



# SIGNAL+DRAHT

SIGNALLING & DATACOMMUNICATION

**MUSTER**

**13** **Zumutbarkeitskriterien für die Leit- und Sicherungstechnik**  
Andunt velenti nossimu sa-pelest erferit recatibus, atius rendelluptat.

**28** **Fernzugriff auf Testanlagen im Rahmen von Abnahmeprüfungen**  
Remote access to test facilities as part of acceptance testing

**39** **Automatisierter Betrieb unter GoA 2 im Digitalen Knoten Stuttgart**  
Automatic operation with GoA 2 for the Stuttgart Digital Node

**Eurail**  
press

Archiv

**MUSTER**

# Ohne Umwege zu Ihren Fachartikeln

Jetzt upgraden und Zugriff auf das **gesamte Eurailpress-Archiv + DER NAHVERKEHR** erhalten!

Abonnenten  
erhalten bis zu  
**50 %  
Rabatt**

-  44.000 Beiträge
-  laufende Aktualisierung
-  individuelle Suchoptionen
-  Volltextsuche
-  Sofort-Download

DER **EI**  
EISENBAHN  
INGENIEUR

**ETR**  
ELEKTROTECHNISCHES  
HANDBUCH

**EIK**  
ELEKTROTECHNISCHES  
KOMPENDIUM

**RAIL**  
DEUTSCHLAND

**Rail**  
BUSINESS

bahn  
manager

**GÜTERBAHNEN**  
POLITIK & WIRTSCHAFT

**DER NAHVERKEHR**  
WIRTSCHAFTS- UND VERKEHRSPOLITIK

**Eurail**  
press

[www.eurailpress.de/upgrade-archiv-erp](http://www.eurailpress.de/upgrade-archiv-erp)

Archiv



## Die Weiche der Zukunft – Ein Umbruch in der Bahntechnik

The turnout of the future –  
a game changer in railways

**D**ie Weiche ist seit jeher ein kritisches Element der Eisenbahninfrastruktur und bei vielen Betreibern eine häufige Störungsquelle. In den letzten Jahren haben zahlreiche Unternehmen, oft branchenfremd, versucht, die Verfügbarkeit von Weichen durch digitale Ansätze zu verbessern. Zwar konnten gewisse Fortschritte erzielt werden, doch ein wirklicher Durchbruch blieb bisher aus.

Das EULYNX-Konzept, das die Trennung von zentraler Stellwerkstechnik und dezentralen Subsystemen vorsieht, könnte der Schlüssel zu einem echten Quantensprung sein – vorausgesetzt, Bahnbetreiber erkennen die Chancen des Gesamtsystems, und die Industrie bietet passende Lösungen an.

Die Weiche der Zukunft ist ein intelligentes System: Design-integrierte („embedded“), robuste Sensoren von Plug and Play gelieferten Systemweichen stellen kontinuierlich Informationen über den technischen Zustand und inspektionsrelevante Parameter zur Verfügung. Ein integrierter Objekt-Controller fungiert dabei als zentrale Schnittstelle. Dank der Einbeziehung von signaltechnisch sichererer Sensorik in die RAMS-Analyse (Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit) der Weiche kann der Hersteller bereits ab Werk verlängerte Inspektions- und Wartungsintervalle vorgeben. Dadurch lassen sich Arbeiten im Gleis erheblich reduzieren.

Damit kann in der Zukunft die Verfügbarkeit maximiert und Performance on Track erreicht werden, sofern die Betreiber diesen Weg mitgehen.

**F**rom the very beginning, the turnout has been a critical element of the railway infrastructure and it has also been a frequent root cause of disruption for many operators. In recent years, many companies, often from outside the rail industry, have tried to improve the availability of turnouts by using digital approaches. This has led to some improvements, but not to any real breakthroughs.

The EULYNX concept, which provides the separation of the central interlocking from the associated sub-systems, could be the key to the required breakthrough, provided the railways recognise the opportunities offered by the integrated system and the industry provides the appropriate solutions.

The turnout of the future is an intelligent system: embedded, robust “plug-and-play” sensors provide continuous information on the functional condition and inspection-relevant parameters. An integrated Object Controller serves as the central interface. By fully integrating the safety-critical sensors and their functions into the turnout’s RAMS analysis (reliability, availability, maintainability, safety), the producer can guarantee extended inspection and maintenance intervals. This approach means that the time that people are required to spend on the track can be reduced to a minimum.

As such, availability can be optimised in the future and Performance on Track can be achieved, as long as the operators support this approach.

# MUSTER



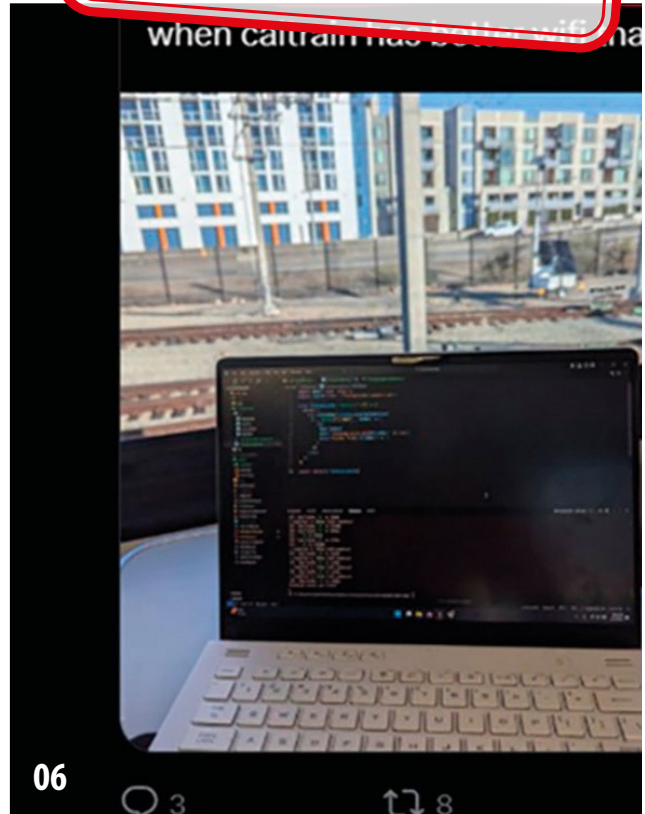
Liebe Leserinnen und Leser,  
 am 7. und 8. November 2024 fand der diesjährige SIGNAL+DRAHT-Kongress in Fulda statt. Dabei haben rund 280 Teilnehmer die Frage diskutiert, welchen Beitrag die Digitalisierung zur Verringerung der Komplexität bei Bau und Betrieb des schienengebundenen Verkehrs leistet. Konkrete Erfahrungen aus der Sanierung der Riedbahn und dem Digitalen Knoten Stuttgart sowie Lösungen aus den Niederlanden und Österreich zeigten die vielfältigen Möglichkeiten. Die überzeugende Botschaft von ProRail aus den Niederlanden war: Vor der Einführung von ETCS sollten die Bereinigung und Optimierung des Gleislayouts in den Knoten stehen – Simulationen helfen, das optimale Layout zu entwickeln. Beeindruckt waren die Teilnehmer von den Lösungsansätzen für FRMCS. Obwohl der Spezifikationsprozess noch nicht abgeschlossen ist, hat die Industrie deutlich gemacht, dass Migrationslösungen für FRMCS bereitstehen werden, die sich nahtlos in das bestehende Ökosystem aus analogem und digitalem Zugfunk integrieren lassen. Auf dem Fahrzeug werden keine umfassenden Neuinstallationen notwendig. Über den Digitalen Knoten Stuttgart berichten wir auch in der vorliegenden Ausgabe von SIGNAL+DRAHT. Dabei geht es um die Ausrüstung von 500 Triebzügen mit ETCS-Level 2-Systemen. Wir wünschen Ihnen und Ihren Familien ein frohes Weihnachtsfest, Erfolg im kommenden Jahr und vor allem Gesundheit!

Dear readers,  
 This year's SIGNAL+DRAHT Congress took place in Fulda from 7 to 8 November 2024. Around 280 participants discussed the question of what contribution digitalisation can make in reducing the complexity of the construction and operation of rail-bound transport. Specific experience from the reconstruction of the Ried Railway and the Stuttgart Digital Node, as well as solutions from the Netherlands and Austria pointed to a number of multifaceted opportunities. The convincing message from ProRail from the Netherlands was that the reassessment and optimisation of the track layout should come before the implementation of ETCS in the nodes. Simulations can help develop the optimal layout. The participants were impressed by the problem-solving approach to FRMCS. Even though the specification process has not yet been concluded, the industry has made it clear that migration solutions for FRMCS will be available and that they will be able to be seamlessly integrated into the existing ecosystem of analogue and digital train radio. No comprehensive new installations will be necessary on the vehicles. This current edition also reports on the Stuttgart Digital Node. This involves the retrofitting of 500 multiple units with ETCS Level 2 systems. We wish you and your families a merry Christmas, great success in the upcoming year and above all good health!

**August Zierl**

**Reinhold Hundt**

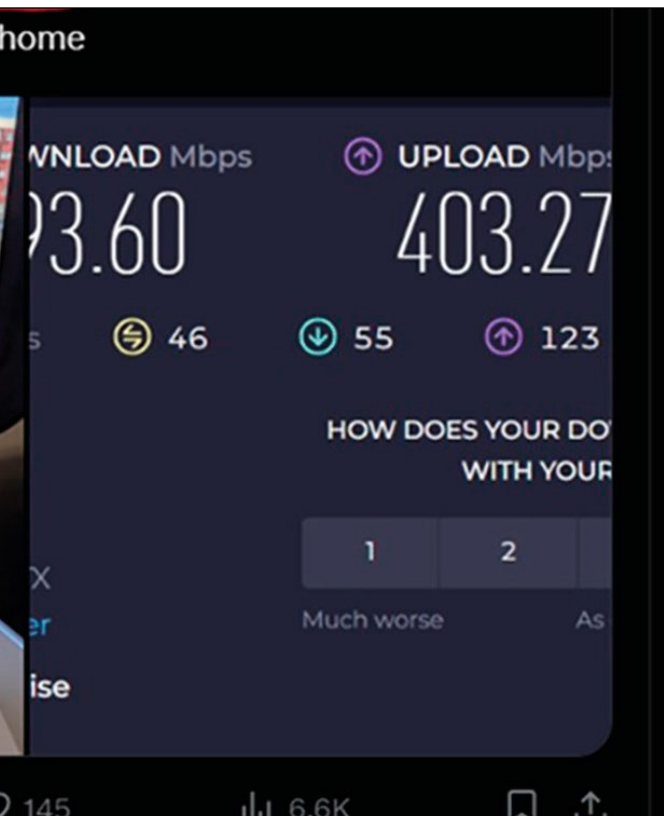
Chefredakteure | Advising Chief Editors



## Internationaler Fachbeirat

**Klaus Altehave**, Signon Deutschland GmbH, Berlin | **Bernhard Appel**, Hitachi Rail GTS Austria GmbH, Wien | **René Berger**, Voestalpine Signaling Austria GmbH, Wien | **Dr.-Ing. Thorsten Büker**, quattron GmbH, Aachen | **Mahir Celik**, safeTrail GmbH, Saarbrücken | **Alessandro de Grazia**, Mermec Deutschland GmbH, Berlin | **Radek Dobiáš**, SŽ, Prag | **Valentin Doytchev**, Bulgarische Staatsbahnen, NRIC, Sofia | **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 | **Reto Germann**, 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 | **Andreas Hinterschweiger**, Westermo Data Communications GmbH, Waghäusel | **Dr. István Hrivnák**, Tran-SYS Ltd., Budapest | **Dirk Isola**, ipw Ingenieurgesellschaft, Braunschweig | **Steffen Jurtz**, Nextrail GmbH, Berlin | **Szymon Kniaż**, Kombud Group, Radom | **Johannes Köbler**, Bayerische Kabelwerke AG, Roth | **Branko Korbar**, Kroatische Eisenbahnen (HŽ), Zagreb | **Dr.-Ing. Rolf-Dieter Krächter**, VDB Service GmbH, Berlin | **Andreas Langer**, ICS Informatik Consulting Systems GmbH, Stuttgart | **Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer**, DLR e.V., Institut für Verkehrssystemtechnik, Braunschweig | **Dr.-Ing. Michael Lenders**, Scheidt & Bachmann GmbH, Mönchengladbach | **Helmut Liebming**, Voestalpine Signaling Siershahn GmbH, Siershahn | **Dr.-Ing. Matthias Martin**, Siemens Mobility AG, Wallisellen | **Andreas Medek**, Siemens Mobility Austria GmbH, Wien | **Dr.-Ing. Daria Menzel**, CERRS Kompetenzzentrum Bahnsicherungstechnik GmbH, Dresden | **Thomas Milewski**, Pintsch GmbH, Dinslaken | **Dr. Oleg**

# MUSTER



### 03 Helmut Liebminger

**Auf ein Wort: Die Weiche der Zukunft – Ein Umbruch in der Bahntechnik**

**Statement: The turnout of the future – a game changer in railways**

### 06 Jeremy Haskey | Ken Cowley | Mark Barrett

**Konnektivität für Bahnreisende mit Hochgeschwindigkeits-mmWave-Technologie**  
**Rail passenger connectivity with high-speed mmWave technology**

Nasedkin, Petersburger Staatl. Universität für Eisenbahnverkehr/Signaltechnik, St. Petersburg | **László Pósalaki**, MÁV ZRt., HU-Budapest | **Michael Osterkamp**, Progress Rail Inspection & Information Systems GmbH, Bad Dürkheim | **PhD. Marek Pawlik**, Railway Research Institute, Warschau | **Frank Peters**, Zöllner Signal GmbH, Kiel | **Marián Roman**, Eisenbahnen der Slowakischen Republik (ŽSR), Bratislava | **Markus F. Rothbauer**, TÜV Süd Schweiz AG, Zürich | **Dr. Guido Rumpel**, Siemens Mobility GmbH, Braunschweig | **Christian Sagmeister**, ÖBB-Infrastruktur AG, Wien | **Christian Schmidt**, Hanning & Kahl GmbH & Co KG, Oerlinghausen | **Prof. Dr.-Ing. habil. Lars Schnieder**, ESE Engineering und Software Entwicklung GmbH, Braunschweig | **Dr. Robert Schönauer**, 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 | **Patrick Steinebach**, DB InfraGO AG, Frankfurt/M. | **Miroslav Stojkovic**, Serbische Eisenbahnen (ŽS), Belgrad | **Dr. Timo Strobel**, Hitachi Rail GTS Deutschland GmbH, Ditzingen | **Detlev K. Suchanek**, GRT Global Rail Academy and Media GmbH/PMC Media, Hamburg | **Michael Thiel**, Fraunhofer Sensor Technology Group, St. Marienkirchen | **Péter Tóth**, Prolan Group, Budakalász | **Prof. Dr.-Ing. Jochen Trinckauf**, Technische Universität, Dresden | **Patrick Trost**, Stadler Signalling Germany GmbH, Braunschweig | **Laurenz Trunner**, EBE Solutions, Wiener Neudorf | **Torsten Vogel**, PSI Transcom GmbH, Berlin | **Bernhard Wahl**, Obermeyer Infrastruktur GmbH & Co. KG, Köln | **Christian Weiß**, Dr. techn. Josef Zelisko Fabrik für Elektrotechnik und Maschinenbau Gesellschaft m.b.H., Mödling | **Peter Wigger**, TÜV Rheinland InterTraffic GmbH, Köln | **Anton Zahner**, HIMA Paul Hildebrandt GmbH, Brühl

**13 Matthias Barz | Dana M...**  
**Einführung von Zumutbarkeitskriterien in der Leit- und Sicherungstechnik**  
**The introduction of reasonableness criteria into signalling and safety technology**

**19 Jesper Näsström**  
**Die gemeinsame Sicherheitsmethode zur Risikobewertung CSM-RA**  
**The common safety method for CSM-RA risk acceptance**

**28 Daniel Lieb | Thomas Gentner | Michael Walter**  
**„Remote Testing“ – Fernzugriff auf Testanlagen im Rahmen von Abnahmeprüfungen**  
**“Remote testing” – remote access to test facilities as part of acceptance testing**

**33 Stefanie Steinbring**  
**Entwicklung von standardisierten LST-Komponenten – Herausforderungen an das Lifecycle Management**  
**Development of standardised CCS components – challenges to lifecycle management**

**39 Felix Specht | Johannes Köstlbacher | Benjamin Lesage | Olivier Lupant**  
**Automatisierter Betrieb unter GoA 2 im Digitalen Knoten Stuttgart**  
**Automatic operation with GoA 2 for the Stuttgart Digital Node**

**47 Norbert Aranyos | Ádám Benda | Péter Tóth**  
**Rekonstruktion des Weichenbereichs der „geraden“ Weichen durch Errichtung von PRORIS-H**  
**Reconstruction of the “even” points area with a PRORIS-H interlocking system**

**56 Kurzberichte | Newsflash**

**58 Impressum | Imprint**



#### Titelbild / Cover

Schöne Weihnachten wünscht die Redaktion mit dieser Ansicht aus Warnemünde.  
 The editorial team wishes you a Merry Christmas with this view from Warnemünde.

Quelle / source: M. Bosch



#### Eurailpress Fachartikelarchiv | Archive of specialist articles

Alle Fachartikel sind dauerhaft unter [www.eurailpress.de/archiv/](http://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/](http://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.

# Konnektivität für Bahnreisende mit Hochgeschwindigkeits-mmWave-Technologie

## Rail passenger connectivity with high-speed mmWave technology

Jeremy Haskey | Ken Cowley | Mark Barrett

Caltrain, eine wichtige S-Bahn-Linie der San Francisco Bay Area, hat ein umfassendes Elektrifizierungsprojekt in Angriff genommen, das auf die Modernisierung ihrer Flotte und die Verbesserung des Fahrgastkomforts abzielt. Im Rahmen dieser Initiative wurde der Bedarf an einer zuverlässigen und schnellen Konnektivitätslösung ermittelt, um die wachsende Nachfrage nach Internetzugang an Bord zu decken. Um dieses Problem zu lösen, schlossen sich Alstom und seine Tochtergesellschaft Nomad Digital mit Blu Wireless, einem in Bristol ansässigen Spezialisten für mmWave-Technologie, zusammen. Gemeinsam haben sie eine hochmoderne drahtlose Konnektivitätslösung implementiert, die einen schnellen und nahtlosen Internetzugang im gesamten Schienennetz ermöglicht und sicherstellt, dass die Fahrgäste auch während der Hauptreisezeiten in Verbindung bleiben.

### 1 Die Herausforderung

Wie viele andere Bahnunternehmen sah sich auch Caltrain mit dem wachsenden Druck konfrontiert, sich zu modernisieren und den sich verändernden Bedürfnissen seiner Fahrgäste gerecht zu werden. Eines der Hauptprobleme war das bestehende Wi-Fi-System, das unter einer uneinheitlichen und begrenzten Abdeckung litt, insbesondere in Gebieten mit schlechtem Mobilfunkempfang. Dies führte bei den Fahrgästen häufig zu Frustration, da der Internetzugang während der Fahrt unzuverlässig war.

Die Elektrifizierung der Caltrain-Pendlerlinie, die San Francisco über das Silicon Valley mit San Jose verbindet, war schon seit Jahrzehnten in Planung. Erste Machbarkeitsstudien wurden bereits 1992 durchgeführt, aber erst 2017 begannen die Bauarbeiten für ein neues Oberleitungssystem auf der Strecke, für die auch eine Flotte moderner KISS-Züge von Stadler beschafft wurde. Diese Züge ermöglichen nicht nur schnellere Fahrzeiten und geringere Emissionen, sondern das Projekt bot auch die Möglichkeit, die Probleme beim Internetzugang von Caltrain zu lösen.

Die Idee, neben der neuen Oberleitungsinfrastruktur ein Breitband-Funksystem zu installieren, war nicht neu. Tatsächlich hatte Nomad Digital bereits 2007 erste Wi-Fi-Lösungen mit 5-GHz-Funkgeräten in den älteren Dieselzügen von Caltrain getestet. Diese Versuche wurden jedoch auf Eis gelegt, solange das lang erwartete Elektrifizierungsprojekt nicht abgeschlossen war.

Im Rahmen der Aufrüstung suchte Caltrain nach einem leistungsstarken drahtlosen Konnektivitätssystem, das den Fahrgästen auf der gesamten elektrifizierten Strecke zuverlässiges Hochgeschwindigkeitsinternet bietet. Die Lösung musste die besonderen Herausforderungen der kalifornischen Bahnumgebung meistern, einschließlich Problemen wie Co-Channel-Interferenzen, und ein naht-

Caltrain, a major commuter rail line serving the San Francisco Bay Area, has embarked on a comprehensive electrification project aimed at modernising its fleet and enhancing its passenger experience. The need for a reliable and high-speed connectivity solution to meet the growing demand for onboard internet access has been identified as part of this initiative. To address this, Alstom and its subsidiary Nomad Digital have partnered with Blu Wireless, a Bristol-based specialist in mmWave technology. Together, they have implemented a cutting-edge wireless connectivity solution designed to deliver fast and seamless internet access throughout the rail network, thereby ensuring that passengers stay connected even during peak travel times.

### 1 The challenge

Like many railway providers, Caltrain faced growing pressure to modernise and meet the evolving needs of its passengers. One of the key issues was their existing Wi-Fi system, which suffered from inconsistent and limited coverage, especially in areas with poor cellular reception. This led to frequent passenger frustration due to unreliable internet access during journeys.

The electrification of Caltrain's commuter line, which connects San Francisco with San Jose via Silicon Valley, had been in the works for decades. Initial feasibility studies were conducted as far back as 1992, but it wasn't until 2017 that construction began on a new overhead power system to support a fleet of modern Stadler KISS trains. These trains would offer faster journey times and reduced emissions, but the project also presented an opportunity to address Caltrain's connectivity challenges.

The idea of installing a broadband radio system alongside the new overhead power infrastructure had been recognised for years. In fact, Nomad Digital had been testing early Wi-Fi solutions using 5 GHz radios on Caltrain's older diesel trains as far back as 2007. However, these trials were put on hold, waiting for the long-anticipated electrification project to move forward. As part of this upgrade, Caltrain sought a high-performance wireless connectivity system that would provide its passengers with reliable, high-speed internet across the entire electrified route. The solution needed to overcome the unique challenges posed by the Californian rail environment, including issues such as co-channel interference, and ensure a seamless experience for all the passengers travelling between San Francisco and San Jose.

loses Erlebnis für alle Fahrgäste auf der Strecke zwischen San Francisco und San Jose gewährleisten.

## 2 Die Lösung

Die Konnektivitäts Herausforderungen von Caltrain wurden durch die Implementierung einer leistungsstarken mmWave-Lösung gelöst, die auf Hochgeschwindigkeitstransportumgebungen zugeschnitten ist. Dieses System erfüllt die speziellen Anforderungen an störungsfreie Netzwerkdienste mit hoher Kapazität.

Caltrain hatte, wie viele andere Bahnbetreiber auch, mit Kanalinterferenzen in herkömmlichen Wi-Fi-Netzwerken zu kämpfen. Um dieses Problem zu lösen, entschieden sich Alstom und Nomad Digital für ein mmWave-System, das im lizenzfreien Frequenzbereich von 57–71 GHz betrieben wird, wodurch Interferenzen mit anderen Netzwerken erheblich reduziert werden, was in dicht besiedelten Gebieten wie der San Francisco Bay Area eine zentrale Herausforderung darstellt.

Entlang der 80 km langen Strecke zwischen San Francisco und San Jose liefert das Netz Bandbreiten von bis zu 2 Gbit/s an den Zug. Dies gewährleistet schnellere und zuverlässigere Internetverbindungen für die Fahrgäste, minimiert Überlastungen und bietet eine nahtlose Internetversorgung während der Fahrt.

Alstom hat auch ein IP/MPLS-Switched-Ethernet-Backhaul-Netzwerk eingerichtet, um einen robusten Datentransport von den streckenseitigen Netzwerkgeräten zum Betriebskontrollzentrum zu gewährleisten. Das Backhaul wurde sorgfältig auf der Grundlage der Zugfrequenz dimensioniert, um genügend Kapazität zur Unterstützung des aktuellen Verkehrs aufzubauen, verbunden mit der Ausfallsicherheit im Falle von Netzwerkunterbrechungen. So wird sichergestellt, dass das Netz auch bei einer Unterbrechung der Glasfaserkabel über genügend Kapazität verfügt, um die volle Last zu tragen und die Konnektivität ununterbrochen aufrechtzuerhalten.

Das Betriebskontrollzentrum spielt eine entscheidende Rolle bei der Verwaltung des gesamten Netzes, einschließlich des Schutzes durch Cybersecurity und der Verbindungen zu den Internetanbietern. Die bestehende Glasfaseranlage und die Stromversorgung wurden erweitert, um jede Funkanlage entlang der Strecke zu unterstützen und so einen einheitlichen Service auf der gesamten Strecke zu gewährleisten. Diese erweiterte Reichweite optimiert das Netzwerkdesign, reduziert die Anzahl der streckenseitigen Installationen, senkt die Infrastrukturkosten und erleichtert die Wartung.

## 3 Eine Partnerschaft für die Zukunft

Die mmWave-Lösung wurde aufgrund ihrer einzigartigen Vorteile ausgewählt, wie unter anderem weniger Zugangspunkte sowie eine vereinfachte Installation, wodurch Unterbrechungen während des Einbaus minimiert werden. Das robuste Backhaul-Netzwerk stellt sicher, dass das System potenzielle Netzwerkausfälle ohne Beeinträchtigung der Fahrgäste bewältigen kann, wodurch Betriebsausfälle und damit verbundene Kosten vermieden werden.

Wie bei vielen Bahnprojekten war eine langfristige Planung entscheidend. Der Lebenszyklus des Systems von 20 bis 30 Jahren wurde berücksichtigt und sieht regelmäßige Technologie-Updates vor. Dadurch wird sichergestellt, dass das System im Laufe der Zeit anpassungsfähig bleibt und die Partnerschaft für die laufende Wartung und Verbesserung vertieft wird.

Heute unterstützen die 65 Masten und Schilderbrücken für die 25-kV-Oberleitungen entlang der Strecke nicht nur die neue elektrische Infrastruktur von Caltrain, sondern tragen auch die mmWave-Basisstationen, die sichere und schnelle Internetverbindungen be-

## 2 The solution

Caltrain's connectivity challenges have been addressed by implementing a high-performance mmWave solution that is tailored to high-speed transport environments. This system meets specific requirements for uninterrupted, high-capacity network services.

Like many rail operators, Caltrain faced challenges with channel interference in traditional Wi-Fi networks. To overcome this, Alstom and Nomad Digital selected an mmWave system that operates in the 57–71 GHz license-exempt spectrum, which significantly reduces the interference from any other networks, a key concern in densely populated areas like the San Francisco Bay Area.

The network provides the train with bandwidths of up to 2 Gbps along the 50-mile (80 km) route between San Francisco and San Jose. This ensures faster, more reliable internet connections for passengers, thereby minimising congestion and offering a seamless online experience while travelling.

Alstom has also deployed an IP/MPLS switched Ethernet backhaul network to ensure robust data transport from the trackside radios to the operational control centre. The backhaul has been carefully dimensioned based on the frequency of the trains, thereby building capacity to support the current traffic with a



**Bild 1: Die „fit and forget“-Installation der Basisstation auf einem Oberleitungsmast**

Fig. 1: The “fit and forget” installation of a base on an overhead power mast

# MUSTER

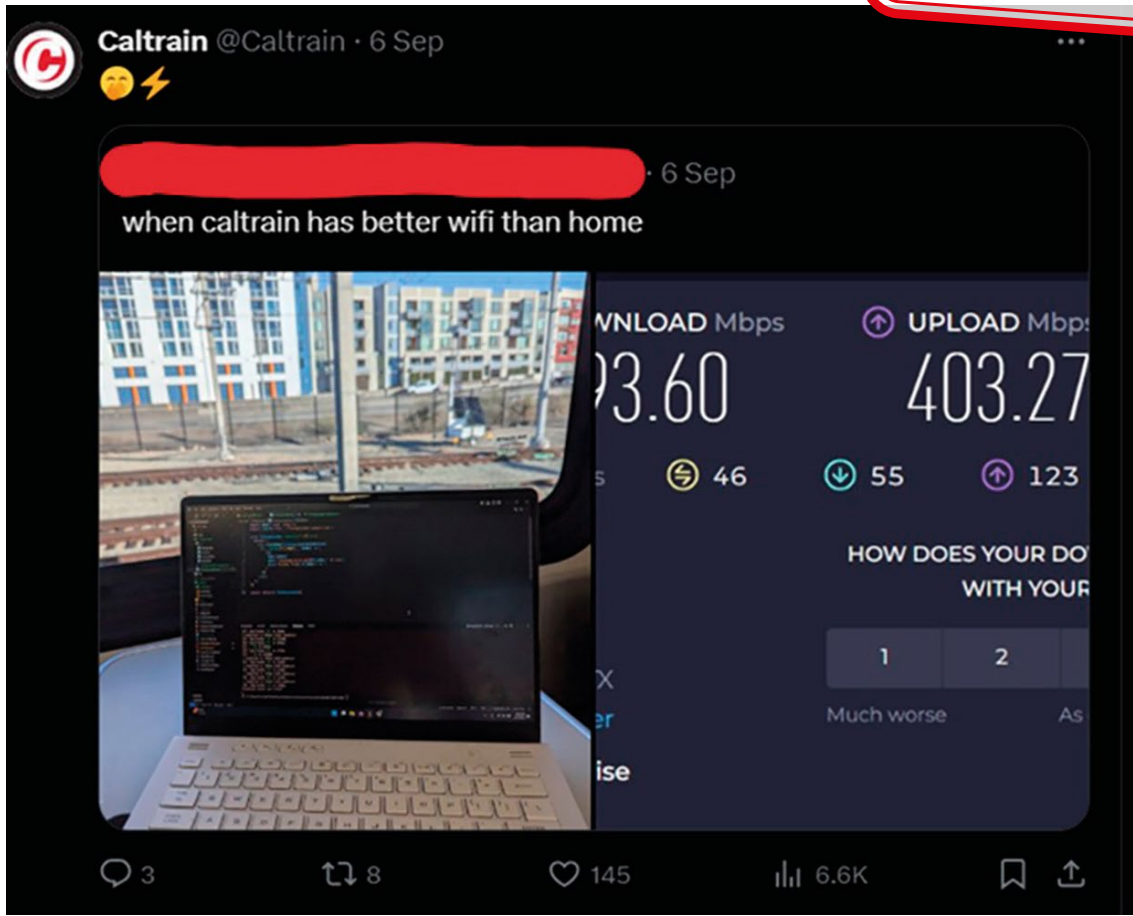


Bild 2: Das Angebot wurde gut angenommen – ein Beitrag auf X.  
 Fig 2: The service was well received – a post on X.

reitstellen und es den Fahrgästen ermöglichen, während der Fahrt zu arbeiten, zu streamen und in Verbindung zu bleiben (Bild 1).

#### 4 Die Vorteile

In der Anfangsphase des Einsatzes der mmWave-Technologie konnten die Fahrgäste beeindruckende Download-Geschwindigkeiten von bis zu 198 Megabit pro Sekunde nutzen. Diese Geschwindigkeiten werden jedoch in Zukunft gedrosselt, um ausreichende Kapazitäten für künftiges Wachstum zu gewährleisten und Spielraum für zusätzliche Nutzer zu schaffen. Dieser Ansatz ermöglicht es, ein qualitativ hochwertiges Internet-on-Board (IOB)-Erlebnis aufrechtzuerhalten, wenn die Nachfrage der Fahrgäste steigt (Bild 2), und gewährleistet langfristige Skalierbarkeit und Zuverlässigkeit:

- Durch die Strahlformung im Zugfunkgerät und in der Basisstation an der Strecke war es nicht erforderlich, die Azimut- und Downtilt-Einstellungen herkömmlicher Wi-Fi-Antennen an der Strecke zu ändern – es genügte, die Basisstation vertikal mit der Rückseite des Funkgeräts an den Oberleitungsmasten zu montieren, um alles zu erreichen.
- Die schmale Fresnel-Zone, die mit den verwendeten Hochfrequenzen verbunden ist, bedeutete, dass es nicht notwendig war, die Antennen oberhalb des Oberleitungssystems zu installieren, um eine Abdeckung zu erhalten – die Montage direkt am Mast innerhalb des Oberleitungs-“Tunnels“ funktionierte perfekt.
- Die Funkgeräte waren über eine einfache Webschnittstelle leicht zu konfigurieren und funktionierten als unkomplizierte Ethernet-Brücken zwischen Zug und Strecke.

certain resilience in the event of any network disruptions. This design ensures that the network has enough capacity to carry the full load and maintain uninterrupted connectivity even if there is a break in the fibre.

The operational control centre plays a critical role in managing the entire network, including any cybersecurity protection and internet service provider links. The existing fibre plant and power supply have been extended to support each radio installation along the track, thereby ensuring consistent service throughout the route. This extended range optimises the network design, which reduces the number of trackside installations, lowers infrastructure costs and makes maintenance easier.

#### 3 A partnership built for the future

The choice of the mmWave solution was driven by its unique advantages, including fewer access points and simplified installation, thereby minimising any disruptions during deployment. The resilient backhaul network ensures that the system can handle any potential network failures without impacting the passengers, so as to avoid any operational downtime and associated costs.

As with many rail projects, long-term planning was key. The 20 to 30-year lifecycle of the system has been accounted for along with the provisions on regular technology updates. This ensures that the system will remain adaptable over time and deepens the partnership for any ongoing maintenance and enhancements.

Today, the 25 kV overhead power lines on 65 masts and gantries not only support Caltrain’s new electrical infrastructure,



# MUSTER

- Die Anbringung der Funkgeräte am vorderen und hinteren Ende der Züge (Bild 3) ermöglichte einen einfachen „hand over hand“ (make before break).
- Die außergewöhnliche Reichweite – bis zu 1,25 km von einer Basisstation aus – ermöglichte eine wirtschaftliche Abdeckung der gesamten Strecke, da die Kosten für den Einsatz der Technologie am Gleis immer höher sind als die Kosten für die Technologie selbst.
- Bei den Frequenzen von 57 bis 71 GHz musste nicht in Betracht gezogen werden, dass andere wichtige Systeme wie z. B. die positive Zugsteuerung (PTC), die weit unten im Spektrum arbeiten, beeinträchtigt werden könnten.

Nomad war in der Lage, alle Funkgeräte mit den Randschaltern in den „Control Points“ (Signalhäusern) zu verbinden, wobei nur ein einziges 12-adriges Kabel im bestehenden Glasfasernetz von Caltrain verwendet wurde. Zwei redundante Betriebszentren in den Caltrain-Haupt- und -Reserveeinrichtungen in San Jose und Menlo Park bieten eine vollständige Redundanz der Backend-Internet-Konnektivität, wobei eine ringförmige Gleisarchitektur das Bild der „Hochverfügbarkeit“ abrundet.

Das Projekt befindet sich bereits in der „Soft Launch“-Phase zusammen mit den ersten neuen Zügen, die auf der Caltrain-Strecke fahren. Alle Systeme waren für den kommerziellen Betrieb am 21. September einsatzbereit.

## 5 Verbesserte Zug-zu-Strecke-Verbindung: Abwägung von Leistung, Frequenzverfügbarkeit und zukünftigem Bedarf

Mit der steigenden Nachfrage nach Breitbandverbindungen in Zügen, die sowohl von Freizeitreisenden, die ein verbessertes Erlebnis suchen, als auch von Geschäftsreisenden, die Produktivitätstools benötigen, stehen Bahnbetreiber vor der wachsenden Herausforderung, diese Erwartungen zu erfüllen. Darüber hinaus führt die Zunahme der Videoüberwachung an Bord zu Sicherheitszwecken zu einem erhöhten Bedarf an Uplink-Datenkapazität. Bisher beruhte ein Großteil dieser Konnektivität auf 4G-LTE-Mobilfunknetzen, in denen mit mehreren SIM-Karten ausgestattete Gateways an Bord den Datenverkehr aus verschiedenen Mo-

but also carry the mmWave base stations, delivering secure and fast internet connections that enable passengers to work, stream and stay connected throughout their journeys (fig. 1).

## 4 The benefits

During the initial phase of the mmWave technology deployment, passengers enjoyed impressive download speeds of up to 198 megabits per second. However, these speeds will be moderated moving forward to ensure sufficient capacity for future growth and to provide headroom for additional users. This approach will allow a high-quality Internet on Board (IOB) experience to be maintained as passenger demand increases (fig. 2), thereby ensuring long-term scalability and reliability:

- The beam forming in the on-train radio and trackside base station meant that it is not necessary to amend the azimuth and down-tilt adjustments on traditional trackside Wi-Fi antennas: just mounting the base station vertically with the back of the radio to the overhead power masts achieved everything that was needed.
- The narrow Fresnel zone associated with the used high frequencies meant there was no need to install anything above the catenary system to get coverage: right down on the pole inside the catenary “tunnel” worked perfectly.
- The radios were easy to configure using a simple web interface and operated as straightforward Ethernet bridges between the train and the shore.
- Fitting radios at the front and rear ends of the trains (fig. 3) enabled simple “hand over hand” (make before break) operations.
- The extraordinary range achieved – up to 1.25 km “reach” from a base – meant economical coverage of the entire track as the cost of deploying the technology trackside is always greater than the cost of the technology itself.
- With 57 to 71 GHz frequencies, there was never a consideration that any other vital systems such as Positive Train Control (PTC) that operate far lower down the spectrum might be impacted.



**Bild 3: Eine kompakte Dacheinheit an jedem Ende des Zuges sorgt für eine kontinuierliche Abdeckung.**

Fig. 3: A compact rooftop unit at each end of the train supplies continuous coverage.



bilfunknetzen bündeln und an Wi-Fi-Zugangspunkte in den Zugwaggons verteilen.

Mit dem Aufkommen von 5G New Radio (5G NR) rüsten die Mobilfunknetzbetreiber nun ihre Netze auf und ermutigen die Zugbetreiber, diesen neueren Standard für die Konnektivität von Zug zu Zug zu übernehmen. Der 5G NR-Standard dehnt sich auf höhere Frequenzen und größere Kanalbandbreiten aus und baut auf der gleichen OFDM-Wellenform auf, die auch in 4G LTE verwendet wird. In Märkten wie Europa und Nordamerika nutzen 5G NR-Implementierungen lizenzierte Frequenzen im 3,5-GHz-Band und bieten eine maximale Kanalbreite von 100 MHz. Zusätzliche Funktionen wie 256QAM-Modulation und MIMO (2x2 oder 4x4) werden integriert, um die Leistung zu verbessern. Messungen des Durchsatzes bei der Nutzung von Zug-zu-Zug-Verbindungen haben ergeben, dass bei kurzen Entfernungen etwa 500 Mbit/s möglich sind, die bei 500 m auf 200 Mbit/s sinken.

Die mmWave-Technologie bietet jedoch einen alternativen Ansatz für die Bereitstellung von Hochgeschwindigkeitsverbindungen für Züge. mmWave arbeitet im lizenzfreien Frequenzbereich von 66–71 GHz und bietet einen deutlich höheren Datendurchsatz. Unter ähnlichen Bedingungen können Geschwindigkeiten von bis zu 3200 Mbit/s im Nahbereich, 2000 Mbit/s bei 500 m und 800 Mbit/s bei 1 km erreicht werden. Dieser beträchtliche Unterschied ist in erster Linie auf die wesentlich größere Kanalbandbreite im mmWave-Spektrum im Vergleich zu 5G NR zurückzuführen, das in einem schmalen Band arbeitet.

Ein wichtiger Faktor, der diesen Leistungsunterschied beeinflusst, ist das Shannonsche Gesetz, das besagt, dass die maximale Datenrate eines Kommunikationskanals proportional zu seiner Bandbreite ist. Da die mmWave-Technologie mehr als das 20-fache der Bandbreite einer typischen 5G NR-Verbindung bietet, kann sie selbst bei niedrigem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) (<5 dB) eine robuste Leistung auf Gigabit-Niveau bieten. Im Gegensatz dazu erfordert 5G NR ein viel höheres SNR (mehr als 30 dB), um vergleichbare Gigabit-Geschwindigkeiten zu liefern, und dies ist in der Regel nur bei sehr kurzen Reichweiten (etwa 50 m) möglich.

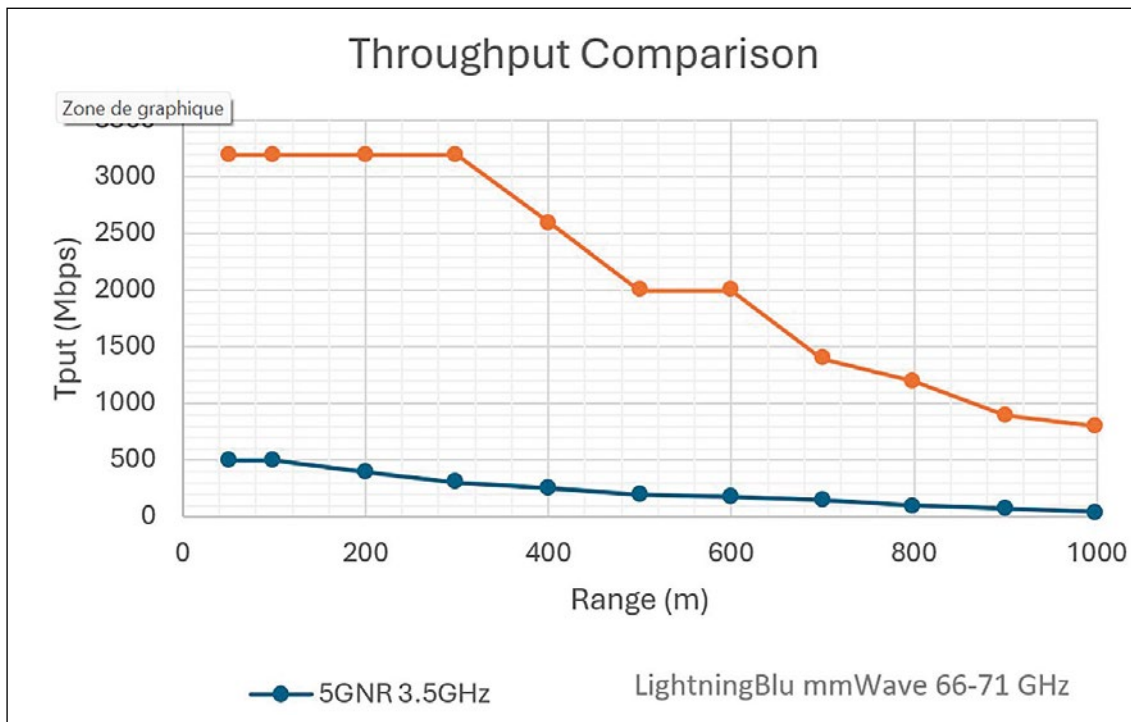
Nomad was able to connect all the trains to edge switches at the “Control Points” (signal houses) using only a single 12-core cable in Caltrain’s existing fibre optical trackside network. Twin redundant operating centres at Caltrain’s primary and standby facilities in San Jose and Menlo Park offer full redundancy of the back-end internet connectivity with a ringed trackside architecture completing the “high availability” picture.

The new service is already in the “soft launch” phase alongside the first-in-class trains plying the Caltrain route. All systems were “go” for full commercial service on 21st September.

**5 Enhanced train-to-ground connectivity: balancing performance, spectrum availability and future demand**

As the demand for broadband connectivity on trains increases, driven by both leisure travellers seeking enhanced experiences and business commuters requiring productivity tools, railway operators are facing growing challenges in meeting these expectations. Additionally, the rise in onboard CCTV for security purposes is also contributing to an increased need for uplink data capacity. To date, much of this connectivity has relied on 4G LTE mobile networks, where onboard gateways equipped with multiple SIMs aggregate traffic from various mobile networks and distribute it to Wi-Fi access points within the train carriages.

With the advent of 5G New Radio (5G NR), Mobile Network Operators (MNOs) are now upgrading their networks and encouraging Train Operating Companies (TOCs) to adopt this newer standard for track-to-train connectivity. The 5G NR standard extends to higher frequencies and broader channel bandwidths, building on the same OFDM waveform used in 4G LTE. In markets such as Europe and North America, 5G NR deployments use the licensed spectrum in the 3.5 GHz band, offering a maximum channel width of 100 MHz. Additional features like 256QAM modulation and MIMO (2x2 or 4x4) are also integrated to enhance performance with throughput measurements for



**Bild 4: Durchsatzvergleich zwischen 5G NR bei 3,5 GHz und LightningBlu bei 66–71 GHz**  
 Fig. 4: A throughput comparison between 5G NR at 3.5 GHz and LightningBlu at 66–71 GHz

Aus betrieblicher Sicht müssen bei der Wahl zwischen diesen beiden Technologien Kompromisse eingegangen werden. Während 5G NR die bestehende Mobilfunkinfrastruktur und das lizenzierte Spektrum nutzen kann, ist seine Leistung durch die Entfernung und die Verfügbarkeit des Spektrums begrenzt. Im Gegensatz dazu bietet die mmWave-Technologie, obwohl sie aufgrund ihrer höheren Frequenzen und der Notwendigkeit einer präzisen Sichtverbindung schwieriger zu implementieren ist, eine überlegene Kapazität und Skalierbarkeit, was sie zu einer überzeugenden Option für Betreiber macht, die ihre Netze zukunftssicher machen wollen, da die Nachfrage der Passagiere nach datenintensiven Diensten weiter steigt (Bild 4).

Eine weitere Option für die Bereitstellung von Konnektivität ist die Verwendung unlizenzierter Wi-Fi-Technologie, die in der Regel im 5,8-GHz-Band betrieben wird, wobei spezielle streckenseitige Zugangspunkte eine drahtlose Backhaul-Verbindung zum Zug herstellen. Dieser Datenstrom wird dann über Wi-Fi-Zugangspunkte im Zug an die Fahrgäste verteilt. Mit dieser Methode können zwar Datenübertragungsraten von etwa 100 Mbit/s pro Zug erzielt werden, doch ist sie bei der Deckung der prognostizierten künftigen Nachfrage mit erheblichen Einschränkungen verbunden. Da die Datennutzung durch die Fahrgäste weiter zunimmt, vor allem in Gebieten mit hohem Fahrgastaufkommen, ist es unwahrscheinlich, dass dieser Ansatz ohne die Einrichtung zusätzlicher spezieller streckenseitiger Infrastrukturen ausreichende Kapazitäten bietet.

In einem Bericht, der im Oktober 2018 von der britischen Telekommunikationsaufsichtsbehörde OFCOM veröffentlicht und im Juni 2020 aktualisiert wurde, um das 39–40-GHz-Band einzubeziehen, wurde die künftige Nachfrage nach drahtloser Konnektivität in Zügen bewertet. In dem Bericht wurde prognostiziert, dass über einen Zeitraum von zehn Jahren ein stark frequentierter Fernverkehrszug bis zu 1 Gbit/s an Datenkapazität benötigen könnte, während ein überfüllter Pendlerzug zwischen 2 und 3 Gbit/s benötigen würde. Diese Zahlen basierten auf einem Bedarf von mindestens 2 Mbit/s pro Fahrgast, wobei die Anforderungen an die Bandbreite für Dienste wie Video-streaming noch höher sind.

Angesichts dieses prognostizierten Anstiegs der Datennachfrage scheint unlizenziertes Wi-Fi, obwohl es in weniger überlasteten Gebieten machbar ist, nicht die Kapazität zu erreichen, die für Strecken mit hoher Verkehrsdichte benötigt wird. Die Abhängigkeit von begrenzten Frequenzen und mäßigen Datenraten deutet darauf hin, dass eine robustere Lösung erforderlich sein wird, um in Zukunft eine zuverlässige und skalierbare Konnektivität zu gewährleisten (Tab. 1). Der OFCOM-Bericht untersuchte auch mehrere Frequenzbänder, die potenziell die wachsende Nachfrage nach Zugverbindungen durch spezielle streckenseitige Lösungen unterstützen könnten. Er kam zu dem Schluss, dass nur die mmWave-Bänder die erwartete Nachfrage von 1 Gbit/s oder mehr bis Mitte/Ende der 2020er Jahre decken

track-to-train use showing speeds around 500 Mbps at short distances and dropping to 200 Mbps at 500 metres.

However, mmWave technology presents an alternative approach to delivering high-speed connectivity to trains. Operating in the 66–71 GHz license-exempt spectrum, mmWave offers significantly higher data throughput. It can achieve speeds of up to 3200 Mbps at a short range, 2000 Mbps at 500 metres and 800 Mbps at 1 kilometre under similar conditions. This substantial difference is primarily due to the much wider channel bandwidth available in the mmWave spectrum compared to 5G NR, which operates in a narrower band.

A key factor influencing this performance difference is Shannon's Law, which states that the maximum data rate of a communication channel is proportional to its bandwidth. With mmWave technology offering more than 20 times the bandwidth of a typical 5G NR connection, it can maintain robust gigabit-level performance even in low signal-to-noise ratio (SNR) conditions (<5 dB). By contrast, 5G NR requires a much higher SNR (greater than 30 dB) to deliver comparable gigabit speeds and this is typically only achievable at very short ranges (around 50 metres).

The choice between these two technologies involves trade-offs from an operating perspective. While 5G NR can leverage existing mobile network infrastructure and the licensed spectrum, its performance is limited by distance and spectrum availability. By contrast, mmWave technology, while more challenging to deploy due to its higher frequencies and need for precise line-of-sight, offers superior capacity and scalability, making it a compelling option for operators looking to future-proof their networks as passenger demands for data-intensive services continue to grow (fig. 4).

Another option for providing connectivity involves the use of unlicensed Wi-Fi technology, typically operating in the 5.8 GHz band, with dedicated trackside access points establishing a wireless backhaul link to the train. This data stream is then distributed to rail passengers via onboard Wi-Fi access points. While this method can deliver data rates of around 100 Mbps per train, it presents significant limitations to meeting future demand projections. As passenger data usage continues to grow, particularly in areas with a high ridership, this approach is unlikely to provide sufficient capacity without the implementation of additional dedicated trackside infrastructure.

A report published by the UK's telecommunications regulator, OFCOM, in October 2018 (and updated in June 2020 to include the 39–40 GHz band) assessed the future demand for wireless connectivity on trains. The report projected that, over a ten-year period, a busy mainline train could require up to 1 Gbps of data capacity, while a crowded commuter train might need between

	2017	2025		
		Low scenario	Medium scenario	High scenario
550-passenger train (rising to 660 in 2025)	80 Mbit/s	400 Mbit/s	790 Mbit/s	1.7 Gbit/s
800-passenger train (rising to 960 in 2025)	120 Mbit/s	580 Mbit/s	1.2 Gbit/s	2.4 Gbit/s
1,200-passenger train (rising to 1,400 in 2025)	180 Mbit/s	860 Mbit/s	1.7 Gbit/s	3.6 Gbit/s

**Tab. 1: Geschätzter durchschnittlicher Datenverbindungsbedarf für einen einzelnen Zug**

Tab. 1: The estimated average data connection demand for a single train

können. Diese Vorhersage berücksichtigt die Einschränkungen, die sich aus der bestehenden Nutzung des Spektrums ergeben. Konkret hat das OFCOM das untere 26-GHz-Band (24,25–26,5 GHz), das obere 26-GHz-Band (26,5–27,5 GHz), das lizenzierte 39–40-GHz-Band und das 66–71-GHz-Band untersucht.

Auch wenn eine derart hohe Nachfrage erst in einem Jahrzehnt voll zum Tragen kommt, wird die Infrastruktur, die in den nächsten Jahren aufgebaut wird, zu diesem Zeitpunkt bereits in Betrieb sein. Daher müssen bei der Planung künftige Anforderungen berücksichtigt werden, um sicherzustellen, dass die Systeme so skaliert werden können, dass sie den langfristigen Anforderungen von Passagieren und Betreibern gerecht werden.

## 6 Fazit

Der lizenzfreie Betrieb im 57–71-GHz-Band erwies sich als Schlüsselfaktor im Entscheidungsprozess zur Auswahl der Technologie für das Gigabit-fähige Zug-zu-Strecke System. Dieses Frequenzband bietet Bahnbetreibern einen erheblichen Vorteil, da es den Wettbewerb um lizenzierte Frequenzen umgeht, die Mobilfunkbetreiber für breitere 5G NR-Anwendungen im Bereich 24,25–27,5 GHz nutzen. Für bahnspezifische Anforderungen ist das 57–71-GHz-Band besonders attraktiv, da es ohne Konkurrenz um Frequenzressourcen betrieben werden kann.

Die umfangreichen Investitionen in drahtlose Plattformen in diesem Frequenzbereich untermauerten die Argumente für dessen Nutzung. Da weltweit etwa 120 000 km von insgesamt 800 000 km Bahnstrecke eine ausreichende Fahrgastnachfrage aufweisen, um den Einsatz von mmWave auf der Strecke zu rechtfertigen, wurde deutlich, dass diese Technologie für stark nachgefragte Bahnstrecken gut geeignet ist, insbesondere für solche in elektrifizierten Regionen mit hohem Pro-Kopf-Einkommen. Dieser datengestützte Ansatz trug dazu bei, die Entscheidung für den Einsatz der mmWave-Technologie als Kernstück der Konnektivitätslösung zu festigen.

Die aktiven Beamforming-Fähigkeiten eines mmWave Zug-zu-Strecke-Systems, das die Line-of-Sight (LoS)-Verbindungen von streckenseitigen Zugangspunkten zu dualen Funkgeräten im Zug aufrechterhält, waren ebenfalls ein entscheidender Faktor. Dieser Aufbau ermöglicht mehrere Funkverbindungen, die einen höheren Durchsatz und eine größere Zuverlässigkeit gewährleisten – Schlüsselkriterien für ein Netz, das im Laufe der Zeit die steigenden Anforderungen der Fahrgäste erfüllen soll.

Insgesamt wurde die Entscheidung für die mmWave-Technologie für die Zug-zu-Strecke-Konnektivität durch ihre Fähigkeit bestimmt, aktuelle und zukünftige Leistungsanforderungen zu erfüllen und gleichzeitig eine skalierbare und robuste Lösung zu bieten. ■

## AUTOREN | AUTHORS

### Jeremy Haskey

Passenger Connectivity and Services Director  
Alstom Transport  
Anschrift / Address: 210 Pentonville Road, GB- N1 9JY London  
E-Mail: jeremy.haskey@alstomgroup.com

### Ken Cowley

Lead Architect  
Nomad Digital  
Anschrift / Address: One Trinity, Broad Chare, UK-NE1 2HF Newcastle upon Tyne  
E-Mail: ken.cowley@nomadrail.com

### Mark Barrett

Chief Commercial Officer  
Blu Wireless  
Anschrift / Address: One Castlepark, Tower Hill, UK-BS2 0JA Bristol  
E-Mail: mark.barrett@bluwireless.com

2-3 Gbps. These figures are based on a per-passenger demand of at least 2 Mbps, with higher bandwidth requirements for services like video streaming.

Given this forecasted growth in data demand, unlicensed Wi-Fi, while feasible in less congested areas, appears to fall short of the capacity needed for high-density routes. The reliance on limited spectrum and moderate data rates suggests that a more robust solution will be required to ensure reliable and scalable connectivity in the future (tab. 1).

The OFCOM report also explored several spectrum bands that could potentially support the growing demand for train connectivity through dedicated trackside solutions. It concluded that only the mmWave bands can meet the anticipated demand levels of 1 Gbps or more by the mid-to-late 2020s. This prediction accounts for the limitations posed by existing uses of the spectrum. OFCOM specifically evaluated the lower 26 GHz band (24.25–26.5 GHz), the upper 26 GHz band (26.5–27.5 GHz), the 39–40 GHz licensed band and the 66–71 GHz band.

While such high demand levels may not be fully realised for another decade, the infrastructure being deployed in the next few years will still be in use by that time. As a result, planning must consider future requirements to ensure that systems can be scaled to meet the long-term needs of passengers and operators.

## 6 Conclusion

License-exempt operations in the 57–71 GHz band emerged as a key factor in the decision-making process when selecting the technology behind the gigabit-capable train-to-ground system. This spectrum band offers a significant advantage for rail operators by bypassing the competition for the licensed spectrum, which mobile operators use for broader 5G NR applications in the 24.25–27.5 GHz range. The ability to operate without competing for spectrum resources made the 57–71 GHz band particularly attractive for rail-specific needs.

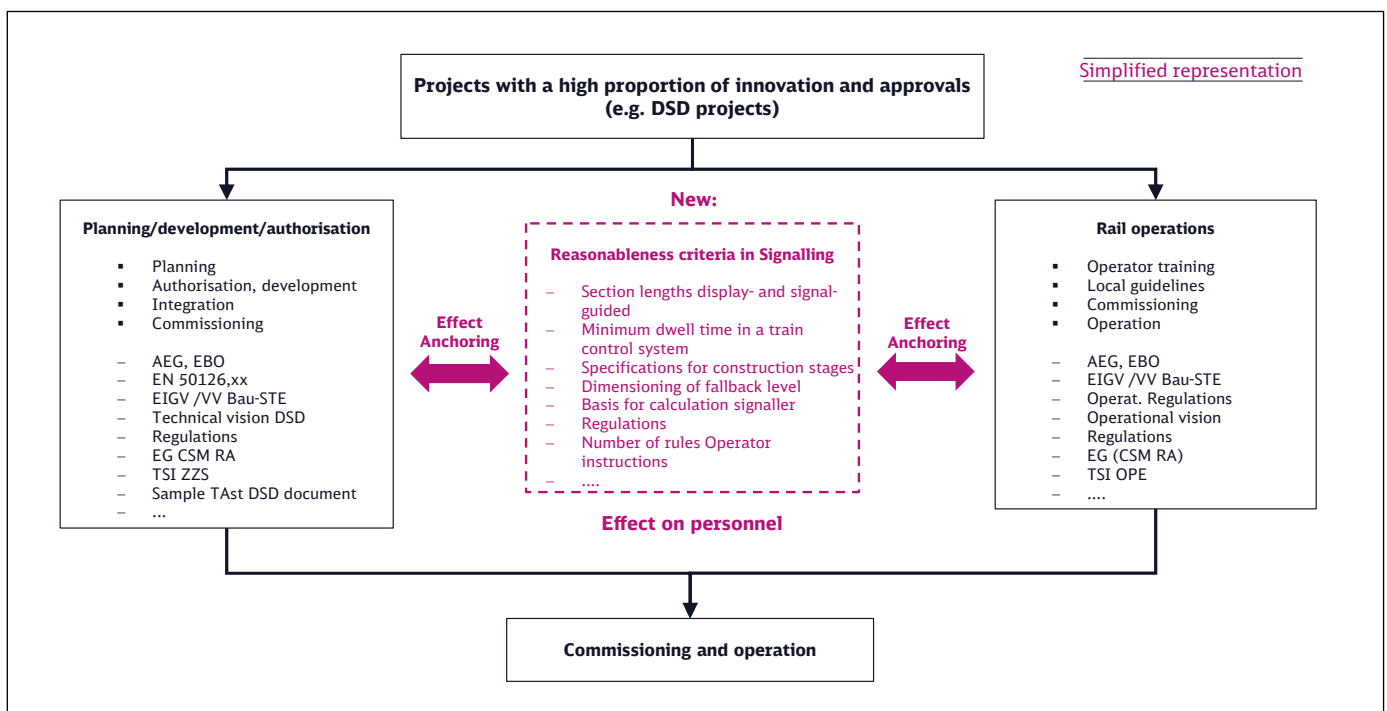
The extensive investment in wireless platforms within this frequency range further strengthened the case for its use. With approximately 120,000 kilometres of track worldwide, out of a total of 800,000 kilometres, showing enough passenger demand to justify trackside mmWave deployments, it became clear that this technology was well-suited for high-demand rail lines, especially those in electrified regions with a high per capita income. This data-driven approach helped solidify the decision to use mmWave technology as the core of the connectivity solution.

The active beamforming capabilities of an mmWave train-to-ground system, which maintains Line of Sight (LoS) connections from trackside access points to dual radios on the train, were also a decisive factor. This setup allows for multiple radio links, ensuring a higher throughput and increased reliability, i.e. the key criteria for a network expected to support growing passenger demands over time.

Overall, the decision to adopt mmWave technology for the train-to-ground connectivity was driven by its ability to meet the current and future performance needs while providing a scalable and robust solution. ■

# Einführung von Zumutbarkeitskriterien in der Leit- und Sicherungstechnik

The introduction of reasonableness criteria into signalling and safety technology



**Bild 1: Hinterlegung von Zumutbarkeitskriterien in der LST**

Fig. 1: The deposit of the reasonableness criteria in the signalling and safety

Matthias Barz | Daria Menzel

Die DB InfraGO AG bzw. der Bereich der Leit- und Sicherungstechnik (LST) setzen Projekte der Digitalen Schiene Deutschland (DSD) bis 2035 ff. um. Dabei werden digitale, standardisierte und leistungsfähige Produkte gemäß „Betrieblich-Technischem Zielbild“ (BTZ) entwickelt und in Projekten implementiert. Des Weiteren werden Prozesse standardisiert und Kosten über den gesamten Lebenszyklus gesenkt. Regelwerke, Lastenhefte, Produkte werden mit neuen Methoden (z. B. agile Methoden wie „Scrum“) entwickelt, und der Rollout der Projekte wird parallelisiert, um die Projektrealisierung zu beschleunigen.

Hat der Bereich der LST dabei ausreichend an das Zumutbarkeitsniveau sowohl für Bediener der LST-Anlagen wie Triebfahrzeugführer (Tf) und Fahrdienstleiter (Fdl) als auch an weitere Berufsgruppen wie Planungsingenieure und Prüfsachverständige gedacht – gerade in der Phase der Migration bzw. hinsichtlich der Bauzustände? Gibt es allgemeingültige (generische) Kriterien für die Zumutbarkeit, die bei der Planung von LST-Anlagen beachtet werden müssen? Welche weiteren Projektbeteiligten sollten mit in die Planung einbezogen werden? Sind europäische

DB InfraGO AG and the Control and Safety Technology Division (signalling and safety) will implement Digital Rail Germany (DSD) projects until 2035 et seq. Digital, standardised and high-performance products are being developed in accordance with the Operational Technical Target Image (BTZ) and implemented in projects. Furthermore, processes are being standardised and costs reduced over the entire lifecycle. Rules, specifications and products are being developed with new methods (e.g. agile methods such as the “Scrum”) and project rollouts are being parallelised in order to accelerate the project implementation.

Has the Signalling and Safety Department given sufficient thought to the levels of reasonableness for the signalling and safety system operators, such as train drivers and dispatchers, as well as for other professional groups such as planning engineers and inspection experts, especially in the migration phase or the construction stages? Are there generally applicable (generic) reasonableness criteria that must be observed when planning signalling and safety facilities? Which other project participants should be involved in the plan-

und nationale Vorgaben wie die DIN EN ISO 10075 (Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung) bzw. VDI 4006 (menschliche Zuverlässigkeit) ausreichend in die Praxis überführt?

Bisher fanden die durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen und Regelwerksansätze aufgrund mangelnder Praktikabilität nicht die nötige Beachtung. Im EU-weit etablierten CSM-RA-Prozess (Common Safety Methods – Risk Assessment) gemäß 402/2013/EG (CSM RA) sind Zumutbarkeitskriterien bisher nicht berücksichtigt. Der aktuelle CSM-Prozess (Bild 2) sowie die neu etablierte „Technische Aufgabenstellung“ (Muster-TAst DSD) (Bild 3) bilden den geeigneten Rahmen, um Zumutbarkeitskriterien effizient und praxistauglich unter Einhaltung weiterer Vorgaben wie der Sektorleitlinie [2] und Regelwerke zu ergänzen (Bild 1).

Diese Themenkomplexe werden derzeit im Rahmen einer Dissertation an der TU-Dresden erforscht. Der Beitrag stellt die Ansätze und Überlegungen aus dieser Forschungsarbeit dar und bietet einen ersten Einblick, welche Zumutbarkeitskriterien über den gesamten LST-Lebenszyklus mitberücksichtigt werden sollten.

## 1 Motivation

Die EG-Verordnung 402/2013/EG (CSM RA) [1] bildet den europäischen Rahmen für die nationale Umsetzung zum Umgang mit sicherheits- und signifikanzrelevanten Themen über den gesamten LST-Lebenszyklus. Davon betroffen sind:

- LST-Planung, Baudurchführung
- System- und Produktentwicklung, Zulassung und Integration
- Inbetriebnahmeprozesse
- Betriebsdurchführung.

Diese sind national in Regularien wie der Sektorleitlinie [2], Eisenbahn-Inbetriebnahmegenehmigungsverordnung (EIGV) [3] und auf Ebene der Deutsche Bahn AG (DB AG) in der Richtlinienfamilie 125 [4] verankert. Geeignete Zumutbarkeitskriterien wurden aus Sicht der Autoren nur unzureichend berücksichtigt.

Diese sollten insbesondere für:

- die Entwicklung- und Zulassung von LST-Produkten,
- die Umsetzung in Projekten in Planungsphasen und
- weitere Akteure (Planungsingenieure, Prüfsachverständige, Entwicklungsingenieure...)

mit hohen Zulassungsanteilen wie z. B. bei Projekten der DSD entwickelt und bedacht werden. Es besteht Handlungsbedarf im gesamten Bereich der LST.

Wird nicht auf Zumutbarkeitskriterien geachtet, besteht das Risiko, dass Eisenbahninfrastrukturanlagen wie Zugbeeinflussungssysteme so geplant werden, dass es im Rahmen der Migration insbesondere bei Bauzuständen zu einer Überlastung und Überforderung vor allem von Tf und Fdl kommen kann. Das erhöht das Unfallrisiko durch Fehlhandlungen und kann zum Ausfall von Beschäftigten im Bereich der LST führen. Diese These muss sorgfältig untersucht und wissenschaftlich aufbereitet werden. Es gibt nur wenige geeignete Studien und Regularien in diesem Bereich. Die wissenschaftlichen Arbeiten von Dr.-Ing. Albrecht Hintzen [6], Dr.-Ing. Malte Hammerl [7] und Dr.-Ing. Christoph Gralla [8] können jedoch als Grundlagen für weitere Forschung herangezogen werden.

## 2 Ausgangssituation

Die nachfolgenden Gesetze, Verordnungen und Richtlinien sind lediglich ein Auszug und geben einen Überblick, wo sicherheitsrelevante und signifikante Sachverhalte geregelt sind. Zumutbarkeitskriterien sind bisher in keinem dieser Regelwerke hinterlegt:

ning? Have European and national requirements such as DIN EN ISO 10075 (Basics of mental workload) or VDI 4006 (Human reliability) been sufficiently put into practice?

The scientific studies and regulatory approaches that have been carried out to date have not received the necessary attention due to a lack of practicability. Reasonableness criteria have not yet been taken into account in the EU-wide CSM-RA process (Common Safety Methods – Risk Assessment) in accordance with 402/2013/EC (CSM RA). The current CSM process (fig. 2) and the newly established Technical Task (Model TAst DSD) (fig. 3) form the appropriate framework for supplementing the reasonableness criteria efficiently and practically in compliance with other requirements such as the Sector Guideline [2] and regulations (fig. 1).

These topics are currently being researched as part of a dissertation at the TU Dresden. This article presents the approaches and considerations from this research work and offers a first insight into which reasonableness criteria should be taken into account throughout the signalling and safety lifecycle.

## 1 Motivation

EC Regulation 402/2013/EC (CSM RA) [1] forms the European framework for national implementation when dealing with safety and significance issues over the entire signalling and safety lifecycle. This affects the following:

- signalling and safety planning, the realisation of construction
- system and product development, approval and integration
- the commissioning processes
- implementation in operations.

These are anchored both nationally in regulations such as the Sector Guideline [2] and the Railway Commissioning Permit Ordinance (EIGV) [3] and at the level of Deutsche Bahn AG (DB AG) in the 125 family of guidelines [4]. In the authors' view, insufficient account has been taken of the suitable reasonableness criteria.

These should particularly be used for:

- developing and approving signalling and safety products,
- implementation in projects in the planning phases and
- other stakeholders (design engineers, test experts, development engineers...)

with a high proportion of approvals, such as DSD projects. There is a need for action in the entire control and safety technology field.

If reasonableness criteria are not taken into account, there is a risk that railway infrastructure facilities such as train control systems will be planned in such a way that overloading and excessive demands can occur during migration, especially for train drivers and dispatchers and during construction stages. This increases the risk of accidents due to mismanagement and can lead to a lack of employees in the signalling and safety area. This thesis must be carefully examined and scientifically prepared. There are currently only a few suitable studies and regulations in this area. However, the scientific work of Dr.-Ing. Hintzen [6], Dr.-Ing. Hammerl [7] and Dr.-Ing. Gralla [8] can be used as the basis for further research.

## 2 The initial situation

The following laws, ordinances and guidelines merely constitute an excerpt and provide an overview of where safety-relevant and significant issues are regulated. Reasonableness criteria have not yet been set out in any of these regulations:

- EG-Verordnung 402/2013/EG (CSM RA) [1]
- Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG), Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)
- Sektorleitlinie Eisenbahn-Bundesamt [2]
- EIGV, VV IBG, VV Bau STE
- Richtlinie 125 (CSM-RA)
- Muster-TAst DSD (Technische Aufgabenstellung DSD) [5]
- UBS-Berichte
- DIN EN ISO 10075 (Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung) [9]
- VDI 4006 Blatt 1 (Menschliche Zuverlässigkeit) [10]

In einer früheren Dissertation [7] wurden beispielsweise feste Kilometerangaben (minimal 20 km und 50 km als Standardgröße) ohne Geschwindigkeitsbezug als Zumutbarkeitskriterien ermittelt und vorgeschlagen. Diese haben sich jedoch bei Projekten mit hohen Zulassungsanteilen sowie signifikant unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen und Zugarten im betrieblichen und planerischen Kontext nicht etabliert. Entwürfe zu Richtlinien, die darauf basierten, wurden zurückgezogen. Die Vorteile von geschwindigkeitsabhängigen und damit zeitabhängigen Vorgaben für Tf und Fdl erscheinen naheliegend und werden im Rahmen der laufenden Dissertation an der TU Dresden auf Anwendbarkeit inkl. Ermittlung weiterer Zumutbarkeitskriterien und Zielgrößen untersucht.

### 3 Ermittlung und Bewertung von Zumutbarkeitskriterien

Das Ziel der Dissertation an der TU Dresden besteht somit darin, ein generisches Kriterienmodell für Zumutbarkeitskriterien zu entwickeln, das bei der Umsetzung von Projekten mit hohen Innovations- und Zulassungsanteilen sowie deren Gesamtwirkung zu berücksichtigen ist. Die nachfolgenden Beispiele sollen einen ersten Eindruck davon vermitteln, wie solche Kriterien identifiziert und berücksichtigt werden können.

#### 3.1 Perspektive: Triebfahrzeugführer und Fahrdienstleiter

In Projekten mit hohen Innovations- und Zulassungsanteilen werden Lastenhefte, Pflichtenhefte, Produkte und Regelwerke in Release-Stufen parallel zur Projektrealisierung über Erstanwendungsprojekte entwickelt und zugelassen. Des Weiteren wird die vollständige Migration der Digitalen LST (DLST) im Gesamtnetz der DB InfraGO AG über Migrationsstufen und eine Vielzahl von Bauzuständen realisiert. Die derzeitige Praxis zeigt, dass dies nicht gänzlich ohne Produkteinschränkungen (z. B. Anwendung von Betreiberhinweisen) und die Planung mit Regelwerksständen mit Einschränkungen zu realisieren sein wird. Projektbezogene Auflagen und Nebenbestimmungen können zur Folge haben, dass Fdl und Tf bauzeitlich einer hohen betrieblichen Belastung ausgesetzt sind (z. B. Beachtung von Betreiberhinweisen, Bauzustände, ...). Um einer Überforderung von betrieblichen Personal entgegenzuwirken, werden Kriterien untersucht und abgeleitet, die im Rahmen der Planung, Produktentwicklung und Realisierung der Projekte zu beachten sind.

So sollen zunächst die ersten identifizierten Zumutbarkeitskriterien für LST-Anlagen untersucht werden:

- Länge eines Abschnittes Zugbeeinflussung anzeige- und signalgeführt (z. B. ETCS L2 oS/mS, ETCS L1, PZB, LZB, ...)
- Zeitdauer in einem Abschnitt für anzeige- und signalgeführte Fahrten
- Mindestaufenthaltszeit in einem Zugbeeinflussungssystem anzeige- und signalgeführt
- Anzahl zu betrachtender technischer Systeme (Anzahl Bedienplätze etc.)
- Anzahl Betreiberhinweise und betriebliche Mitteilungen
- Besonderheiten an Grenzbetriebsstrecken.

- EC Regulation 402/2013/EG (CSM RA) [1]
- Allgemeines Eisenbahngesetz (AEG, General Railway Law) and Railway Infrastructure Usage Regulations), Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO, Railway Construction and Operating Regulations)
- the Federal Railway Authority Sector Guideline [2]
- EIGV, VV IBG, VV Bau STE
- Guideline 125 (CSM-RA)
- Sample TAst DSD (Technical Task DSD) [5]
- the UBS Reports
- DIN EN ISO 10075 (Basics of mental workload) [9]
- VDI 4006 Part 1 (Human Reliability) [10]

In an earlier dissertation [7], for example, fixed mileage figures (minimums of 20 km and 50 km as a standard size) were determined without any reference to speed and proposed as reasonableness criteria. However, these have not become established within the operational and planning context for projects with a high proportion of approvals and significantly different speed profiles and traffic types. Draft guidelines based on this have been withdrawn. The advantages of speed-dependent and thus time-dependent specifications for train drivers and dispatchers seem obvious and will be examined for their applicability, including the determination of any further reasonableness criteria and target values, within the framework of the ongoing dissertation at the TU Dresden.

### 3 Determining and evaluating reasonableness criteria

The aim of the dissertation at TU Dresden is thus to develop a generic criteria model for reasonableness criteria, which is to be taken into account in the case of the implementation of projects with high innovation and approval shares, as well as their overall impact. The following examples are intended to provide a first impression of how such criteria can be identified and taken into account.

#### 3.1 Perspective: train drivers and dispatchers

In the case of projects with a high proportion of innovation and approval, requirement specifications, functional specifications, products and regulations are developed and approved in release stages parallel to the project implementation by means of initial application projects. In addition, the complete migration of the digital control and safety technology into the entire DB InfraGO AG network will be implemented by means of migration stages and a large number of construction stages.

Current practice has shown that this will not be entirely possible without any product restrictions (e.g. the application of operator instructions) and planning for regulatory statuses with restrictions. Project-related requirements and ancillary provisions can result in dispatchers and train drivers being exposed to a high operating burden during construction (e.g. compliance with operator instructions, construction conditions...). In order to counteract the overloading of the operational staff, criteria are examined and derived that must be observed during the planning, product development and implementation of the projects. The first identified reasonableness criteria for signalling and safety systems will initially be examined:

- the length of a train control section guided by display and signal (e.g. ETCS L2 oS/mS, ETCS L1, PZB, LZB, ...)
- the time spent in a section for display and signal-guided journeys
- the minimum time spent in a train control system



zulässige Streckengeschwindigkeit v (km/h) permissible line speed v (km/h)	Verweildauer im Zugbeeinflussungssystem (s) dwell time in train control system(s)	ermittelte Mindest-Abschnittslänge (m) determined minimum section length (m)
40	120	1333
60	120	2000
80	120	2667
100	120	3333
120	120	4000
140	120	4667
160	120	5333
180	120	6000
200	120	6667
230	120	7667
250	120	8333
300	120	10000

**Tab. 1: Mindestlängen für Abschnitte bei verschiedenen Geschwindigkeiten und bei konstanter Verweildauer von 120 Sekunden**

Tab. 1: The minimum lengths for sections at different speeds and with a constant dwell time of 120 seconds

zulässige Streckengeschwindigkeit v (km/h) permissible line speed v (km/h)	Verweildauer im Zugbeeinflussungssystem (s) dwell time in train control system(s)	ermittelte Mindest-Abschnittslänge (m) determined minimum section length (m)
40	240	2667
60	240	4000
80	240	5333
100	240	6667
120	240	8000
140	240	9333
160	240	10667
180	240	12000
200	240	13333
230	240	15333
250	240	16667
300	240	20000

**Tab. 2: Mindestlängen für Abschnitte bei verschiedenen Geschwindigkeiten und konstanter Verweildauer von 240 Sekunden**

Tab. 2: The minimum lengths for sections at different speeds and with a constant dwell time of 240 seconds

So lässt sich beispielhaft die geschwindigkeitsabhängige Mindest-Abschnittslänge in Abhängigkeit von der Verweildauer im jeweiligen LST-System verdeutlichen (Tab. 1 und 2). Derartige Vorgaben sind bisher als Regelwerksgrundlage für Planungsingenieure nicht hinterlegt. Die beiden Tabellen zeigen, wie komplex der Sachverhalt zur Ermittlung von Zumutbarkeitskriterien in Abhängigkeit von diversen Randbedingungen sich auf die Bemessung von Abschnittslängen auswirken kann. Durch strukturierte Befragungen, Projekterfahrungen und Anwendung weiterer wissenschaftlicher Methoden werden im Rahmen der Dissertation allgemeingültige Vorgaben erarbeitet, die als generische Vorgaben für Planung, Produkt- und Projektrealisierung hinterlegt werden können.

**3.2 Perspektive: Prüfsachverständige (PSV) (bspw. Planprüfer)**

Mit der grundlegenden Umstellung des Bahnbetriebes auf DLST werden neue LST-Systeme entwickelt, zugelassen und in Betrieb genommen. Es besteht die Herausforderung, eine Vielzahl von Bahnhöfen und Strecken mit European Train Control System Level 2 (ETCS L2) auszurüsten. Für die Ausführung der zu realisierenden Projekte ist mit einem erheblichen Personalaufwand zu rechnen. Ausgehend von den am Markt vorhandenen Personalkapazitäten kann der Bedarf, insbesondere an PSV, nicht im erwarteten Umfang gedeckt und auch mit Nachwuchskräften nicht kompensiert werden.

Die sicherungstechnischen Systeme funktionieren nicht autonom, sondern haben Schnittstellen zu den betroffenen Umsystemen. Meistens hängt mit dem Bau von ETCS L2 entweder der Neubau von digitalen Stellwerken (DSTW) oder das Upgrade eines vorhandenen elektronischen Stellwerks (ESTW) inkl. der Schnittstellenerweiterung SCI-RBC zusammen. So bestehen kausale Zusammenhänge zwischen den betroffenen Gewerken, auch bei den späteren Änderungen der Ausführungsplanung. Dies führt dazu, dass beispielsweise eine Änderungsmitteilung nicht für sich allein zu beurteilen ist, sondern es die Aufgabe eines PSV ist, die Änderungen in Nachbargewerken zu bewerten.

Es stellt sich dabei die Frage, ob die Vielzahl der anzuwendenden Richtlinien und Regelwerke in der vorgegebenen Zeit der Projektrealisierung noch beherrschbar ist, ohne dabei Sachverhalte zu übersehen. Zwar ist der PSV theoretisch von wirtschaftlichen Zwängen befreit, aber für die

- the number of technical systems to be considered (the number of operator stations, etc.)
- the number of operator notices and company announcements
- the special features on border operating routes.

This is an example of the speed-dependent minimum section length depending on the length of time spent in the given signalling and safety system (tab. 1 and 2). Such requirements have not yet been deposited as a regulatory basis for planning engineers. The two tables show how the complexity of the facts pertaining to the determination of reasonableness criteria based on various boundary conditions can affect the design of section lengths. The dissertation has used structured surveys, project experience and the application of other scientific methods to develop generally valid specifications, which can be stored as generic specifications for planning, product and project implementation.

**3.2 Perspective: inspection experts (PSV) (e.g. plan examiners)**

The fundamental conversion of railway operations to digital control and safety technology means that new signalling and safety systems are being developed, approved and commissioned. Equipping a large number of stations and lines with European Train Control System Level 2 (ETCS L2) is a challenge. Considerable personnel costs are to be expected with regard to the execution of the projects to be realized. Given the personnel capacities available in the market, the demand, especially for PSV, cannot be met to the expected extent and likewise cannot be compensated for with junior staff.

Safety systems do not function autonomously, but have interfaces to various affected peripheral systems. In most cases, the construction of ETCS L2 is associated with either the construction of new digital interlockings (DSTW) or an upgrade of an existing electronic interlocking (ESTW), including the SCI-RBC interface extension. As such, there are causal relationships between the involved trades, even in the case of subsequent changes to the implementation planning. This leads to the fact that, for example, a change notification cannot be assessed on its own, but the PSV is also required to evaluate the changes in the neighbouring trades.

The question arises as to whether the large number of applicable guidelines and regulations can still be manageable at the given time



Verlässlichkeit von Projektabläufen sollte eine realistische Schätzung des Aufwandes, aufgrund vernünftiger Belastbarkeit, möglich sein. Die Interessenslage besteht also am Beispiel der Planprüfungen darin, den Prüfaufwand, und somit auch den Personalbedarf, deutlich zu reduzieren. Die Grundlagen in Richtung Automatisierung der Prüfprozesse werden bereits in Projekten wie z. B. „Durchgängige digitalen Datenhaltung im Planungsprozess“ (D3IP) gelegt.

Darüber hinaus bedarf es einer Konzeption für die Neugestaltung der Regelwerke, ausgehend von drei Aspekten:

1. Die Regeln in Richtlinien sollen nicht als Wissensersatz fungieren, sondern reine Planungs- und Prüfvorgaben enthalten. Eine solche Trennung würde die aktuellen Regelwerke wesentlich verschlanken. Das Systemwissen sollte sowohl bei den Planern als auch bei dem Prüfenden vorausgesetzt werden können.
2. Bestimmte Prüfschritte werden in Zukunft nicht mehr Bestandteil der Planprüfung sein, sondern durch automatische zertifizierte Tools übernommen werden.
3. Die Regelwerke, die sowohl die Planungsingenieure als auch die Planprüfer zu beachten haben, sollten auf Widerspruchsfreiheit geprüft werden. Die neue Welt der DLST umfasst entsprechende neue Begriffe und Definitionen, die häufig nicht mehr dem bisherigen Stand entsprechen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Automatisierung der Prüfschritte und die Neugestaltung der Regelwerke die Kriterien darstellen, die die Beschleunigung des Prüfvorgangs ermöglichen werden, ohne den Rahmen der Realisierungsprojekte zu sprengen.

**4 Umgang mit Gesetzen, Vorschriften und Regelwerken**

Neben der Ermittlung der fachlichen Zumutbarkeitskriterien gilt es, den neuen Kriterien den jeweiligen Rahmen auf europäischer und nationaler Ebene zur Umsetzung zu geben. Sowohl die gesetzlichen europäischen und nationalen Vorgaben (CSM-RA, AEG,...) als auch die Vorgaben zur Projektumsetzung (Richtlinien, Muster-TAst...) werden hinsichtlich ihrer bestmöglichen zeitlichen und inhaltlichen Wirksamkeit und Praktikabilität in der Anwendbarkeit untersucht. Eine detail-

of the project implementation without... [REDACTED]... Although the PSV has theoretically been freed from economic constraints, a realistic estimate of the effort based on reasonable resilience should be possible for the reliability of project processes.

The example of plan reviews therefore shows that there is an interest in significantly reducing the audit effort and thus also the personnel requirements. The foundations for automating the testing processes are already being laid in projects such as end-to-end digital data storage in the planning process (D3IP).

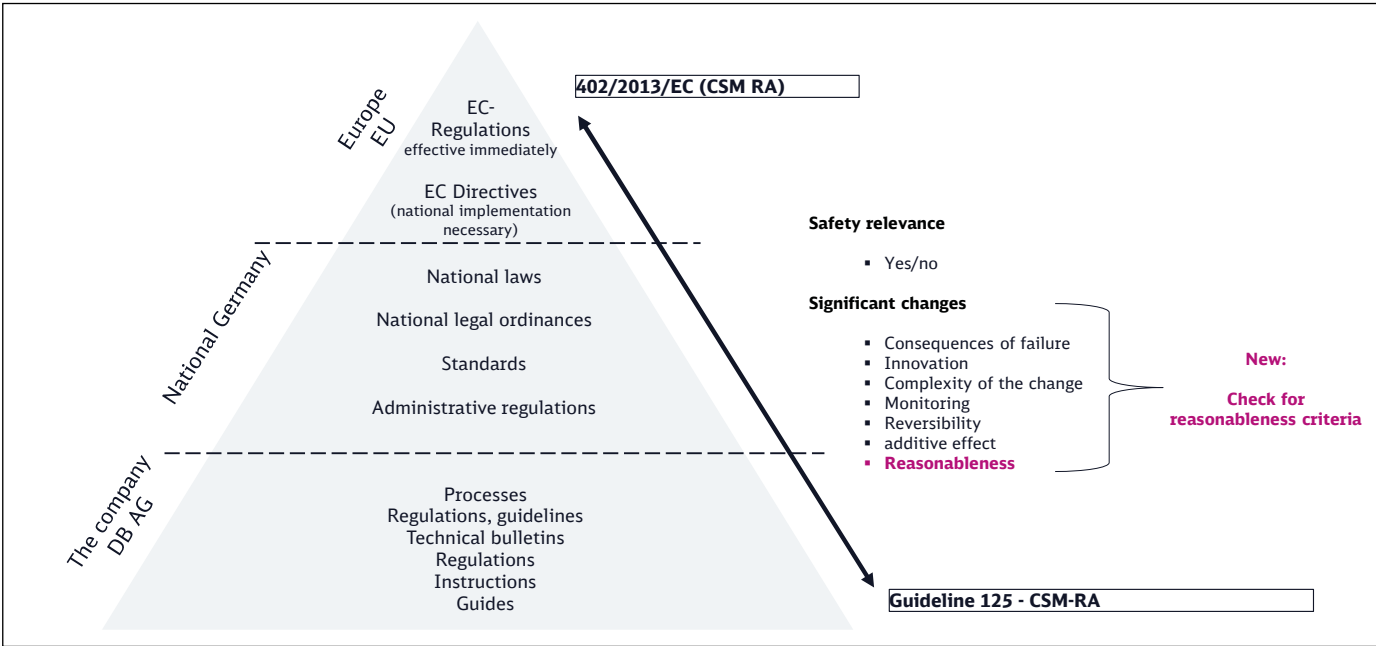
In addition, a concept for redesigning the regulations is needed, based on three aspects:

1. The rules in the guidelines should not be intended to act as a substitute for knowledge, but to contain pure planning and testing requirements. Such a separation would significantly streamline the current regulations. It should be possible to assume that both the planner and the examiner have knowledge of the system.
2. In the future, certain inspection steps will no longer constitute part of the plan review, but will be taken over by certified, automated tools.
3. The rules and regulations that both the planning engineer and the plan examiner have to comply with should be checked for consistency. The new world of digital signaling und safety includes corresponding new terms and definitions, which often no longer correspond to the previous state.

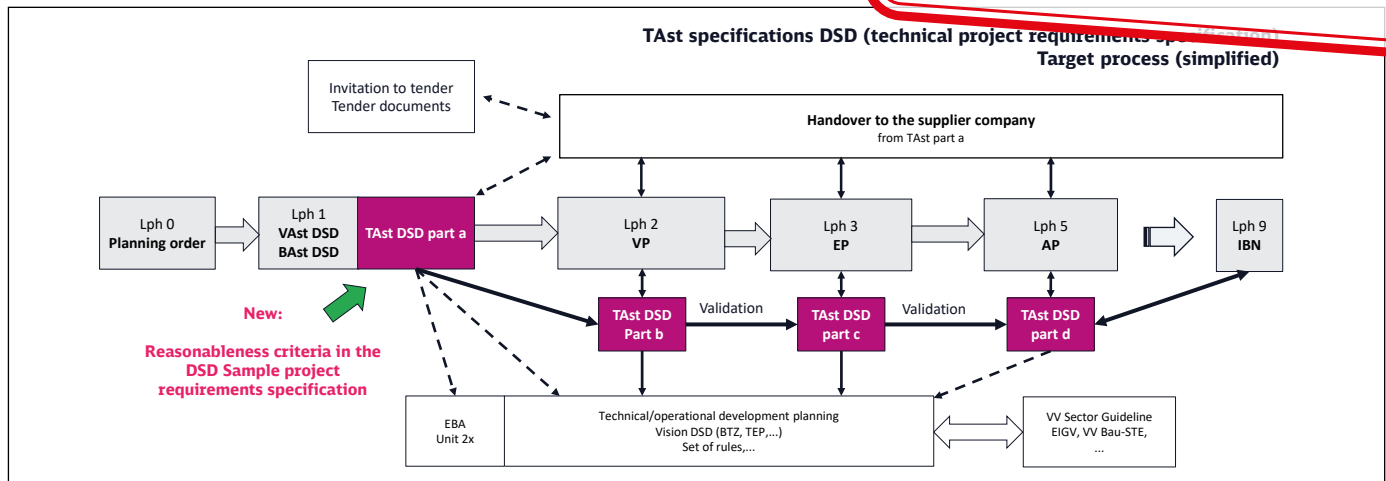
In summary, the automation of the inspection steps and the redesign of the regulations are the criteria that will enable the testing process to be accelerated without going beyond the scope of the implementation projects.

**4 Dealing with laws, guidelines and regulations**

In addition to determining the professional reasonableness criteria, it is also important to give any new criteria the appropriate framework for their implementation at the European and national levels. Both the legal European and national requirements (CSM-RA, AEG,...) and the requirements for project implementation (guidelines, model TAst...) have been examined with regard to their best



**Bild 2: Umsetzung Risikomanagementverfahren für Bauprojekte, Produktzulassung, Regelwerke**  
 Fig. 2: The implementation of risk management procedures for construction projects, product approval and regulations



**Bild 3: Muster-TAst DSD, Hinterlegung der Zumutbarkeitskriterien in der Prozessabfolge**

Fig. 3: The DSD TAst model, the deposit of the reasonableness criteria in the process sequence

lierte Betrachtung richtet den Fokus insbesondere auf die folgenden Aspekte:

- der im Sektor der Leit- und Sicherungstechnik EU-weit etablierte CSM-Prozess (Bild 2)
- das in Deutschland geltende AEG und die EBO
- die national eingeführten Regularien wie Sektorleitlinie [2], EIGV, VV-Bau STE, IBG
- die bei der DB AG etablierten Prozesse und Regelwerke wie die Ril 125 [3], Ril 413 und Ril-Familie 819.xx
- die bei der DB InfraGO AG neue eingeführte Muster-TAst DSD (Bild 3).

## 5 Ausblick

Die Zwischenergebnisse des anfangs genannten Forschungsvorhabens und der Praxis bei Realisierungsprojekten mit hohen Innovations- und Zulassungsanteilen zeigen, dass bisher fehlende zumutbarkeitsrelevante Kriterien einen wichtigen Beitrag zur Beschleunigung der Projektrealisierung unter Einhaltung der Sicherheitsziele leisten können. Sehr langwierige projektbezogene Einzelbetrachtungen könnten damit vermieden werden. Klare Rahmenbedingungen und standardisierte Prozesse geben den Projektbeteiligten Klarheit und Orientierung und schützen Mitarbeiter im Betriebsdienst vor Überforderung und unzulässigen Fehlhandlungen. ■

## LITERATUR | LITERATURE

- [1] EG-Verordnung 402/2013/EG (CSM RA), Europäische Union, 30.04.2013, geänderte Fassung, 03.08.2015
- [2] Sektorleitlinie für die Zulassungsbewertung von STE-Anlagen, Eisenbahn-bundesamt, Ausgabe 2.0, 27.03.2024
- [3] Eisenbahn-Inbetriebnahmegenehmigungsverordnung, Bundesministerium der Justiz, 26.07.2018
- [4] Richtlinie 125 (CSM-RA), DB AG, 15.07.2021
- [5] Muster-TAst DSD V2.0 (Technische Aufgabenstellung Digitale Schiene Deutschland), DB InfraGO AG, Matthias Barz, 01.03.2024
- [6] Der Einfluss des menschlichen Fehlers auf die Sicherheit der Eisenbahn, RWTH Aachen, Dissertation, Dr. Albrecht Hinzen, 1993
- [7] Analyse der menschlichen Einflussfaktoren und Zuverlässigkeit im Eisenbahnverkehr, TU Braunschweig, Dissertation, Dr. Malte Hammerl, 2010
- [8] Zur Gestaltung einer ETCS-Migration eines Eisenbahnverkehrsunternehmens, TU Braunschweig, Dissertation, Dr. Christoph Gralla, 2009
- [9] DIN EN ISO 10075 Teil 1-3, Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung - DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Ausgabe 01/2018
- [10] VDI 4006 Blatt 1 (Menschliche Zuverlässigkeit), Verein Deutscher Ingenieure, Ausgabe 03/2015

possible effectiveness in terms of time and content and the practicability of their application. A detailed examination has particularly focused on the following aspects:

- the CSM process established throughout the EU in the control and safety technology sector (fig. 2)
- the AEG, which is in force in Germany, and the EBO
- the nationally introduced regulations such as the Sector Guideline [2], EIGV, VV-Bau STE and IBG
- the processes and regulations established at DB AG, such as Directive 125 [3], Directive 413 and the Directive 819.xx family
- the new DSD TAst model introduced at DB InfraGO AG (fig. 3).

## 5 Outlook

The interim results of the research project mentioned at the beginning and the practice of implementation projects with a high proportion of innovation and approval have shown that criteria relevant to reasonableness, which have so far been lacking, can make an important contribution to accelerating project implementation in compliance with safety objectives.

Very lengthy project-related individual considerations could thus be avoided. Clear framework conditions and standardised processes provide clarity and orientation to those involved in the project and protect employees in operations from being overwhelmed and from inadmissible misconduct. ■

## AUTOREN | AUTHORS

### Dipl.-Ing. Matthias Barz

Experte Projektportfolio Digitale Schiene Deutschland (DSD)/  
Technical Lead (expert), Project Portfolio Digitale Schiene Deutschland (DSD)  
DB InfraGO AG  
Anschrift / Address: Schweizer Straße 3b, D-01069 Dresden  
E-Mail: matthias.barz@deutschebahn.com

### Dr.-Ing. Daria Menzel

Prokuristin / General Manager  
CERSS Kompetenzzentrum Bahnsicherungstechnik GmbH  
Anschrift / Address: Bernhardstraße 77, D-01187 Dresden  
E-Mail: daria.menzel@cerss.com

# Die gemeinsame Sicherheitsmethode zur Risikobewertung CSM-RA

## The common safety method for CSM-RA risk acceptance

Jesper Näsström

Die EU-Verordnung über Gemeinsame Sicherheitsmethoden – Risikobewertung (CSM-RA) wurde vor etwa zehn Jahren veröffentlicht, und ihre Anwendung gehört für viele von uns inzwischen zum Arbeitsalltag. Allerdings sind die Absätze zur Risikoakzeptanz etwas schwer zu entschlüsseln. In diesem Beitrag wird eine umfassende Risikomatrix vorgeschlagen, die auf den Definitionen des CSM-RA beruht. Die CSM-RA gibt nur begrenzte Informationen über die Risikoakzeptanz, aber mit einigen Extrapolationen können wir zu einer vollständigen Risikomatrix gelangen, die in der praktischen Arbeit der Risikoakzeptanz verwendet werden kann. Die erste Ausgabe der CSM-RA [1] war in Bezug auf die Kriterien für die Risikoakzeptanz sehr begrenzt. Danach wurden mit der Änderungsverordnung EU 2015/1136 [2] Änderungen vorgenommen, sodass wir eine Grundlage haben, um nützliche Extrapolationen vorzunehmen, während wir uns streng an die Vorgaben der EU-Verordnung für CSM-RA halten. Die konsolidierte Fassung der CSM-RA-Verordnung [3] ist natürlich diejenige, die zu lesen und zu verwenden ist, da sie die Zusammenführung von [1] und [2] darstellt.

### 1 Die Vor- und Nachteile der Risikomatrix

Die Risikomatrix ist eine beliebte Methode der Risikobewertung, da sie auch für Laien leicht zu verstehen und anzuwenden ist. Schließlich ist es wichtig, verschiedene Fachleute in die Risikoanalyse einzubeziehen, seien es Triebfahrzeugführer, Gleisstandhalter, Fahrdienstleiter oder andere Akteure, die an Aktivitäten mit potenziellen Risiken beteiligt sind. Die Risikomatrix ist gut geeignet, da sie von jedem schnell verstanden werden kann. Aber es muss auch gleichzeitig eine Warnung ausgesprochen werden. Die Matrix ist ein ziemlich stumpfes Werkzeug, dem es an Präzision mangelt. Es gibt mehrere Ursachen, die zur Ungenauigkeit beitragen. Eine davon ist, dass die Schritte in einer typischen Risikomatrix recht groß sind, was zu erheblichen Rundungsfehlern führt. Eine andere ist, dass die beiden Parameter Wahrscheinlichkeit und Konsequenz nicht nur schwer zu schätzen sind, sondern tatsächlich zwei Spektren mit Verteilungskurven einer bestimmten Form darstellen. Werden beide mit safe(r)-Werten angesetzt, kann das Ergebnis eine recht starke Überschätzung des Risikos sein. Ist die Sicherheit in der Analyse ausreichend, wenn Durchschnittswerte verwendet werden? Die Botschaft lautet hier, die Ergebnisse einer Risikomatrix mit Vorsicht und Augenmaß zu behandeln. Ein bewährtes Verfahren ist die Verwendung der Risikomatrix, um einen Überblick über alle ermittelten Risiken zu erhalten. Die Übersicht zeigt die Teilmenge der Risiken auf, die eine tiefergehende Sicherheitsanalyse und/oder die Anwendung von Sicherheitsmaßnahmen erfordern. Beispiele für eine vertiefte Sicherheitsanalyse sind die Fehlerbaumanalyse (FTA) oder eine tiefer gehende Szenarioanalyse. Beides sind Möglichkeiten, verfügbare Barrieren mit höherer Präzision zu berücksichtigen.

The EU Regulation on Common Safety Methods – Risk Assessment (CSM-RA) was published some ten years ago and many of us now apply it in our daily work. However, the paragraphs on risk acceptance are somewhat difficult to decode. This article proposes a comprehensive risk matrix based on the definitions provided by CSM-RA. CSM-RA only provides limited information about risk acceptance, but some extrapolation can enable us to arrive at a complete risk matrix that may be applicable to the practical work of risk acceptance. The first issue of CSM-RA [1] was very limited in terms of its risk acceptance criteria. The EU 2015/1136 amending regulation [2] then made some amendments, so that we have a foundation from which to usefully extrapolate while remaining in strict compliance with what the EU CSM-RA regulation states. The consolidated version of the CSM-RA regulation [3] is, of course, the one to read and use, given that it constitutes a merger of [1] and [2].

### 1 The pros and cons of a risk matrix

A risk matrix is a very popular risk assessment method as laypeople find it easy to understand and use. After all, it is important to engage various domain experts in risk analysis sessions, no matter whether they are train drivers, track maintenance staff, dispatchers or anyone else representing the actors involved in any potential risk activities. The risk matrix is excellent, because it can be quickly grasped by anyone! However, we must also exercise some caution, as it is a rather blunt tool and lacks precision. There are several sources that contribute to this inaccuracy. One lies in the fact that the steps in a typical risk matrix are quite large and lead to a significant rounding error. Another is that the two parameters of probability and consequence are not only hard to estimate, but are actually two spectrums with distribution curves of a specific shape. If safe(r) values are used for both, this can result in a quite large overestimation of the risk. However, the safety in the analysis may also be insufficient if average values are used. The message here is to handle the results of a risk matrix with caution and judgement. It is good practice to use the risk matrix to maintain an overview of all the identified risks. The overview will highlight the subset of risks that need a deeper safety analysis and/or the application of safety measures. Examples of deeper safety analyses include fault-tree analyses (FTA) or scenario analyses that drill deeper. Both are ways of factoring in the available barriers with higher precision. They can quite possibly



Möglicherweise können sie zu einer verbesserten Risikoabschätzung führen, die deutlich niedriger ist als die ursprüngliche matrixbasierte Abschätzung. Alternativ können auch Sicherheitsmaßnahmen zur Risikominderung angewendet werden. Sicherheitsmaßnahmen können viele Formen annehmen und können technischer, verfahrenstechnischer oder organisatorischer Art sein.

**2 Grundsätze der Risikoakzeptanz**

Die CSM-RA definiert drei Grundsätze für die Risikoakzeptanz:

- 1. Verwendung von Verhaltenskodizes
- 2. Verwendung des Referenzsystems
- 3. Explizite Risikoeinschätzung und -bewertung

Die ersten beiden Grundsätze unterstützen im Wesentlichen die Wartung von Altsystemen einschließlich ihrer Sicherheitsnachweise und werden hier nicht weiter behandelt.

Das explizite Risiko beinhaltet eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeiten und Folgen der ermittelten Gefahren. Eine quantitative Schätzung ist wünschenswert, aber oft nicht machbar. Die Alternativen sind qualitative oder halbquantitative Risikoabschätzungen.

Daher müssen wir uns auf Kriterien einigen, die festlegen, welches Risikoniveau akzeptabel ist und welches nicht.

**3 Die CSM-RA-Risikoakzeptanzkriterien**

Im Mittelpunkt der EU-Verordnungen stehen gemeinsame Regeln und gleiche Wettbewerbsbedingungen für Unternehmen. Dies ist ein strategisches Ziel für die Eisenbahnen in Europa, und eine gemeinsame Definition von Sicherheitszielen ist ein Teil dieses Ziels. Der Kern der Definitionen ist in der konsolidierten CSM-RA [3] zu finden und wird in Tab. 1 zitiert.

Def ID	Reference	Definition Tabelle 1
D1	Article 3 (23)	„Katastrophaler Unfall“ ist ein Unfall, bei dem in der Regel eine große Zahl von Personen Schaden erleidet und mehrere Menschen zu Tode kommen
D2	Article 3 (35)	„Kritischer Unfall“ ist ein Unfall, bei dem in der Regel eine sehr geringe Zahl von Personen Schaden erleidet und mindestens ein Mensch zu Tode kommt
D3	Article 3 (36)	„Höchst unwahrscheinlich“ bedeutet das Auftreten eines Ausfalls mit einer Ausfallrate von höchstens 10 <sup>-9</sup> je Betriebsstunde
D4	Article 3 (37)	„Unwahrscheinlich“ bedeutet das Auftreten eines Ausfalls mit einer Ausfallrate von höchstens 10 <sup>-7</sup> je Betriebsstunde
D5	Annex 1; 2.5.5 a)	Ist bei einem Ausfall davon auszugehen, dass dieser unmittelbar zu einem katastrophalen Unfall führt, muss das damit verbundene Risiko nicht weiter reduziert werden, wenn es nachweislich höchst unwahrscheinlich ist, dass es zu einem Ausfall der Funktion kommt.
D6	Annex 1; 2.5.5 b)	Ist bei einem Ausfall davon auszugehen, dass dieser unmittelbar zu einem kritischen Unfall führt, muss das damit verbundene Risiko nicht weiter reduziert werden, wenn es nachweislich unwahrscheinlich ist, dass es zu einem Ausfall der Funktion kommt.

**Tab. 1: Grundlegende Definitionen zur Risikoakzeptanz nach CSM-RA. Fettdruck zur Hervorhebung der Beziehungen innerhalb der Tabelle**

Die Aussagen aus den Punkten D5 und D6 definieren das Niveau der Risiken, die akzeptabel sind.

Wenn wir die obigen Definitionen auf eine klassische Risikomatrix übertragen, ist diese noch lange nicht fertig, aber sie ist ein interessanter Anfang. Unten sehen Sie die Risikomatrix mit den explizit akzeptablen Risiken nach D5 und D6. Die grünen Kästchen auf der linken Seite der D5- und D6-Kästchen sind trivialerweise akzeptabel, da sie mildere Folgen darstellen (Tab. 2).

Wir wollen alle weißen Kästchen ausfüllen, müssen aber zunächst die fehlenden Kategorien von Folgen und Wahrscheinlichkeiten definieren.

provide an improved estimation of the risk that is significantly lower than the initial matrix-based estimation. Alternatively, safety measures can also be applied to mitigate the risk. Safety measures can take many forms and may be technical, procedural or organisational.

**2 Risk acceptance principles**

The CSM-RA defines three principles for risk acceptance:

- 1. the use of codes of practice
- 2. the use of a reference system
- 3. an explicit risk estimation and evaluation

The first two basically support the maintenance of legacy systems, including their proof of safety, and are not discussed here any further.

An explicit risk involves an estimation of the probabilities and consequences of the identified hazards. A quantitative estimation is preferable, but often not feasible. The alternatives are qualitative or semi-quantitative risk estimations.

We then need to have some agreed criteria concerning the level of risk that is acceptable or not.

**3 The CSM-RA risk acceptance criteria**

Common rules and a level playing field for businesses lie at the heart of the EU regulations. This is a strategic target for railways in Europe and a common definition of the safety targets constitutes part of this. The very core of the definitions can be found in the consolidated CSM-RA [3] and are quoted in tab. 1.

Def ID	Reference	Definition
D1	Article 3 (23)	A “catastrophic accident” means an accident typically affecting a large number of people and resulting in multiple fatalities
D2	Article 3 (35)	A “critical accident” means an accident typically affecting a very small number of people and resulting in at least one fatality
D3	Article 3 (36)	“Highly improbable” means an occurrence of failure at a frequency less than or equal to 10 <sup>-9</sup> per operating hour
D4	Article 3 (37)	“Improbable” means an occurrence of failure at a frequency less than or equal to 10 <sup>-7</sup> per operating hour
D5	Annex 1; 2.5.5 a)	Where a failure has a credible potential to lead directly to a catastrophic accident, the associated risk does not have to be reduced further if the frequency of the failure of the function has been demonstrated to be highly improbable
D6	Annex 1; 2.5.5 b)	Where a failure has a credible potential to lead directly to a critical accident, the associated risk does not have to be reduced further if the frequency of the failure of the function has been demonstrated to be improbable.

Tab. 1: The foundational risk acceptance definitions according to CSM-RA. The bold font has been added to highlight the relations within the table.

The statements from D5 and D6 define the levels of risks that are acceptable.

If we take the definitions set out above and map them onto a classic risk matrix, it will be far from finished, but will constitute an interesting start. The risk matrix view of the explicitly acceptable risks according to D5 and D6 can be seen below. The green boxes to the left of the D5 and D6 boxes are trivially acceptable as they represent milder consequences (tab. 2).

We want to fill in all the white boxes, but first need to define the missing categories of consequence and probability.



Höchste Wahrscheinlichkeit					Ecke des maximalen Risikos
...					
...					
Unwahrscheinlich D4				Annehmbar D6	
Höchst unwahrscheinlich D3	Ecke des geringsten Risikos			Annehmbar D5	
	Geringste Konsequenz	...	...	Kritischer Unfall	Katastrophaler Unfall

Tab. 2: Eine vorläufige Risikomatrix. Die fettgedruckte Schrift weist auf eine direkte Rückverfolgbarkeit zur CSM-RA-Verordnung hin.

#### 4 Kategorien der Wahrscheinlichkeit

Eine sehr etablierte Definition von Wahrscheinlichkeitskategorien ist natürlich die Definition des Safety Integrity Level (SIL). Gemäß EN 50126-2 [5], Abschnitt 10.2.7, lautet die Definition wie folgt (Tab. 3):

TFFR [h <sup>-1</sup> ]	SIL-Zuordnung
10 <sup>-9</sup> ≤ TFFR < 10 <sup>-8</sup>	4
10 <sup>-8</sup> ≤ TFFR < 10 <sup>-7</sup>	3
10 <sup>-7</sup> ≤ TFFR < 10 <sup>-6</sup>	2
10 <sup>-6</sup> ≤ TFFR < 10 <sup>-5</sup>	1
10 <sup>-5</sup> ≤ TFFR	basic integrity

Tab. 3: SIL-Stufen nach EN 50126-2 [5], mit Hinzufügung von Basic Integrity

Eine Anmerkung: EN 50126-1 [4] Anhang C (informativ) besagt, dass die Kalibrierung der Risikomatrix und die Akzeptanzkriterien vom Inhaber des Eisenbahnbetriebs festgelegt werden müssen. Dies ist nicht ganz zutreffend, wenn der Inhaber des Eisenbahnverkehrsdienstes im Rahmen der EU-Verordnungen handelt, da in diesem Fall die Beschränkungen gemäß Tab. 1 verbindlich sind.

Highest probability					Corner of max. risk
...					
...					
Improbable D4				Acceptable D6	
Highly improbable D3	Corner of least risk			Acceptable D5	
	Least consequence	...	...	Critical accident	Catastrophic accident

Tab. 2: A tentative risk matrix. The bold font indicates direct traceability to the CSM-RA Regulation.

#### 4 Categories of probability

The definition of the Safety Integrity Level (SIL) is, of course, a well-established definition of the categories of probabilities. The definition is as follows (tab. 3) according to EN 50126-2 [5] sec 10.2.7:

TFFR [h <sup>-1</sup> ]	SIL attribution
10 <sup>-9</sup> ≤ TFFR < 10 <sup>-8</sup>	4
10 <sup>-8</sup> ≤ TFFR < 10 <sup>-7</sup>	3
10 <sup>-7</sup> ≤ TFFR < 10 <sup>-6</sup>	2
10 <sup>-6</sup> ≤ TFFR < 10 <sup>-5</sup>	1
10 <sup>-5</sup> ≤ TFFR	basic integrity

Tab. 3: SIL levels according to EN 50126-2 [5], with basic integrity added

A comment: EN 50126-1 [4] Annex C (informative) states that the risk matrix calibration and acceptance criteria will be defined by the railway operator. This is not entirely true, however, if the railway operator is acting under the EU Regulations, as the constraints according to tab. 1 are mandatory in such a case.



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.





ID	Kategorie	Praktische Kriterien	TFFR [h <sup>-1</sup> ]	SIL	Quelle
4	Häufig	Geschieht mehrmals pro Jahr und Fahrzeug	$10^3 \leq TFFR$	Grundlegende Integrität	[Ref. 5]
3	Gelegentlich	Passiert wahrscheinlich mehr als einmal während der vorhersehbaren Nutzungsdauer des Fahrzeugs (15 Jahre)	$10^4 \leq TFFR < 10^3$ $10^5 \leq TFFR < 10^4$		
2	Entfernte	Passiert höchstens einmal in der vorhersehbaren Zeit eines Fahrzeugs. Passiert mindestens einmal in absehbarer Zeit von 100 Fahrzeugen.	$10^6 \leq TFFR < 10^5$ $10^7 \leq TFFR < 10^6$	1 2	[Ref. 5]
1	<b>Unwahrscheinlich</b>	Das wird in der absehbaren Zeit von 100 Fahrzeugen wahrscheinlich nicht passieren.	$10^8 \leq TFFR < 10^7$ $10^9 \leq TFFR < 10^8$	3 4	<b>D4</b> [Ref. 5]
0	<b>Höchst unwahrscheinlich</b>	Ereignis, das so unwahrscheinlich ist, dass es vernachlässigt werden kann	<b><math>TFFR &lt; 10^9</math></b>	N/A	<b>D3</b>

Tab. 4: Tabelle der Kategorien von Wahrscheinlichkeiten. Die fettgedruckte Schrift weist auf eine direkte Rückverfolgbarkeit zur CSM-RA-Verordnung hin.

ID	Category	Practical criteria	TFFR [h <sup>-1</sup> ]	SIL	Source
4	Frequent	Happens several times per year and vehicle	$10^3 \leq TFFR$	Basic Integrity	[Ref. 5]
3	Occasional	Happens probably more than once during the foreseeable service life of the vehicle (15 years)	$10^4 \leq TFFR < 10^3$ $10^5 \leq TFFR < 10^4$		
2	Remote	Happens at most once during the foreseeable time of the vehicle. Happens at least once in the foreseeable time of 100 vehicles	$10^6 \leq TFFR < 10^5$ $10^7 \leq TFFR < 10^6$	1 2	[Ref. 5]
1	<b>Improbable</b>	Will probably not happen during the foreseeable time of 100 vehicles	$10^8 \leq TFFR < 10^7$ $10^9 \leq TFFR < 10^8$	3 4	<b>D4</b> [Ref. 5]
0	<b>Highly improbable</b>	An event so improbable it can be disregarded	<b><math>TFFR &lt; 10^9</math></b>	N/A	<b>D3</b>

Tab. 4: The table of the categories of probabilities. The bold font indicates direct traceability to the CSM-RA Regulation.

Wir weisen darauf hin, dass das „unwahrscheinliche“ D4 in der Tat als der Bereich zwischen  $10^{-7}$  und  $10^{-9}$  Ausfällen pro Betriebsstunde definiert ist, der einen Faktor von 100 umfasst. Dieser Bereich entspricht auch den Wahrscheinlichkeitsbereichen von SIL3 und SIL4. Die vorgeschlagenen Kategorien von Wahrscheinlichkeiten folgen diesem Muster und haben einen festen Abstand mit einem Faktor von 100. (Der gleiche Faktor wird später ein nützliches Merkmal sein.) Jede Kategorie erhält eine ID-Nummer, wobei 0 die geringsten und 4 die höchsten Anforderungen sind. Die höchsten und niedrigsten Kategorien haben offene Intervalle, so dass jeder Wahrscheinlichkeit eine ID zugeordnet werden kann. Es ist eine gute Idee, die Wahrscheinlichkeiten in einer Form auszudrücken, die für die Teilnehmer der Risikoanalyse-Sitzungen klar und intuitiv ist. Versuchen Sie, Definitionen zu finden, die der Realität entsprechen und für die Teilnehmer sinnvoll sind. Eine gute Idee ist es, die Grenzen der Wahrscheinlichkeiten als Häufigkeit auszudrücken, d. h. wie oft das Ereignis eintreten kann, da dies viel intuitiver ist.

ID	Kategorie	Definition	Quelle
0	Vernachlässigbar	Keine Folgen	-
1	Geringfügiger Unfall	Leichte Verletzung der Person und/oder begrenzte Schäden am Material	-
2	Schwerer Unfall	Eine Person schwer verletzt und/oder hoher Sachschaden	-
3	<b>Kritischer Unfall</b>	<b>Unfall, bei dem in der Regel nur sehr wenige Personen betroffen sind und der mindestens einen Todesfall zur Folge hat</b>	<b>D6</b>
4	<b>Katastrophaler Unfall</b>	<b>Ein Unfall, der in der Regel eine große Anzahl von Menschen betrifft und mehrere Todesopfer fordert</b>	<b>D5</b>

Tab. 5: Kategorien von Konsequenzen. Die fettgedruckte Schrift kennzeichnet die direkte Rückverfolgbarkeit zur CSM-RA-Verordnung.

We would note that the D4 “improbable” is in effect defined as the range between  $10^{-7}$  and  $10^{-9}$  failures per operating hour, spanning a factor of 100. This range also matches the probability ranges of SIL3 and SIL4. The proposed categories of probabilities follow this pattern and are given a fixed spacing with a factor of 100. (The equal factor will be a useful feature later.) Each category is given an ID number with 0 as the least demanding and 4 the most demanding. The highest and lowest categories have open intervals, so any probability can be assigned an ID. It is a good idea to express the probabilities in a form that is clear and intuitive to the participants of the risk analysis sessions. Try to make definitions that match reality and are meaningful to the participants. It is a good idea to express the probability boundaries as a frequency, i.e. how often the event may happen, as this is far more intuitive.

ID	Category	Definition	Source
0	Negligible	No consequences	-
1	Marginal accident	Mild injury to a person and/or limited damage to material	-
2	Severe accident	One person severely injured and/or major material damage	-
3	<b>Critical accident</b>	<b>An accident typically affecting a very small number of people and resulting in at least one fatality</b>	<b>D6</b>
4	<b>Catastrophic accident</b>	<b>An accident typically affecting a large number of people and resulting in multiple fatalities</b>	<b>D5</b>

Tab. 5: Categories of consequence. The bold font indicates direct traceability to the CSM-RA Regulation.