wachsende Nachfrage nach EULYNX-konformen, SIL-4-zertifizierten Object Controllern, die sowohl Neubau- als auch Bestandsanforderungen erfüllen. Dabei ist nicht nur die technische Breite der Produktfamilie bedeutend, sondern auch die Tiefe des fachlichen Know-hows: Das Wissen über die physischen Feldelemente, etwa darüber, wie sich ein Weichenantrieb unter Last verhält, ist konsequent in die Entwicklung der Plattform eingeflossen.

10 Fazit

voestalpine Railway Systems zeichnet sich als Komplettanbieter für vollständige LST-Lösungen aus. Die Object Controller Platform ist das Ergebnis einer konsequenten Technologiestrategie. Jahre der Entwicklung und der Feldvalidierung des Achszählsystems UniAC[2] haben eine Wissensbasis im Systems Engineering und in der Kryptografie geschaffen, die heute das Fundament einer vollständigen, EULYNX-konformen Feldelementeplattform bildet. Das UniOC[P] zeigt als erstes SIL-4-zertifiziertes Mitglied der Familie, dass dieser Weg tragfähig ist, und die funktionsfähigen Prototypen für UniOC[IO], UniOC[LS] und UniOC[LC] belegen, dass die Plattformstrategie aufgeht. Das hauseigene EMV-Labor, das Security-Engineering nach IEC 62443 und der EULYNX-Simulator sind strategische Investitionen in die Qualitätssicherung, die das Entwicklungstempo erhöhen und zugleich Qualität und Konformität sichern. EULYNX ist mehr als ein Standard, es ist ein Katalysator für den Wandel der europäischen Bahninfrastruktur. voestalpine Railway Systems hat sich entschieden, diesen Wandel aktiv mitzugestalten: mit einer vollständigen, plattformbasierten Objekt-Controller-Familie, die alle EULYNX-Feldobjekte abdeckt, und mit der technischen Tiefe aus zwei Jahrzehnten Kompetenzaufbau in der Sicherungstechnik. ■

greenfield initiative designed from the outset for EULYNX-compliant solutions, Rail Baltica is an ideal environment for the platform's initial application.

For the platform, this means growing demand for EULYNX-compliant, SIL 4-certified object controllers satisfying both greenfield and brownfield requirements. It is not only the technical breadth of the product range that is significant, but also the depth of technical expertise: knowledge of the physical field elements – how a point machine behaves under load, for example – has been consistently incorporated into the platform's development.

10 Conclusion

voestalpine Railway Systems is supporting single-stop suppliers for complete signalling solutions. The Object Controller Platform is the result of a consistent technology strategy. Years of development and field validation of the UniAC[2] axle counting system have built a knowledge base, in system engineering and cryptography, that today forms the foundation of a complete, EULYNX-compliant field device platform. The UniOC[P], as the first SIL 4-certified member of the family, demonstrates that this path is viable, and the working prototypes for UniOC[IO], UniOC[LS] and UniOC[LC] show that the platform strategy is delivering. The in-house EMC laboratory, the security engineering to IEC 62443 and the EULYNX simulator are strategic quality assurance investments that increase development velocity while safeguarding quality and conformance.

EULYNX is more than a standard – it is a catalyst for the transformation of European railway infrastructure. voestalpine Railway Systems has chosen to shape this transformation actively: with a complete, platform-based object controller family covering all EULYNX field objects, and the technical depth of two decades of competence-building in signalling technology. ■

AUTOREN | AUTHORS

Woloszyk Przemyslaw

Senior Vice President – R&D/Engineering
E-Mail: przemyslaw.woloszyk@voestalpine.com

Marek Kucinski

Vice President – Software Application, Product Security Manager
E-Mail: marek.kucinski@voestalpine.com

René Berger

Member of the Management Board Sales
E-Mail: r.berger@voestalpine.com

Alle Autoren / all authors:
voestalpine Signaling Poland Sp. z o.o.
Anschrift / Address: Jana z Kolna 26C, PL-81859 Sopot

LITERATUR | LITERATURE

- [1] EULYNX: Europäische Initiative zur Standardisierung von Schnittstellen und Elementen der Signaltechnik. Online: <https://eulynx.eu/> (Zugriff: Juni 2026)
- [2] Europe's Rail Joint Undertaking; EULYNX: Baseline Set 4 Release 3 – Spezifikation standardisierter Signaltechnik-Schnittstellen. 2024. Online: <https://rail-research.europa.eu/latest-news/europes-rail-joint-undertaking-and-eulynx-release-baseline-set-4-release-3-specification/> (Zugriff: Juni 2026)
- [3] CENELEC: EN 50129:2018 – Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety related electronic systems for signalling. Brüssel: CENELEC, 2018. Ergänzend: EN 50126-1:2017 (RAMS) und EN 50128:2011 (Software)
- [4] CENELEC: EN 50159:2010+A1:2020 – Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Safety-related communication in transmission systems. Brüssel: CENELEC, 2010/2020
- [5] IEC: IEC 62443 (Normenreihe) – Security for industrial automation and control systems. Genf: International Electrotechnical Commission. Überblick online: <https://www.iec.ch/blog/understanding-iec-62443> (Zugriff: Juni 2026)

Nächste Digitalisierungsstufe: Achszählrechner mit EULYNX-Schnittstelle in Betrieb

The next step in digitalisation: a train detection system with a live EULYNX interface

Christian Hein | Andre Wenning

Die Digitalisierung der Leit- und Sicherungstechnik (LST) erfordert neben neuen Stellwerksarchitekturen auch die Weiterentwicklung angebundener Subsysteme. Eine Schlüsselrolle spielt die Gleisfreimeldung. Während klassische Achszählssysteme oft eng mit der Stellwerkslogik verknüpft sind, ermöglichen dezentrale Achszählrechner mit standardisierten Schnittstellen eine funktionale Entkopplung, höhere Skalierbarkeit und flexible Integration in digitale Architekturen. Das Train Detection System von Scheidt & Bachmann (TDSB) unterstützt diesen Transformationsprozess.

1 Motivation

Die Digitalisierung der LST stellt Eisenbahninfrastrukturbetreiber vor die Herausforderung, bestehende Systeme schrittweise zu modernisieren, ohne dabei Verfügbarkeit, Betriebssicherheit oder Investitionen zu gefährden. Insbesondere bei der Achszählung zeigt sich, dass klassische, zentral aufgebaute Architekturen zunehmend an ihre Grenzen stoßen – sei es hinsichtlich Skalierbarkeit, Rechenlast oder der Abhängigkeit von Softwareständen zentraler Komponenten.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Einführung leistungsfähiger, dezentraler Achszählrechner mit standardisierter Schnittstelle an Bedeutung. Mit der Implementierung von Achszählrechnern mit EULYNX-Schnittstelle verfolgt Scheidt & Bachmann konsequent das Ziel, die Achszählung funktional zu entkoppeln, modular aufzubauen und zukunftssicher in moderne Stellwerks- und Sicherungssysteme einzubetten.

1.1 Verbesserte Skalierbarkeit der Achszählung

Ein wesentlicher Vorteil der dezentralen Achszählrechnerarchitektur liegt in der deutlich verbesserten Skalierbarkeit. Durch die Auslagerung der Achszählfunktionen auf eigenständige Rechner können zusätzliche Zählabschnitte oder Streckenerweiterungen weitgehend unabhängig von der zentralen Stellwerkslogik realisiert werden. Neue Achszählpunkte lassen sich modular ergänzen, ohne bestehende Systeme in ihrer Leistungsfähigkeit oder Struktur wesentlich zu beeinflussen.

Die standardisierte EULYNX-Schnittstelle schafft dabei eine klare Trennung zwischen Achszähltechnik und dem übergeordneten Sicherungssystem. Dies erleichtert sowohl die Integration in unterschiedliche Stellwerksarchitekturen als auch die zukünftige Erweiterung oder Migration, beispielsweise im Rahmen von Ausbaumaßnahmen oder der schrittweisen Einführung neuer Sicherungstechnologien.

The digitalisation of signalling and train control systems requires not only new interlocking architectures but also the further development of the connected subsystems. Train detection plays a key role in this transformation. While systems that prove track vacancy are often tightly coupled to the interlocking logic, decentralised train detection with standardised interfaces enables greater functional decoupling, improved scalability and more flexible integration into digital architectures. Scheidt & Bachmann's Train Detection System (TDSB) supports this transformation process.

1 Motivation

The digitalisation of signalling and safety systems presents railway infrastructure managers with the challenge of modernising their existing systems step by step without jeopardising their availability, operational safety or previous investments. It is especially apparent in track vacancy proving (TVP) systems that conventional centralised architectures are increasingly reaching their limits, whether in terms of their scalability, processing load or dependence on central component software versions.

The introduction of decentralised, high-performance train detection systems with a standardised interface is becoming increasingly important against this background. The implementation of train detection systems with a EULYNX interface constitutes part of Scheidt & Bachmann's consistent pursuit of the objective of functionally decoupling TVP, creating a modular structure and integrating it into modern interlocking and signalling systems in a future-proof manner.

1.1 Improved axle counting scalability

A major advantage of the decentralised architecture lies in its significantly improved scalability. Additional TVP sections or line extensions can be implemented largely independently of the central interlocking logic by outsourcing the train detection functions to autonomous units. New axle counters can be added on a modular basis without materially affecting the performance or structure of the existing systems.

The standardised EULYNX interface provides a clear separation between the train detection and the interlocking system. This facilitates both integration into different interlocking architectures and future expansion or migration, for example as part of infrastructure extensions or the gradual introduction of new safety technologies.

1.2 Entlastung der Zentraleinheit

Mit der Verlagerung der Achszählverarbeitung auf dezentrale Achszählrechner wird die Zentraleinheit des Stellwerks signifikant entlastet. Rechenintensive Aufgaben wie die Auswertung der Zählimpulse, Plausibilitätsprüfungen oder die Verwaltung der Zählzustände erfolgen lokal im Achszählrechner und nicht mehr in der zentralen Stellwerkslogik.

Dies führt zu einer Reduzierung der Rechenlast und erhöht die Gesamtstabilität des Systems, insbesondere in komplexen Anlagen mit einer großen Anzahl von Gleisabschnitten. Gleichzeitig entstehen zusätzliche Reserven in der Zentraleinheit, die für weitere Funktionen oder zukünftige Erweiterungen genutzt werden können, ohne die Leistungsgrenzen des Systems frühzeitig zu erreichen.

1.3 Erhalt der Gleisbelegungsinformationen bei Softwareupdates

Ein weiterer entscheidender Kundennutzen ergibt sich im Zusammenhang mit Wartung und Softwarepflege. In klassischen Architekturen können Softwareupdates der Zentraleinheit dazu führen, dass temporär keine gültigen Gleisbelegungsinformationen zur Verfügung stehen oder diese neu ermittelt werden müssen. Dies hat potenziell Auswirkungen auf den Betrieb und erhöht den organisatorischen Aufwand bei Inbetriebnahmen oder Updates. Durch den Einsatz eigenständiger Achszählrechner bleibt die Verwaltung der Gleisbelegungen unabhängig von Softwareänderungen der Zentraleinheit erhalten. Gleiszustände werden lokal gespeichert und stehen auch während oder unmittelbar nach einem Update der zentralen Komponenten weiterhin konsistent zur Verfügung. Dadurch ergeben sich erhebliche Vorteile: Die Verfügbarkeit der Anlage wird erhöht, die betrieblichen Risiken werden reduziert und die Wartungs- und Updateprozesse vereinfacht.

2 TDSB-Integration in die ZSB 2000-Systemarchitektur

Das digitale Stellwerkssystem ZSB 2000 von Scheidt & Bachmann ist ein modular aufgebautes, softwarebasiertes Sicherungssystem. Die Architektur folgt einem klar strukturierten Ebenenkonzept und gliedert sich in drei funktional getrennte Systemebenen: das integrierte Leit und Bediensystem (iLBS), die Sicherungsebene sowie die Feldebene. Die Kommunikation zwischen diesen Ebenen erfolgt über definierte, rückwirkungsfreie Schnittstellen und gewährleistet eine eindeutige Aufgabentrennung innerhalb des Gesamtsystems (Bild 1).

Das iLBS stellt die Mensch-Maschine-Schnittstelle dar. Es dient der Visualisierung der Betriebszustände, der Bedienung des Bahnbetriebs sowie der Diagnose und Überwachung der Stellwerksanlage. Mehrere Bedienplätze können dabei über IP-basierte Verbindungen an die zentrale Systemstruktur angebunden werden.

Die Sicherungsebene bildet den zentralen Kern für die funktionale Sicherheit des Systems. Dort werden Bedienhandlungen geprüft und die sicherungstechnischen Logiken umgesetzt, unter anderem für die Fahrstraßenbildung, die Überwachung der Gleisfreimeldung sowie die Anbindung und Integration von ETCS-Funktionen. Die Sicherungsebene ist als verteilte Stellwerksarchitektur ausgeführt und ermöglicht die Anbindung weiterer digitaler Stellwerke über standardisierte Schnittstellen.

Die Feldebene übernimmt die direkte Ansteuerung und Überwachung der Außenanlagen. Eigenintelligente Controller steuern Signale, Weichen, Gleissperren und Bahnübergänge und erfassen die Zustände der technischen Einrichtungen. Die Kommunikation mit den Feldobjekten erfolgt über robuste, seit Jahrzehnten

1.2 Reducing the load on the central unit

Shifting the axle counting processing to decentralised train detection systems significantly reduces the load on the central interlocking unit. Processing-intensive tasks such as evaluating count impulses, plausibility checks and managing count states are performed locally in the train detection logic rather than in the central interlocking logic.

This reduces the processing load and increases the overall stability of the system, particularly in complex installations with a large number of track vacancy sections. At the same time, additional reserves are also created in the central unit, which can be used for further functions or future extensions without the system reaching its performance limits prematurely.

1.3 Retaining track occupancy information during software updates

A further decisive customer benefit arises in connection with maintenance and software support. In conventional architectures, software updates to the central unit may mean that the valid track occupancy status is temporarily unavailable or that it has to be re-established. This may potentially affect operations and increase the organisational effort required for commissioning or updates.

The use of autonomous train detection systems allows the management of track occupancy states to remain independent of any software changes in the central unit. The track vacancy information is stored locally and therefore remains consistently available even during or immediately after an update of the central components. This increases system availability, reduces operating risks and significantly simplifies the maintenance and update processes.

2 Integrating the TDSB into the ZSB 2000 system architecture

Scheidt & Bachmann's ZSB 2000 digital interlocking system is a modular, software-based signalling system. Its architecture follows a clearly structured layer concept and is divided into three functionally separate system layers: the integrated control system (iLBS), the interlocking level and the field level. Communication between these levels takes place via defined interfaces that do not interfere with one another and ensure the clear separation of the tasks within the overall system (fig. 1).

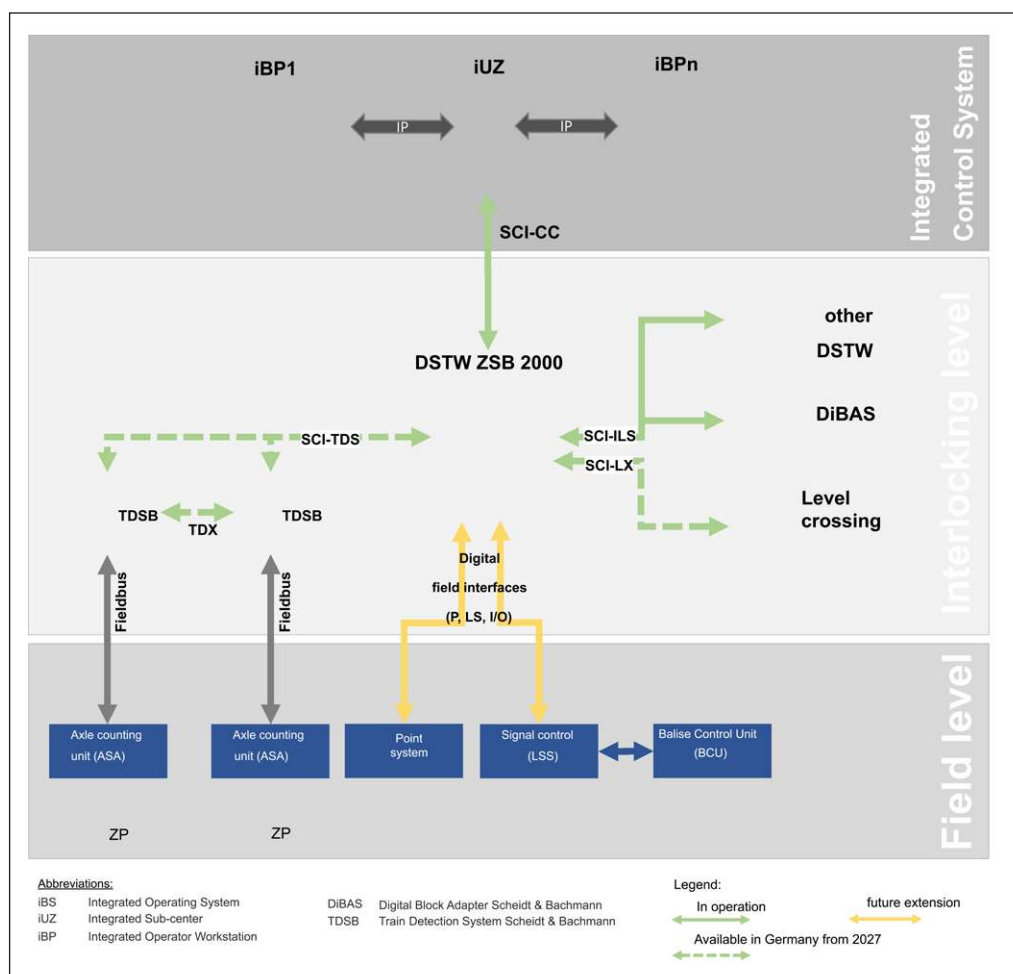
The integrated control system provides the human-machine interface. It is used to visualise operating states, control railway operations and diagnose and monitor the interlocking system. Several operator workstations can be connected to the central system structure via IP-based links.

The signalling layer forms the central core for the system's functional safety. Operator actions are verified and the signalling logic is implemented within this layer, including the route setting, train detection monitoring and connection and integration of the ETCS functions. The interlocking level has been designed as a distributed interlocking architecture and enables the connection of further digital interlockings via standardised interfaces.

The field level is responsible for the direct control and monitoring of the external equipment. Intelligent controllers operate signals, points, derailleurs and level crossings and record the states of the technical installations. Communication with the field elements takes place via robust bus systems such as the CAN bus, which have proven their value over decades and require only minimal amounts of copper cabling.

Bild 1: Systemarchitektur DSTW ZSB 2000 und TDSB

Fig. 1: The ZSB 2000 digital interlocking system and TDSB system architecture



bewährte Bussysteme wie den CAN-Bus, die nur einen minimalen Bedarf an Kupferkabeln aufweisen.

2.1 Integration des Achszählsystems TDSB über SCI-TDS

Ein zentrales Element der Systemarchitektur ist die konsequente Nutzung standardisierter EULYNX-Schnittstellen zur Anbindung sicherungstechnischer Subsysteme. Diese ermöglichen eine funk-

2.1 Integrating the TDSB axle counting system via SCI-TDS

A central element of the system architecture is the consistent use of standardised EULYNX interfaces to connect the signalling sub-systems. These enable the functional decoupling of the individual components and provide the basis for flexible system integration. The connection between the central interlocking logic and the dedicated TDSB train detection system is realised via the SCI-

EULYNX CONFORMITY FROM ZERO TO HERO

- Full EULYNX Simulation Suite
- Safety-Critical Software
- Integration & Automation

Systems Lab 21

systemslab21.com

InnoTrans 2026

CityCube · Hall B · Booth 210

tionale Entkopplung der einzelnen Komponenten und schaffen die Grundlage für eine flexible Systemintegration.

Die Anbindung der ESTW-Zentraleinheit an das dedizierte Achszählsystem TDSB erfolgt über die Schnittstelle SCI-TDS (Standard Communication interface – Train Detection System). Das TDSB-System übernimmt vollständig die Verwaltung der Zählabschnitte sowie die Ermittlung und Speicherung der Gleisbelegungszustände. Die sicherungsrelevanten Informationen werden standardisiert an die Sicherungsebene des ZSB 2000 übergeben.

Die Erkennung der Achsen und deren Fahrtrichtung erfolgen dezentral in eigenständigen Achszählauswerteeinheiten (kurz ASA-BG), die direkt mit den Zählpunkten verbunden sind. Diese Architektur erlaubt eine skalierbare Erweiterung der Gleisfreimeldung und reduziert gleichzeitig die Rechenlast innerhalb der zentralen Stellwerkslogik.

Optional kann die Achszählauswertung auch in Bestandssystemen eingebunden werden und unter geeigneten technischen sowie betrieblichen Randbedingungen eine schrittweise Migration bestehender Systeme in eine TDSB-basierte Zielstruktur unterstützen.

2.2 Kommunikation zwischen Achszählrechnern

Da der EULYNX-Standard [1] keine Schnittstelle zum Nachbar-Achszählsystem spezifiziert, wäre an Systemgrenzen eine doppelte Ausrüstung mit Achszählpunkten erforderlich. Aus Mangel an Alternativen hat sich Scheidt & Bachmann dafür entschieden, seinen Kunden, neben der standardisierten SCI-TDS-Schnittstelle, eine mit SCI-TDX bezeichnete Schnittstelle zur direkten Kopplung von TDSB-Systemen anzubieten.

Ziel ist die Freimeldung von Gleisfreimeldeabschnitten über Systemgrenzen hinweg, ohne an jeder Grenze zwingend eine dop-

TDS interface (Standard Communication Interface – Train Detection System). The TDSB system manages the TVP sections and determines and stores the track occupancy states. The safety-relevant information is transferred to the ZSB 2000 interlocking level in a standardised form.

Axle and direction of movement detection occurs decentrally in autonomous axle counting units (ASA-BG for short) that are directly connected to the detection units. This architecture allows the scalable expansion of train detection while at the same time reducing the processing load within the central interlocking logic.

Optionally, the train detection can also be integrated into existing systems and support the gradual migration of existing systems towards a TDSB-based target structure under suitable technical and operating boundary conditions.

2.2 Communication between the train detection systems

Given that the EULYNX standard [1] does not specify an interface to a neighbouring train detection system, a double equipment installation with axle counters would otherwise be required at the system boundaries. In the absence of an alternative, Scheidt & Bachmann has decided to offer its customers an SCI-TDX designated interface for the direct coupling of TDSB systems in addition to the standardised SCI-TDS interface.

The aim is to establish TVP sections across system boundaries without having to double the axle-sensing equipment at every boundary. Architecturally, TDX communication is based on safe communication between system components in accordance with EULYNX or NeuPro and uses an IP-based com-

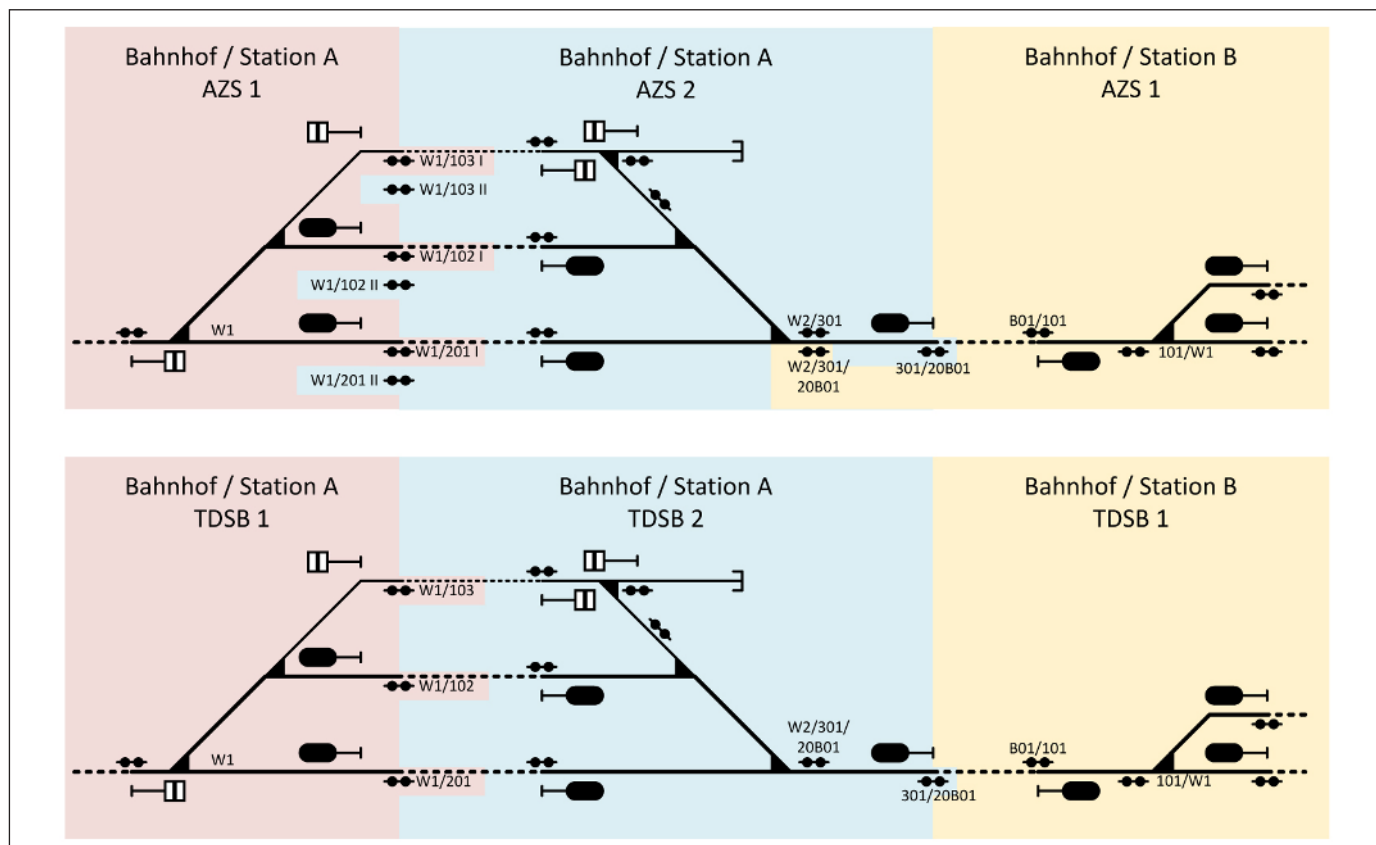


Bild 2: Schematische Anordnung von Gleisfreimeldeanlagen

Fig. 2: The schematic arrangement of train detection installations

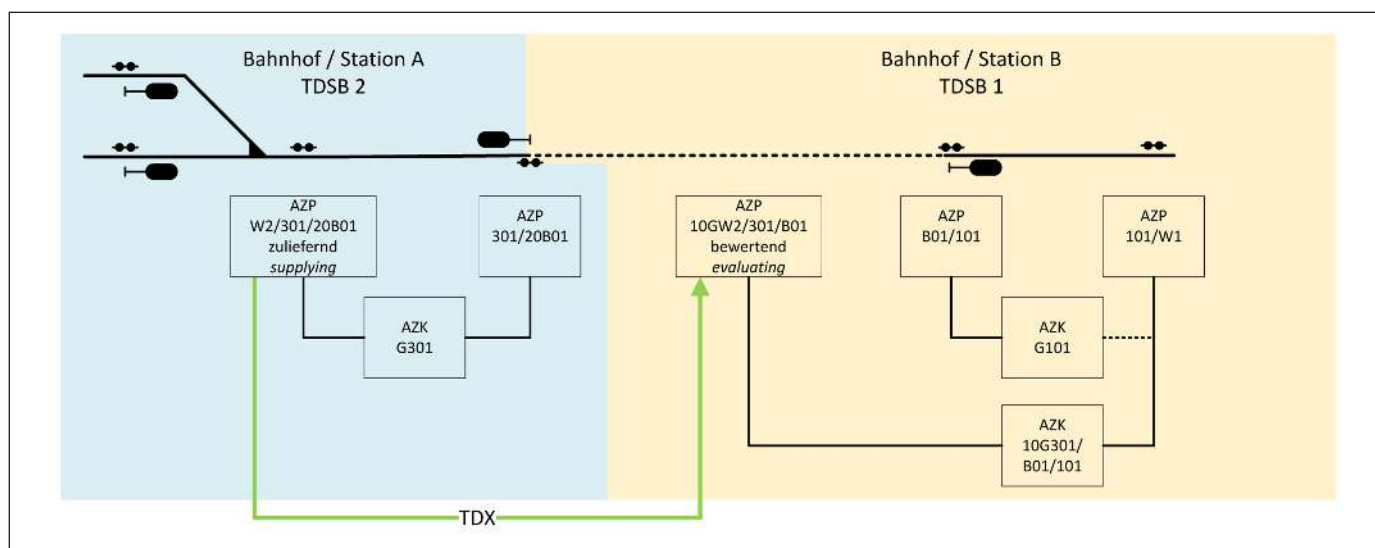


Bild 3: Beispielanwendung TDX-Schnittstellenkonzept

Fig. 3: An example application of the TDX interface concept

pelte Ausrüstung mit Achssensorik vorsehen zu müssen. Die TDX-Kommunikation orientiert sich architektonisch an der sicheren Kommunikation zwischen Systemkomponenten nach EULYNX oder NeuPro und nutzt eine IP-basierte Kommunikationsstruktur mittels RaSTA-Protokoll. Dadurch können Zustandsdaten und detektierte Achswerte zwischen gekoppelten Achszählssystemen sicher übertragen werden.

Dies ist insbesondere bei Systemgrenzen zwischen benachbarten Stellwerksbereichen, bei der Aufteilung der Gleisfreimeldung einer Betriebsstelle auf mehrere Achszählrechner oder bei abgesetzten Anlagen, beispielsweise Ausweichanschlussstellen, relevant. Während in manchen Planungsansätzen an solchen Grenzen zusätzlicher Ausrüstungsaufwand und erhebliche Mehrkosten entstehen, etwa durch doppelte Zählpunkte oder zusätzliche Verbindungskabel, kann die direkte Kommunikation zwischen Achszählrechnern diesen Aufwand reduzieren und die Planung größerer oder modular aufgebauter Anlagen vereinfachen.

Die beiden Teilbilder in Bild 2 verdeutlichen den Unterschied bei der Planung und Projektierung der Gleisfreimeldeanlagen für die Bahnhöfe A und B mit und ohne Möglichkeit der direkten Übertragung von Achsinformationen. Hierbei werden jeweils zwei Anwendungsfälle dargestellt: Aufteilung der Gleisfreimeldeanlagen für Bahnhof A auf zwei Achszählssysteme AZS 1 und AZS 2 sowie die Freimeldung für das Streckengleis zwischen den Bahnhöfen A und B.

Bei der Realisierung nach EULYNX-Standard (oberes Teilbild) müssen die Zählpunkte W1/103, W1/102 und W1/201 an den Grenzen der beiden Achszählssysteme AZS 1 und AZS 2 im Bahnhof A doppelt ausgerüstet werden. Für die Freimeldung der Strecke zwischen den Bahnhöfen A und B, die dem Bahnhof B zugeordnet ist, muss der Achszählpunkt W2/301/20B01 am Gefahrenpunkt des Einfahrsignals des Bahnhofs A verdoppelt und übertragen werden.

Das untere Teilbild zeigt demgegenüber eine mögliche Aufteilung bei der TDSB-Anwendung. Durch die Kommunikation zwischen TDSB-Systemen können Zählinformationen über Systemgrenzen hinweg bereitgestellt und ausgewertet werden. Dadurch kann eine doppelte Ausrüstung von Achszählpunkten an definierten Systemgrenzen eingespart werden. Bild 3 verdeutlicht das Konzept für die Streckengleisfreimeldung.

Im TDSB-System TDSB 2 des Bahnhofs A, an das der physikalische Zählpunkt W2/301/20B01 am Gefahrenpunkt angeschlossen ist, wird

munication structure by means of the RaSTA protocol. This makes it possible to transmit state data and detected axle values securely between coupled axle counting systems.

This is particularly relevant at the system boundaries between neighbouring interlocking areas where the TVP in an operating location is divided among several train detection systems or in remote installations such as siding connections. While some planning approaches lead to additional equipment requirements and considerable extra costs at such boundaries, for example due to duplicate axle counters or additional connecting cables, direct communication between the train detection systems can reduce this effort and simplify the planning of larger or modular installations.

The two subfigures in fig. 2 illustrate the difference in the planning and design of train detection installations for stations A and B with and without the option of the direct transmission of axle information. Two use cases are shown in each case: the division of the train detection equipment for station A between two train detection systems, AZS 1 and AZS 2, and train detection for the line track between stations A and B.

The W1/103, W1/102 and W1/201 axle counters located at the boundaries between the two train detection systems, AZS 1 and AZS 2, in station A have to be doubled in an implementation based on the EULYNX standard (the top subfigure). The W2/301/20B01 axle counter at the danger point of station A's entry signal must be duplicated and transferred for the TVP in the block section between stations A and B, which is assigned to station B.

By contrast, the bottom subfigure shows one possible configuration for a TDSB application. The counting information can be provided and evaluated across the system boundaries by means of communication between the TDSB systems. This can reduce the need for duplicate axle counters at the defined system boundaries. Fig. 3 illustrates the concept for block section TVP.

The relevant AZP W2/301/20B01 axle counter is configured with the additional supplying property and assigned to the TDX connection in the TDSB system, specifically to TDSB 2 at Station A, to which the physical W2/301/20B01 axle counter is connected at the danger point.

der betreffende Achszählpunkt AZP W2/301/20B01 mit der zusätzlichen Eigenschaft „zuliefernd“ projektiert und der Achszählrechner-Achszählrechner-Verbindung TDX zugewiesen.

Auf der Gegenseite wird im benachbarten TDSB-System des Bahnhofs B ein korrespondierender virtueller Achszählpunkt AZP 10GW2/301/B01 mit der Eigenschaft „bewertend“ projektiert und ebenfalls derselben TDX-Verbindung zugeordnet. Dadurch wirkt der Achszählpunkt W2/301/20B01 nicht nur ein- oder auszählend auf den Abschnitt 301 im Bahnhof A, sondern ebenfalls auf den Streckengleisfreimeldeabschnitt B01 im Bahnhof B.

Zustandsdaten sowie detektierte Achswerte werden vom zuliefernden Achszählpunkt AZP W2/301/20B01 an den entsprechenden bewertenden Achszählpunkt AZP 10GW2/301/B01 übertragen. Dort werden diese Informationen durch das zugeordnete Achszählkreisobjekt AZK 10G301/B01/101 für das Streckengleis in Verbindung mit dem Achszählpunkt am Gefahrpunkt des Bahnhofs B AZP 101/W1 zu einer Gesamtaussage für den Belegungs- und Betriebszustand des Achszählkreises akkumuliert.

Die Projektierung für die aufgeteilten Gleisfreimeldeabschnitte 201, 202 und 203 in Bahnhof A erfolgt analog der Streckengleisfreimeldung mit zuliefernden und bewertenden Achszählpunkten mit dem Unterschied, dass hier keine Überlappung von Abschnitten existiert.

2.3 Systemeigenschaften TDSB

Das TDSB ist für skalierbare Anwendungen in digitalen Stellwerksarchitekturen ausgelegt. Ein TDSB-System hat folgende Leistungsdaten:

- bis zu 126 Achszählpunkte,
- bis zu 126 Achszählkreise,
- bis zu 32 Befahrmelder,
- bis zu acht TDSB-TDSB-Verbindungen,
- Wirkung eines Achszählpunktes auf bis zu vier Achszählkreise, beispielsweise zur Bildung überlagerter Abschnitte.

Der Systemaufbau ist sehr kompakt und hat einen Platzbedarf von nur sechs Höheneinheiten, der sich nicht mit der Anzahl der angeschlossenen Elemente verändert. Diese Systemeigenschaften unterstützen eine modulare Anlagenstruktur und ermöglichen die Abbildung unterschiedlicher betrieblicher und topologischer Anforderungen. Diese Faktoren sind insbesondere bei digitalen Stellwerksarchitekturen relevant, um zukünftige Erweiterungen mit minimalem Aufwand vornehmen und gleichzeitig Systemgrenzen einhalten und Migrationsszenarien technisch realistisch und beherrschbar gewährleisten zu können.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Digitalisierung der LST erfordert skalierbare, modular integrierbare und langfristig beherrschbare Lösungen für die Gleisfreimeldung. Mit dem Train Detection System von Scheidt & Bachmann wird die Achszählung funktional von der zentralen Stellwerkslogik entkoppelt und über die standardisierte SCI-TDS-Schnittstelle in die ZSB 2000-Systemarchitektur eingebunden. Die dezentrale Auswertung in eigenständigen Achszählrechnern reduziert Abhängigkeiten, schafft Erweiterungsreserven und unterstützt eine robuste Betriebsführung bei Wartung, Erweiterung und Softwarepflege. Ergänzend ermöglicht die TDX-Schnittstelle eine systemübergreifende Kommunikation zwischen den Achszählsystemen. Dadurch können Gleisfreimeldeabschnitte auch über Anlagen- oder Systemgrenzen hinweg gebildet werden, ohne an jeder Grenze zwingend eine doppelte Achssensorik vorzusehen. Dies reduziert Planungs- und Ausrüstungsaufwand und unterstützt insbesondere größere oder modular aufgebaute Stellwerksarchitekturen.

On the opposite side, in the neighbouring TDSB system of Station B, a corresponding virtual AZP 10GW2/301/B01 axle counter is configured with the evaluating property and likewise assigned to the same TDX connection. As a result, the W2/301/20B01 axle counter not only counts in or out for section 301 in Station A, but also for TVP block section B01 in Station B. State data and detected axle values are transmitted from the AZP W2/301/20B01 supplying axle counter to the corresponding AZP 10GW2/301/B01 evaluating axle counter. There, this information is accumulated by the assigned AZK 10G301/B01/101 TVP section object for the block section in conjunction with the axle counter at the Station B danger point, AZP 101/W1, so as to produce an overall statement on the occupancy and operating state of the axle counting circuit.

The configuration of the divided 201, 202 and 203 TVP sections in Station A follows the same principle as that for the block section, using a supplying and evaluating axle counter, except that in this case there is no overlap between the sections.

2.3 TDSB system characteristics

TDSB has been designed for scalable applications in digital interlocking architectures. A TDSB system has the following performance data:

- up to 126 axle counter points
- up to 126 axle counting circuits
- up to 32 passage detectors
- up to eight TDSB-TDSB connections
- the effect of one axle counting point on up to four TVP sections, for example for the formation of overlapping sections

The system design is very compact and requires only six height units of installation space, regardless of the number of connected elements. These system characteristics support a modular installation structure and allow different operating and topological requirements to be mapped. These factors are particularly relevant in digital interlocking architectures, as they enable future extensions to be implemented with minimal effort while ensuring that the system boundaries and migration scenarios remain technically realistic and manageable.

3 Summary and outlook

The digitalisation of signalling and safety systems requires scalable, modularly integrable and sustainably manageable solutions for train detection. Scheidt & Bachmann's Train Detection System functionally decouples train detection from the central interlocking logic and integrates it into the ZSB 2000 system architecture via a standardised SCI-TDS interface. Decentralised evaluation in an autonomous TDS reduces dependencies, creates expansion reserves and supports robust operations during maintenance, extensions and software support.

In addition, the TDX interface enables communication across train detection boundaries. This makes it possible to form TVP sections across installation or system boundaries without necessarily having to provide doubled axle-sensing equipment at every boundary. This reduces planning and equipment costs and particularly supports larger or modular interlocking architectures.

The telegram-based SCI-TDX interface has been established in TDSB, alongside SCI-TDS, as a further application layer of a railway-specific protocol. The telegram structure and start-up behaviour correspond to the generic properties of an SCI-XX interface between a central unit and a subsystem for external elements, allowing seamless integration into the existing infra-

Die telegrammbasierte SCI-TDX-Schnittstelle wurde im TDSB neben SCI-TDS als weitere Anwendungsschicht eines bahntechnischen Protokolls etabliert. Der Telegrammaufbau sowie das Anlaufverhalten entsprechen den generischen Eigenschaften einer SCI-XX Schnittstelle zwischen Zentraleinheit und einem Teilsystem für Außenelemente, womit eine nahtlose Integration in die vorhandene Infrastruktur möglich ist. Das Protokoll wurde offengelegt, sodass auch eine herstellerübergreifende Implementierung der Schnittstelle möglich ist.

Die TDSB-Systeme mit SCI-TDS-Anbindung sind seit 2022 bei der staatlichen luxemburgischen Eisenbahn CFL (Société Nationale des Chemins de Fer Luxembourgeois) erfolgreich unter voller Sicherheitsverantwortung in Betrieb. Damit liegt ein praktischer Betriebsnachweis für die Architektur vor. Für den deutschen Markt ergibt sich daraus ein relevanter Ansatz, um die Achszähltechnik stärker zu modularisieren, Schnittstellen zu standardisieren und digitale Stellwerksarchitekturen schrittweise weiterzuentwickeln. ■

structure. The protocol has been disclosed, so a cross-manufacturer implementation is possible.

TDSB systems with SCI-TDS connection have been in successful operation under full safety responsibility at the CFL Luxembourg State Railway (Société Nationale des Chemins de Fer Luxembourgeois) since 2022, thereby providing practical operating evidence for the architecture. This represents a relevant approach to further modularising axle counting technology, standardising interfaces and progressively developing digital interlocking architectures in the German market. ■

AUTOREN | AUTHORS

Dipl.-Ing. Christian Hein

Teamleiter Sicherungsfunktionen / *Teamleader Safety Functions*
E-Mail: hein.christian@scheidt-bachmann.de

Andre Wenning, M. Eng.

Projektleiter Digitale Stellwerke / *Projectleader Digital Interlocking Systems*
E-Mail: wenning.andre@scheidt-bachmann.de

Beide Autoren / *both authors:*

Scheidt & Bachmann Signalling Systems GmbH
Anschrift / *Address:* Breite Straße 132, D-41238 Mönchengladbach

LITERATUR | LITERATURE

[1] EULYNX System Definition Eu.Doc.7_A1 – Appendix A1 Version 4.2 (2.A)

100 JAHRE FACHWISSEN ZU TECHNIK UND MANAGEMENT MODERNER BAHNEN



BEWERBEN SIE IHRE DIENSTLEISTUNGEN ODER PRODUKTE IN DEN RUBRIKEN

-  **Fahrweg & Bahnbau**
-  **Fahrzeuge & Komponenten**
-  **Ausrüstung & Betrieb**
-  **Projekte & Management**
-  **Forschung & Entwicklung**

JETZT BUCHEN



Ihren Firmeneintrag
Präsentieren Sie Ihr Unternehmen



Ihr Businessprofil
Zeigen Sie Ihre Expertise



Ihre Anzeige
Erreichen Sie Ihre Zielgruppe

Erfahrungen mit EULYNX-Object Controllern für moderne modulare Signalarchitekturen

Experience of EULYNX Object Controllers for modern modular signalling architecture

Sami Hyryläinen

Das finnische Digirail-Programm führt im Rahmen des EKA-Projekts EULYNX-basierte Signaltechnik auf dem ersten kommerziellen ERTMS/ETCS-Streckenabschnitt (European Rail Traffic Management System / European Train Control System) Finnlands zwischen Tampere und Rauma/Pori ein (Bild 1). Mipro Oy liefert dabei das Object Controller System (OCS) sowie ein CTC (Centralised Traffic Control) – System mit ATO-TS-Funktionalität. Das Projekt zählt zu den ersten groß angelegten Implementierungen eines herstellerübergreifenden EULYNX-basierten Signalsystems, bei dem das Centralized Safety System (CSS) und die Object Controller im Rahmen separater Verträge geliefert und zu einem gemeinsamen operativen System integriert werden.

1 Projektphasen

Das Projekt startete im November 2024. Die Arbeiten begannen mit einer Spezifikationsphase, in der die Anforderungen des Kun-

The Finnish Digirail program is introducing EULYNX-based signalling solutions in its EKA project, the first commercial ERTMS/ETCS (European Rail Traffic Management System / European Train Control System) track section in Finland covering the Tampere – Rauma/Pori line (fig. 1). Mipro Oy is supplying the Object Controller System (OCS) and a CTC (Centralised Traffic Control) system with ATO-TS functionality. The project is one of the first large-scale implementations of a multi-vendor EULYNX-based signalling system, where the Centralised Safety System (CSS) and Object Controllers are being delivered under separate contracts and integrated into a single operating system.

1 The project phases

The project started in November 2024. The work commenced with a specification phase, during which the customer's require-

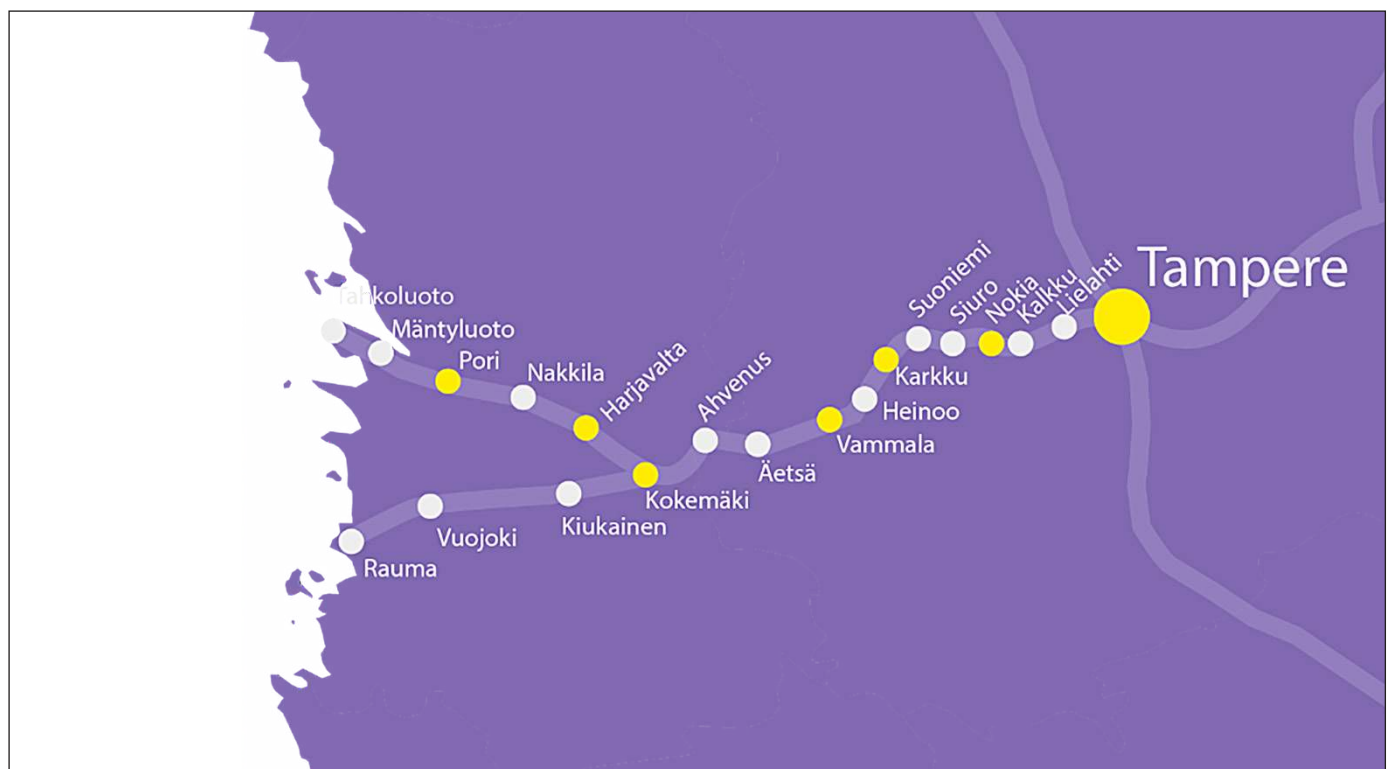


Bild 1: Projektgebiet des EKA-Projekts in Westfinland

Fig. 1: The EKA project area in Western Finland

den geprüft wurden. Für die technischen Schnittstellen wurde in Zusammenarbeit mit dem CSS-Systemlieferanten und dem Kunden eine Dokumentation zur Schnittstellenansteuerung (ICD) erstellt. Die ICD legt unter anderem die Kommunikationsparameter der Protokolle RaSTA und SCI-XX sowie die nationalen Anpassungen fest.

Die ersten inoffiziellen Integrationstests wurden im Frühjahr 2025 durchgeführt. Ziel der Tests war es, mögliche Kompatibilitätsprobleme so früh wie möglich zu erkennen. Die Tests erfolgten zunächst ohne TLS-Verschlüsselung (Transport Layer Security) unter Verwendung von UDP / RaSTA.

Im Februar 2026 fanden unabhängige EULYNX-Tests gemäß der EULYNX-Testbibliothek statt. Die generischen E/A-Tests wurden unter Verwendung eines „Hardware-in-the-Loop“-Modells durchgeführt, bei dem die E/A-Schnittstelle des Object Controllers ebenfalls Teil des Testaufbaus war.

Derzeit befindet sich das Projekt im Übergang von den Labortests zu den Standortintegrationstests (SIT). Nach dem aktuellen Zeitplan wird die Betriebsbereitschaft für das gesamte EKA-Projekt voraussichtlich Ende 2027 erwartet.

2 Zentrale Herausforderungen und gewonnene Erkenntnisse

2.1 Abstimmung der Anforderungen

Das laufende Projekt ist eines der ersten groß angelegten Schienensignalprojekte, bei dem EULYNX-konforme Geräte in einer herstellerübergreifenden Umgebung umfassend zum Einsatz kommen. Die Abstimmung zwischen EULYNX und den nationalen funktionalen Anforderungen für verschiedene Arten von Object Controllern hat länger gedauert als ursprünglich vorgesehen. Ein Beispiel hierfür ist die Integration finnischer Bahnübergangssysteme in eine neue ETCS-Bahnumgebung unter Verwendung von EULYNX-konformen Schnittstellen. Bei dieser Anpassung müssen die technischen und funktionalen Umsetzungen von drei verschiedenen Systemanbietern berücksichtigt werden, wobei sicherzustellen ist, dass die Architektur den hohen Anforderungen an die Cybersicherheit entspricht.

2.2 Die Bedeutung einer einheitlichen Konfiguration

Da alle beteiligten Parteien gleichzeitig an der Produktentwicklung arbeiten, waren die Koordination gemeinsamer Systemtests und die Abstimmung der Systemkonfigurationen eine Herausforderung. Das Fehlen einheitlicher Tools und Verfahren für das Konfigurationsmanagement führt in gemeinsamen Testphasen leicht zu Kompatibilitätsproblemen. Eine einheitliche Grundlage für Konfigurationselemente ist für die Kompatibilität und Sicherheit von entscheidender Bedeutung.

Der in den SCI-XX-Protokollen integrierte Mechanismus zur Versionsprüfung stellt die Konsistenz der Konfigurationen auf beiden Kommunikationsendpunkten sicher. Dies führt dazu, dass selbst geringfügige Änderungen an der Konfiguration des Object Controllers entsprechende Anpassungen auf beiden Seiten der Schnittstelle erfordern, auch wenn das Verhalten der Schnittstelle selbst hiervon nicht betroffen ist. Da sämtliche Systeme nach sicherheitskritischen Entwicklungsprozessen entwickelt werden, erfordern selbst kleine Änderungen formale Verifizierungs- und Freigabeschritte und sind entsprechend zeitaufwendig.

2.3 Cybersicherheit auf höchstem Niveau

Die hohen Anforderungen an die Cybersicherheit des Projekts sowie die Notwendigkeit, alle wesentlichen Kommunikationsschnittstellen durch integrierte TLS-Verschlüsselung zu schützen,

were reviewed. Interface Control Documents (ICDs) were prepared for the technical interfaces in cooperation with the CSS system supplier and the customer. The ICDs define, amongst other things, the RaSTA and SCI-XX protocol communication parameters, as well as the national adaptations.

The first unofficial integration tests were conducted in the spring of 2025. The purpose of the tests was to identify any potential compatibility issues at the earliest possible stage. The tests were initially performed without any TLS encryption (Transport Layer Security) using UDP / RaSTA.

Third-party EULYNX tests were carried out in February 2026 in accordance with the EULYNX test library. The Generic IO tests were executed using a “Hardware-in-the-Loop” model, where the IO interface of the Object Controller was also included as part of the test setup.

Currently, the project is transitioning from laboratory testing to Site Integration Testing (SIT). According to the current schedule, operational readiness for the entire EKA project is expected to be achieved by end of 2027.

2 The key challenges and lessons learned

2.1 Aligning requirements

The ongoing project is one of the first large-scale railway signalling projects to implement EULYNX-compliant equipment extensively in a multi-vendor environment. The alignment of the EULYNX and national functional requirements for the different types of Object Controllers has required more time than originally allocated. One example involves the integration of Finnish level crossing systems into the new ETCS railway environment using EULYNX-compliant interfaces. This adaptation requires consideration of the technical and functional implementations of three different system suppliers, while ensuring that the architecture complies with the high cybersecurity requirements.

2.2 The importance of common configuration

As all the parties involved are carrying out their own product development activities simultaneously, the coordination of the joint system tests and alignment of the system configurations have proven to be challenging. The lack of common configuration management tools and practices can easily lead to compatibility issues in joint test phases. A common base for the configuration items is crucial for compatibility and safety.

The built-in version checking mechanism in the SCI-XX protocols enforces configuration consistency between both communication endpoints. As a result, even minor changes to the Object Controller configuration require corresponding configuration updates on both sides of the interface, regardless of whether the interface behaviour itself is affected. Given that all the systems are being developed under safety-critical processes, even minor changes require formal verification.

2.3 High level cybersecurity

The project's high cybersecurity requirements, as well as the required protection of all the critical communication interfaces using built-in TLS encryption, have significantly increased the complexity of the system implementation. TLS is a widely used encryption method in internet-based communication protocols. However, there is limited practical experience in use cases where the communication has to be continuously operational without any interruptions, even during TLS certificate renewal procedures. Public Key Infrastructure (PKI)

haben die Komplexität der Systemimplementierung erheblich erhöht. TLS ist ein weit verbreitetes Verschlüsselungsverfahren in internetbasierten Kommunikationsprotokollen. Allerdings gibt es nur wenige praktische Erfahrungen mit Anwendungsfällen, in denen die Kommunikation auch während der Erneuerung von TLS-Zertifikaten ohne Unterbrechungen aufrechterhalten werden muss. Die Architektur der Public-Key-Infrastruktur (PKI) und die Zertifikatsverwaltung wurden im Rahmen der Projektumsetzung durch die Organisation System Pillar von Europe's Rail weiter präzisiert.

2.4 Weiterentwicklung der Spezifikationen

Eine der Herausforderungen des Projekts war die Ausgereiftheit der EULYNX-Spezifikationen, die sich während der Projektdurchführungsphase noch weiterentwickelten. Die ersten Schritte zur Systemkonzeption und -entwicklung wurden auf der Grundlage der Spezifikationen von EULYNX Baseline 4 Release 2 unternommen. Insbesondere die SDI- und SMI-Schnittstellen (Standardised Diagnostics Interface/Standardised Maintenance Interface) sind für eine Implementierung noch nicht ausgereift. Sowohl die SDI- als auch die SMI-Funktionalitäten sind eng mit der Hardware-Lösung des Object Controllers verknüpft. Beispielsweise ist die SMI-Lösung für einen Controller für mehrere Typen und Elemente in den aktuellen Spezifikationen nicht definiert.

Die sich wandelnde Bedrohungslage im europäischen Betriebsumfeld stellt neue Anforderungen an die Weiterentwicklung der Architekturen von Eisenbahnsystemen. Der vorherrschende Trend geht hin zu Lösungen, die sich stark auf Mobilfunknetze und zentralisierte Systemarchitekturen stützen. Diese Technologien bieten zwar erhebliche Vorteile in Bezug auf Effizienz, Wartungsfreundlichkeit und Interoperabilität, erhöhen jedoch auch die Abhängigkeit von einer gemeinsamen Kommunikations- und Steuerungsinfrastruktur. Gleichzeitig wächst die Notwendigkeit, die Ausfallsicherheit des Systems zu verbessern und sicherzustellen, dass der Ausfall einer einzelnen technischen Komponente oder Kommunikationsverbindung nicht zu einer vollständigen Unterbrechung des Bahnbetriebs führt. Zukünftige Architekturen sollten daher geeignete Ausweichmechanismen vorsehen, einschließlich lokaler Steuerungsmöglichkeiten für kritische Feldkomponenten wie Weichen, falls zentralisierte Steuerungsfunktionen nicht verfügbar sind.

Diese neuen Anforderungen an Ausfallsicherheit und Sicherheit könnten eine Neubewertung einiger grundlegender Annahmen erfordern, auf denen die derzeitigen Signalarchitekturen und -spezifikationen der Bahn beruhen.

2.5 Fehlende Softwaresimulation

Es ist davon auszugehen, dass die meisten künftigen Projekte mit EULYNX-basierten Object Controllern in sogenannten Brownfield-Umgebungen umgesetzt werden, in denen bestehende Stellwerksysteme schrittweise ersetzt werden. Bei typischen Brownfield-Projekten kann das neue System zusammen mit den dazugehörigen Feldkomponenten parallel zum bestehenden, in Betrieb befindlichen System installiert werden. Dadurch können Systemintegrationstests (SIT) und Standortabnahmetests (SAT) durchgeführt werden, während das Altsystem weiterhin in Betrieb bleibt.

Die Tests und Integrationsmaßnahmen des Gesamtsystems würden sich jedoch erheblich vereinfachen, wenn die Object Controller über eine softwarebasierte Funktion zur Simulation von Feldelementen verfügen würden. Dies ist besonders wichtig für Komponenten wie Weichen, die im laufenden Betrieb normalerweise nicht gleichzeitig an zwei verschiedene Steuerungssysteme angeschlossen werden können.

architecture and certificate management have been further clarified during the project implementation by the Europe's Rail System Pillar organisation.

2.4 Evolving specifications

One of the project's challenges has been the maturity of the EULYNX specifications that were still evolving during the project execution phase. The initial system design and development activities were started using the EULYNX Baseline 4, Release 2 specifications. The SDI and SMI interfaces (Standardised Diagnostics Interface/Standardised Maintenance Interface) in particular are insufficiently mature for implementation. Both SDI and SMI functionalities are heavily linked to the Object Controller's hardware solution. For example, a multi-type, multi-element controller SMI solution is not defined in the current specifications.

The changing threat landscape in the European operating environment is creating new demands for the evolution of railway system architectures. The prevailing trend has been towards solutions that rely heavily on mobile communication networks and centralised system architectures. While these technologies provide significant benefits in terms of efficiency, maintainability and interoperability, they also increase the dependency on a shared communication and control infrastructure. At the same time, there is also a growing need to improve system resilience and ensure that the loss of a single technical component or communication link does not lead to the complete disruption of railway operations. Future architectures should therefore provide appropriate fallback mechanisms, including local control capabilities for critical field elements such as points, when any centralised control functions are unavailable. These emerging resilience and security requirements may require the reassessment of some of the fundamental assumptions underlying current railway signalling architectures and specifications.

2.5 Missing software simulation

Most future EULYNX-based Object Controller projects are expected to be implemented in so-called brownfield environments, where existing interlocking systems are gradually replaced. In typical brownfield projects, the new system and its associated field elements can be installed in parallel with the existing operating system. This enables System Integration Testing (SIT) and Site Acceptance Testing (SAT) activities to be carried out while the legacy system remains in operation. However, overall system testing and integration activities would be significantly easier if the Object Controllers included a software-based field element simulation capability. This is particularly important for elements such as points, which cannot normally be connected simultaneously to two different control systems during live operations.

At present, such simulation functionality is not explicitly considered within the EULYNX architecture. Furthermore, the current specifications do not define a standardized method for notifying the interlocking that a field element is being simulated. This creates additional challenges for testing, validation and phased migration activities in brownfield deployment scenarios.

3 Key success factors

3.1 The importance of a common test laboratory

One of the project's key success factors has been the establishment of a common test laboratory environment (fig. 2), where the interoperability and compatibility of different systems can be validated to-

Derzeit sind solche Simulationsfunktionen in der EULYNX-Architektur nicht ausdrücklich vorgesehen. Zudem sehen die aktuellen Spezifikationen kein standardisiertes Verfahren für die Übermittlung von Informationen vor, wenn das Feldelement am Stellwerkssystem simuliert wird. Dies bringt zusätzliche Herausforderungen für Tests, Validierungen und schrittweise Migrationsmaßnahmen bei der Einführung in bestehenden Systemen mit sich.

3 Wichtige Erfolgsfaktoren

3.1 Die Bedeutung des gemeinsamen Testlabors

Einer der wichtigsten Erfolgsfaktoren des Projekts war die Einrichtung einer gemeinsamen Testlaborumgebung (Bild 2), in der die Interoperabilität und Kompatibilität verschiedener Systeme gemeinsam in einer kontrollierten Umgebung überprüft werden können. Der gemeinsame Laboraufbau ermöglichte bereits vor der Inbetriebnahme in der realen Bahnumgebung die Durchführung erster Integrationstests zwischen dem CSS, den Object Controllern und den Feldelementen.

Die Verfügbarkeit von realen Feldelementen als Teil der Laborausstattung war besonders wichtig für die Validierung des Schnittstellenverhaltens, der zeitlichen Eigenschaften, der ausfallsicheren Funktionalität und der durchgängigen Kommunikationsszenarien. Die gemeinsame Laborumgebung erleichterte zudem die schnellere Erkennung von Interoperabilitätsproblemen und förderte eine effizientere Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Anbietern und Beteiligten während der Systementwicklung und der Testphase.

3.2 Unabhängige Tests für Schnittstellen durch Dritte

Die von einer unabhängigen Stelle durchgeführten Zertifizierungsprüfungen haben eine entscheidende Rolle bei der Überprüfung der Konformität der Systemschnittstellen mit den EULYNX-Spezifikationen gespielt. Die Zertifizierungstests wurden im Rahmen der FAT (Factory Acceptance Test) – Prüfungen für die generische Anwendung durchgeführt, bei denen alle Elementtypen in einer Laborumgebung anhand von realen Feldgeräten getestet wurden. Die Tests wurden auf der Grundlage der von EULYNX veröffentlichten offiziellen Testbi-

gether in a controlled environment. The shared laboratory setup has enabled early integration testing between the CSS, Object Controllers and field elements before their deployment in the operational railway environment.

The availability of real field elements as part of the laboratory setup has proven particularly important when validating the interface behaviour, timing characteristics, fail-safe functionality and end-to-end communication scenarios. The shared laboratory environment has also enabled the faster identification of interoperability issues and supported efficient cooperation between different suppliers and stakeholders during system development and testing activities.

3.2 Third party testing for interfaces

Certification testing performed by an independent third party has played a key role in validating the compliance of the system interfaces against the EULYNX specifications. The certification tests have been carried out as part of the Generic Application FAT (Factory Acceptance Test) testing activities, where all the element types were tested against real field equipment in a laboratory environment. The tests were executed based on the official test libraries published by EULYNX. These tests provide objective verification as to the fact that the implemented technical interfaces, communication protocols and interoperability mechanisms operate according to the standardised EULYNX requirements.

Independent certification testing is especially important in a multi-vendor environment, where interoperability between the systems supplied by different manufacturers must be ensured in a predictable and standardised manner. The certification activities have also helped identify specification ambiguities, implementation deviations and compatibility issues at an early stage, thereby reducing any integration risks during the later project phases and supporting long-term interoperability between future EULYNX-compliant systems.

3.3 The importance of machine-readable input data

The quality and availability of the input data have a major impact on the efficiency and reliability of system engineering, con-

Ihre Innovationen für die **digitale Schiene** sind **jetzt** gefragt! Präsentieren Sie Ihr Unternehmen zielgerichtet in **SIGNAL+DRAHT**. Das international führende Fachmedium für die Leit-, Sicherungs- und Informationstechnologie.

OSTW
DIGITALISIERUNG
MOBILITÄT
ZUKUNFTSTECHNOLOGIE

AUTOMATISIERUNG
KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

ILBS

ETCS





Bild 2: Labor-Testumgebung im Eisenbahnausbildungszentrum in Kouvola, Finnland

Fig. 2: The laboratory test environment at the Railway Training Centre in Kouvola, Finland

blibliotheken durchgeführt. Sie liefern einen objektiven Nachweis dafür, dass die implementierten technischen Schnittstellen, Kommunikationsprotokolle und Interoperabilitätsmechanismen gemäß den standardisierten EULYNX-Anforderungen funktionieren.

Unabhängige Zertifizierungsprüfungen sind besonders in Umgebungen mit mehreren Anbietern wichtig, in denen die Interoperabilität zwischen Systemen verschiedener Hersteller auf vorhersehbare und standardisierte Weise gewährleistet sein muss. Die Zertifizierungsmaßnahmen haben ferner dazu beigetragen, Unklarheiten in den Spezifikationen, Abweichungen bei der Umsetzung und Kompatibilitätsprobleme frühzeitig zu erkennen, wodurch Integrationsrisiken in späteren Projektphasen verringert wurden und die langfristige Interoperabilität zwischen künftigen EULYNX-konformen Systemen unterstützt wurde.

3.3 Die Bedeutung maschinenlesbarer Eingabedaten

Die Qualität und Verfügbarkeit der Eingabedaten haben einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz und Zuverlässigkeit der Systemtechnik, der Konfiguration und der Testaktivitäten. In modernen EULYNX-basierten Sicherungsschaltwerken ist es besonders wichtig, dass die Eingabedaten und Definitionen der Infrastruktur in einem maschinenlesbaren Format vorliegen.

Maschinenlesbare Eingabedaten ermöglichen den Einsatz automatisierter Verifizierungs- und Validierungsprozesse während der gesamten Lebensdauer des Projekts. Dies unterstützt Konsistenzprüfungen, die automatisierte Generierung von Konfigurationen, die Validierung von Schnittstellen sowie Regressionstests und verringert gleichzeitig das Risiko menschlicher Fehler bei manuellen Konstruktionsaufgaben. In groß angelegten Projekten mit mehreren Anbietern verbessern standardisierte und strukturierte Datenformate zudem die Interoperabilität zwischen Engineering Tools, Testsystemen und Betriebsumgebungen.

4 Vorteile einer zentralisierten Object-Controller-Architektur

Die gewählte zentralisierte Object-Controller-Architektur (auf Stationsebene) bietet dem Infrastrukturbetreiber zahlreiche Vorteile bei

figuration und testing activities. In modern EULYNX-based signalling systems, it is particularly important that the input data and infrastructure definitions are available in a machine-readable format.

Machine-readable input data enables the use of automated verification and validation processes throughout the project lifecycle. This supports consistency checks, automated configuration generation, interface validation and regression testing activities while reducing the risk of human errors in manual engineering tasks. In large-scale multi-vendor projects, standardised and structured data formats also improve interoperability between the engineering tools, test systems and operating environments.

4 The advantages of a centralised Object Controller architecture

The selected centralised Object Controller architecture (at the station level) provides several advantages allowing the infrastructure owner to reduce investment (CapEx) and lifecycle (OpEx) costs in particular. A centralised solution enables more efficient system management, simplified maintenance activities and improved overall lifecycle cost efficiency compared to highly distributed architectures.

The architecture is particularly well suited to the Finnish railway operating environment, where harsh weather conditions and significant temperature variations can be managed more effectively through a centralised equipment room solution.

Cybersecurity management is significantly easier to implement in a centralised architecture. Physical protection, software updates, monitoring and access control can be managed in a more consistent and controlled manner from centralised locations. These advantages become increasingly important over the long operating lifecycle of railway signalling systems, where cybersecurity requirements, software maintenance and system upgrades must be managed continuously over decades of operation.

NEW!

Now available as a digital,
modular data platform



WORLD RAIL MARKET STUDY

DATA PLATFORM

forecast 2026 to 2031

The strongest data foundation
for rail market experts



ORDER NOW!

www.eurailpress.de/wrms26



der Senkung der Investitionskosten (CapEx) und insbesondere der Lebensdauerkosten (OpEx). Eine zentralisierte Lösung ermöglicht im Vergleich zu stark verteilten Architekturen eine effizientere Systemverwaltung, vereinfachte Wartungsarbeiten und eine verbesserte Gesamtkosteneffizienz über die gesamte Lebensdauer hinweg. Die Architektur eignet sich besonders gut für das finnische Bahnbetriebsumfeld, wo raue Wetterbedingungen und erhebliche Temperaturschwankungen durch eine zentralisierte Technikraumlösung besser bewältigt werden können.

Das Cybersicherheitsmanagement lässt sich in einer zentralisierten Architektur wesentlich einfacher umsetzen. Physischer Schutz, Software-Updates, Überwachung und Zugriffskontrolle lassen sich von zentralen Standorten aus einheitlicher und kontrollierter verwalten. Diese Vorteile gewinnen im Laufe der langen Lebensdauer von Eisenbahnsignalanlagen zunehmend an Bedeutung, da Anforderungen an die Cybersicherheit, die Softwarewartung und Systemaktualisierungen über Jahrzehnte hinweg kontinuierlich verwaltet werden müssen.

5 Schlussfolgerung und Zusammenfassung

Die enge Zusammenarbeit aller Beteiligten war eine der wichtigsten Voraussetzungen für den Erfolg des Projekts. In einer komplexen Umgebung mit mehreren Anbietern, die durch sich ständig weiterentwickelnde Spezifikationen, neue Technologien und parallele Produktentwicklungsmaßnahmen gekennzeichnet ist, ist eine effektive Zusammenarbeit zwischen dem Kunden, dem CSS-Anbieter, dem Anbieter des Object Controllers, Testorganisationen, unabhängigen Prüfstellen und anderen Beteiligten unerlässlich, um Interoperabilität zu erreichen und technische Herausforderungen effizient zu meistern.

Das Projekt hat deutlich gemacht, wie wichtig Vertragsmodelle sind, die eine iterative Systementwicklung unterstützen und es ermöglichen, dass sich die technischen Anforderungen im Laufe der Lebensdauer des Projekts weiterentwickeln. Darüber hinaus sind flexible Projektzeitpläne bei groß angelegten EULYNX-basierten Projekten von entscheidender Bedeutung, da Integrationsmaßnahmen, Zertifizierungstests, die Umsetzung von Cybersicherheitsmaßnahmen und die Klärung von Spezifikationen unter Umständen deutlich mehr Zeit in Anspruch nehmen als bei herkömmlichen Signalprojekten. ■

5 Conclusion and summary

Close cooperation between all the stakeholders has been one of the key prerequisites for the success of the project. Effective collaboration between the customer, the CSS supplier, the Object Controller supplier, the test organisations, the independent inspection bodies and the other stakeholders is essential in a complex, multi-vendor environment with evolving specifications, new technologies and simultaneous product development activities so as to achieve interoperability and resolving technical challenges efficiently.

The project has highlighted the importance of contract models that support iterative system development and enable technical requirements to evolve during the project lifecycle. In addition, flexible project schedules are also critical in large-scale EULYNX-based projects, where integration activities, certification testing, cybersecurity implementation and specification clarifications may require significantly more time than in traditional signalling projects. ■

LITERATUR | LITERATURE

- [1] EULYNX, <https://eulynx.eu/>, 1.5.2026
- [2] Digirail, <https://digirata.fi/en/>, 4.6.2026
- [3] Europe's Rail System Pillar, <https://rail-research.europa.eu/system-pillar-outputs/>, 22.5.2026
- [4] Mipro Oy, <http://www.mipro.fi/en>, 10.6.2026

AUTOR | AUTHOR

Sami Hyyryläinen
 Produktmanager / Product Manager
 Mipro Oy
 Anschrift / Address: Kunnamäki 9, FI-50600 Mikkeli
 E-Mail: sami.hyyrylainen@mipro.fi

Maßgeschneiderte Zugerfassungssysteme für nicht-sicherheitskritische Anwendungen

Tailored train detection systems for non-safety-critical applications

Matthias Forstenpointner

Steigende Anforderungen bilden zusammen mit den Möglichkeiten und Herausforderungen aus Technologisierung und Digitalisierung ein Spannungsfeld, in dem sich der Bahnbetrieb laufend verändert. Betrieb und Steuerung sicherheitskritischer und nicht-sicherheitskritischer Anwendungen werden darin stetig optimiert. Auch im industriellen oder nicht-öffentlichen Bereich steigt der Bedarf an hochzuverlässigen und präzisen Lösungen zur Erfassung von Zügen und weiterer relevanter Kontextdaten. Dieser Beitrag erläutert, wie Achszähllösungen, die speziell auf diese nicht-sicherheitskritischen Bereiche zugeschnitten sind, wirksam eingesetzt werden können.

1 Einordnung sicherer und nicht-sicherer Anwendungen von Zugerfassungssystemen

Häufige Anwendungsbereiche für Zugerfassungssysteme umfassen etwa die Gleisfreimeldung, Bahnübergangssicherung, den Weichenumschalterschutz oder das Aktivieren verschiedener Drittsysteme. Die Sicherheitsanforderungen dieser Anwendungen ergeben sich aus dem Kontext des jeweiligen Bahnsystems. In öffentlichen Netzen mit Personen- und Güterverkehr wird zumeist eine SIL 4-Begutachtung (Sicherheitsintegritätslevel 4) gemäß der CENELEC-Normen vorausgesetzt. Faktoren, die für einen sicheren Bahnbetrieb erfüllt werden müssen, sind etwa:

- **Fehlersichere Architektur:** Die Systemarchitektur von sicherheitsrelevanten Lösungen muss gewährleisten, dass Fehler durch ständigen Abgleich zuverlässig und sicher erkannt und beherrscht werden – im Fehlerfall muss der sichere Zustand eingenommen werden.
- **Sicherheitsmanagement:** Von der Konzeption bis zur Inbetriebnahme muss jeder Schritt lückenlos dokumentiert, verifiziert und validiert werden. Schon kleine Änderungen nach der initialen Projektinbetriebnahme, wie das Hinzufügen eines Gleisfreimeldeabschnittes, erfordern oft erneute, aufwendige Zulassungen und Abnahmen.
- **Personalanforderungen:** Der sichere und zuverlässige Betrieb von Lösungen im sicherheitskritischen Bereich erfordert tiefgreifende Expertise von dem zuständigen Personal.

Schon diese beispielhaft angeführten Faktoren geben Hinweis darauf, dass ein SIL 4-Gutachten erheblichen Aufwand in Entwicklung, Produktion und Konfiguration einer solchen Lösung mit sich bringt. Je nach Umfeld können die Sicherheitsanforderungen jedoch sinken. Etwa dann, wenn der betroffene Gleisabschnitt oder die vom Zugdetektionssystem aktivierte Anlage in einem nicht-öffentlichen Bereich liegt, zu dem nur geschultes Personal Zugang erhält – beispielsweise in einer Wartungshalle oder einem Industriegelände.

Rising requirements combined with the opportunities and challenges presented by technological change and digitalisation have created a dynamic environment in which railway operations are continuously evolving. The operation and control of both safety-critical and non-safety-critical applications are being steadily optimised. The demand for highly reliable and precise train detection solutions and other relevant contextual data is also growing in industrial and non-public environments. This article explains how axle counting solutions tailored specifically to non-safety critical applications can be deployed effectively.

1 The classification of safety critical and non-safety critical train detection system applications

Common train detection applications include track vacancy detection, level crossing protection, switch point protection and the triggering of third-party systems. The safety requirements for these applications are determined within the context of the given railway system. Public networks carrying passenger and freight traffic generally require a SIL 4 assessment (Safety Integrity Level 4) in accordance with the CENELEC standards. The factors that must be met for safe railway operations include:

- **a fail-safe architecture:** the system architecture of safety-relevant solutions must ensure that any faults are reliably and safely detected and managed through continuous monitoring; the system must revert to a safe state in the event of a fault.
- **safety management:** every step from the design through to the commissioning must be fully documented, verified and validated. Even minor changes following initial project commissioning, such as the addition of a track section, often require renewed and time-consuming approvals and acceptance procedures.
- **personnel requirements:** the safe and reliable operation of solutions in the safety-critical domain requires in-depth expertise from the responsible personnel.

These examples clearly illustrate that a SIL 4 assessment entails considerable effort throughout the development, production and configuration of such a solution.

However, the safety requirements may be lower depending on the environment. This is the case, for example, when the track section concerned or the system activated by the train detection system is located in a non-public area accessible only to trained personnel, such as a maintenance depot or an industrial site. As-

Die Bewertung der jeweils geltenden Sicherheitsanforderungen in solchen Anlagen unterliegt stets dem Betreiber.

2 Zugerfassungssysteme: Gleisstromkreis und Achszähler im Vergleich

Im Bereich der Zugdetektion haben sich weltweit zwei Technologien etabliert: Gleisstromkreise und Achszähler. Beide Ansätze weisen verschiedene Eigenschaften gemäß ihrem jeweiligen Funktionsprinzip auf, die im Kontext der Betrachtung sicherer und nicht-sicherer Anwendungen gleichermaßen relevant sind.

2.1 Gleisstromkreise

Es existieren drei Formen von Gleisstromkreisen, die sich in Gleichstrom-, Niederfrequenz- und Tonfrequenzgleisstromkreise unterscheiden. Gleichstrom- und Niederfrequenzgleisstromkreise benötigen Isolierstöße, um Abschnitte voneinander zu trennen. Tonfrequenzgleisstromkreise benötigen diese galvanische Trennung zwischen Gleisabschnitten nicht. Grundsätzlich arbeiten alle Arten von Gleisstromkreisen auf Basis elektrischer Kontinuität der beiden Fahrschienen und deren Isolation zueinander. Ein Fahrzeug belegt einen Abschnitt, sobald eine Achse einen Kurzschluss zwischen den beiden Fahrschienen herstellt. Bei dem vorwiegend genutzten Ruhestromprinzip fällt ein Freimelderelais am Ende des Abschnittes ab und meldet so die Belegung. Dabei führen auch häufig auftretende Fehler, wie Stromkreisunterbrechungen oder zusätzliche Nebenschlüsse zum Gleis, immer zu einer Belegtmeldung (Bild 1).

Das Arbeitsstromprinzip ist weniger verbreitet. Hier fließt erst beim Einfahren einer Achse Strom durch den Kreis, der ein Gleisrelais zum Anzug bringt. Stromkreisunterbrechungen führen hier zu Freimeldungen, wodurch Störungszustände nicht offenbart werden können [1].

Zusätzlich zur Gleisbelegungsprüfung dienen Gleisstromkreise in manchen Märkten auch zur Datenübertragung zwischen strecken-seitiger Infrastruktur und Zügen. Hierbei werden die in den Schienen übertragenen Gleisströme codiert, um betriebsrelevante Informationen – wie Geschwindigkeitsvorgaben – direkt an die Gleisfahrzeuge zu übermitteln.

sessing the applicable safety requirements at such facilities is always the responsibility of the operator.

2 Train detection systems: a comparison of track circuits and axle counters

Two technologies have established themselves globally in the field of train detection: track circuits and axle counters. Both approaches have different characteristics based on their respective operating principles, which are equally relevant when considering both safety critical and non-safety critical applications.

2.1 Track circuits

Three forms of track circuit currently exist: DC, low-frequency and audio-frequency track circuits. DC and low-frequency track circuits require insulated rail joints to separate the sections from one another. Audio-frequency track circuits do not require this galvanic separation between track sections. All the track circuit types operate on the basis of the electrical continuity of the two running rails and their isolation from one another.

A vehicle occupies a section as soon as a wheelset creates a short circuit (bridge) between the two running rails. A track relay at the end of the section then drops out to indicate occupation using the more commonly used closed-circuit principle. Commonly occurring faults, such as circuit interruptions or unintentional shunts across the rails, always result in an occupied indication (fig. 1).

The open-circuit principle is less common. Here, current only flows through the circuit whenever an axle enters, thereby causing a track relay to pick up. Circuit interruptions lead to clear indications, meaning that fault conditions cannot be revealed. [1] In some markets, track circuits also serve as a data transmission medium between the wayside infrastructure and trains, in addition to detecting track occupancy. The track currents transmitted through the rails are encoded so as to convey the operationally relevant information, such as the speed commands, directly to the rolling stock.

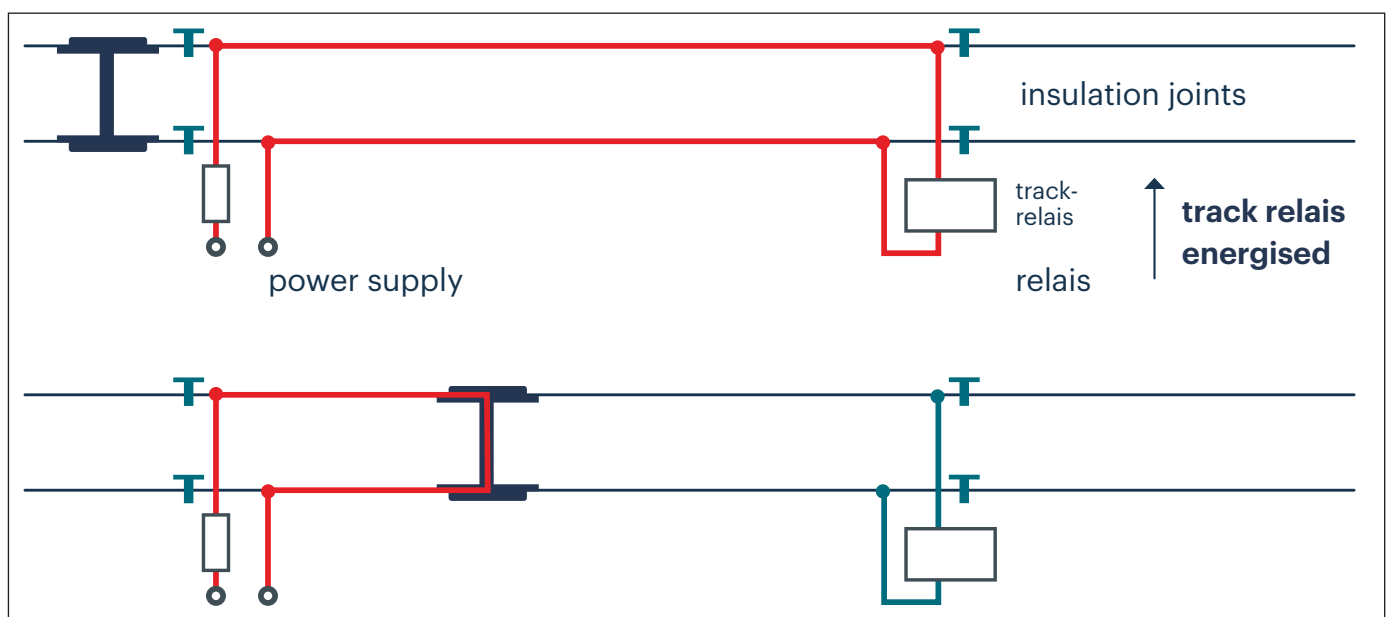


Bild 1: Schematische Darstellung eines Gleisstromkreises

Fig. 1: A schematic diagram of a track circuit

Quelle / Source: Frauscher

Bild 2: Die Umweltbedingungen an einem Gleisbett in einer Industrieanlage stellen gleisseitige Komponenten vor Herausforderungen.

Fig. 2: The environmental conditions on a track bed in an industrial facility present challenges for wayside components.

Quelle / Source: Shutterstock



In Summe bringt das Wirkungsgrundprinzip von Gleisstromkreisen strukturelle Abhängigkeiten mit sich, die die Leistungsfähigkeit einschränken:

- Der Bettungswiderstand muss auf definierten Werten je Kilometer gehalten werden, um Querströme zu vermindern, die eine Gleisbelegung imitieren können.
- Isolierstöße an Abschnittsgrenzen erfordern regelmäßige Inspektion und Erneuerung.
- Die effektive Abschnittslänge ist durch die elektrischen Systemparameter begrenzt.

Darüber hinaus können externe Einflüsse Störmeldungen verursachen. Dazu zählen Ölkontamination, Feuchtigkeitsansammlungen, elektromagnetische Störungen, Korrosion sowie degradierter Schotter – Faktoren, die etwa für Rangierbahnhöfe, Depots und Industrieanlagen charakteristisch sind (Bild 2). Der dadurch verursachte Instandhaltungsaufwand erfordert spezialisiertes Fachpersonal, um Verfügbarkeit und Sicherheit des Systems sicherzustellen.

Auch das häufig diskutierte Potenzial von Gleisstromkreisen zur Erkennung von Schienenbrüchen unterliegt Limitierungen: Spaltbrüche mit leitendem Kontakt, Teilbrüche oder Risse vor einem Durchbruch bleiben oft unerkannt, da der Strom weiterfließen kann.

2.2 Achszähler

Beim Einsatz von Achszählern werden Gleisabschnitte mittels direkt am Gleis montierter Radsensoren gebildet. Diese bilden die Grenzen eines Abschnittes, innerhalb dessen die Präsenz eines Zuges indirekt festgestellt werden kann (Bild 3). Fährt ein Zug über einen Sensor in diesen Gleisabschnitt ein, wird jedes einzelne Rad oder dessen Spurkranz registriert und von einer Auswerteeinheit, die an den Sensor angeschlossen ist, gezählt. Die Detektion der Räder erfolgt über das Erkennen einer Ablenkung des Sensor-Magnetfeldes, die am Sensor zu Stromänderungen führt. Erst wenn dieselbe Achsanzahl den Abschnitt wieder verlassen hat, kann der Abschnitt freigemeldet werden.

Frauscher Sensortechnik fertigt seit 1987 induktive Radsensoren. Die Sensoren des Unternehmens arbeiten selbst unter widrigsten Bedingungen höchst zuverlässig und verursachen dabei äußerst

Overall, the fundamental track circuit operating principle introduces structural dependencies that constrain performance:

- ballast resistance must be maintained at defined values per kilometre so as to reduce any leakage currents that can simulate track occupation.
- the insulated joints at the section boundaries require regular inspection and replacement.
- the section length is limited by the electrical system parameters.

External influences can also cause false occupancy indications. These include oil contamination, moisture accumulation, electromagnetic interference, corrosion and degraded ballast, i.e. factors that are characteristic for marshalling yards, depots and industrial facilities (fig. 2). The resulting maintenance burden requires specialist personnel to maintain system availability and safety.

The widely discussed potential of track circuits for broken rail detection is also subject to limitations: rail breaks where the fractured ends remain in contact, partial breaks or cracks before a complete fracture often remain undetected, as the current can continue to flow.

2.2 Axle counters

When using axle counters, the track sections are defined by wheel sensors mounted directly on the rails. These sensors form the boundaries of a section within which the presence of a train can be determined indirectly (fig. 3). As a train passes over a sensor into a track section, each individual wheel or its flange is detected and counted by an evaluation board connected to said sensor. Wheel detection is achieved by sensing a deflection of the sensor's magnetic field, which causes current changes at the sensor. The section can only be cleared once the same number of axles has exited it.

Frauscher Sensor Technology has been manufacturing inductive wheel sensors since 1987. The company's sensors operate with high reliability even in the most adverse conditions, resulting in extremely low maintenance and lifecycle costs. Influences such

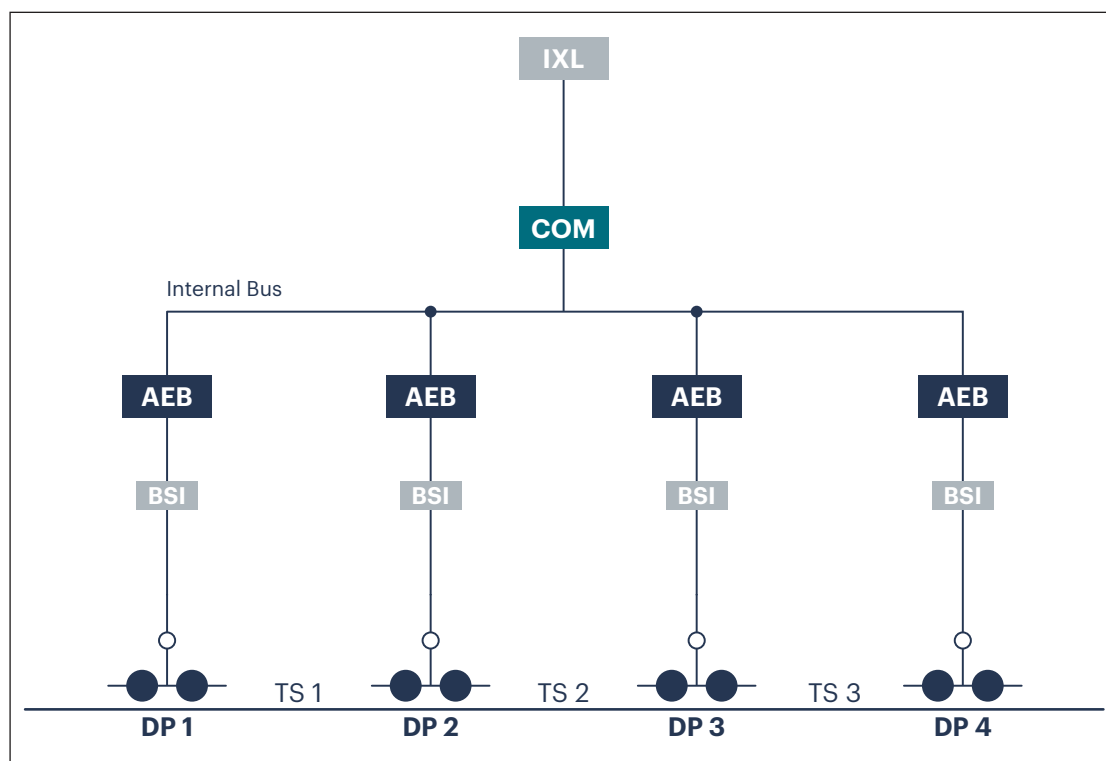


Bild 3:
Schematische
Darstellung eines
Achszählers
mit Freimelde-
abschnitten

Fig. 3: Schematic
diagram of an axle
counter with track
sections

Quelle / Source: Frauscher

niedrige Wartungs- und Lebenszykluskosten. Einflüsse wie Feuchtigkeit, Überflutungen, Verschmutzungen oder mechanische Einwirkungen beeinflussen die Funktionsweise nicht. Die Montage erfolgt über eine patentierte Schienenklaue, durch deren Einsatz Bohrarbeiten am Gleis vollständig entfallen (Bild 4). [2]

Die modernen Achszähler des Unternehmens verfügen zudem über innovative Zusatzfunktionen, die den Umgang mit externen Störeinflüssen und betrieblichen Abweichungen ermöglichen sowie einen störungsfreien Betrieb zusätzlich unterstützen. So bieten eigens entwickelte Features etwa Lösungen für den Umgang mit Wartungsfahrzeugen, welche inmitten eines Gleisabschnittes aufgleist werden [3].

as moisture, flooding, contamination or mechanical impact do not affect sensor operations. The installation uses a patented rail claw that eliminates the need for any track drilling (fig. 4). [2]

The company's modern axle counters also feature innovative additional functions that support the handling of external interference and operating deviations, thereby further contributing to fault-free operations. Specifically developed capabilities include, for example, solutions for managing maintenance vehicles that are placed on the track within a section. [3]

Innovative wheel sensors and axle counters can be integrated into an interlocking via either a hardware or software interface, such as relays or the Ethernet. The sensor design and net-



Bild 4: Frauscher
Radsensor RSR123
am Gleis, die
zugehörige
Innenanlage des
Frauscher Advanced
Counter FAdC
befindet sich
in dezentralen
Schaltschränken
oder im
Stellwerksgebäude.

Fig. 4: A Frauscher
Wheel Sensor RSR123
on a rail; the associated
indoor equipment for
the Frauscher
Advanced Counter
FAdC is located in
decentralised cabinets
or in the interlocking
building.

Quelle / Source: Frauscher

Die Integration innovativer Radsensoren und Achszähler in ein Stellwerk ist sowohl über eine Hardware- als auch eine Software-Schnittstelle, wie Relais oder Ethernet, möglich. Die Bauweise der Sensoren sowie die netzwerkbasierte Anbindung ermöglichen nicht nur die Realisierung sicherheitsrelevanter Anwendungen wie der Gleisfreimeldung, sondern auch die Erfassung betrieblicher Daten, die für einen zuverlässigen und wirtschaftlichen Bahnbetrieb unverzichtbar sind. Dazu zählen neben Sensorsystem- sowie Richtungsinformation und – im nicht-sicherheitsrelevanten Bereich – Geschwindigkeits- und Rad-durchmesser-messung auch wichtige Diagnoseinformationen, welche vorausschauende Wartungsstrategien unterstützen.

2.3 Zusammenfassung: Gleisstromkreise vs. Achszähler

Wenngleich Gleisstromkreise als historisch älteres Mittel zur Zugdetektion weltweit sehr verbreitet und nach wie vor im Einsatz sind, lässt sich ein zunehmender Wandel in Richtung Achszähler beobachten. Aufgrund steigender Anforderungen an Effizienz, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit werden bei der Planung von Neu- und Modernisierungsprojekten in der Eisenbahninfrastruktur Faktoren hinsichtlich Zuverlässigkeit und Wartungsaufwand immer wichtiger. Die heute gängigen Achszähllösungen wurden in der Regel für Anwendungen im sicherheitskritischen Bereich entwickelt. Dementsprechend durchlaufen die dafür erforderlichen Komponenten, wie Radsensoren und Auswerteeinheiten, umfangreiche Entwicklungszyklen, wie in Abschnitt 1 skizziert. Diese werden von standardisierten Dokumentations- und Prüfprozessen begleitet, um eine hochzuverlässige und fehlerfreie Arbeitsweise zu gewährleisten. Auch die Konzeption der übergeordneten Systemarchitekturen, in denen Achszähler eingesetzt werden, entspricht diesen hohen Sicherheitsanforderungen. Redundante Ausführungen und entsprechende Integrationsmöglichkeiten prägen das Produktdesign von Zugdetektionssystemen mit Sicherheitsanforderungen genauso wie die erforderliche Robustheit und Witterungsbeständigkeit der gleisseitigen Komponenten.

Damit stellen Achszähler im Vergleich zu Gleisstromkreisen eine in der Anschaffung vielleicht kostenintensivere Lösung dar. Dieser Unterschied monetarisiert sich jedoch rasch durch wesentlich geringere Betriebskosten und Wartungsaufwände sowie durch einen signifikant verfügbaren Bahnbetrieb.

3 Maßgeschneiderte Achszähllösung für nicht-sicherheitskritische Anwendungen

Um eine nähere Betrachtung maßgeschneiderter Achszähllösungen für nicht-sicherheitskritische Anwendungen anzustellen, sollen diese vorab im Sicherheitsgefüge des Bahnsystems verortet werden. Denn auch für technische Systeme, die nicht unmittelbar in sicherheitskritischen Bereichen des Bahnbetriebs eingreifen, gilt ein definiertes Sicherheitsniveau: Die „Basic Integrity“, oder zu Deutsch „Basisintegrität“. Eine Fehlfunktion oder ein Ausfall dieser Systeme und der von ihnen gesteuerten Funktionen führt nicht zwangsläufig zu einer Gefährdung, die ein Sicherheitsniveau von SIL 4 erfordert. Abhängig von der Anwendung können auch geringere Sicherheitsanforderungen, einschließlich Basic Integrity, angemessen sein. Auch wenn sie nicht hochsicherheitsrelevant sind, müssen sie dennoch bei der Integration in den Bahnbetrieb grundlegenden Normen, wie etwa EN 50126, EN 50129 oder EN 50716 (früher EN 50128), entsprechen. Dadurch wird die Einhaltung betrieblicher Anforderungen sichergestellt. Dementsprechend wird im Folgenden von „Basic Integrity Achszählern“ die Rede sein, die diesen Anforderungen genügen. Während Zuverlässigkeit und Flexibilität im nicht-sicherheitskritischen Bereich ebenso gefordert sind, wie in sicherheitskritischen

work-based connectivity enable not only safety-relevant applications such as track vacancy detection, but also the collection of the operating data essential for reliable and cost-efficient railway operations. These include information from the sensor system and on the vehicle's direction of travel, as well as speed and wheel diameter measurement in non-safety-relevant applications and important diagnostic information that supports predictive maintenance strategies.

2.3 Summary: track circuits vs axle counters

Although track circuits, being the historically older train detection method, remain widely deployed globally, a growing shift towards axle counters can be observed. As efficiency, safety and economic requirements increase, reliability and the maintenance burden are becoming ever more important factors in planning new-build and modernisation projects in railway infrastructure.

Current axle counting solutions have generally been developed for safety-critical applications. Accordingly, the required components, such as wheel sensors and evaluation boards, are subject to extensive development cycles, as outlined in Section 1. These are accompanied by standardised documentation and testing processes so as to ensure highly reliable, fault-free operations. The design of the higher-level system architectures where axle counters are used likewise meets these high safety requirements. Redundant configurations and appropriate integration options characterise the product design of train detection systems with safety requirements, as does the necessary robustness and weather resistance of the wayside components.

Axle counters may represent a potentially higher initial investment compared to track circuits. However, this difference is quickly offset by the significantly lower operating costs and maintenance requirements, as well as the considerably improved availability of railway operations.

3 A tailored axle counting solution for non-safety-critical applications

In order to examine tailored axle counting solutions for non-safety-critical applications more closely, it is useful to first place them within the safety framework of the railway system. Even technical systems that do not directly intervene in safety-critical areas of railway operations are subject to a defined safety level, i.e. Basic Integrity. A malfunction or failure of these systems and the functions they control does not necessarily lead to a hazard requiring a SIL 4 safety level. Lower safety requirements, including Basic Integrity, may be appropriate depending on the application. Although they are not highly safety-critical, they still must comply with fundamental standards such as EN 50126, EN 50129 or EN 50716 (formerly EN 50128) when integrated into railway operations. This ensures compliance with the operating requirements. The following discussion therefore refers to Basic Integrity axle counters that meet these requirements.

While reliability and flexibility are required in non-safety critical applications just as in safety-critical ones, additional factors also play a decisive role within this context. Use cases such as facility automation or level crossing monitoring in enclosed areas require cost-effective and compact solutions that can be tailored to individual requirements and scaled as needed.

The comparison of axle counters and track circuits must be extended to include a further option against this background: Basic Integrity axle counters offer an ideal solution for non-safety-

Anwendungen, spielen weitere Faktoren hier eine entscheidende Rolle. Use Cases wie die Automatisierung von Einrichtungen oder das Überwachen eines Bahnübergangs in abgeschlossenen Bereichen erfordern kostengünstige und kompakte Lösungen, die individuell auf die jeweiligen Anforderungen angepasst und ggf. skaliert werden können.

Vor diesem Hintergrund muss der Vergleich zwischen Achszählern und Gleisstromkreisen um eine weitere Option erweitert werden: Basic Integrity Achszähler bieten im Umfeld nicht-sicherheitskritischer Anwendungen eine ideale Lösung. Sie vereinen die Eigenschaften etablierter Achszähler mit attraktiver Wirtschaftlichkeit, einem kompakten, skalierbaren Design und vereinfachter Inbetriebnahme, wie sich am Beispiel des Frauscher Track Vacancy Systems FTVS darstellen lässt.

Das System wurde ursprünglich speziell für die Anforderungen in Rangierbahnhöfen von Bahnbetreibern in den Vereinigten Staaten entwickelt, wo sich FTVS inzwischen in zahlreichen Installationen bewährt hat. Zur Steuerung und Optimierung von Abläufen wurde eine Lösung benötigt, die mehrere Kriterien erfüllen sollte:

- Die Installation und Integration in bestehende Systeme zur Realisierung einer Anwendung sollte möglichst einfach, unkompliziert und ohne tiefere Kenntnisse im Signaltechnikbereich möglich sein.
- Der Platzbedarf sollte auf ein Minimum reduziert sein. Da die Anwendungen häufig der Betriebsoptimierung an speziellen Punkten einer Anlage dienen, war es wichtig, dass die benötigten Komponenten in möglichst kompakten Gehäusen in unmittelbarer Gleisnähe verbaut werden können.
- Entsprechend der breitgefächerten Palette an Abläufen in einem Rangierbahnhof wurden insbesondere hohe Flexibilität und Modularität gefordert, um individuelle Anwendungen gemäß lokalen Anforderungen eigenständig realisieren und eine etablierte Lösung jederzeit erweitern zu können.
- Die Kosten für Anschaffung und Betrieb sollten möglichst gering sein.

critical applications. They combine the characteristics of established axle counters with attractive economics, a compact, scalable design and simplified commissioning, as illustrated by the Frauscher Track Vacancy System FTVS.

The system was originally specifically developed for the requirements of railway operators in marshalling yards in the United States, where FTVS has since proven itself across numerous installations. The control and optimisation of the processes required a solution that would meet several criteria:

- the installation and integration into existing systems when implementing an application should be as simple and straightforward as possible, without requiring any in-depth knowledge of signalling technology.
- the space requirements should be kept to a minimum. Since the applications typically serve to optimise operations at specific points within a facility, it was important for the required components to be housed in compact enclosures as close to the track as possible.
- high flexibility and modularity were specifically required, thereby reflecting the wide range of operations in a marshalling yard, so as to enable individual applications to be implemented independently according to local requirements and to allow an established solution to be extended at any time.
- the costs for procurement and operation should be kept as low as possible.

The FTVS comprises the Frauscher Wheel Sensor RSR310 as the wayside component, together with a Wheel Signal Converter (WSC) and a Wheel Counting Board (WCB) as the indoor components. The WCB evaluates the occupation status of each track section and provides this as volt-free contact outputs via high-performance optocouplers (fig. 5). All the indoor components can be mounted on a DIN rail close to the track, requiring minimal space in wayside enclosures. This

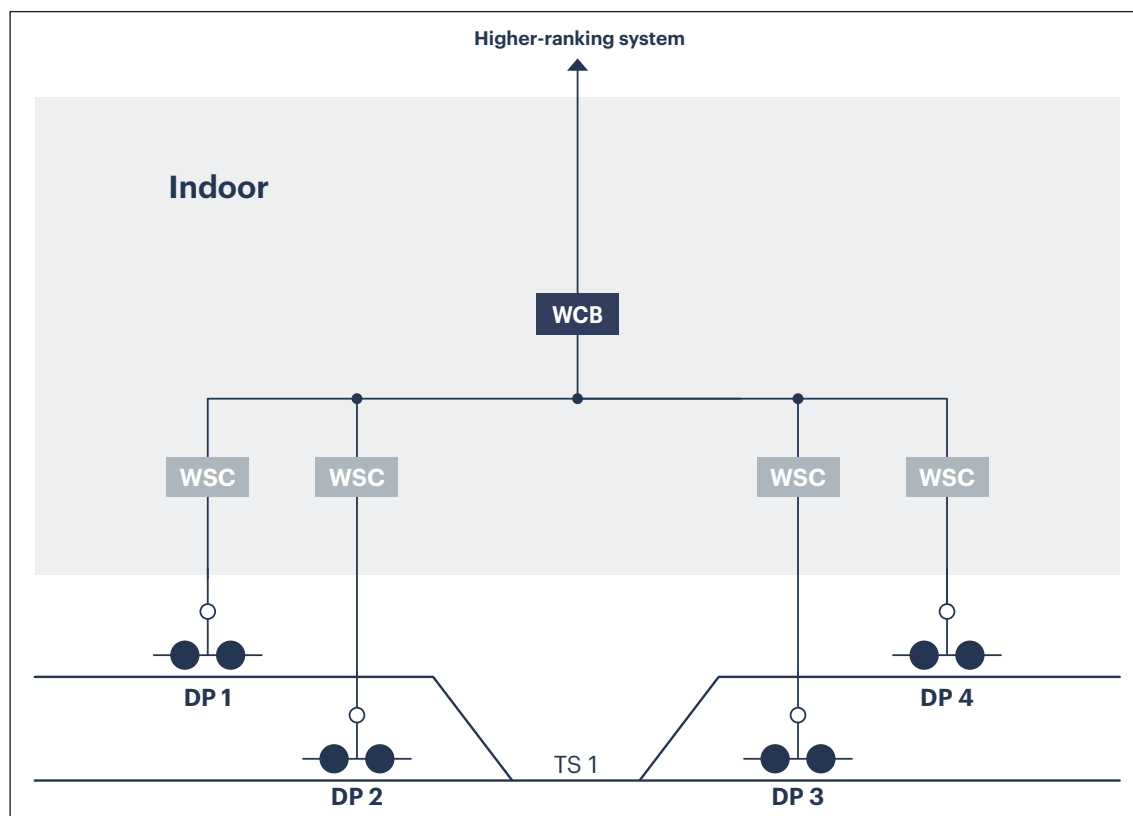


Bild 5: Schematische Darstellung einer FTVS-Installation

Fig. 5: A schematic diagram of an FTVS installation

Quelle / Source: Frauscher

Das FTVS besteht aus dem Radsensor RSR310 als Außenanlagenkomponente sowie dem Wheel Signal Converter WSC und dem Wheel Counting Board WCB als Innenanlagenkomponenten. Das WCB wertet den Belegungsstatus der jeweiligen Gleisabschnitte aus und stellt diesen als potenzialfreie Kontaktausgänge über leistungsstarke Optokoppler bereit (Bild 5). Alle Innenanlagenkomponenten sind in unmittelbarer Gleisnähe auf DIN-Schiene montierbar und benötigen damit nur minimalen Platz in gleisseitigen Gehäusen. Damit entfällt aufwendige Verkabelung zu entfernten Schalträumen (Bild 6).

Die Montage des RSR310 an der Schiene erfolgt mittels der patentierten Frauscher Schienenklaue ohne Bohrungen in wenigen Minuten (Bild 7). Eine anschließende Kalibrierung lässt sich über die Innenanlagenkomponenten durchführen, sodass zeitaufwendige Gleisarbeiten weitgehend entfallen. Die Systemkonfiguration erfolgt per DIP-Schalter. Der Radsensor deckt einen Temperaturbereich von -40 °C bis +85 °C ab und ist mit der Schutzklasse IP68 bewertet.

Wie in Abschnitt 2.3 erläutert, monetarisieren sich die etwas höheren Anschaffungskosten eines Achszählers im Vergleich zu einem Gleisstromkreis rasch aufgrund der geringeren Wartungs- und Betriebskosten. Die Initialkosten für Basic Integrity Achszählösungen liegen ihrerseits je nach Applikation rund 50 bis 70 % unter jenen eines gemäß SIL 4-entwickelten Achszählsystems. Insbesondere im Falle nicht-sicherheitskritischer Anwendungen stellen sie damit sowohl eine zuverlässigere und flexiblere als auch wirtschaftlichere Lösung als Gleisstromkreise dar.

4 Beispielanwendungen Basic Integrity Achszähler aus der Praxis

Die Vorteile des Einsatzes von Basic Integrity Achszählern wurden inzwischen in zahlreichen Projekten über die Vereinigten Staaten hinaus rund um den Globus unter Beweis gestellt – so auch in Europa, wo das System in manchen Ländern bereits in Betrieb ist oder dessen Einsatz gerade erörtert wird.

Bild 6: Das FTVS wird platzsparend auf einer Hutschiene montiert.

Fig. 6: The FTVS is mounted on a DIN rail in a space-saving manner.

Quelle / Source: Frauscher



eliminates the need for extensive cabling to remote equipment rooms (fig. 6).

The RSR310 is mounted on the rail using the patented Frauscher rail claw in a matter of minutes and without any drilling (fig. 7). The subsequent calibration is performed via the indoor components, thereby largely eliminating any time-consuming track work. The system configuration is carried out using DIP switches. The wheel sensor covers a temperature range of -40 °C to +85 °C and is rated to IP68.

As discussed in Section 2.3, the somewhat higher initial costs of an axle counter compared to a track circuit are quickly offset by the lower maintenance and operating costs. The initial costs of Basic Integrity axle counting solutions are, depending on the application, approximately 50 to 70 % lower than those of an axle counting system developed to SIL 4. They therefore represent a more reliable, more flexible and more cost-efficient solution than track circuits for non-safety-critical applications in particular.

4 Basic Integrity axle counters in practice: application examples

The advantages of using Basic Integrity axle counters have been demonstrated across numerous projects worldwide beyond the United States, including in Europe where the system is already operational in some countries or its deployment is currently under consideration.

4.1 Track vacancy detection and trigger function for complex measurement systems

The use of the FTVS is being evaluated as part of a train detection application on an enclosed site in Spain for detecting a train's presence within a defined measurement section. When a train enters this section, a series of measurement systems is activated by a "wake-up signal". The FTVS axle counting function

4.1 Gleisfreimeldung und Trigger-Funktion für komplexe Messanlagen

Im Rahmen einer Anwendung zur Zugdetektion auf einem abgeschlossenen Gelände in Spanien wird der Einsatz des FTVS evaluiert, um die Zugpräsenz innerhalb eines definierten Messabschnitts zu erfassen. Fährt ein Zug in diesen Abschnitt ein, wird über ein sogenanntes „Wake-Up-Signal“ eine Reihe von Messsystemen aktiviert. Über die Achszählfunktion des FTVS wird eine Freimeldung generiert, wenn der Zug den Abschnitt wieder vollständig verlassen hat. Damit werden sowohl die Trigger- als auch die Achszählfunktion des Systems in einem Use Case genutzt.

4.2 Bahnübergangssicherung in kontrollierten Umgebungen

Im Vereinigten Königreich überqueren Gäste eines Campingplatzes eine eingleisige Bahnstrecke über einen manuell bedienten Bahnübergang. Der Bahnübergang wird mittels Toren betrieben, die auf beiden Seiten der Strecke angebracht sind und die Nutzer beim Überqueren öffnen und schließen müssen. Da dies nicht immer eingehalten wird, ist ein Schrankenwärter dafür verantwortlich, dass die Tore geschlossen und gesichert sind. Bisher hatte der Schrankenwärter keine direkte Anzeige herannahender Züge und stützte sich auf veröffentlichte Fahrpläne, um Zugbewegungen einzuplanen. Zur Verbesserung der Situationswahrnehmung ist die Installation einer FTVS-Lösung geplant. Das System wird dann Gleisabschnitte in der Umgebung des Bahnübergangs überwachen. Wenn ein Zug in die überwachten Abschnitte einfährt, erhält der Schrankenwärter zwei Meldungen. Eine LED-Anzeige wird mittels eines Pfeils die Richtung anzeigen, aus der sich der Zug nähert, und beleuchtet bleiben, bis der Zug die Abschnitte verlassen hat. Zusätzlich wird beim Erkennen eines Zuges ein akustisches Signal ausgegeben werden. Diese Anwendung zeigt das Potenzial der Basic Integrity Achszählung, Zugannäherungsanzeigen für Bahnübergangsanwendungen bereitzustellen, bei denen ausgebildetes Personal die Betriebsverantwortung behält und keine vollständige Signaltechniklösung erforderlich ist.



Bild 7: Der Frauscher Radsensor RSR310 wird mittels patentierter Schienenklaue am Gleis montiert.

Fig. 7: The Frauscher Wheel Sensor RSR310 is mounted to the track via patented rail claw.

Quelle / Source: Frauscher

generates a clear indication once the train has fully exited the section. In this use case, both the system’s trigger and axle counting functions are utilised.

4.2 Level crossing protection in controlled environments

In the United Kingdom, campsite guests cross a single-track railway line using a manually operated level crossing. The level crossing is operated using gates fitted on both sides of the line, which users must open and close when crossing. A crossing keeper is responsible for ensuring the gates are closed and secured, as this is not always adhered to. Previously, the crossing keeper had no direct indication of any approaching trains and relied on the published timetables to plan for train movements.

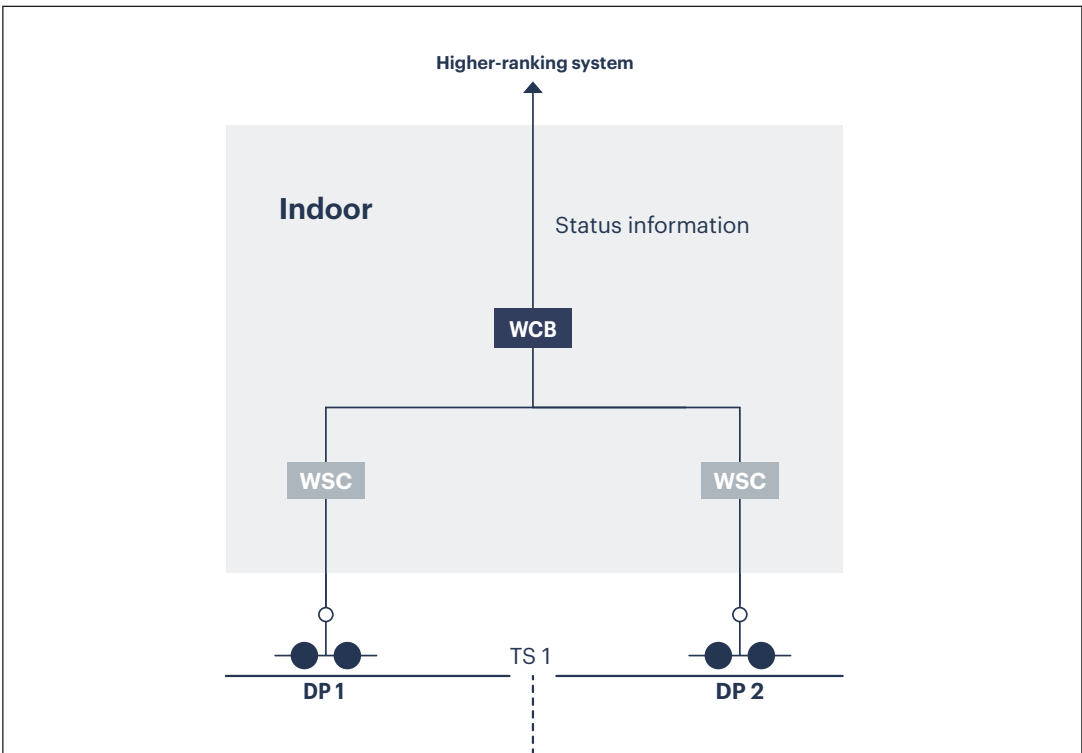


Bild 8: Über das WCB gibt FTVS Informationen zuverlässig an übergeordnete Systeme weiter.

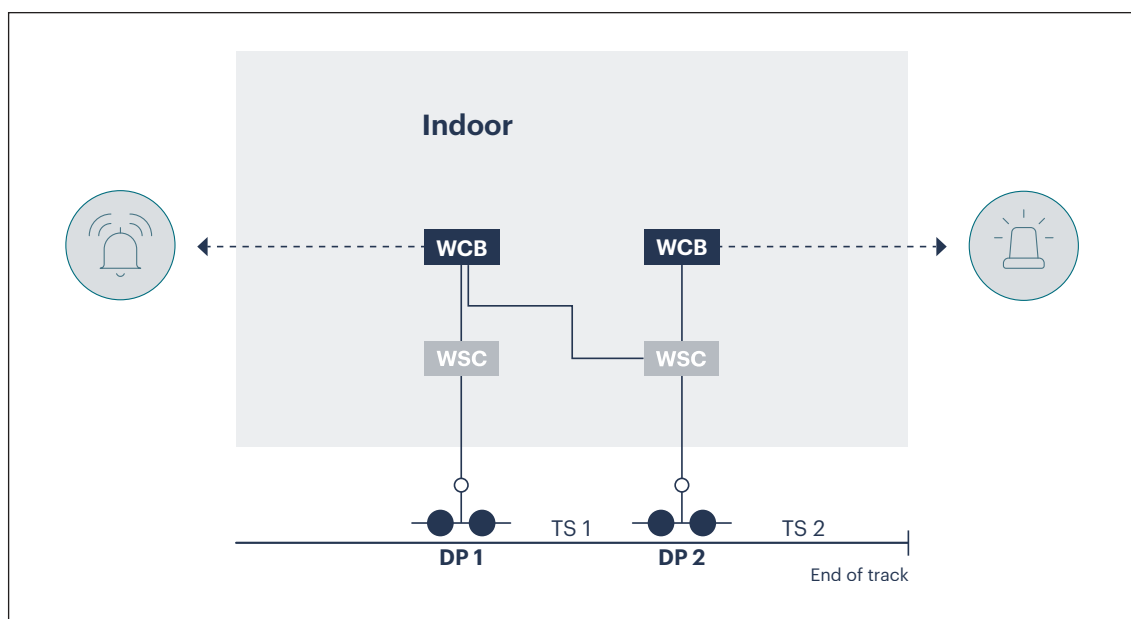
Fig. 8: FTVS reliably transmits information to higher-level systems via the WCB.

Quelle / Source: Frauscher

Bild 9: FTVS ermöglicht die stufenweise Aktivierung aufeinanderfolgender Warnsignale.

Fig. 9: FTVS enables the staged activation of successive warning signals.

Quelle / Source: Frauscher



In den Niederlanden wird das FTVS in vergleichbaren Kontexten eingesetzt, in denen Bahnübergänge auf Betriebsgeländen – ohne öffentlichen Personenzugang – mit einfachen Warnsignalen ausgestattet werden. Die potenzialfreien Ausgangskontakte des FTVS ermöglichen die direkte Ansteuerung von Lichtsignalen, Schrankenanlagen oder akustischen Warnsystemen ohne aufwendige Schnittstellenimplementierung.

4.3 Aktivierung von Drittsystemen

Eine besonders prägnante Anwendungsklasse stellt die detektionsgesteuerte Aktivierung von Drittsystemen dar. Ebenfalls in den Niederlanden wird das Öffnen und Schließen eines Einfahrtores in einem Terminal durch das FTVS erwogen. In Frankreich wird über das FTVS eine Zugwaschanlage aktiviert, sobald ein Fahrzeug in den überwachten Abschnitt einfährt. Beide Anwendungen illustrieren die universelle Integrationskompatibilität der Optokoppler-Ausgänge: Eine protokollbasierte Schnittstelle ist nicht erforderlich; die potenzialfreien Ausgangskontakte sind mit jeder übergeordneten Steuerung kompatibel (Bild 8).

4.4 End-of-Track-Warnsysteme

End-of-Track-Warnsysteme zählen zu den klassischen Anwendungsfeldern der Basic Integrity Achszählung. In Österreich sowie in einem Hafen in Deutschland ist das FTVS in Warnsystemen für Streckenenden eingesetzt. Das System detektiert Schienenfahrzeuge in Echtzeit und löst zweistufige Warnsignale aus: Beim Einfahren in einen überwachten Vorwarnabschnitt aktiviert sich ein akustisches Signal. Fährt das Fahrzeug in den Abschnitt ein, der dem Streckenende am nächsten ist, aktiviert sich zudem ein optisches Warnsignal (Bild 9). Derartige Lösungen sind in Hafenbetrieben und Industrieanlagen besonders relevant, da herkömmliche Signaltechniklösungen im industriellen Umfeld häufig überdimensioniert und mit hohem Installationsaufwand verbunden wären.

5 Zusammenfassung

Achszähler haben sich weltweit als zuverlässige Methode zur Zugdetektion etabliert und bilden die technische Grundlage für ein breites Spektrum an Anwendungen – von der Gleisfreimeldung über die Bahnübergangssicherung bis hin zur Aktivierung von Dritt-

To improve situational awareness, the installation of an FTVS solution is being considered.

The system will monitor the track sections in the vicinity of the level crossing. When a train enters the monitored sections, the crossing keeper will receive two indications. An LED display will show the direction from which the train is approaching with an arrow and remains illuminated until the train has left the sections. An acoustic signal will also be triggered upon the detection of a train. This application demonstrates the potential of Basic Integrity axle counting to provide train approach indications for level crossing applications where trained personnel retain operational responsibility and a full signalling technology solution is not required.

In the Netherlands, the FTVS system has also been deployed in comparable contexts where level crossings at operational sites, i.e. without any public access, have been equipped with simple warning signals. The volt-free FTVS output contacts enable direct control of the light signals, barrier systems or acoustic warning systems without any complex interface implementation.

ebe

Railway Systems

Innovative und digitale Lösungen im Bereich der Bahnübergangs- und Sicherungstechnik

- Level Crossing Systems
- Interlocking Systems
- Digital Technologies

Besuchen Sie uns auf der InnoTrans 2026
Halle 25 / Stand 280

systemen. Im Vergleich zu Gleisstromkreisen zeichnen sie sich durch deutlich geringere Anfälligkeit gegenüber Umwelteinflüssen, niedrigere Betriebskosten und flexible Integrationsmöglichkeiten aus. Die Anbindung an bestehende Infrastrukturen erfolgt über bewährte Hardware-Schnittstellen wie Relais, für moderne, digitale Systemumgebungen stehen netzwerkbasierte Kommunikationswege über Ethernet zur Verfügung.

Im Rahmen geltender Gesetze und Richtlinien obliegt die Einschätzung des Sicherheitsniveaus einer Anwendung, speziell in nicht-öffentlichen Bereichen, stets dem Betreiber. Wenn die Sicherheitsbeurteilung zeigt, dass kein Sicherheitsintegritätslevel erforderlich ist, empfiehlt es sich, den möglichen Einsatz von Basic Integrity Achszählern zu prüfen.

Lösungen wie das FTVS bieten eine wirtschaftlich attraktive Alternative für die Betreiber nicht-sicherheitsrelevanter Anwendungen, die von den Stärken der Achszähltechnologie in Kombination mit einfacher, gleisnaher Installation bei minimalem Platzbedarf sowie unkomplizierter Integration und Konfiguration profitieren wollen. Drittsysteme wie Licht- und Akustiksignale, Schrankenanlagen, Tore oder Waschanlagen lassen sich direkt und ohne protokollbasierte Zwischenschicht über die potenzialfreien Ausgangskontakte ansteuern. Das FTVS bietet so einen zuverlässigen, äußerst kompakten und flexibel anpassbaren Mechanismus zur Steuerung und Optimierung betrieblicher Abläufe im Sinne aktueller und zeitgemäßer Anforderungen an einen wirtschaftlichen, effizienten und anforderungsgemäßen Bahnbetrieb in sämtlichen Bereichen. ■

LITERATUR | LITERATURE

[1] Fenner, W.; Naumann, P.: Verkehrssicherungstechnik – Steuern, Sichern und Überwachen von Fahrwegen und Fahrgeschwindigkeiten im Schienenverkehr, 1998, Hrsg: Siemens Aktiengesellschaft, Berlin und München. Verlag: Publicis MCD Verlag, Erlangen und München

[2] Pointner, F.; Kalteis, H.: Zuverlässige Radsensoren als Basis für hochverfügbare Radsensoren, SIGNAL+DRAHT 04/2017

[3] Rosenberger, M.; Pointner, F.: Hochverfügbarkeit: Definition, Einflussfaktoren und Lösungen, SIGNAL+DRAHT 06/2015

AUTOR | AUTHOR

Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Matthias Forstenpointner

Technical Sales Manager

Frauscher Sensortechnik GmbH

Anschrift / Address: Gewerbestraße 1, A-4774 St. Marienkirchen bei Scharding

E-Mail: matthias.forstenpointner@frauscher.com

4.3 Activating third-party systems

A particularly prominent application class involves the detection-triggered activation of third-party systems. The opening and closing of an entry gate at a terminal using FTVS is currently under consideration, also in the Netherlands. In France, a train washing facility is activated by FTVS as soon as a vehicle enters the monitored section. Both applications illustrate the universal integration compatibility of the optocoupler outputs. No protocol-based interface is required, as the volt-free output contacts are compatible with any higher-level control systems (fig. 8).

4.4 End-of-track warning systems

End-of-track warning systems are among the classic application fields for Basic Integrity axle counting. FTVS has been deployed in end-of-track warning systems in Austria and at a port in Germany. The system detects rail vehicles in real time and triggers two-stage warning signals: an acoustic signal is activated when a vehicle enters a monitored approach warning section. A visual warning signal is additionally activated when the vehicle enters the section closest to the track's end (fig. 9). Such solutions are particularly relevant for port operations and industrial facilities, where conventional signalling technology solutions would often be oversized and require extensive installation effort.

5 Summary

Axle counters have established themselves globally as a reliable train detection method and form the technical basis for a wide range of applications ranging from track vacancy detection and level crossing protection through to the activation of third-party systems. Compared to track circuits, they are characterised by a significantly lower susceptibility to environmental influences, lower operating costs and flexible integration options. The connection to existing infrastructure is achieved via proven hardware interfaces such as relays; network-based communication paths via the Ethernet are also available for modern digital system environments.

According to the framework of applicable laws and regulations, the safety level assessment of an application, particularly in non-public environments, is always the responsibility of the operator. If the safety assessment shows that no safety integrity level is required, it is advisable to explore the possible use of Basic Integrity axle counters.

Solutions such as the FTVS offer an economically attractive alternative for those operators of non-safety-relevant applications who wish to benefit from the strengths of axle counting technology combined with simple, track-proximate installations requiring minimal space, as well as straightforward integration and configuration. Third-party systems such as light and acoustic signals, barrier systems, gates or washing facilities can be directly controlled via the volt-free output contacts without the need for a protocol-based intermediate layer. FTVS thus provides a reliable, highly compact and flexibly adaptable mechanism for controlling and optimising operating processes in line with the current requirements for efficient, cost-effective and compliant railway operations across all environments. ■



WENN DAS KEIN GRUND ZUM FEIERN IST!

Seit 120 Jahren Ihr zuverlässiges internationales Fachmedium für die Signal-, Sicherungs- und Kommunikationstechnik sowie Betriebsleittechnik.

Kurz gesagt: **SIGNAL+DRAHT** ist eine der wichtigsten Fachzeitschriften für die technische Infrastruktur **hinter** dem Eisenbahnbetrieb.

Feiern Sie mit!

Nutzen Sie die große Jubiläumsausgabe für Ihren Werbeauftritt!

**Anzeigenschluss
für das Heft 11|26
ist am 05.10.2026**



Holistische Weichenzustandsüberwachung: Bisherige und zukünftige Entwicklungen

Holistic point condition monitoring: what has been done and what's next?

Thorsten Neumann | Susanne Reetz | Jörn Groos

Dieser Beitrag gibt aus Sicht der Forschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) einen Überblick über bisherige und zukünftige Trends im Bereich der holistischen Weichenzustandsüberwachung als Teil einer angestrebten prädiktiven und präskriptiven Instandhaltung. Ausgehend von der strombasierten Anomaliedetektion werden verschiedene Entwicklungsstränge bis hin zu aktuellen Forschungsergebnissen zum Zusammenwirken von Weichenantrieb und weiteren Systemkomponenten einschließlich des Gleisoberbaus nachgezeichnet. Zukünftig stehen verstärkt auch der Ausbau von Datenintegrationsplattformen und kausale Analysemethoden im Fokus.

1 Einleitung

Eisenbahnweichen zählen aufgrund ihrer Bauform mit zahlreichen beweglichen und festen Bauteilen und Komponenten sowie infolge ihrer Funktion beim Gleiswechsel zu den besonders beanspruchten Elementen der Schieneninfrastruktur. Gleichzeitig bedeutet eine Funktionsstörung oder ein Defekt hier oft unmittelbar eine merkliche Einschränkung des Bahnbetriebs – angefangen bei Verspätungen bis hin zu Zugausfällen. Weiterhin entstehen signifikante Sicherheitsrisiken, falls z. B. schwerwiegende Abweichungen vom Sollzustand nicht rechtzeitig erkannt und behoben werden. Zu überwachen sind unter anderem der Weichenantrieb, die Weichenzungen, Herzstücke, Schwellen, Befestigungen, die gleisgeometrischen Parameter der Weiche und so weiter. Zum Einsatz kommen dabei in der Praxis fest etablierte und in den einschlägigen Richtlinien verankerte Verfahren und Ansätze, die bei entsprechender Einhaltung vor allem die Sicherheit des Bahnbetriebs gewährleisten sollen. Hierzu gehören insbesondere regelmäßige Mess- und Inspektionsfahrten mit speziellen Messzügen sowie manuelle Gleis- und Weicheninspektionen vor Ort. Vielerorts spielen zudem Methoden und Sensoren zur Weichenstellstromüberwachung eine wichtige Rolle (z. B. [1, 2]). Der zunehmende Effizienzdruck aufgrund begrenzter finanzieller Ressourcen bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Pünktlichkeit im Bahnbetrieb sowie der zunehmende Fachkräftemangel geben jedoch Anlass, mehr und mehr auch innovative, datenbasierte und automatisierte Ansätze zur Weichenzustandsüberwachung marktreif zu entwickeln und auszurollen. Forschungseinrichtungen und Unternehmen beschäftigen sich daher seit vielen Jahren intensiv mit Sensortechnologien und Datenanalysemethoden einschließlich Künstlicher Intelligenz (KI) zur Verbesserung der Zustandsüberwachung jeweils spezifischer Weichenkomponenten mit deren jeweiligen potenziellen

This article provides an overview of previous and future trends in the field of holistic point condition monitoring from the perspective of the research undertaken at the Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). The goal is to enable the next steps towards predictive and prescriptive maintenance. Starting with actuating current-based anomaly detection, the lines of development can be traced through to current research results into the interaction between the point machine and other system components, including the track superstructure. In the future, the focus will increasingly fall on the expansion of data integration platforms and causal analytics.

1 Introduction

Due to their design with numerous moving and fixed parts and components, as well as their role enabling a change of tracks, railway points are among the rail infrastructure elements that are most subject to particular stresses. At the same time, a malfunction or defect here often immediately results in noticeable restrictions to rail operations ranging from delays to train cancellations. Furthermore, significant safety risks arise if, for example, any major deviations from the nominal state are not detected and rectified in good time. The point machines, blades, frogs, sleepers, fastenings, track geometry, etc. all need to be monitored. This involves procedures and approaches that have been firmly established in practice and are anchored in the relevant guidelines, which are primarily intended to ensure the safety of rail operations when adhered to. This particularly includes regular measurement and inspection runs with specialised measurement trains as well as manual track and point inspections on site. Methods and sensors for point actuating current monitoring often play an important role too (e.g. [1, 2]). However, the increasing pressure to improve efficiency due to limited financial resources combined with rising demands on reliability and punctuality in rail operations and the growing shortage of skilled workers are prompting the development and market roll-out of increasing numbers of innovative, data-based and automated approaches to point condition monitoring. Research institutions and companies have therefore been working intensively for many years on sensor technologies and data analysis methods, including artificial intelligence (AI), to improve the condition monitoring of the individual point components with their respective potential fault conditions. For example, acceleration sensors are used on the track [3, 4] or on regu-

Fehlzuständen. Verwendet werden z. B. Beschleunigungssensoren im Gleis [3, 4] oder auf regulär verkehrenden Schienenfahrzeugen [5, 6], dazu die Bilddatenanalyse mit Kameradaten unterschiedlicher Auflösung und Perspektive [7], Ultraschall [8], Magnetfeldsensorik [9] oder laserbasierte Messsysteme [10].

Die in jüngerer Zeit gesammelten Erfahrungen bestätigen, dass die isolierte Betrachtung der verschiedenen Weichenkomponenten – auch in Kombination mit neueren Methoden der KI – für eine prädiktive Instandhaltung von Weichen als Ganzes letztlich nicht ausreicht [11]. Vielmehr ist eine integrierte Datenauswertung notwendig, die neben der konkreten, teilweise auch organisationsübergreifenden Zusammenführung und Synchronisation der verschiedenen oben genannten Datenquellen einschließlich der Witterung zusätzlich auch Störungsmeldungen und detaillierte Informationen über durchgeführte Wartungen und Instandsetzungen berücksichtigt.

Bereits seit einigen Jahren stehen Ansätze und Verfahren für eine solche holistische Zustandsüberwachung im Fokus der Forschungsarbeiten am DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik. Der vorliegende Beitrag zeichnet in diesem Zusammenhang ausgehend von der klassischen Stellstromüberwachung und angefangen bei ersten konzeptionellen Überlegungen zur Gestaltung eines geeigneten algorithmischen Modells für eine holistische Weichenzustandsdiagnose die Beiträge des DLR in diesem Bereich nach. Abschließend werden aktuelle Herausforderungen und Potenziale für zukünftige Weiterentwicklungen dargestellt.

2 Stellstrombasierte Weichenzustandsüberwachung

Im Zuge des Weichenumlaufs von elektromechanischen Weichen, wie sie im Folgenden betrachtet werden, können zahlreiche Fehler oder Anomalien auftreten, die sich oft in einem erhöhten mechanischen Widerstand bei der Zungenbewegung oder beim Weichenverschluss äußern. Hinzu kommen elektrische Effekte, die je nach Typ und Bauform der Weiche bzw. des Weichenantriebs einen Einfluss auf den genauen zeitlichen Verlauf der Stromaufnahme – auch Stellstromkurve genannt – haben. Im einfachsten Fall vergleicht man diesen mit einer zuvor bestimmten Referenzkurve und kennzeichnet signifikante Abweichungen als Alarmer. Eine umfassende Zustandsbeurteilung ist damit allerdings in der Regel nicht möglich. Ebenso wenig reicht dieser einfache Ansatz aus, um daraus im Abgleich mit realen Störungsdaten rein datenbasiert eine für die Praxis hinreichend verlässliche Schätzung der verbleibenden Nutzungsdauer (engl. RUL = Remaining Useful Life) abzuleiten, wie in [12] gezeigt werden konnte. Vielmehr ist eine sehr viel detailliertere Analyse der gemessenen Stellstromkurven notwendig, die unter anderem auch die Witterungsbedingungen zum Zeitpunkt der Messung mitberücksichtigen muss. Ferner ist es in Anlehnung an die üblichen Prozessschritte im „Prognostics and Health Management“ (PHM) häufig sinnvoll, in der Analyse bewusst zwischen der Erkennung (Detektion) auffälliger Stellstromkurven (Anomalien) und deren Interpretation im Sinne der Zustandsdiagnose zu unterscheiden [13].

2.1 Anomaliedetektion

Bild 1 zeigt eine typische Stellstromkurve für einen NSE2-Weichentrieb [14], wie er in den Niederlanden verbreitet ist. Ein Großteil der in den weiteren Abschnitten zitierten Arbeiten des DLR bezieht sich auf diese Art von Stellstromkurven. Will man die durchaus komplexe Struktur solcher Kurven nicht nur visuell, sondern vor allem mathematisch greifbar machen, ohne sie zu stark zu vereinfachen, liegt

larly operating rail vehicles [5, 6], as well as image data analysis using camera data of different resolutions and perspectives [7], ultrasound [8], magnetic field sensors [9] or laser-based measurement systems [10].

Recent experience has confirmed that the isolated consideration of the various point components, even in combination with state-of-the-art methods involving AI, is ultimately insufficient for the predictive maintenance of points as a whole [11]. Rather, integrated data analysis is required. This means the consolidation and synchronisation of the aforementioned data sources among different stakeholders as well as taking into account the weather conditions, fault messages and detailed information on the maintenance and repairs that have been carried out.

For some years now, approaches to and procedures for such holistic condition monitoring have been the focus of research work undertaken at the DLR Institute of Transportation Systems. This article traces the DLR's contributions within this context, starting with common actuating current curve monitoring and beginning with initial conceptual considerations on the design of a suitable algorithmic model for holistic point condition diagnosis. Finally, the current challenges and potential for future developments are discussed.

2 Point machine monitoring using actuating current curves

Numerous faults or anomalies can occur over the course of moving the blades of electromechanical points, such as those considered below, which often manifest themselves in increased mechanical resistance during point movement or point closure. In addition, there are electrical effects which, depending on the type and design of the point or point machine, influence the current consumption when actuating the point; also known as the actuating current curve. In the simplest case, these current curves are compared with a previously determined reference curve and significant deviations are marked as alarms. However, a comprehensive health status assessment is not usually possible using this approach. Nor is this simple approach sufficient to derive a purely data-based estimate of the point's remaining useful life (RUL) that is reliable enough for practical use in comparison with real fault data, as was shown in [12]. Instead, a much more detailed analysis of the measured actuating current curves is required, which must also take into account the climatic conditions at the time of measurement. Furthermore, in line with the usual process steps in "Prognostics and Health Management" (PHM), it often makes sense to make a conscious distinction in the analysis between the recognition (detection) of anomalous actuating current curves (anomalies) and their interpretation in terms of failure root cause diagnosis [13].

2.1 Anomaly detection

Fig. 1 shows a typical actuating current curve for an NSE2 point machine [14], as is common in the Netherlands. Much of the DLR's work cited in the following sections refers to this type of actuating current curve. If the complex structure of such curves is to be made not only visually, but above all mathematically tangible without oversimplifying it, it makes sense to first describe various characteristic (statistical) features and then, if necessary, to perform a dimensional reduction adapted to the data structure. Various statistical features were therefore calculated in [15], which were then compressed into two abstract parameters using a principal component analysis (PCA). Outliers or trend changes in the time series of these parameters compared to an

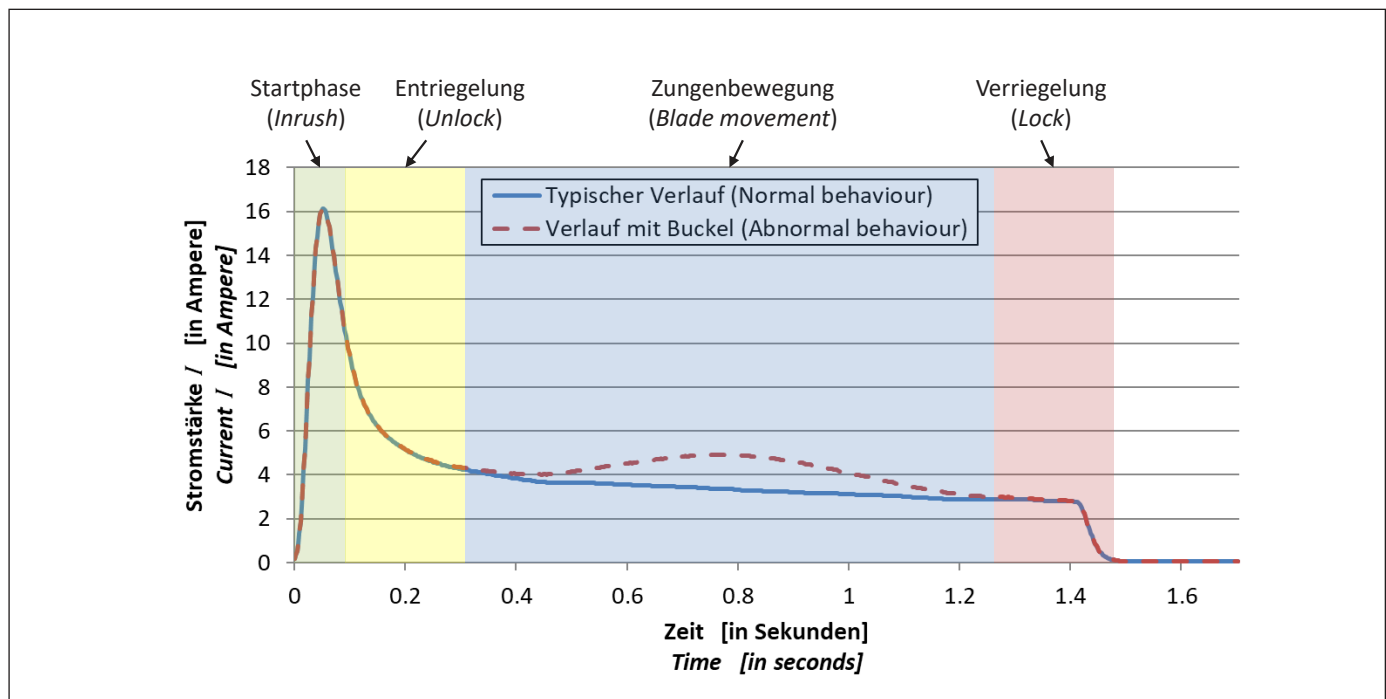


Bild 1: Normale und anormale NSE-Stellstromkurven

Fig. 1: The normal and abnormal actuating current curves of an NSE point machine

es nahe, zunächst verschiedene charakteristische Merkmale (sog. Features) zu beschreiben und anschließend ggf. eine an die Datenstruktur angepasste Dimensionsreduktion vorzunehmen. In [15] wurden daher diverse statistische Features berechnet, die anschließend mittels einer Hauptkomponentenanalyse (PCA) zu zwei abstrakten Kenngrößen komprimiert wurden. Ausreißer oder Trendveränderungen in den Zeitreihen dieser Kenngrößen gegenüber einem aus den Daten zuvor abgeleiteten, angenommenen Normalzustand deuten dabei auf Anomalien bzw. mögliche Fehler in der Weiche hin, wie am Beispiel eines korrodierenden Getriebes im Weichenantrieb exemplarisch gezeigt werden konnte.

Teilweise hohe Fehlalarmraten bei gleichzeitig ungenauen und unvollständigen Referenzinformationen zum tatsächlichen Zustand (Ground Truth) machten jedoch weitere Überlegungen zur Verbesserung der Anomaliedetektion notwendig. Über mehrere Arbeiten hinweg [16, 17, 18] wurde daher zunächst versucht, durch geeignete Normierung der Features die Temperaturabhängigkeit der Stellstromkurven zu kompensieren. Zusätzlich wurden einzelne Stellstromkurven manuell von Experten aus der Praxis mit Zustandsinformationen bzw. einer Experteneinschätzung annotiert, um darüber eine bessere Validierung der entwickelten Algorithmen zu ermöglichen.

Basierend auf den temperaturnormierten Features wurde sodann der zuvor skizzierte PCA-Ansatz durch einen auf der Berechnung von Isolation Forests [19] aufsetzenden Anomaliewert (Anomaly Score) ersetzt [20]. In einer weiter ausgereiften Form des Verfahrens folgten schließlich in langjähriger Forschungspartnerschaft mit Strukton Rail die Implementierung und ein Pilotbetrieb in operativer Umgebung mit einer größeren Weichenpopulation in den Niederlanden [21]. Dabei wurden erstmals auch gezielt durch die geometrische Form der Stellstromkurven motivierte Merkmale – insbesondere auf erhöhte mechanische Widerstände zurückzuführende „Buckel“ während des Zungenumlaufs (Bild 1) – integriert, um die Diagnosefähigkeit der eingesetzten Algorithmen zur Anomaliedetektion zu verbessern.

assumed normal state previously derived from the data indicate any anomalies or possible errors in the point, as could be shown by the example of a corroding gearbox in the point machine.

However, in some cases high false alarm rates combined with inaccurate and incomplete reference information on the actual state (ground truth) made further considerations necessary to improve the anomaly detection. Over the course of several studies [16, 17, 18], an attempt was therefore first made to compensate for the temperature dependence of the actuating current curves by means of the suitable normalisation of the features. In addition, individual actuating current curves were manually annotated by experts from the field with status information or an expert assessment in order to enable better validation of the developed algorithms.

Based on the temperature-normalised features, the previously outlined PCA approach was then replaced with an anomaly score [20] based on the calculation of isolation forests [19]. In a more mature form of the method, a pilot implementation and demonstration in an operating environment with a larger population of points in the Netherlands [21] was carried out within the context of an existing long-term research partnership with Strukton Rail. Features specifically motivated by the geometric shape of the actuating current curves – in particular “humps” that occur due to increased mechanical resistance during point rotation (fig. 1) – were integrated for the first time in order to improve the diagnostic capability of the used anomaly detection algorithms.

2.2 Holistic diagnostic approaches

Mathematical models for diagnosing failure root causes in complex systems have long been known from the field of medicine, amongst others [22]. It was therefore logical to transfer the methodological approaches used there to railway points with their large number of interacting components and possible malfunctions. Some fundamental questions regarding the suitability

2.2 Holistische Diagnoseansätze

Unter anderem aus dem Bereich der Medizin kennt man schon lange mathematische Modelle zur Ursachendiagnose in komplexen Systemen [22]. Insofern lag es nahe, die dort verwendeten methodischen Ansätze auch auf Eisenbahnweichen mit ihrer Vielzahl an interagierenden Komponenten und möglichen Fehlzuständen zu übertragen. Ausgehend von ersten konzeptionellen Überlegungen zur Beschreibung einer generischen Weiche in Form eines modular aufgebauten, sogenannten Bayes'schen Netzes [23] wurden dabei zunächst einige grundsätzliche Fragen zu dessen methodischer Eignung im Sinne einer holistischen (d.h. komponentenübergreifenden) Weichenzustandsdiagnose beantwortet [24]. Im Vordergrund stand das Ziel, die Weiche zumindest im beweglichen Zungenbereich (inkl. Weichenantrieb) möglichst in ihrer ganzen Komplexität, aber gleichzeitig ohne eine – zweifellos sehr viel kompliziertere – detaillierte physikalische Modellierung quantitativ zu beschreiben und potenzielle Multi-Fehlzustände – soweit möglich – in all ihren Abhängigkeiten gezielt mit den Stellstrommessungen (bzw. daraus geeignet abgeleiteten Features) rechnerisch in Beziehung zu setzen.

Bild 2 zeigt in diesem Zusammenhang eine stark vereinfachte, schematische Darstellung eines solchen Diagnosemodells (vgl. [25]). Ein erstes, zu Demonstrationszwecken erstelltes, vollständig parametrisiertes Beispielmmodell aus einer frühen Phase der Entwicklung findet sich etwa in [26].

Ähnlich wie am Ende von Abschnitt 2.1 beschrieben, zeigte sich auch hier die Notwendigkeit, vor allem geometrische Features der Stellstromkurven (z. B. „Buckel“, Abflachungen, Oszillationen, Abbrüche) explizit in die Modellierung zu integrieren [27]. Die präzise mathematische Beschreibung und algorithmische Berechnung dieser Features gestaltet sich aufgrund der speziellen Struktur realer Stellstromkurven (vgl. Bild 1) jedoch ungleich aufwendiger als die Ermittlung gängiger Standardkenngrößen aus der Statistik. Schon die automatisierte und zugleich sachlich zutreffende Segmentierung der gemessenen Stellstromkurven in

ity of such an approach in terms of a holistic (i.e. cross-component) point condition diagnosis have been answered [24] on the basis of the initial conceptual considerations for the description of a generic point in the form of a modular, so-called Bayesian network [23]. The main objective was to quantitatively describe the point in all its complexity, at least in the vicinity of its moving parts (including the point machines), but at the same time without any detailed physical modelling, which is undoubtedly much more complicated, and to mathematically relate any potential multi-failure states in all their dependencies to the actuating current measurements (or features suitably derived from them) as far as possible.

Fig. 2 shows a highly simplified, schematic representation of just such a diagnostic model (see [25]). An initial, fully parameterised example model created for demonstration purposes from an early phase of development can be found in [26].

Similar to the description at the end of Section 2.1, the need to explicitly integrate the geometric features of the actuating current curves (e.g. “humps”, flat spots, oscillations, breaks) into the modelling was also evident here [27]. The precise mathematical description and algorithmic calculation of such features, however, turned out to be much more challenging than the determination of the common standard statistical parameters which is due to the complex structure of the real actuating current curves (fig. 1). Even the automated and at the same time factually accurate segmentation of the measured actuating current curves into the various phases of the point rotation is not trivial (cf. [28]).

A comprehensive diagnostic model was finally designed and roughly parameterised in collaboration with point maintenance experts from Strukton Rail on the basis of the findings of a dedicated measurement campaign to generate abnormal actuating current curves by means of deliberately created fault states in the point machine and the point blades [25]. The subsequent evaluation based on various hypothetical fault scenarios showed that the model is qualitatively plausible to a large extent, although

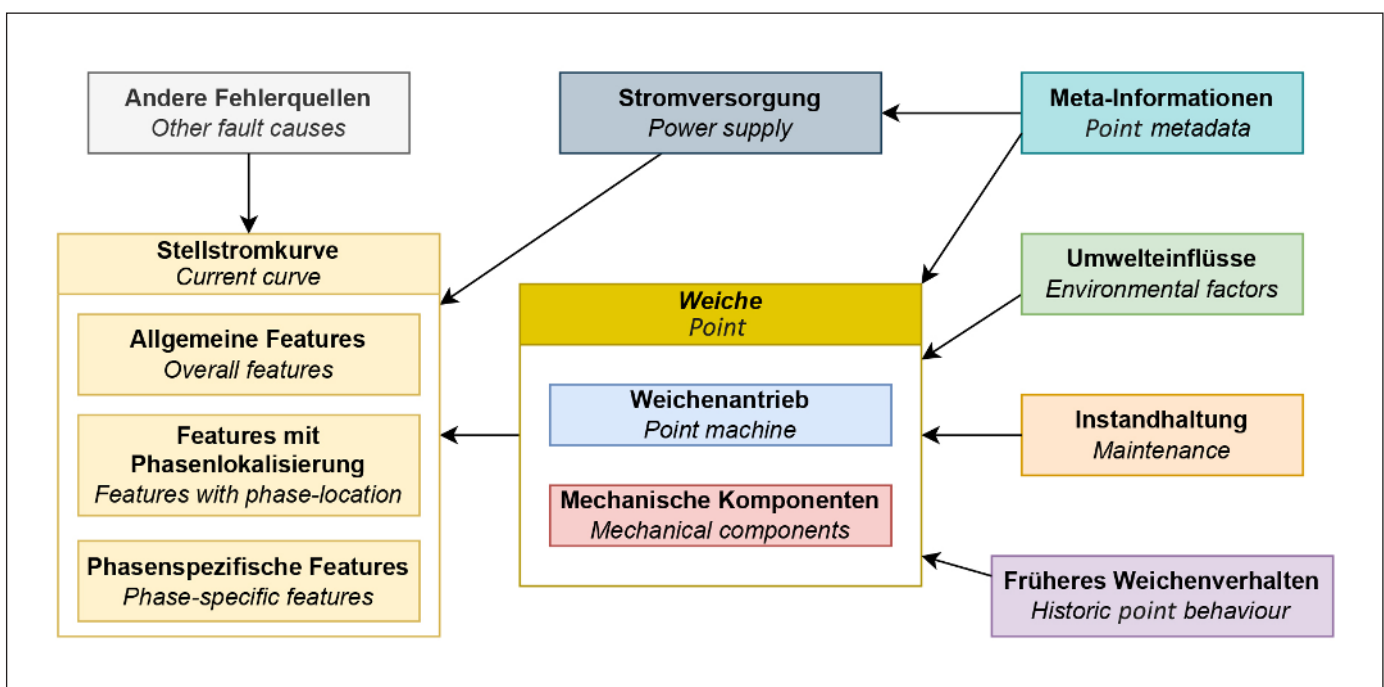


Bild 2: Diagnosemodell (schematische Darstellung)

Fig. 2: A diagnostic model (schematic)

die verschiedenen Phasen des Weichenumlaufs ist nicht trivial (vgl. [28]).

Unterstützt durch Erkenntnisse einer dezidierten Messkampagne zur Generierung anormaler Stellstromkurven mittels bewusst hergestellter Fehlzustände des Weichenantriebs und der Zungen konnte schließlich in [25] gemeinsam mit Weicheninstandhaltungsexperten der Firma Strukton Rail ein umfassendes Diagnosemodell erstellt und grob parametrisiert werden. Die anschließende Evaluation basierend auf verschiedenen hypothetischen Störungsszenarien zeigte, dass das Modell qualitativ in weiten Teilen plausibel ist, für einen Praxiseinsatz allerdings noch Verbesserungen notwendig sind. Angesichts des angestrebten Detailgrads des Diagnosemodells stellt sich die vorhandene Datenlage hierfür jedoch bis heute noch als unzureichend dar (vgl. auch Abschnitt 3). Darüber hinaus wurde deutlich, dass eine zuverlässige Diagnose sich aufgrund der Vielzahl zusätzlich zu kontrollierender Einflussparameter (u.a. Instandhaltung, Umweltbedingungen, Zugverkehr) anders als die bisher beschriebenen Ansätze nicht nur isoliert auf einzelne Stellstromkurven beschränken darf, sondern diese sowohl im historischen Verlauf der einzelnen Weiche als auch als Teil des insgesamt überwachten Weichenkollektivs betrachten muss. Dies führt zu den in Abschnitt 2.3 beschriebenen weichenübergreifenden Analysen.

2.3 Weichenübergreifende Analysen

Anknüpfend an das Thema der Anomaliedetektion (siehe Abschnitt 2.1), aber aufbauend auf einer verbesserten Berechnungsmethodik für bestimmte Features zur Beschreibung von „Buckeln“ in den Stellstromkurven aus dem Kontext der Diagnosemodelle (vgl. Abschnitt 2.2) wurde in der erst kürzlich erschienenen Publikation [29] ein neuartiger Weichenzustandsindikator entwickelt, der einerseits eine Vergleichbarkeit zwischen Weichen desselben Typs ermöglicht und zu diesem Zweck andererseits Temperatureffekte durch eine geschickte Verteilungstransformation kompensiert. In den Indikatorzeitreihen konnten dabei basierend auf den über mehr als zwei Jahre vorliegenden Daten von insgesamt 58 Weichen aus den Niederlanden z. B. Instandhaltungseinsätze und deren Nachhaltigkeit im Sinne der Zustandsdegradation identifiziert werden. Dabei gab es sowohl Fälle langanhaltender Verbesserungen des Weichenzustands, aber auch Eingriffe, die sich gemäß dem skizzierten Zustandsindikator als nur sehr kurz wirksam herausstellten.

Der Zustandsindikator adressiert somit gleichermaßen sowohl kurzfristige Änderungen im Weichenverhalten (z. B. durch spontane Weichenstörungen oder in Reaktion auf eine durchgeführte Instandsetzung) als auch mittel- und langfristige Trends, wie sie für eine prädiaktive Instandhaltung oder auch Lebenszyklusbetrachtungen (RUL-Betrachtungen) von Bedeutung sind. Ein robustes weichenübergreifendes Zustandsranking innerhalb des betrachteten Weichenkollektivs ermöglicht perspektivisch zudem eine zielgerichtete Ressourcen-Allokation im Bereich der Wartung und Instandsetzung. Ein nach ersten Rückmeldungen auch für die Praxis sehr gewinnbringender Pilotbetrieb in operativer Umgebung wurde inzwischen gemeinsam mit der Firma Strukton Rail aus den Niederlanden realisiert und wird nun weiter ausgebaut und optimiert.

3 Integration weiterer Datenquellen

Bereits in Abschnitt 2.2 wurde erwähnt, dass als eine der großen Hürden für ein tatsächlich holistisches Diagnosemodell für Weichen neben der grundsätzlichen Komplexität des Problems nicht zuletzt auch die verfügbare Datenlage zu nennen ist. Obwohl in

improvements are still necessary for practical use. However, the available data is still insufficient in light of the desired level of detail of the diagnostic model (see also Section 3).

In addition, it also became clear that, unlike the approaches described so far and because of the large number of additional influencing parameters to be monitored (including maintenance, environmental conditions, train traffic), a reliable diagnosis cannot be limited to the individual actuating current curves, but must consider them both within the historical progression of the individual point and as part of the overall monitored point collective. This leads to the cross-point analyses described in Section 2.3.

2.3 Cross-point analyses

A new type of point health indicator has been developed in a recently published paper [29] that follows on from the topic of anomaly detection (see Section 2.1), while building on an improved calculation of certain features to describe the “humps” in the actuating current curves from the context of the diagnostic models (see Section 2.2). On the one hand, it enables comparability between points of the same type and on the other hand compensates for temperature effects by means of a clever distributional transformation. Based on more than two years of data retrieved from a total of 58 points in the Netherlands, it then proved possible to identify maintenance operations and their sustainability in terms of condition degradation in the indicator time series. There were cases of long-lasting improvements in the health of the points, but also interventions that, according to the outlined health indicator, only proved to be effective for a very short time.

That is to say that the health indicator obviously addresses both short-term changes in point behaviour (e.g. due to spontaneous point malfunctions or in response to repair actions) as well as the medium and long-term trends that are important for predictive maintenance or lifecycle considerations (RUL). A robust cross-point condition ranking within the considered point collective also enables the targeted allocation of resources with regard to maintenance and repair. A very valuable pilot demonstrator has recently been implemented with Strukton Rail from the Netherlands in an operating environment based on some of the initial feedback and this is now being further expanded and optimised.

3 Integrating further data sources

As already mentioned in Section 2.2, one of the major hurdles to a truly holistic diagnostic model for points not only involves the fundamental complexity of the problem, but also the available data. Although a great deal of data on rail infrastructure and its health is already regularly collected in practice, wide accessibility, even within the same company, is still limited for historical reasons and the data is insufficiently synchronised for holistic analyses. In addition, existing data structures and management often require complex adjustments when transferring them to new research and application scenarios.

A start was therefore made on building up a comprehensive data set [30] that is tailored as well as possible to the current issues in collaboration with the project partners in the ongoing EU IAM4Rail project. The aim is to extend the actuating current-based point condition analysis (see Section 2) to also investigate the influences and effects of other (track) parameters on point behaviour and the associated fault conditions. The rel-

der Praxis bereits sehr viele Daten zur Bahninfrastruktur und deren Zustand regelmäßig erhoben werden, liegen diese historisch bedingt oft noch sehr verteilt und für holistische Analysen nicht hinreichend synchronisiert vor. Zudem erfordern existierende Datenstrukturen und das Datenmanagement häufig aufwendige Anpassungen bei der Übertragung auf neue Forschungs- und Anwendungsszenarien.

In Zusammenarbeit mit Projektpartnern im laufenden EU-Projekt IAM4Rail wurde daher vor einiger Zeit damit begonnen, einen umfassenden Datensatz aufzubauen [30], der möglichst gut auf die aktuellen Fragestellungen zugeschnitten ist. Ziel ist es, in Erweiterung der stellstrombasierten Weichenzustandserfassung (siehe Abschnitt 2) – wie bereits durch die holistischen Diagnoseansätze in Abschnitt 2.2 vorgezeichnet – auch die Einflüsse bzw. Auswirkungen anderer (Gleis-)Parameter auf das Weichenverhalten und damit verbundene Fehlzustände zu untersuchen. Bestätigung findet das Thema unter anderem in der aktuellen Technikstrategie der Deutschen Bahn AG (siehe [31]: S. 103).

Aktuelle Beispiele (siehe Abschnitt 3.1) sind die Betrachtung der Wechselwirkung zwischen gemeinsamer Stromversorgung mehrerer Weichen und dem jeweils einzelnen, per Stellstromkurve überwachten Weichenantrieb, oder das Zusammenspiel zwischen Auffälligkeiten beim Weichenumlauf und Eigenschaften des Gleisoberbaus (z. B. Gleisgeometrie, Hohllagen). Hinzu kommt die Frage nach dem möglicherweise dominierenden Einfluss der Instandhaltung in den Datenzeitreihen. Fallspezifisch können und sollen so ausgewählte, im Diagnoseansatz aus Abschnitt 2.2 bisher durch Experten nur geschätzte bzw. postulierte Wirkungszusammenhänge datenbasiert verifiziert und nach Möglichkeit quantifiziert werden.

3.1 Aktuelle Beispiele und Analyseergebnisse

In der Praxis erfolgt die Stromanbindung der Weichenantriebe eines Stellwerkbereichs gelegentlich in Gruppen. Durch parallele Messung der anliegenden Versorgungsspannung konnte hierbei nachgewiesen werden, dass neben Witterungseinflüssen auch (oft stufenhaft auftretende) Veränderungen in der Stromversorgung (minimale) Variationen in einzelnen der aus den Stellstromkurven abgeleiteten Features hervorrufen können. Vor allem bei gleichzeitig umlaufenden Weichen mit zeitlich leicht versetzt überlappenden Stellstromkurven entstehen oft sichtbare Schwankungen in den Kurven derselben Weichengruppe, die unter Umständen leicht mit sich anbahnenden Fehlzuständen verwechselt werden können [32]. Will man demnach die Stellstromüberwachung im Kontext einer prädiktiven Instandhaltung zur bewusst frühzeitigen Erkennung und Prognose von möglichen Störungen verwenden, darf dieser Effekt nicht unberücksichtigt bleiben.

Weiterhin wurde in [33] erstmals systematisch untersucht, wie Merkmale der Gleisgeometrie im Bereich der Weichen mit mechanischen Widerständen während des Weichenumlaufs (inkl. Ent- und Verriegelung) korrelieren. Als besondere Herausforderung stellte sich dabei die geringe Frequenz an (messzugbasierten) Gleisgeometriemessungen im Vergleich zur Häufigkeit zustandsverändernder Wartungseingriffe beim Weichenantriebssystem (inkl. der beweglichen Weichenkomponenten) heraus.

3.2 Datenintegrationsplattformen

Grundlage für eine langfristig erfolgreiche Entwicklung holistischer Diagnoseansätze ist wie dargestellt die systematische Zusammenführung und Synchronisation möglichst aller hierfür relevanten Daten mit einheitlichen Schnittstellen und aufeinander abgestimmten Datenmodellen. Nahezu alle großen Inf-

evance of this topic has also been confirmed in the current technology strategy at Deutsche Bahn AG (see [31]: p. 103).

Current examples (see Section 3.1) include the consideration of the interaction between the common power supply of a given point group and the individual point machines monitored by the actuating current curve or the interaction between anomalies in the point rotation and the properties of the track superstructure (e.g. track geometry, voiding). In addition, there is also the question of the possibly dominant influence of maintenance on the data time series. Selected causal relationships that have so far only been estimated or postulated by experts in the diagnostic approach from Section 2.2 can and should then be verified on a case-specific basis and, if possible, quantified by data.

3.1 Current examples and the analysis results

In practice, the electric power supply to the point machines in a given interlocking area is sometimes performed in groups. By measuring the supply voltage in parallel to the actuating current, it has been possible to prove that, in addition to climatic influences, (often stepwise) changes in the power supply voltage can cause (minimal) variations in the individual time series derived from the actuating current curves. Visible fluctuations often occur in the curves of the same group of points, which can easily be mistaken for looming fault states [32], particularly in the case of simultaneously actuated point machines with slightly shifted overlapping current curves. Therefore, this effect must not be ignored if current curve monitoring is to be used within the context of predictive maintenance for the early detection and prognosis of possible faults.

Furthermore, [33] systematically investigated for the first time how the track geometry characteristics in the vicinity of the points correlate with the mechanical resistances during point rotation (including unlocking and locking). The temporal sparsity of (measurement train-based) track geometry data compared to the relatively large number of condition-affecting maintenance interventions in the point drive system (including the movable point components) proved to be a particular challenge.

3.2 Data integration platforms

As described above, the basis for the successful development of holistic diagnostic approaches involves the systematic consolidation and synchronisation of as much relevant data as possible with clear interfaces and coordinated data models. Almost all the major infrastructure managers have therefore been working on the development, expansion and optimisation of corresponding data integration platforms in their respective companies. Examples include Deutsche Bahn AG's DIANA platform [34], the ProRail Monitoring Platform in the Netherlands [35], ÖBB's "Data Science Hub" [36] and SBB's RCM approach [37]. European initiatives such as Gaia-X [38] with the creation of federated data spaces [39], in which the DLR is also involved, have the additional goal of promoting the exchange of data between the involved stakeholders and establishing a data economy. Standardised processes and interfaces are intended to reduce the organisational, legal and technical barriers.

In addition, various manufacturers of railway infrastructure components and/or sensor hardware have been developing increasing numbers of software-based platform solutions for data integration in the area of infrastructure condition monitoring as a new business model for several years now (see [11]).

rastrukturbetreiber beschäftigen sich daher – teils schon lange – mit dem Aufbau, der Erweiterung und der Optimierung entsprechender Datenintegrationsplattformen in ihrem jeweiligen Unternehmen. Zu nennen sind beispielsweise die DIANA-Plattform der Deutschen Bahn AG [34], die ProRail Monitoring Plattform in den Niederlanden [35], der „Data Science Hub“ der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) [36] oder der RCM-Ansatz der Schweizerische Bundesbahnen AG (SBB) [37]. Europäische Initiativen wie Gaia-X [38] mit dem Aufbau föderierter Datenräume [39], an denen auch das DLR beteiligt ist, haben das zusätzliche Ziel, den Datenaustausch zwischen den jeweils beteiligten Stakeholdern und die Etablierung einer Datenökonomie zu fördern. Einheitliche Prozesse und Schnittstellen sollen dabei organisatorisch, rechtlich und technisch bedingte Hemmnisse abbauen.

Hinzu kommt, dass auch diverse Hersteller von Eisenbahninfrastrukturkomponenten und/oder Sensorhardware seit einigen Jahren zunehmend softwarebasierte Plattformlösungen zur Datenintegration im Bereich der Infrastrukturzustandsüberwachung als neues Geschäftsmodell entwickeln (vgl. [11]).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Der Blick auf aktuelle Trends im Kontext der datenbasierten Zustandsüberwachung der Schieneninfrastruktur zeigt deutlich, wie holistische Ansätze einschließlich dem hierzu notwendigen weiteren Ausbau im Bereich des Datenmanagements immer mehr Bedeutung gewinnen. Die in den vorangegangenen Abschnitten zitierten Beiträge des DLR (vgl. auch Bild 3), motivieren ein starkes, integriertes Zusammenwirken von erfahrenen Weicheninspektoren und -instandhaltern auf der einen Seite und in der Bahndomäne geschulten Datenwissenschaftlern auf der anderen Seite. Nicht zuletzt aufgrund der starken Dominanz der Instandhaltung im Hinblick auf Varianzen und Trendbrüche in den Messdaten steht dabei auch die Ertüchtigung der Instandhaltungsdokumentation als Referenz für überwachte Lernverfahren und zur Validierung neuer datengetriebener Ansätze des Zustandsmonitorings im Fokus (vgl. [33]).

4 Summary and outlook

A look at current trends within the context of the data-based condition monitoring of rail infrastructure clearly shows how holistic approaches, including the necessary further expansion in the field of data management, are becoming increasingly important. The DLR's contributions cited in the previous sections (see also fig. 3) are providing motivation for strong, integrated collaboration between experienced inspection staff and maintenance engineers on the one hand and data scientists trained in the rail domain on the other. Not least due to the dominance of maintenance with regard to variances and trend breaks in the measurement data, the focus is also on upgrading the maintenance documentation as a reference for supervised learning procedures and for validating new data-driven approaches to health monitoring (cf. [33]).

It should also be mentioned that the current AI-based methods for data analysis are based almost exclusively on statistical associations (e.g. correlations) in the available measurement data. For the purposes of reliable diagnosis (see Section 2.2), the knowledge about causal dependencies between the different variables and components is even more important, however. In the future, the question will therefore arise as to how exactly causal learning or other causality-based analytic methods can help further improve holistic point condition diagnosis. An initial corresponding pilot study [40] has showed promising results using the example of weather-dependent insulation resistance measurements from interlocking monitoring [41], which are now to be transferred to other components of the railway infrastructure. ■

Acknowledgement

Funded by the European Union. The views and opinion expressed are, however, those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or Europe's Rail Joint Undertaking. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them. The pro-

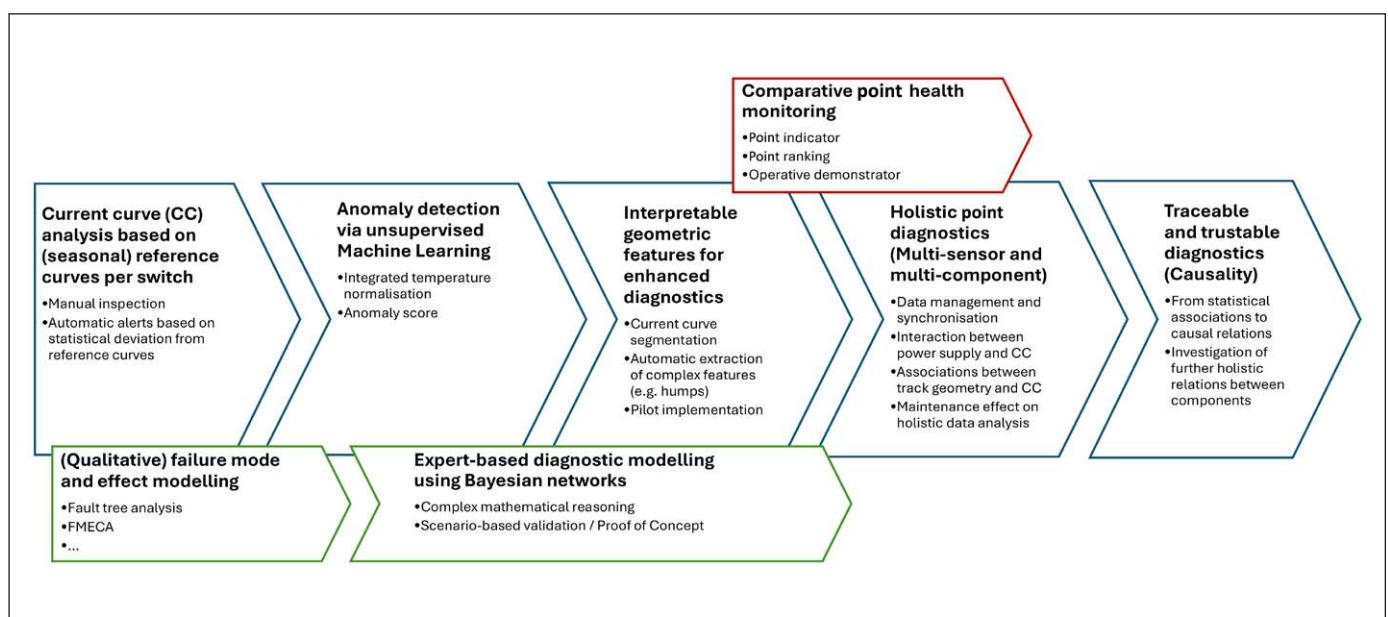


Bild 3: Überblick über die beschriebenen Entwicklungsstränge

Fig. 3: Overview of the lines of development as described in this article

Festzuhalten ist ferner, dass aktuelle KI-basierte Methoden zur Datenanalyse nahezu ausschließlich auf statistischen Assoziationen (z. B. Korrelationen) in den vorhandenen Messdaten beruhen. Gerade für eine zuverlässige Diagnose (vgl. Abschnitt 2.2) sind aber auch die kausalen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Variablen und Komponenten von Bedeutung. Zukünftig stellt sich somit die Frage, wie genau kausales Lernen oder andere auf Kausalität beruhende Analysemethoden helfen können, die holistische Weichenzustandsdiagnose weiter zu verbessern. Eine erste entsprechende Pilotstudie [40] zeigte am Beispiel von witterungsabhängigen Isolationswiderstandsmessungen aus der Stellwerksüberwachung [41] durchaus vielversprechende Ergebnisse, die nun auch auf andere Komponenten der Bahninfrastruktur zu übertragen sind. ■

Danksagung

Gefördert durch die Europäische Union. Die geäußerten Ansichten und Meinungen sind jedoch ausschließlich die der Autor(en) und spiegeln nicht notwendigerweise die der Europäischen Union oder des Europe's Rail Joint Undertaking wider. Weder die Europäische Union noch die Bewilligungsbehörde können dafür verantwortlich gemacht werden. Das Projekt FP3-IAM4Rail (Grant Agreement Nr. 101101966) wird vom Europe's Rail Joint Undertaking und dessen Mitgliedern unterstützt.

Die Autoren bedanken sich bei der Firma Strukton Rail für die langjährige partnerschaftliche Zusammenarbeit.



LITERATUR | LITERATURE

- [1] Stoll, H.; Bollrath, B. (2002): Weichendiagnosesystem SIDIS W, SIGNAL+DRAHT (94) 4/2002, S. 26-29
- [2] Redeker, F.R. (2011): POSS®: Railway Condition Monitoring developed by a maintainer, 5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing, RCM 2011, 29.-30.11.2011, Derby, UK
- [3] Gerber, U.; Fengler, W.; Zoll, A.: Das Messsystem ESAH-M, EIK (Eisenbahn Ingenieur Kompendium) 2016, S. 49-62
- [4] Thomma, L.; Reetz, S.; Neumann, T. (2023): Zustandsüberwachung des Weichenoberbaus mit streckenseitigen Beschleunigungssensoren – Literaturrecherche zum aktuellen Forschungsstand zu streckenseitigen Sensoren, EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2023, S. 32-37
- [5] Heusel, J.; Baasch, B.; Roth, M.; Jahan, K.; Groos, J.C. (2025): Analysis of switch passage patterns for positioning and condition monitoring applications using axle-box acceleration data, 8th International Congress and Workshop on Industrial AI and eMaintenance, IAI 2025, 13.-15.5.2025, Luleå, Schweden
- [6] Sandner, C. (2022): Charakterisierung von Einzelfehlern im Eisenbahnoberbau aus Messfahrten der Regelinspektion und dem Fahrwegmonitoring mit Regelzügen, Dissertation, Technische Universität München
- [7] Jahan, K.; Lähns, A.; Tiecken, J.; Tiecken, S.; Groos, J.C. (2026): AI-Enabled Classification of Railway Switch Components Using Camera Data to Support Component-Specific Axle Box Acceleration-Based Condition Monitoring, Transport Research Arena, TRA 2026, 18.-21.5.2026, Budapest, Ungarn
- [8] Saftinspect Consortium (2020): Automated ultrasonic scanner monitors railway frogs, URL: <https://cordis.europa.eu/article/id/422302-automated-ultrasonic-scanner-monitors-railway-frogs> (Letzter Zugriff: 05.06.2026)
- [9] Chandran, P.; Rantatalo, M.; Odelius, J.; Lind, H.; Famurewa, S. M. (2019): Train-based differential eddy current sensor system for rail fastener detection, Meas. Sci. Technol. 30 (12), 125105, DOI: 10.1088/1361-6501/ab2b24
- [10] Ye, J.; Stewart, E.; Zhang, D.; Chen, Q.; Thangaraj, K.; Roberts, C. (2021): Integration of Multiple Sensors for Noncontact Rail Profile Measurement

and Inspection, IEEE Trans. Instrum. Meas. 70, S. 1-12, DOI: 10.1109/TIM.2020.3042297

ject FP3-IAM4Rail (Grant Agreement No. 101101966) is supported by the Europe's Rail Joint Undertaking and its members. The authors would like to thank Strukton Rail for its many years of cooperation.



- [11] Schneditz-Bolfras, F. (2026): What Actually Works: Data Driven Prediction for Reliable Turnouts, Railway Diagnostics and Monitoring Conference 2026, 16.-17.4.2026, Hamburg, Deutschland
- [12] Böhm, T. (2018): Präzise Prognose von Störungen an Eisenbahnweichen, Dissertation, Technische Universität Braunschweig
- [13] Atamuradov, V.; Medjaher, K.; Dersin, P.; Lamoureux, B.; Zerhouni, N. (2017): Prognostics and Health Management for Maintenance Practitioners – Review, Implementation and Tools Evaluation, International Journal of Prognostics and Health Management 8(60), S. 1-31, DOI: 10.36001/ijphm.2017.v8i3.2667
- [14] VRS Railway Industry (2022): NSE point machine, URL: https://www.vrsrail.nl/sites/vw_vrs/files/webcomposer/5815--Point%20Machines%20NSE%20%28VRS%20Infosheet%202022%29.pdf (Letzter Zugriff: 05.06.2026)
- [15] Narezo Guzman, D.; Neumann, T.; Groos, J.C. (2018): Kontinuierliche Überwachung der LST mit eingebetteten Sensoren, EI – DER EISENBAHN-INGENIEUR 11/2018, S. 6-11
- [16] Narezo Guzman, D.; Hadzic, E.; Schuil, R.; Baars, E.; Groos, J.C. (2018): Data-driven condition now- and forecasting of railway switches for improvement in the quality of railway transportation, European Conference of the PHM Society, 3.-6.7.2018, Utrecht, Niederlande
- [17] Narezo Guzman, D.; Hadzic, E.; Baasch, B.; Heusel, J.; Neumann, T.; Schrijver, G.; Buursma, D.; Groos, J.C. (2019): Anomaly Detection and Forecasting Methods Applied to Point Machine Monitoring Data for Prevention of Switch Failures, 32nd International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM 2019, 3.-5.9.2019, Huddersfield, UK
- [18] Narezo Guzman, D.; Hadzic, E.; Groos, J.C. (2019): Anomaly detection model based on switch monitoring data to enable condition-based

maintenance, 12th World Congress on Railway Research, WCRR 2019, 28.10.-1.11.2019, Tokyo, Japan

[19] Sharova, E. (2018): Unsupervised anomaly detection with isolation forest, Proceedings of the PyData, 27.-29.4.2018, London, UK

[20] Narezo Guzman, D.; Hadzic, E.; Samson, H.; Van Den Broek, S.; Groos, J.C. (2020): Detecting anomalous behavior of railway switches under real operation conditions: workflow and implementation, Transport Research Arena, TRA 2020, 27.-30.4.2020, Helsinki, Finnland

[21] Narezo Guzman, D.; Heusel, J.; Weik, N.; Reetz, S.; Buursma, D.; Van Den Berg, A.; Schrijver, G.; Neumann, T.; Van Den Broek, S.; Groos, J.C. (2022): Towards the automation of anomaly detection and integrated fault identification for railway switches in a real operational environment, 13th World Congress on Railway Research, WCRR 2022, 6.-10.6.2022, Birmingham, UK

[22] Heckerman, D.E.; Nathwani, B.N. (1992): Toward normative expert systems: Part II. Probability-based representations for efficient knowledge acquisition and inference, Methods of Information in Medicine 31(2), S. 106–116

[23] Charniak, E. (1991): Bayesian networks without Tears, AI Magazine Winter 1991, S. 50–63

[24] Neumann, T.; Narezo Guzman, D. (2019): Bayesian network design for fault diagnostics of railway switches, European Safety and Reliability Conference, ESREL 2019, 22.-26. September 2019, Hannover, Deutschland

[25] Reetz, S.; Neumann, T.; Schrijver, G.; Van Den BERG, A.; Buursma, D. (2024): Expert system based fault diagnosis for railway point machines, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 238(2), S. 214–224

[26] Neumann, T.; Narezo Guzman, D.; Groos, J.C. (2019): Transparente Fehlerdiagnose bei Weichenstörungen mittels Bayes'scher Netze, SIGNAL+DRAHT (111) 12/2019, S. 23–31

[27] Neumann, T.; Heusel, J.; Del Aalamo Ruiz, M.; Narezo Guzman, D.; Reetz, S. (2023): Modellierung und Simulation atypischer Merkmale bei Weichenstellstromkurven, SIGNAL+DRAHT (115) 1+2/2023, S. 53–63

[28] Reetz, S.; Neumann, T.; Schrijver, G.; Van Den Berg, A. (2021): Kombination von Messdaten und wissensbasierter Modellierung zur Fehlerdiagnose bei Weichen, SIGNAL+DRAHT (113) 12/2021, S. 27–35

[29] Reetz, S.; Neumann, T.; Buursma, D.; Roodenburg, W. (2026): Robust health indicator and rankings for railway point machines using motor current curves, Intelligent Transportation Infrastructure, DOI: 10.1093/iti/liag005

[30] Neumann, T.; Tiecken, J.; Buursma, D.; Baasch, B.; D Miguel, J.C.; Rodriguez-Arana, B.; Alvarado, U. (2024): Boosting Holistic Railway Infrastructure Monitoring and Health Prediction by Integrated Data Sets and Analysis, Transport Research Arena, TRA 2024, 15.-18.4.2024, Dublin, Irland

[31] Deutsche Bahn AG (2026): Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2025, URL: https://www.eba.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Finanzierung/IZB/IZB_2025.html?nn=1689606 (Letzter Zugriff: 10.06.2026)

[32] Reetz, S.; Buursma, D.; Lawate, A.J. (2026): Impact of voltage supply fluctuations on the condition monitoring of railway point machines. International Congress and Workshop on Industrial AI and eMaintenance, AI4Rail 2025, 13.-15.5.2025, Luleå, Schweden

[33] Reetz, S.; Neumann, T.; Groos, J.C.; Buursma, D.; Roodenburg, W. (2026): Multi-modal data analysis for railway switch monitoring: Point machine motor currents, track geometry, and maintenance records, Applied Sciences, MDPI (eingereicht)

[34] Hampel, M.; Rees, G.; Brandes, C. (2017): Weichendiagnose mit DIANA – wenn die Infrastruktur online geht, EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 6/2017, S. 6–10

[35] Van Driel, J. (2026): Watch out, we are monitoring you – or ProRail Monitoring: the road from data to information, Railway Diagnostics and Monitoring Conference 2026, 16.-17.4.2026, Hamburg, Deutschland

[36] Geerts, E. (2021): From data to predictive maintenance at ÖBB, URL: <https://www.railwaygazette.com/infrastructure/2021/08/17/from-data-to-predictive-maintenance-at-obb/> (Letzter Zugriff: 12.06.2026)

[37] SBB (2026): Rail Condition Monitoring: RCM DX Viewer, URL: <https://company.sbb.ch/de/bahnentwicklung/bahnbetrieb/bahninformatik/anlagenmanagement/rcm.html> (Letzter Zugriff: 12.06.2026)

[38] Linder, C.; Ortiz, N. (2025) Chancen aus der Initiative Gaia-X für die Bahnindustrie. ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 3/2025, S. 10–12

[39] Ortiz N.; Linder, C.; Uschok, A.R.; Kürschner, M. (2025): Federated Data Spaces für den Bahnsektor: Ein technischer Einblick. ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 7-8/2025, S. 30–33

[40] Neumann, T.; Rabel, M.; Popescu, O.I.; Gerhardus, A. (2025): Causal Discovery for Railway Health Condition Monitoring – A Case Study, 5th International Railway Symposium Aachen, IRSA 2025, Aachen, Deutschland

[41] Heusel, J.; Groos, J.C. (2021): Analysis of Systematic Influences on the Insulation Resistance of Electronic Railway Interlocking Systems, International Congress and Workshop on Industrial AI, IAI 2021, 25.-27.5.2021, Luleå, Schweden

AUTOR | AUTHOR

Dr.-Ing. Thorsten Neumann

Wissenschaftlicher Mitarbeiter / *Scientific Researcher*
Assetmonitoring und -management
Institut für Verkehrssystemtechnik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Anschrift / Address: Rutherfordstraße 2, D-12489 Berlin
E-Mail: thorsten.neumann@dlr.de

Susanne Reetz

Wissenschaftliche Mitarbeiterin / *Scientific Researcher*
Assetmonitoring und -management
Institut für Verkehrssystemtechnik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Anschrift / Address: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig
E-Mail: susanne.reetz@dlr.de

Dr. Jörn Groos

Gruppenleiter / *Group Leader*
Assetmonitoring und -management
Institut für Verkehrssystemtechnik
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Anschrift / Address: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig
E-Mail: joern.groos@dlr.de

Kurzberichte | Newsflash

ERTMS-Koordinierungsstelle hat sich konstituiert

Am 13. August 2026 hat sich im Bundesverkehrsministerium (BMV) in Berlin der Lenkungskreis der ERTMS-Koordinierungsstelle konstituiert. Diese wurde am Frühling gegründet und soll als operative Steuerungseinheit für Synchronisation und Gestaltung des infrastrukturellen- und fahrzeugseitigen ERTMS-Rollouts fungieren. Sie ist darüber hinaus als Auskunftsstelle für den gesamten Sektor in Fragen zu ERTMS und ETCS vorgesehen. Auch die Förderung der Umrüstung von Bestandsfahrzeugen soll von ihr koordiniert werden. Der Lenkungskreis der Koordinierungsstelle ist ihr zentrales Entscheidungsgremium und besteht aus Vertretern der Länder, Aufgabenträger, Eisenbahnverkehrsunternehmen und Eisenbahninfrastrukturunternehmen sowie des Bundes. Sie verständigten sich einstimmig auf eine Geschäftsordnung und stimmten ebenfalls einstimmig der Bestellung von Florian Böhm als Leiter der Geschäftsführung der Koordinierungsstelle zu.

bm

ERTMS Coordination Office established

On 13 August 2026, the steering committee of the ERTMS Coordination Office was established at the Federal Ministry of Transport (BMV) in Berlin. The Coordination Centre was established in the spring and is intended to act as the operational steering body for the synchronisation and organisation of the ERTMS roll-out on both the infrastructure and rolling stock sides. It is also intended to serve as an information centre for the entire sector on matters relating to ERTMS and ETCS. It will also coordinate the funding for the retrofitting of existing rolling stock. The steering committee of the Coordination Office is its central decision-making body and comprises representatives from the federal states, transport authorities, rail transport operators and rail infrastructure companies, as well as the federal government. They unanimously agreed on rules of procedure and also unanimously approved the appointment of Florian Böhm as head of the Coordination Office's management.

bm

EurailJobs

Karrieremarkt der Bahnbranche



Zur Bewerbung im
#TeamHerzschlag:



www.kvb.koeln/jobs

Verantwortung, die den Takt vorgibt.

Jetzt als Leitung Signaltechnik
bei der KVB einsteigen.



Neubau in Veilsdorf wird nicht mehr umgesetzt

Der für 2027 geplante Neubau des Stellwerks im thüringischen Veilsdorf (Strecke 6311 Hildburghausen – Eisfeld) wird nicht stattfinden. Dies geschehe „aufgrund einer Repriorisierung“, schreibt DB InfraGO. Somit wird es nicht zur angekündigten Vollsperrung der Strecke zwischen 9. Juli 2027 und 30. Juli 2027 kommen – und einige der wenigen im deutschen Schienennetz verbliebenen EZMG-Signale sowjetischer Art werden vorerst weiter ihren Dienst tun. **bm**

New interlocking in Veilsdorf will not go ahead

The construction of a new interlocking in Veilsdorf, Thuringia (line 6311 Hildburghausen – Eisfeld), which had been planned for 2027, will not take place. This is “due to a reprioritisation”, writes DB InfraGO. Consequently, the announced full closure of the line between 9 July 2027 and 30 July 2027 will not take place – and some of the few remaining Soviet-style EZMG signals on the German rail network will continue to operate for the time being. **bm**

SBB verlängert LST-Vertrag mit Siemens

Die Schweizerische Bundesbahnen AG (SBB) will ihr bestehendes Leitsystem Ittis mindestens bis in die 2030er Jahre weiterbetreiben – und verlängert zu diesem Zweck per Direktvergabe ihren „Partnerschaftsvertrag Bahnleittechnik“ mit dem Anbieter des Systems, Siemens Mobility. Dieser Vertrag soll nun bis 2045 laufen: „Spätestens“ dann soll ein neues digitales System Ittis abgelöst werden. Für die Verlängerung ist ein maximaler Kostenrahmen von 280 Mio. CHF vereinbart worden. Die Leistungen sollen von Siemens Mobility Schweiz in Wallisellen erbracht werden. Ittis ist seit über 30 Jahren in der Schweiz im Einsatz. „Ein Wechsel des Anbieters für die Betreuung des heutigen Leitsystems ist technisch und rechtlich ausgeschlossen“, begründet SBB die sog. „freihändige Vergabe“ (Direktvergabe). Siemens halte als Entwickler von Ittis das geistige Eigentum am System und verfüge als einziges Unternehmen über das nötige technische Wissen für den Weiterbetrieb.

2013 unterschrieben SBB und Siemens einen Vertrag zur Weiterentwicklung von Ittis, die eine Zusammenführung der anfangs 25 Leitstellen in vier Betriebszentralen zum Kern hatte. Dieser Vertrag lief bis Ende 2025. Für die Beschaffung eines neuen Bahnleittechniksystems wollen die SBB 2027 in einem modularen Ansatz mit mehreren Ausschreibungen beginnen. **bm**

SBB extends signalling contract with Siemens

Swiss Federal Railways (SBB) intends to continue operating its existing Ittis control system at least until the 2030s – and, to this end, is extending its “Railway Control Technology Partnership Agreement” with the system’s supplier, Siemens Mobility, via direct award. This contract is now set to run until 2045: a new digital system is to replace Ittis “by then at the latest”. A maximum budget of CHF 280 million has been agreed for the extension. The services are to be provided by Siemens Mobility Switzerland in Wallisellen.

Ittis has been in use in Switzerland for over 30 years. “A change of provider for the maintenance of the current control system is technically and legally impossible,” says SBB, explaining the so-called “direct award”. As the developer of Ittis, Siemens holds the intellectual property rights to the system and is the only company with the necessary technical expertise to continue its operation.

In 2013, SBB and Siemens signed a contract for the further development of Ittis, the core of which was the consolidation of the initial 25 control centres into four operations centres. This contract ran until the end of 2025. SBB intends to begin the procurement of a new rail control system in 2027 using a modular approach involving several tenders. **bm**

Siemens-Konsortium erhält Signaltechnik-Aufträge

Ein Konsortium aus Siemens Mobility, dem türkischen Zulieferer Elitel und dem rumänischen Unternehmen Imsat hat drei Aufträge zur Modernisierung von Signal- und Stellwerksystemen in Rumänien erhalten. Konsortialführer ist Siemens. Die Vergabe erfolgte durch den staatlichen Infrastrukturbetreiber CFR SA im Rahmen öffentlicher Ausschreibungen.

Mit einem Gesamtvolumen von rund 308 Mio. EUR geht es um eines der umfangreichsten Signaltechnik-Modernisierungsprogramme, die derzeit in Rumänien umgesetzt werden. Auf rund 560 Streckenkilometern soll an 66 Bahnhöfen, 13 Betriebsleitzentralen, 122 Bahnübergängen sowie mehr als 2000 Signalen gearbeitet werden. **bm**

Siemens consortium awarded signalling contracts

A consortium comprising Siemens Mobility, the Turkish supplier Elitel and the Romanian company Imsat has been awarded three contracts to modernise signalling and signal box systems in Romania. Siemens is the consortium leader. The contracts were awarded by the state-owned infrastructure operator CFR SA following public tenders.

With a total value of around EUR 308 million, this is one of the most extensive signalling modernisation programmes currently being implemented in Romania. Work is to be carried out on around 560 km of track, covering 66 stations, 13 control centres, 122 level crossings and more than 2,000 signals. **bm**

Alstom-geführtes Konsortium ertüchtigt Korridorabschnitt

Wie die rumänische CFR Infrastructura mitteilt, hat sie das aus Alstom und Terna bestehende Konsortium TrackWorks mit der Planung und Ausführung von Modernisierungsarbeiten auf einem 44 km langen Abschnitt des Orient/East-Med TEN-T Korridorausbauprojekts Craiova – Caransebeș beauftragt. Die Strecke soll für 22,5 t Achslast und 740 m Zuglänge aufgerüstet werden. Im vergangene Woche unterschriebenen Vertrag geht es um Phase 2 des Korridorausbaus zwischen Filiași – Igiroasa; Phase 1 ging ebenfalls an TrackWorks. Auch die Implementierung von ERMTS/ETCS L2 ist vereinbart worden. Der Netto-Vertragswert beläuft sich auf 1,8 Mrd. RON (342 Mio. EUR) bei 15 Jahren Laufzeit (inkl. vier Jahre Bauausführung) und wird finanziert aus dem Verkehrsprogramm 2021–2027, Haushaltsmitteln sowie „anderen rechtlich zulässigen Quellen“, wie die Infrastrukturbehörde mitteilt. Alstom ist für Zugsicherungs-, Telekom- und Traktionsstromsysteme zuständig; die griechische Firma Terna für Hoch- und Tiefbauarbeiten.

in

Alstom-led consortium to upgrade section of corridor

According to the Romanian company CFR Infrastructura, it has awarded the TrackWorks consortium – comprising Alstom and Terna – the contract to plan and carry out modernisation works on a 44 km section of the Craiova – Caransebeș phase of the Orient/East-Med TEN-T corridor development project. The line is to be upgraded to accommodate an axle load of 22.5 t and trains up to 740 m in length. The contract, signed last week, covers Phase 2 of the corridor expansion between Filiași and Igiroasa; Phase 1 was also awarded to TrackWorks. The implementation of ERMTS/ETCS Level 2 has also been agreed. The net contract value amounts to 1.8 billion RON (342 million EUR) over a 15-year term (including vier years of construction) and will be financed from the 2021–2027 transport programme, budgetary funds and “other legally permissible sources”, as stated by the infrastructure authority. Alstom is responsible for signalling, telecommunications and traction power systems; the Greek company Terna is responsible for civil engineering works.

in

ERTMS-Einführung rückt in noch weitere Ferne

Laut Norwegens aus dem Jahr 2015 stammendem „Nationalen Signalplan“ sollte die landesweite Ausrüstung mit dem Leitsystem ERTMS 2031 abgeschlossen sein. Seitdem ist das Einführungsdatum immer weiter verschoben worden: Im 2023 überarbeiteten Plan war dann von 2034 die Rede. Zuletzt wurde mit 2040 gerechnet. Jetzt ist, wie das Fachmedium Teknisk Ukeblad berichtete, in einer von der Behörde Jernbanedirektoratet, dem Infrastrukturbetreiber Bane Nor und der Fahrzeughaltungsgesellschaft Norske Tog ausgearbeiteten Analyse nicht mehr von einer Einführung vor den 2050er Jahren ausgegangen worden. In der Folge hat das norwegische Verkehrsministerium Jernbanedirektoratet beauftragt, in Abstimmung mit Bane Nor bis zum 15. März 2027 einen ganzheitlichen Plan für die Erneuerung des Signalsystems der norwegischen Eisenbahn vorzulegen. Als Grund für die erneute Verschiebung wird auf fortlaufende Verzögerungen seitens Alstom (Hauptlieferant der in den Zügen verbauten Technik), Siemens (Hauptlieferant für die Digitalisierung der Infrastruktur) und Hitachi, vormals Thales (Lieferant des Verkehrsleitsystems) verwiesen.

hz/bm

ERTMS roll-out recedes even further into the distance

According to Norway's “National Signalling Plan” from 2015, the nationwide roll-out of the ERTMS signalling system was due to be completed by 2031. Since then, the roll-out date has been repeatedly postponed: the plan revised in 2023 then mentioned 2034. Most recently, the target was set for 2040. Now, as reported by the trade publication “Teknisk Ukeblad”, an analysis drawn up by the Norwegian Railway Directorate (Jernbanedirektoratet), the infrastructure operator Bane Nor and the rolling stock management company Norske Tog no longer anticipates an introduction before the 2050s. Consequently, the Norwegian Ministry of Transport has commissioned the Norwegian Railway Directorate (Jernbanedirektoratet), in consultation with Bane Nor, to submit a comprehensive plan for the renewal of the Norwegian railway signalling system by 15 March 2027. The reason given for this further postponement is ongoing delays on the part of Alstom (the main supplier of the technology installed in the trains), Siemens (the main supplier for the digitalisation of the infrastructure) and Hitachi, formerly Thales (the supplier of the traffic control system).

hz/bm

Standort Arnstadt wird modernisiert

Hitachi Rail modernisiert sein Werk im thüringischen Arnstadt. Wie der Hersteller am 10. August 2026 mitteilte, sollen am Produktionsstandort für Bahntechnik im laufenden und kommenden Geschäftsjahr rund 7 Mio. EUR für die Überholung bestehender Gebäude ausgegeben werden, um diese „energieeffizient“ und „zeitgemäß“ zu gestalten. Durch die Maßnahmen sollen zudem rund 1000 m² zusätzliche Produktionsfläche entstehen. Das Werk Arnstadt übernahm Hitachi im Juni 2024, als es für 1,66 Mrd. EUR die Bahntechniksparte von Thales kaufte. In Arnstadt werden Signaltechnik, Weichenantriebe, Achszähler und digitale Stellwerke entwickelt und gefertigt. Im vergangenen Herbst eröffnete Hitachi am Standort ein Ausbildungszentrum.

bm

Arnstadt site to be modernised

Hitachi Rail is modernising its plant in Arnstadt, Thuringia. As the manufacturer announced on 10 August 2026, around EUR 7 million is to be spent at the rail technology production site during the current and coming financial years on refurbishing existing buildings to make them “energy-efficient” and “up to date”. The measures are also expected to create around 1,000 m² of additional production space. Hitachi Rail took over the Arnstadt plant in June 2024 when it acquired Thales's rail technology division for EUR 1.66 billion. Signalling technology, points actuators, axle counters and digital interlockings are developed and manufactured in Arnstadt. Last autumn, Hitachi opened a training centre at the site.

bm

Wir sind dort, wo Ihre Kunden sind.

Heft 11/26

120 Jahre SIGNAL+DRAHT - 26. SIGNAL+DRAHT-Kongress
12.11. - 13.11.26, Fulda

Heft 1+2/27

Jahrestagung EBA
25.02. - 26.02.27, Berlin

Heft 4/27

6. Fachtagung Eisenbahnrecht & Technik
20.04. - 21.04.27, Bonn

Änderungen vorbehalten

2026/2027



Weitere Infos:

Silke Härtel

040/237 14-227

silke.haertel@dvvmedia.com



Gegründet im Jahre 1906 und herausgegeben von DVV Media Group | Eurailpress, Hamburg
Founded in 1906 and published by DVV Media Group | Eurailpress, Hamburg

Freie Chefredaktion | Advising Chief Editors

Dipl.-Phys. Reinhold Hundt
reinhold.hundt.extern@dvvmedia.com
Ing. August Zierl
august.zierl.extern@dvvmedia.com

Freie Fachredaktion | Advising Specialist Editors

Dipl.-Ing. Roland F. Albert
rf.albert.extern@dvvmedia.com
Dipl.-Ing. (FH) Hartwig Schuster
hartwig.schuster.extern@dvvmedia.com

Verlagsredaktion | Staff Editors

Georg Kern
(Chefredakteur/Editor in chief Eurailpress)
Tel. +49 40 23714-144, georg.kern@dvvmedia.com

Dipl.-Journ. (FH) Jennifer Schacha

(Redaktionsleitung / Managing Editor)
Tel. +49 40 23714-281, jennifer.schacha@dvvmedia.com

Verlag | Publisher

DVV Media Group GmbH |
Heidenkampsweg 73-79, D-20097 Hamburg
Tel. +49 40 23714-100 | www.eurailpress.de/sd
Geschäftsführer | CEO: **Martin Weber**
Verlagsleiter | Publishing director: **Manuel Bosch**
Tel.: +49 40 23714-155 | manuel.bosch@dvvmedia.com

Anzeigen | Advertisements

Anzeigenleitung | Advertising mgt. Eurailpress: **Silke Härtel**
Tel.: +49 40 23714-227, silke.haertel@dvvmedia.com
Anzeigenverkauf | Advertising sales: **Silvia Sander**
Tel.: +49 40 23714-171, silvia.sander@dvvmedia.com
Anzeigentechnik | Ad Administration: **Nicole Junge**
Tel.: +49 40 23714-263, nicole.junge@dvvmedia.com

Gültig ist die Anzeigenpreisliste Nr. 59 vom 1. Januar 2026.
The valid advertisements price list is no. 59 of 1 January 2026.

Vertrieb | Distribution

Leiter Marketing & Vertrieb |
Marketing and distribution manager: **Markus Kukuk**
Tel.: +49 40 23714-291 | markus.kukuk@dvvmedia.com

Unternehmenslizenzen Digital / Print |
Enterprise licences digital / print:
lizenzen@dvvmedia.com

Leser- und Abonnenten-Service |

Reader and subscriber service

Tel.: +49 40 23714-260, service@dvvmedia.com

Erscheinungsweise | Publication frequency

Monatlich, zwei Doppelhefte im Jan./Feb. und Juli/Aug.
Monthly, two double issues in Jan./Feb. and July/Aug.

Bezugsbedingungen | Subscription conditions

Die Bestellung des Abonnements gilt zunächst für die Dauer des vereinbarten Zeitraumes (Vertragsdauer). Eine Kündigung des Abonnementvertrages ist zum Ende des Berechnungszeitraumes schriftlich möglich. Erfolgt die Kündigung nicht rechtzeitig, verlängert sich der Vertrag und kann dann zum Ende des neuen Berechnungszeitraumes schriftlich gekündigt werden.

Bei Nichtlieferung ohne Verschulden des Verlages, bei Arbeitskampf oder in Fällen höherer Gewalt besteht kein Entschädigungsanspruch. Zustellmängel sind dem Verlag unverzüglich zu melden.

Es ist ausdrücklich untersagt, die Inhalte digital zu vervielfältigen oder an Dritte (auch Mitarbeiter, sofern ohne personenbezogene Nutzerlizenzierung) weiterzugeben. The order for a subscription is initially valid for the duration of the agreed period of time (duration of contract). It is possible to terminate the subscription contract by giving written notice for the end of the invoicing period. If notice is not given in time, the contract is extended to the end of the new invoicing period, and it is then possible to give notice on it at the end of that period.

There is no right to claim compensation in the event of non-delivery for which the publisher is not to blame, industrial action or force majeure. Any delivery fault must be reported to the publisher immediately.

It is expressly prohibited to make digital copies of the contents or to pass them on to third parties (including employees, unless a personalised user licence has been granted).

Bezugsgebühren | Charges

Abonnement Inland jährlich 296,00 EUR inkl. Porto zzgl. MwSt.
Subscription Domestic EUR 296,00 for one year incl. P&P plus VAT.

Abonnement Ausland jährlich 341,00 EUR inkl. Porto
Abroad with a VAT number EUR 341,00 incl. P&P

Das Abonnement beinhaltet die jeweiligen Ausgaben gedruckt und digital sowie den Zugang zum EurailpressArchiv. The subscription includes each individual issue in printed, digital forms and also access to the Eurailpress archive.

Einzelheft 34,99 EUR inkl. MwSt. | Single issue 34,99 EUR incl. VAT

Copyright

Vervielfältigungen durch Druck und Schrift sowie auf elektronischem Wege, auch auszugsweise, sind verboten und bedürfen der ausdrücklichen Genehmigung des Verlages. Für unverlangt eingesandte Manuskripte und Abbildungen übernimmt der Verlag keine Haftung.

It is prohibited to make copies in printed, written or digital form in whole or in part except with the publisher's express permission. The publisher accepts no liability for unsolicited manuscripts and illustrations.

Druck | Printing company

Silber Druck GmbH & Co. KG, Lohfelden

INSERTENTENVERZEICHNIS | DIRECTORY OF ADVERTISERS

Bayka Bayerische Kabelwerke AG, Roth	7
BBL Bahnbau Lüneburg GmbH, Lüneburg	79
DVV Media Group GmbH, Hamburg	6, 14, 42, 58, 67, 85, 107, 111, 113, 125, 136
EBE Railway Systems GmbH, Wien	123
Elemaster SpA, Lomagna	41
ESA GmbH, Grimma	9
Funkwerk AG, Kölleda	U3
Hopf Elektronik GmbH, Rabenstein an der Pielach	27
ITK Engineering GmbH, Rülzheim	29
Knick Elektronische Messegeräte GmbH & Co.KG, Berlin	16
Knorr-Bremse Global-Rail-Holding GmbH, München	31
Kölner Verkehrsbetriebe AG, Köln	135
Kombud Group S.A., Random	97
Pilz GmbH, Ostfildern	17
Pintsch GmbH, Dinslaken	73
Powerlines Group GmbH, Woltersdorf	83
Progress Rail Inspection & Informations GmbH, Mannheim	91
ProVi GmbH, München	19
quattron GmbH, Frankfurt am Main	13
Railcomplete AS, N-Lysaker	15
Scheidt & Bachmann Signalling Systems GmbH, Mönchengladbach	18
Siemens AG, München	39
Signon Deutschland GmbH, Berlin	11
Systems Lab 21 GmbH, Potsdam	103
telent GmbH, Backnang	49
Voestalpine Signaling Austria GmbH, Zeltweg	U4
W&S Technik GmbH, Castrop-Rauxel	7
Zelisko GmbH, Mödling	U2

In dieser Ausgabe finden Sie eine Beilage der DVV Media Group GmbH, Hamburg. Wir bitten um freundliche Beachtung.

In this issue you will find a supplement of DVV Media Group GmbH, Hamburg. We kindly ask for your attention.

Das Inserentenverzeichnis dient nur zur Orientierung der Leser. Es ist kein Bestandteil des Insertionsauftrages. SIGNAL+DRAHT übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit.

The Directory of Advertisers is provided for the reader's guidance only. It does not form part of the advertising contract. SIGNAL+DRAHT does not guarantee its correctness and completeness.

www.eurailpress.de/sd
ISSN 0037-4997



MESA ALL:NEXO

CONNECTING RAILWAYS



The future of train communication starts at InnoTrans 2026.
With our innovative and tested FRMCS train radio solutions.

At InnoTrans we will showcase **MESA all:nexo®** train radio systems, that natively support 5G/FRMCS as well as multimode and will be available with the official introduction of FRMCS. Learn also, how our migration strategies are paving your transition from GSM-R to FRMCS and MCX for your existing train radio systems.

Are you ready for the cyber resilience act?

The first requirements of the Cyber Resilience Act (CRA) will come into force in September 2026.

Are you ready? If not, we can help with **RMX all:nexo®** – the open CRA solution for Funkwerk products and third-party on-board systems.

Come visit Funkwerk at **InnoTrans in hall 4.1 on stand 420.**



READ MORE
[FUNKWERK.COM/ALLNEXO](https://funkwerk.com/allnexo)



22-25 SEP 2026 · BERLIN
HALL 4.1 – STAND 420



**Besuchen Sie uns
in Berlin bei der:**

INNOTRANS 2026

22. - 25.09.2026

Halle 21B | Stand 150

SYSTEM PERFORMANCE ON TRACK®

**Besuchen Sie uns auf der
internationalen Fachmesse
für Verkehrstechnik.**

Auf der InnoTrans 2026 zeigt voestalpine Railway Systems, wie integrierte Systemlösungen die Zukunft der Bahninfrastruktur gestalten.

Als führende Systemanbieterin denken wir Bahninfrastruktur ganzheitlich: Wir verbinden innovative Produkte, digitale Lösungen und umfassende Expertise zu leistungsstarken Systemlösungen aus einer Hand.

Besucher:innen erwartet ein breites Spektrum an Produktneheiten – von neuen Herzstücklösungen für eine höhere Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit bis hin zu zukunftsweisende Systeme für den urbanen Schienenverkehr. Ergänzt werden diese durch digitale Lösungen für Monitoring,

Asset Management und datenbasierte Instandhaltungsstrategien, die dazu beitragen, Infrastruktur effizienter, nachhaltiger und leistungsfähiger zu betreiben.

Entdecken Sie, wie wir gemeinsam mit unseren Kund:innen die Bahn von morgen gestalten – mit intelligent vernetzten Lösungen, die Verfügbarkeit steigern, Ressourcen schonen und nachhaltige Mobilität vorantreiben.

**Erleben Sie echte System Performance on Track®
live auf unserem Messestand.**

**Besuchen Sie uns in Halle 21B | Stand 150
22. - 25. September 2026 | InnoTrans Berlin**