

Die Digitalisierung der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart (Teil 1)

Digitalising the S-Bahn Stuttgart Core (part 1)

Albrecht Achilles | Behrooz Azarfar | Martin Beyer | Frank Lehmann | Roman Lies | Martin Schleede | Daniel Trenchel | Sven Wanstrath

Mit inzwischen mehr als 900 Zügen pro Tag zählt die zweigleisige S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart zu den am stärksten belasteten Strecken in Deutschland. Nach mehrjähriger Diskussion, Konzeption und Planung wird sie – als eine der ersten derartigen Strecken weltweit – mit einem Digitalen Stellwerk (DSTW), European Train Control System Level 2 ohne Signale (ETCS L2oS) und Automatic Train Operation Grade of Automation 2 (ATO GoA 2) ausgerüstet. Während dabei zahlreiche Optimierungen für „maximale“ Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit vorangetrieben werden, zeigen sich auch einige Chancen und Herausforderungen. Im Fokus des mehrteiligen Beitrags stehen in Teil 1 zunächst Konzeption und Planung.

1 Motivation

Die S-Bahn Stuttgart ist eine Erfolgsgeschichte und das Rückgrat des Verkehrs in der Region. Bis zu 435 000 Fahrgäste sind täglich (Mo-Fr) mit rund 1000 Zügen auf dem 215 km langen Streckennetz mit sei-

With more than 900 trains per day, the double-track S-Bahn Core in Stuttgart is one of the busiest lines in Germany. After several years of discussions, concepts and planning, it is now being equipped with a digital interlocking (DSTW), European Train Control System Level 2 (ETCS L2) (without Class B) and Automatic Train Operation Grade of Automation 2 (ATO GoA 2) – one of the first such lines in the world. While numerous optimisations for “maximum” performance and availability are being pursued, some opportunities and challenges are also becoming apparent. Part 1 of this multi-part article focuses on the concept and planning.

1 Motivation

The suburban train system in the Stuttgart region (S-Bahn Stuttgart) is a success story and it constitutes the backbone of the transport in the region. Up to 435,000 passengers travel on around 1,000 trains along the 215 km route network with its 83 stations

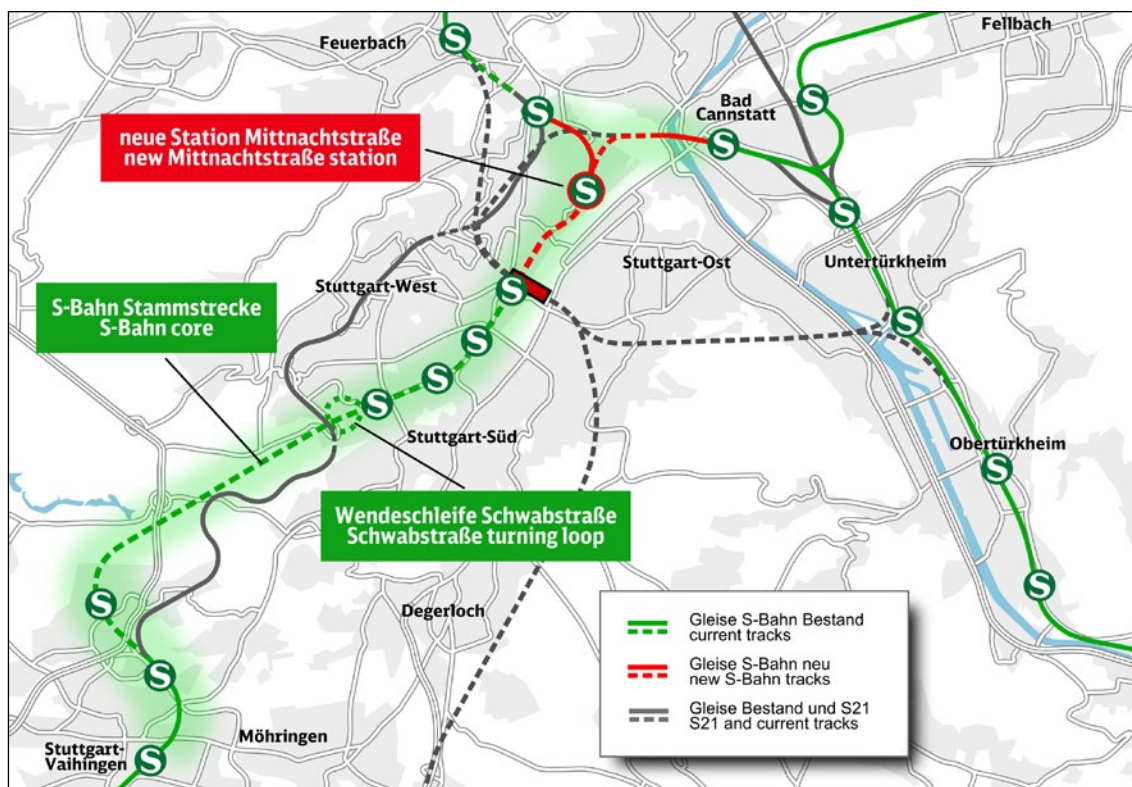


Bild 1: Die Stammstrecke ist das Herzstück der S-Bahn Stuttgart.

Fig. 1: The Core lies at the heart of the Stuttgart S-Bahn. Quelle aller Abbildungen/ Source of all figures: Deutsche Bahn

nen 83 Stationen unterwegs. Das Herzstück des Systems ist die zweigleisige S-Bahn-Stammstrecke. (Bild 1) 1978 ging zunächst der besonders hochbelastete Kernbereich, zwischen Hauptbahnhof und der Wendeschleife Schwabstraße, in Betrieb, 1985 folgte die Erweiterung über die Universität bis Vaihingen. Im Norden verzweigt sich die Strecke Richtung Feuerbach und Bad Cannstatt.

Auf den sechs über den hochbelasteten Kernbereich Stammstrecke geführten Linien ist inzwischen von 6 bis 20 Uhr ein Viertelstunden-takt geplant, mit einer 2,5-Minuten-Zugfolge je Richtung. Die Hälfte der Züge wendet an der Schwabstraße, die andere Hälfte wird Richtung Vaihingen weitergeführt. Die vorgesehenen Haltezeiten von 30 Sekunden werden häufig überschritten. 2022 waren nur noch 80 % aller Züge pünktlich (weniger als 3,0 Minuten verspätet). In den kommenden Jahren werden noch mehr Züge, längere Züge und noch mehr Fahrgäste erwartet.

Im hochbelasteten Kernbereich reizt die Leit- und Sicherungstechnik (LST) aus den 1970er Jahren die Möglichkeiten der konventionellen Lichtsignalisierung (H/V-Signale) mit Punktförmiger Zugbeeinflussung (PZB) aus. Unter anderem stehen Hauptsignale in Abständen von teils unter 400 m, wird teils auf Vorsignale verzichtet und es werden Geschwindigkeitsprüfeinrichtungen (GPE) anstelle von 500- und 1000-Hz-Magneten eingesetzt. [1, 2] Angesichts des ungebrochenen Wachstums wurden bereits seit den 1990er Jahren diverse Verbesserungen erwogen – darunter Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB) [3], Außenbahnsteige für kürzere Haltezeiten [4] oder auch eine zweite Stammstrecke [5] – und letztlich verworfen.

Die heute für 60 km/h zugelassene Strecke darf im Regelbetrieb nur durch beschleunigungsstarke S-Bahn-Fahrzeuge (Baureihen 420, 423, 430) von besonders ausgebildeten Triebfahrzeugführern befahren werden. Die fast 70 m langen Triebzüge kommen dabei zumeist in Doppel- oder Dreifachtraktion zum Einsatz.

Im Rahmen des seit 2010 im Bau befindlichen Großprojekts Stuttgart 21 wird die Stammstrecke um eine weitere Station (Mittnachtstraße) ergänzt. Das heutige Relaisstellwerk (am Hauptbahnhof) sollte in diesem Zuge durch ein Elektronisches Stellwerk (ESTW) ersetzt werden, die alten Signale des Haupt-/Vorsignal-Systems (H/V) durch neue Kombinationssignale (Ks) – weiterhin mit PZB und zahlreichen GPE. Unter hohem Aufwand hätte dies für Kapazität (Zugfolgezeiten) und Betriebsqualität (Verspätungen) letztlich keine Verbesserung gebracht. [6]

2 Genese

Vor diesem Hintergrund entzündeten sich Mitte der 2010er Jahre erste Diskussionen, angesichts der ohnehin notwendigen LST-Erneuerung, ETCS auf der Stammstrecke einzuführen [7]. Nachdem eine erste einfache Untersuchung [6] der Deutschen Bahn AG (DB) positive Effekte durch ETCS erwarten ließ, schrieben das Land Baden-Württemberg, der Verband Region Stuttgart (VRS) sowie die DB eine mit 1 Mio. EUR unterlegte Untersuchung zur technischen Machbarkeit und betrieblichen Sinnhaftigkeit von ETCS aus. Im Ergebnis zeigte sich Ende 2018, dass ETCS (und ATO GoA 2) auf der S-Bahn-Stammstrecke nicht nur technisch machbar, sondern auch betrieblich sinnvoll wäre: Selbst unter konservativen Prämissen können die Mindestzugfolgezeiten um fast eine halbe Minute verkürzt bzw. eingetragene Verspätungen im Kern des S-Bahn-Systems um durchschnittlich 26 Sekunden reduziert werden. [8, 9]

Darauf folgten 2019 und 2020 wegweisende Entscheidungen. So beschloss der VRS, fast 1 Mrd. EUR zu investieren: in 58 neue Triebzüge, in die Umrüstung der gesamten Flotte, in eine Verlängerung des Verkehrsvertrages sowie in verkehrliche Verbesserun-

daily (Mon-Fri). The double-track S-Bahn Core is at the heart of the system. (fig. 1) Services started on the particularly heavily used section between the main station (Hauptbahnhof) and the Schwabstraße turning loop in 1978, followed by the southern extension via the university to Vaihingen in 1985. In the north, the line branches out towards Feuerbach and Bad Cannstatt.

Meanwhile, a quarter-hourly service is planned from 6 am to 8 pm on the six lines running through the highly congested section with a 2.5-minute train sequence in each direction. Half the trains turn at Schwabstraße, while the other half continue towards Vaihingen. The scheduled dwell times of 30 seconds (from stop to start) are often exceeded. In 2022, only 80 % of all trains were on time (less than 3:00 minutes delayed). In the coming years, more trains, longer trains and even more passengers are expected.

The command, control and signalling (CCS) in the particularly heavily used area has utilised almost all the options for conventional (H/V) light signalling and its underlying PZB train protection from the 1970s. Amongst other things, the main signals are placed at distances of less than 400 m in some cases, advance signals have been partly dispensed with and speed checking devices (GPE) are used instead of 500 and 1000 Hz PZB inductors. [1, 2] In light of the uninterrupted growth, various improvements have been under consideration since the 1990s (including continuous LZB train protection [3], additional platform edges for shorter stopping times [4] or building a second core [5]) and ultimately discarded.

The line, which is currently approved for 60 km/h, can only be used in regular service by well-braking S-Bahn vehicles (class 420, 423, 430) driven by specially trained drivers. The trains are usually composed of two or three of the 70 m long multiple trainsets. Another station (Mittnachtstraße) is being added to the Core as part of the Stuttgart 21 megaproject, which has been under construction since 2010. The current relay-based interlocking (at the main station) was supposed to be replaced with an electronic interlocking (ESTW), while the old H/V system signals should have been replaced with modern signals (Ks) as well as with PZB and numerous GPE. This would have ultimately brought no improvement in terms of capacity (headways) and operating quality (delays) despite the great expense. [6]

2 Origins

In light of this, the first discussions commenced in the mid-2010s with the aim of introducing ETCS to the Core in view of the CCS renewal that had already been planned [7]. After an initial simple study [6] undertaken by Deutsche Bahn AG (DB) suggested that ETCS would have positive effects, the state of Baden-Württemberg, the Verband Region Stuttgart (VRS) and DB called for tenders for a 1 million EUR study into the technical feasibility and operating sense of ETCS. The results at the end of 2018 showed that ETCS (and ATO GoA 2) on the S-Bahn core would not only be technically feasible, but would also make sense operationally: even under conservative premises, the minimum headway could be reduced by almost half a minute and any delays in the S-Bahn system's core could be reduced by an average of 26 seconds. [8, 9] This was followed by ground-breaking decisions in 2019 and 2020. The VRS decided to invest almost 1 billion EUR in 58 new multiple units, the conversion of the entire fleet, an extension of the transport contract and traffic improvements that will only become possible in conjunction with the digitalisation and accompanying infrastructure measures. [10] A deliberate decision

gen, die erst zusammen mit der Digitalisierung und begleitenden Infrastrukturmaßnahmen möglich werden. [10] Auf eine Doppelausrüstung der Infrastruktur sollte bewusst verzichtet [11] und die Leistungsfähigkeit auf zunächst mindestens 30 Züge pro Stunde und Richtung [12] erhöht werden.

Die S-Bahn-Stammstrecke wurde zur Keimzelle des Digitalen Knotens Stuttgart (DKS), einem Pilotprojekt im Starterpaket der Digitalen Schiene Deutschland (DSD), in dessen Rahmen in den kommenden Jahren rund 500 Streckenkilometer und zunächst rund 500 Triebzüge / Triebfahrzeuge ausgerüstet werden [13, 14]. Thales Deutschland (heute GTS) erhielt Ende 2020 den Auftrag, den rund 125 Streckenkilometer umfassenden Kernbereich des DKS auszurüsten [15]. Für die darin enthaltene Ausführungsplanung (PT1) und die PT1-Planprüfung wurde safeTrail unterbeauftragt, die an dem Projekt gemeinsam mit den Ingenieurbüros PlanIQ, PlanSig, V+S sowie Nehmsch arbeitet.

Parallel zur Infrastruktur wird die gesamte S-Bahn-Flotte (215 Triebzüge) nicht nur mit ETCS und ATO GoA 2 ausgerüstet, sondern vorausschauend auch mit weiteren Techniken und Funktionen (wie ETCS Level 3) und Optimierungen (wie Bremskurven) [16, 17, 18, 19, 20].

Auf diesen Grundlagen soll zunächst im September 2025 das DSTW und ETCS L2oS in Betrieb genommen werden, weitere Techniken und Optimierungen Schritt für Schritt werden folgen. Begleitet wird das Vorhaben von umfangreichen konventionellen Infrastrukturmaßnahmen wie eine Reihe neuer Weichen im Umfeld der Stammstrecke und einer Modernisierung von Tunneln und Verkehrsstationen.

3 DSTW-Planung

3.1 Grundlagen

Betrieblich ist die Stammstrecke zukünftig im Wesentlichen ein 11 km langer Bahnhof „Stuttgart Hbf (S-Bahn)“ [21]. Sie ist Teil der Stellwerk-Zentraleinheit „Stuttgart S-Bahn“, die rund 38 Streckenkilometer umfasst und der die gleichnamige ETCS-Zentrale (Radio Block Centre, RBC) zugeordnet ist [22].

DSTW, ETCS und ATO GoA 2 werden gesamthaft und datenbankbasiert mit dem Planungswerkzeug safeTplan [23] geplant. Das ursprüngliche Ziel, Planung, Prüfung und Projektierung möglichst durchgehend „digital“ und datenbasiert (PlanPro / D3iP [24]) zu machen, stieß in der Praxis noch an einige Grenzen. Das Planungsergebnis wird nunmehr teils als PlanPro-XML, teils auch nur in PDF-Dateien und Tabellen zur Prüfung und Projektierung übergeben. Eine Reihe von Erfahrungen floss und fließt in die Weiterentwicklung von Datenmodell und Werkzeugen ein. [25]

3.2 Blockteilung

Der Hochleistungsblock in Stationsbereichen ist das wichtigste Element, um die Mindestzugfolgezeiten (MzF) auf der Stammstrecke zu verkürzen. Die S-Bahn-Stammstrecke München [26], auf der seit 2004 planmäßig 30 Züge pro Stunde und Richtung mit LZB und bis zu 50 m kurzen Blöcken in Stationsbereichen gefahren werden, war Ausgangspunkt für die seit 2016 vertieften Überlegungen zur Gestaltung der Blockteilung.

Im Gegensatz zur LZB kennt ETCS an sich keine derartige Mindestlänge, gleichwohl die Mindestlänge der Gleisfreimeldeabschnitte für L2oS eine Untergrenze setzt, die im DB-Netz bei typischerweise 30 m und in Ausnahmefällen bei 22 m liegt [27]. Während die Studie von 2018 zunächst konservativ von rund 50 m langen Abschnitten ausging, ließ eine Verkürzung auf 30 m eine weitere MzF-Verkürzung um wenige weitere Sekunden erwarten (Bild 2).

was made to omit any Class B equipment in the infrastructure [11] and to increase the performance to an initial level of at least 30 trains per hour per direction [12].

The S-Bahn Core became the nucleus of the Stuttgart Digital Node (DKS), a pilot project in the starter package of Digitale Schiene Deutschland (DSD), in which around 500 route kilometres and initially around kilometres of track and initially around 500 traction 500 multiple units/traction units will be equipped in the coming years. [13, 14] Thales Germany (now GTS) was awarded the contract at the end of 2020 to build the 125 route kilometres of the core area of the DKS. [15] For the implementation planning (PT1) and PT1 plan review included in this and the plan verification, safeTrail was subcontracted, together with engineering companies PlanIQ, PlanSig, V+S and Nehmsch.

In addition to the infrastructure, the entire S-Bahn fleet (215 multiple units) will not only be equipped with ETCS and ATO GoA 2, but also with other technologies, functions (such as ETCS Level 3) and optimisations (such as braking curves) in a forward-looking manner [16, 17, 18, 19, 20].

Based on these foundations, the DSTW and ETCS L2 without Class B (ETCS only) will initially be commissioned in September 2025 with further technologies and optimisations to follow step by step. The project will be accompanied by extensive conventional infrastructure measures such as a series of new points in the vicinity of the Core and the modernisation of the tunnels and stations.

3 DSTW planning

3.1 The basics

Operationally, the Core will mainly be the 11 km long “Stuttgart Hbf (S-Bahn)” station [21]. It is part of the “Stuttgart S-Bahn” central interlocking unit that covers around 38 route kilometres and to which the Radio Block Centre (RBC) of the same name has been assigned [22].

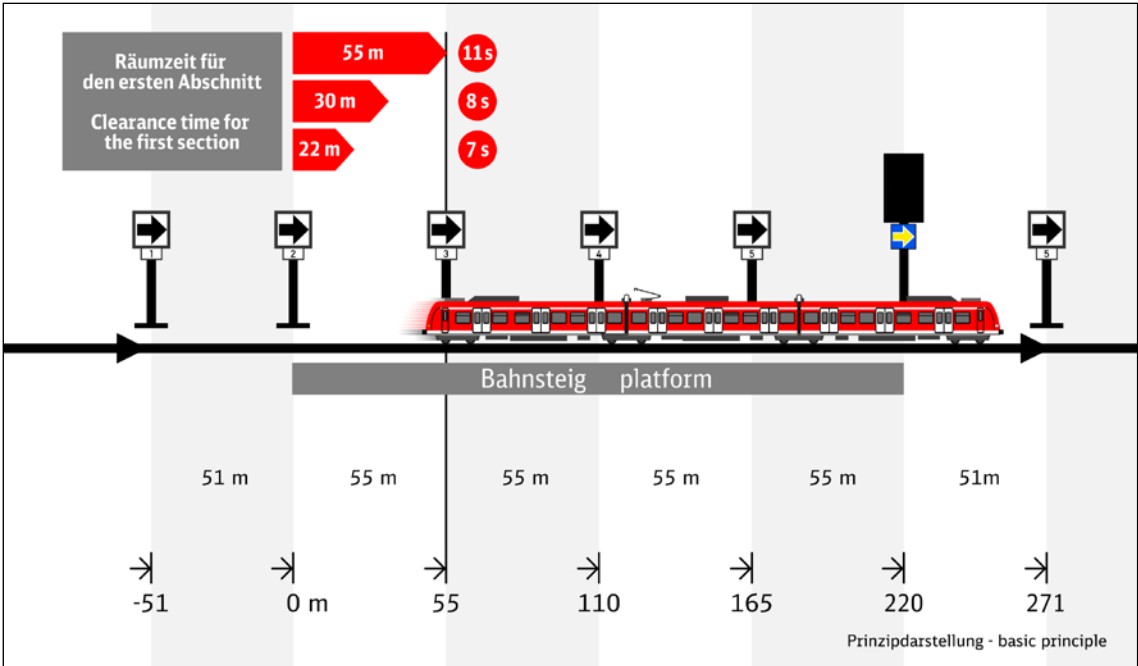
The DSTW, ETCS and ATO GoA 2 have been planned as a whole and database-based using the safeTplan planning tool [23]. The original goal of making planning, testing and data engineering as “digital” and data-based as possible (PlanPro / D3iP [24]) still came up against some limits in practice. The planning results have now been provided partly as a PlanPro XML and partly only in PDF files and tables for the planning / design review and for configuring the interlockings and RBCs. A number of experiences have gone into the further development of the data model and tools. [25]

3.2 Block division

The high-performance block in the station areas is the most important element for reducing headways on the Core. The Munich S-Bahn Core [26], on which 30 trains per hour and direction have been running as scheduled with LZB and blocks of around 50 m in the station areas since 2004, has been the starting point for the in-depth considerations on the design of the block division since 2016.

In contrast to LZB, ETCS does not require any such minimum length, although the minimum length for track vacancy detection sections for ETCS L2 sets a lower limit, which is typically 30 m in the DB network or 22 m in exceptional cases [27]. Whereas the 2018 study initially conservatively assumed sections of around 50 m in length, shortening them to 30 m gave rise to the anticipation of a further headway reduction of a few more seconds (fig. 2).

Bild 2: Ein Eindruck aus den frühen Überlegungen für die Blockteilung
Fig. 2: An impression from the early ideas for the block division



Mit der in [28] dargestellten Methode wurde anschließend eine mikroskopisch optimierte Blockteilung entwickelt. Während in Stationsbereichen 30 bis 75 m lange Blöcke gebildet wurden (exemplarisch: Bild 3), liegen dazwischen selbst im besonders hochbelasteten Kernbereich bis zu 600 m lange Abschnitte, im anschließenden langen Tunnel sogar bis zu 1,3 km. Durch die rein „virtuelle“ Blockteilung ist der Aufwand – für Achszählpunkt, Kabel, Balise, „Blechtafel“ und Projektierung – im niedrigen fünfstelligen Euro-Bereich je Block [28] überschaubar. Für (seltene) Fahrten entgegen der Hauptfahrtrichtung wird eine vereinfachte Blockteilung umgesetzt. Auf der Stammstrecke sind insgesamt rund 230 Freimeldeabschnitte, 80 ETCS-Halttafeln (Ne 14) und 120 Blockkennzeichen (BK) geplant. Der Hochleistungsblock ist ein wesentlicher Gegenstand einer Innovationskooperation, u.a. mit einer diesbezüglichen Machbar-

A microscopically optimised block division was then developed using the method presented in [28]. While 30 to 75 m long blocks have been created in the station areas (see the example in fig. 3), there are up to 600 m long sections in between them, even in the particularly highly loaded core area, and there is even a 1.3 km section in the long connecting tunnel. The purely “virtual” block division means that the expenditure (on axle counting point, cables, balises, location markers and project planning) is manageable in the low five-digit euro range per block [28]. A simplified block division has been implemented for (rare) journeys against the main direction of travel. A total of around 230 clearance sections, 80 ETCS stop markers (Ne 14) and 120 location identifiers (BK) have been planned for the core.

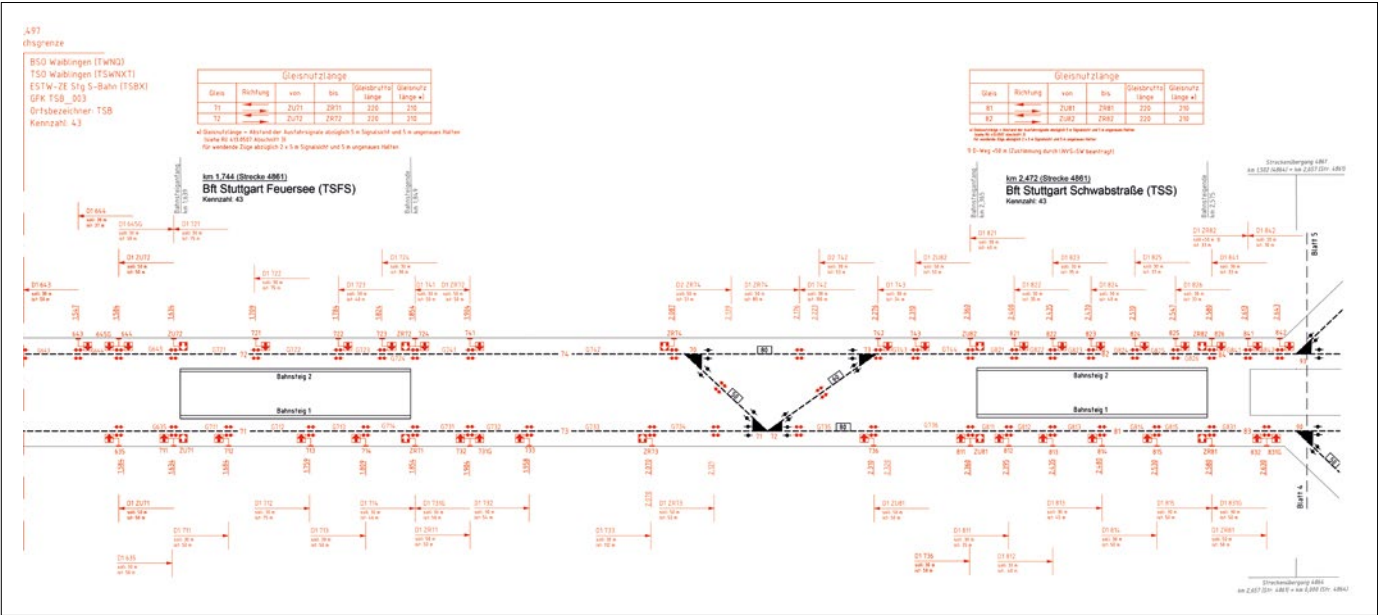


Bild 3: Vereinfachter Auszug aus einem LST-Übersichtsplan der Stammstrecke
Fig. 3: A simplified excerpt from a CCS overview plan for the Core

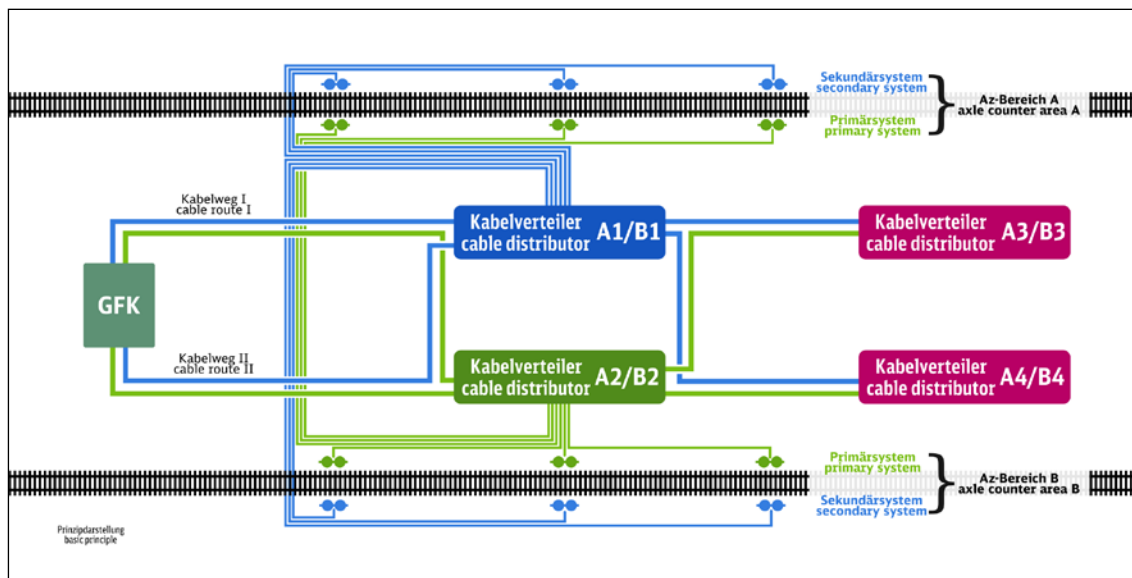


Bild 4: Prinzipdarstellung der Kreuzverkabelung des Achszählsystems

Fig. 4: A schematic diagram of the cross-cabling of the axle counting system

keitsstudie und einem daraus hervorgegangenen neuen Fahrstraßentyp (Wendezugstraße) [29].

3.3 Gleisfreimeldung

Aufgrund der Vielzahl der Abschnitte und der betrieblichen Bedeutung der Stammstrecke wird die Gleisfreimeldung derart robust geplant, dass ein einzelner Ausfall oder eine Zählstörung ohne Auswirkung auf den laufenden Betrieb bleibt [21, 30, 31]. Erstmals in Deutschland wird dazu eine Gleisfreimeldung mit redundant angeordneten Achszählpunkten (Azp) realisiert. Dabei werden zwei Azp möglichst im gleichen Schwellenfach an beiden Schienen angeordnet. Wo dies nicht möglich ist, z. B. in Weichenverbindungen, ist eine Montage mit bis zu 3 m Versatz an derselben Schiene zulässig. Ferner werden die Azp beider Systeme weitgehend trassenredundant und in den Bereichen, in denen nur eine gemeinsame Kabeltrasse verfügbar ist, „kreuzweise“ (Bild 4) verkabelt, sodass ein Ausfall eines Verteilerschranks oder eines Kabelweges ohne Folgen für den direkt betroffenen oder den Nachbarabschnitt bleibt. Wo zwei Segmente (z. B. mangels Kabelgleisquerungen) nicht miteinander verbunden werden können, wird baumförmig verkabelt, jedoch weiterhin ein separates Stammkabel für das Primär- und für das Sekundärsystem verlegt.

Als Alternative zu dieser Lösung wurde zunächst die mit dem System Thales Az LM mögliche „Überbrückung“ von Achszählern [32] verfolgt, aber wieder verworfen, da laut Fachbereich Auflösestörungen im Stellwerk nicht ausgeschlossen werden könnten.

3.4 Gleisfeldvernetzung

Die Gleisfeldvernetzung erfolgt nach den in [30] dargestellten Prinzipien und Elementen. Im Gegensatz zu den darin vorgestellten oberirdischen Bahnhofsbereichen mit Doppelausrüstung gestaltet sich die Ausrüstung der unterirdischen Stammstrecke mit L2oS insgesamt wesentlich einfacher.

Entlang der S-Bahn-Stammstrecke (Bild 1) sind rund 500 Azp, 32 Weichen und 16 Lichtsignale (mit etwa 30 GPE) mit vier Gleisfeldkonzentratoren (GFK) zu verkabeln. Den überwiegenden Teil der Kabel macht die redundante, sehr dichte Gleisfreimeldung (in klassischer ESTW-Technik) aus. Die Struktur der Kabelanlage ergibt sich im Wesentlichen aus den betrieblichen Anforderungen, den Restriktionen des fast 50 Jahre alten Tunnels und eines für einen anderen Stellwerkstyp realisierten Neubautunnels. Erweiterungen und Neubau-

The high-capacity block is the major subject of innovative co-operation, including a feasibility study in this regard and a new route type (a route for reversing trains) resulting from it [29].

3.3 Train detection system

Given the large number of block sections and the operational importance of the Core, the track vacancy detection has been planned to be sufficiently robust so that a single failure or counting fault will have no effect on any ongoing operations [21, 30, 31]. A redundant train detection system with redundantly arranged axle counter detection points (Azp) is being implemented for the first time in Germany. Two Azp have been arranged in the same sleeper compartment on both rails where possible. If this is not possible, e.g. in points, an installation with an offset of up to three metres on the same rail is permissible. Furthermore, the Azp for both systems are wired in a largely route-redundant manner and are “cross-wired” in areas where only one common cable route is available (fig. 4), so that a distribution cabinet or a cable route failure will have no consequences for the directly affected or neighbouring section. In cases where two segments cannot be connected to each other (e.g. due to a lack of cable track crossings), the wiring is executed in a tree-like manner, but a separate trunk cable is still laid for the primary and the secondary systems.

The “bridging” of the counter detection points [32] achievable with the Thales Az LM system was initially pursued as an alternative to this solution, but it was subsequently rejected, as the DB unit responsible for these matters concluded that resolution disturbances in the interlocking could not be ruled out.

3.4 Track-field networking

The track field networking has been realised according to the principles and elements presented in [30]. In contrast to the above-ground station areas with both ETCS and class B, the equipment for the ETCS-only underground Core is considerably simpler overall.

Around 500 Azp, 32 points and 16 lineside light signals (with around 30 GPE) will be wired along the Core (fig. 1) with four track field concentrators (GFK). The redundant, very dense track vacancy detection (in classic computer-based technol-

ten von Kabeltrassen sind nahezu ausgeschlossen, beispielsweise mit Rücksicht auf Lichtraumprofil, Fluchtwege, zahlreiche Einbauten und unzulässige Eingriffe in die stark bewehrte Tunnelsohle. Punktuelle Ergänzungen sind lediglich im Bereich von Stationen sowie Weichen (mit bauzeitlichen Hohlswellen) mit vertretbarem Aufwand möglich.

Ein wesentlicher Teil der Planung ist die optimierte Anordnung von Feldelementanschlussschränken (FEAS), -kästen (FEAK) und Kabelverteilsschränken. Sie werden möglichst in vorhandenen LST-Räumen abseits der Gleise aufgestellt. Diese sind gut erreichbar, können im laufenden Betrieb betreten werden und erfordern auch keine umfassenden aerodynamischen und statischen Nachweise wie bei einer Aufstellung am Gleis.

Durch den Verzicht auf eine Doppelausrüstung (mit Ks / PZB) kann ein Großteil der sonst notwendigen FEAK / FEAS entfallen. Die 43 verbleibenden FEAKs dienen ausschließlich der Ansteuerung der 32 Weichen und der 16 Lichtsignale (Hauptsignale und Wiederholer) im ETCS-Einstiegsbereich (Abschnitt 4.2). Während zwischen FEAK / FEAS und Lichtsignal im Thales-System (sekundäre) Stellentfernungen von 63 bis 100 m zulässig wären, sind es für Weichen bis zu 2 km.

Entsprechend der in [21] und [30] dargestellten Prinzipien ist die S-Bahn-Stammstrecke in mehrere, im Falle einer technischen Störung sinnvoll zu betreibende, Segmente unterteilt. Elemente dieser Segmente sind jeweils unabhängig von Elementen anderer Segmente verkabelt und verfügen über eigene Achszählrechner. Durch Flankenschutzanforderungen bleiben gleichwohl einzelne Abhängigkeiten zwischen den Segmenten bestehen.

Im Neubauteil stellt das als Rohrtrasse ausgeführte Kabelführungssystem eine Restriktion dar. Azp konnten nur an bereits zuvor erstellten Kabelschächten geplant werden, da nur dort eine Wandmontage der Elementanschlusskästen (EAK) der Azp möglich ist und nur dort ein Kabelauslass zur Wand und zum Gleis hergestellt werden kann. Die Kabellänge vom EAK zum Azp ist in der Regel auf 8 m beschränkt.

4 ETCS-Planung

4.1 Generik

Für die erstmalige Anwendung von ETCS L2 auf einer deutschen S-Bahn-Stammstrecke war eine Reihe von Richtlinien und Lastenheften für ETCS und Umsysteme (Stellwerk, Bediensystem, ATO)

ogy) accounts for the majority of the cables. The structure of the cable system has essentially resulted from the operating requirements, the restrictions of the almost 50-year-old tunnel and one tunnel realised for a different type of interlocking. Extensions and newly constructed cable routes are almost impossible, for example with regard to the clearance gauge, escape routes, numerous fixtures and inadmissible interventions in the heavily reinforced tunnel floor. Selective additions at a reasonable expense are only possible in the area of the stations and points (fitted with hollow sleepers during construction).

An essential part of the planning involves the optimised arrangement of the field element connection cabinets (FEAS), boxes (FEAK) and cable distribution cabinets. If possible, they are placed in existing CCS rooms away from the tracks. These are easily accessible, can be entered during operations and also do not require any comprehensive aerodynamic and static verifications unlike installations on the tracks.

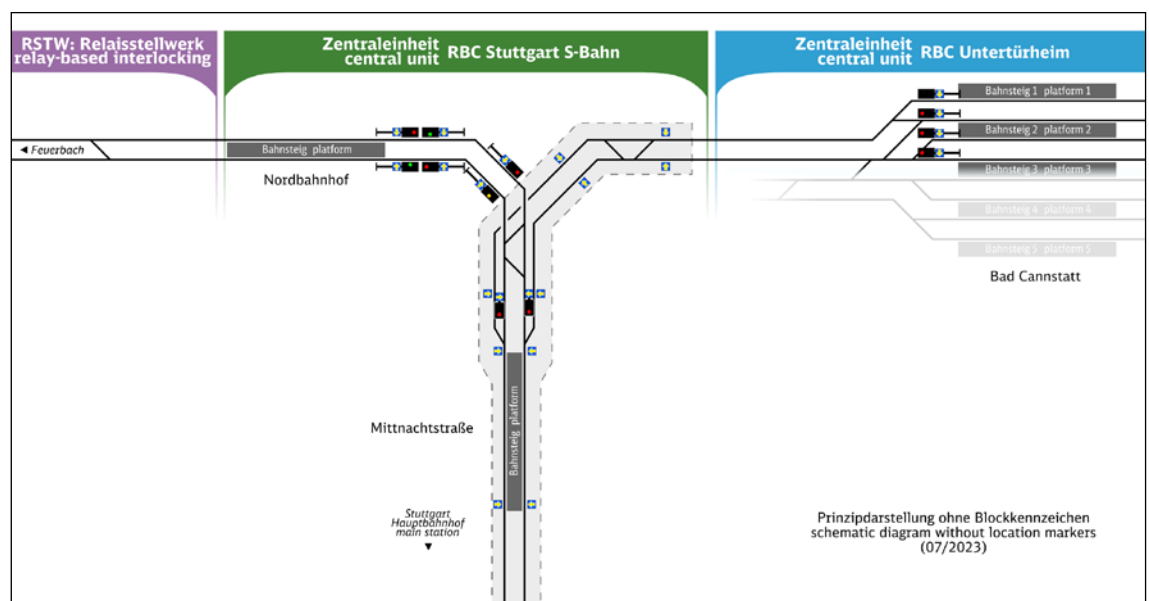
A large part of the otherwise necessary FEAK / FEAS can be omitted by dispensing with the Class B equipment (Ks / PZB). The 43 remaining FEAKs are used exclusively to control the 32 points and the 16 light signals (main signals and repeaters) in the ETCS transition area (section 4.2). While (secondary) distances of 63 to 100 m are permissible between the FEAK / FEAS and the lineside light signals in the Thales system, this distance is up to 2 km for points.

In accordance with the principles described in [21] and [30], the S-Bahn Core has been divided into several segments that can be sensibly operated in the event of a technical fault. The elements in these segments are wired independently of the elements in the other segments and have their own axle counter evaluator. Nevertheless, individual dependencies between the segments remain due to the flank protection requirements.

The cable routing system designed as a pipe route in the new infrastructure area represents a restriction. Azp could only be planned at the previously constructed cable shafts, as it is only possible to mount the Azp electronic junction boxes (EAK) on the wall there and this is the only place where a cable outlet to the wall and the track can be created. The cable length from the EAK to the Azp is usually limited to 8 m.

Bild 5: ETCS-Einstieg und Beginn des L2oS-Bereichs unter beengten Verhältnissen im nordwestlichen Zulauf

Fig. 5: The ETCS transition and the ETCS-only area in the north-western approach



anzupassen [33]. Gänzlich neu geschaffen wurden ergänzende, S-Bahn-spezifische ETCS-Planungsvorgaben für Stammstrecken [34] sowie Lastenhefte und Planungsleitfäden für ATO GoA 2.

Neben den im Rahmen der Innovationskooperation [29] verfolgten Themen war insbesondere die Anzahl erforderlicher Balisen zu reduzieren und waren ATO-Präzisionshalte zu regeln. Ferner war für die bis zu 30 m kurzen Gleisfreimelde- bzw. Blockabschnitte sicherzustellen, dass sicherheitsrelevante Funktionen wie die Zuordnung eines Zugs zum Signal, die Haltfallbewertung oder Fahrten in der Rückfallebene mit Betriebsart SR nicht beeinträchtigt werden. Daraus ist eine Vorgabe mit geschwindigkeitsabhängigen Mindestabständen für Ne 14 bzw. BK entstanden [35].

Die geschaffenen Werke sind durchgehend generisch und damit auch in anderen Projekten anwendbar.

4.2 ETCS-Einstiege

Ein Schwerpunkt der Planung lag in der Gestaltung der Einstiege nach ETCS L2oS, für die unter hohen Leistungsanforderungen bei DB Netz drei aufeinander folgende Hauptsignale erforderlich [22] und gewisse Vorläufe und Mindestabstände [36] einzuhalten sind. Während Züge zur Stammstrecke von Süden und Nordosten bereits einige Kilometer zuvor in den DSTW-Bereich einfahren, in ETCS einsteigen und anschließend in den L2oS-Bereich einfahren können, gelingt dies von Nordwesten nicht: Aus diversen Gründen [37] kann die Grenze zum DSTW erst vor dem Nordbahnhof liegen und der Levelwechsel erst nach Abfahrt am dortigen Halt erfolgen (Bild 5).

Durch eine Reihe von Optimierungen, darunter auf rund 400 m verkürzte Hauptsignalabstände, konnten in dem 1 km langen Abschnitt zwischen Nordbahnhof und Mitnachtstraße die jeweils drei Signale in beiden Gleisen angeordnet werden. Das jeweils letzte Lichtsignal vor der Mitnachtstraße dient dabei als Zufahrtssicherungssignal – eine Voraussetzung, um die Stammstrecke selbst durchgehend in L2oS zu betreiben.

Um Züge mit nicht funktionsbarem ETCS noch vor Einfahrt in die Stammstrecke zu erkennen, wird auf allen Zuläufen eine Dispositive Zufahrtssicherung [29] eingerichtet.

4.3 ATO GoA 2

Als Teil des DKS wird die Stammstrecke auch für hochautomatisiertes Fahren mit Triebfahrzeugführer (ATO GoA 2,) ausgerüstet. Im Rahmen der ETCS-Planung sind hierbei insbesondere Präzisionshalte auf $\pm 0,5$ m genau [38] zu berücksichtigen. Vor einem derartigen Halt sind drei zur Ortung geeignete Balisen als „Präzisionshaltedatenpunkte“ in definierten Fenstern (Bild 6) anzuordnen. Diese werden gemäß [39] angeordnet; geeignete Balisengruppen, beispielsweise an BK, können auch für ATO mitgenutzt werden. Während bereits für ETCS alle Balisen metergenau zu montieren und im RBC zu projek-

4 ETCS planning

4.1 Generics

A number of guidelines and specifications for ETCS and the surrounding systems (interlockings, the control system, ATO) have had to be adapted to the first application of ETCS L2 on a German S-Bahn core [33]. New supplementary S-Bahn-specific ETCS planning specifications have been created for S-Bahn cores [34], as well as the specifications and planning guidelines for ATO GoA 2. In addition to the topics pursued within the framework of the innovative cooperation [29], the number of required balises has had to be reduced and ATO precision stop rules have had to be established. Furthermore, it was necessary to ensure that the safety-relevant functions such as the allocation of a train to the signal, the signal-to-stop evaluation or journeys in degraded mode (SR) were not impaired for the up to 30 m short train detection / block section. This has resulted in a specification with speed-dependent minimum distances for the stop and location markers [35].

The created work is generic throughout and therefore also applicable to other projects.

4.2 ETCS transitions

One focus of the planning involved designing the transitions to the ETCS-only areas, for which three consecutive main signals are required under the high performance requirements at DB Netz [22] and certain lead times and minimum distances [36] must be observed. While trains coming to the Core from the south and north-east can already enter the DSTW area a few kilometres earlier, transition to ETCS and then enter the ETCS-only area, this is not possible from the north-west: the border to the DSTW can only be located in front of the Stuttgart Nordbahnhof for various reasons [37] and the transition to ETCS L2 can only take place after the departure from the stop there (fig. 5).

A series of optimisations, including shortening the main signal distances to around 400 m, enabled the three signals to be arranged on both tracks in the one-kilometre section between the Nordbahnhof and Mitnachtstraße stations. The last light signal in front of Mitnachtstraße serves as an access-protection signal, a prerequisite for the continuous operation of the main part of the Core as ETCS-only.

An early-warning system (DZ) [29] will be installed on all the approaches to detect any trains with non-functional ETCS before they enter the Core.

4.3 ATO GoA 2

As part of the DKS, the Core will also be equipped for highly automated driving with a train driver (ATO GoA 2). Precision

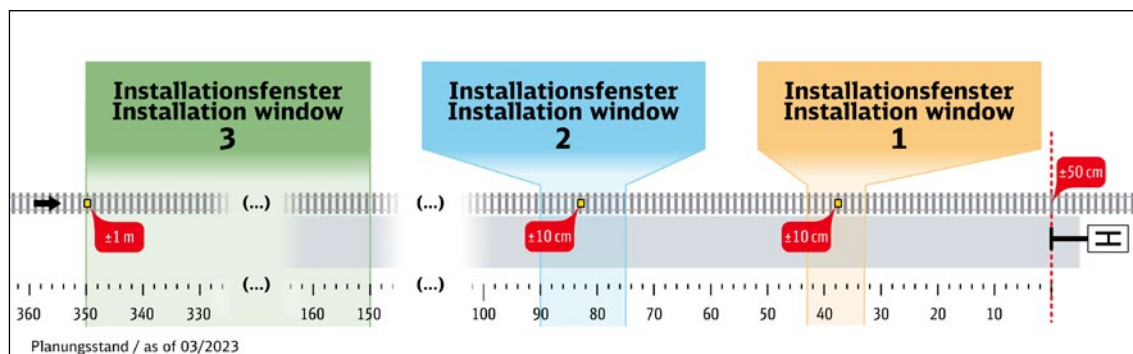
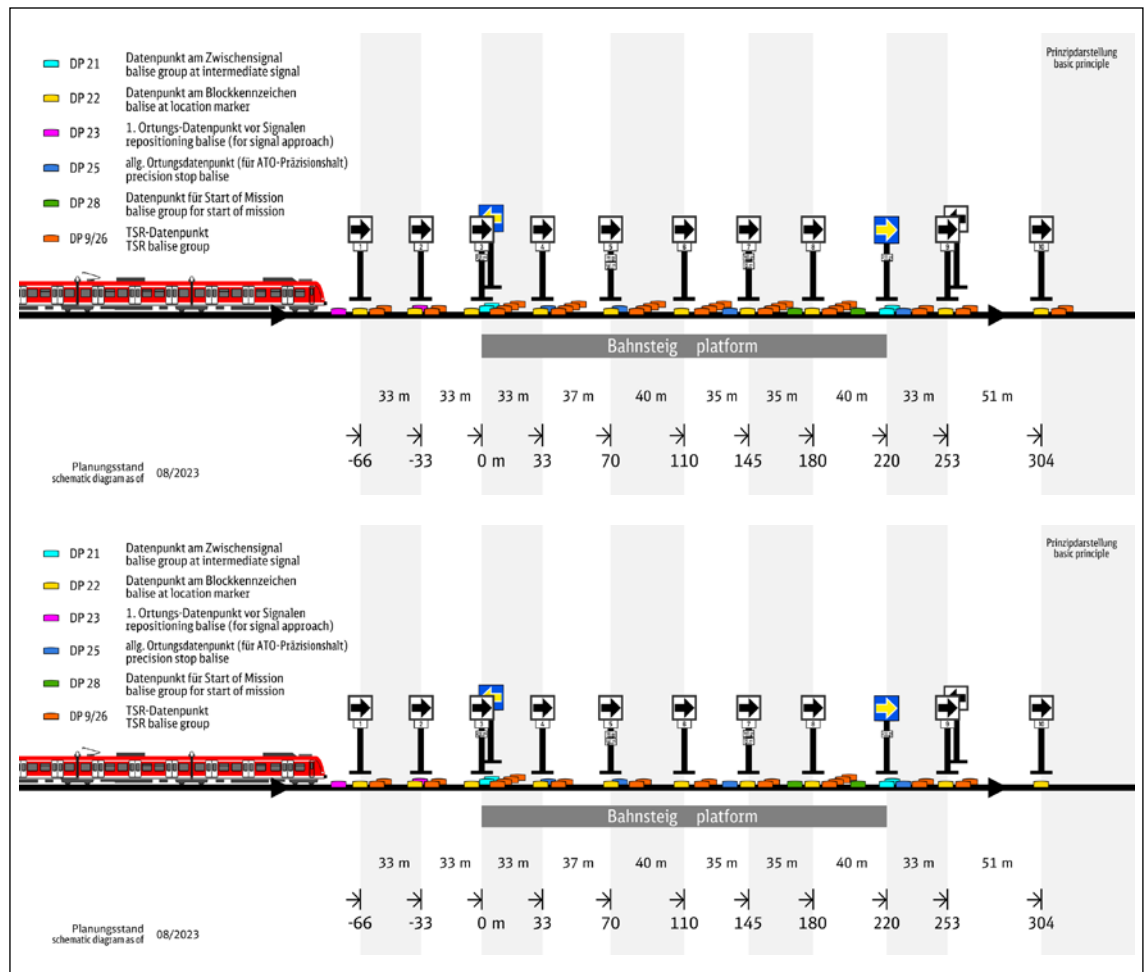


Bild 6: Verlegefenster für „Präzisionshaltbalisen“

Fig. 6: The windows to lay the “precision stop balises”

Bild 7: Balisenteppich an einer fiktiven, brettebenen Station vor Optimierung (oben) und mit bisherigen Optimierungen (unten)

Fig. 7: Balise littering at a fictitious, level station prior to optimisation (top) and with previous optimisations (bottom)



tieren sind, muss für die letzten beiden Präzisionshaltedatenpunkte eine Genauigkeit von ± 10 cm eingehalten werden, die in der ATO-Streckenzentrale (ATO-TS) hinterlegt sind und voraussichtlich eine gesonderte Nachvermessung erfordern werden.

Die ATO-Planung baut auf den PT1 von ETCS auf. Das im Rahmen der DSD entwickelte Digitale Register (DR), das im späteren Betrieb die notwendigen Infrastrukturdaten bereitstellt, wird u. a. aus PlanPro-Daten gespeist.

4.4 Balisenteppiche

Nach der allgemeingültigen ETCS-Planungsrichtlinie [40] wären in den 0,3 km langen Stationsbereichen je nach Anwendungsfall etwa 50 Balisen je Gleis erforderlich gewesen (Bild 7 oben). Dies beinhaltet:

- je zwei Balisen an beiden Ne 14, insbesondere um Züge in der Rückfallebene (Betriebsart SR) ohne Befehl (Override) zu stoppen
- eine Balise an jedem BK, insbesondere um einen Position Report zur Haltfallbewertung [41] auszulösen
- zunächst 2x2 Balisen je BK, um die Geschwindigkeit von Zügen in SR von 40 auf 20 km/h vor dem Ne 14 abzusenken (Temporary Speed Restriction, TSR)
- einzelne Balisen insbesondere für ATO-Präzisionshalte, zur Ortung vor Ne 14 sowie Balisenpaare für „Start of Mission“ (ohne gültige Position).

Der Großteil der Balisen diente somit nicht (vorrangig) der Ortung, sondern übrigen Systemfunktionen. Aufgrund diverser Abstandsregeln und weiterer Randbedingungen wie Linking erwies sich ein derartiger „Balisenteppich“ frühzeitig als schlicht nicht umsetzbar.

stops with an accuracy of ± 0.5 m [38] must be taken into account within the framework of the ETCS planning. Three balises suitable for localisation will be arranged in defined windows in front of such stops as “precision stop balises” (fig. 6). They will be arranged according to [39]; suitable balise groups, for example at location markers, can also be used for ATO. While all the balises for ETCS have to be mounted with an accuracy to the metre and planned in the RBC, an accuracy of ± 10 cm has to be maintained for the last two precision balises, which are stored in the ATO Trackside (ATO-TS) and will probably require separate re-measurement.

The ATO planning is based on the PT1 of ETCS. The Digital Register (DR), developed within the framework of DSD, provides the infrastructure data required for ATO operation, which is fed from PlanPro Data, among others.

4.4 Balise littering

According to the generally applicable ETCS planning guideline [40], about 50 balises per track would have been required in the 0.3 km long station areas, depending on the application (fig. 7 above). This included:

- two balises at each stop marker, especially to stop trains in degraded operations (SR mode) without command (override)
- one balise at each location marker, in particular to trigger a position report for the signal-to-stop evaluation [41].
- initially 2x2 balises per location marker to reduce the speed of trains in SR from 40 to 20 km/h before the location marker (Temporary Speed Restriction, TSR)

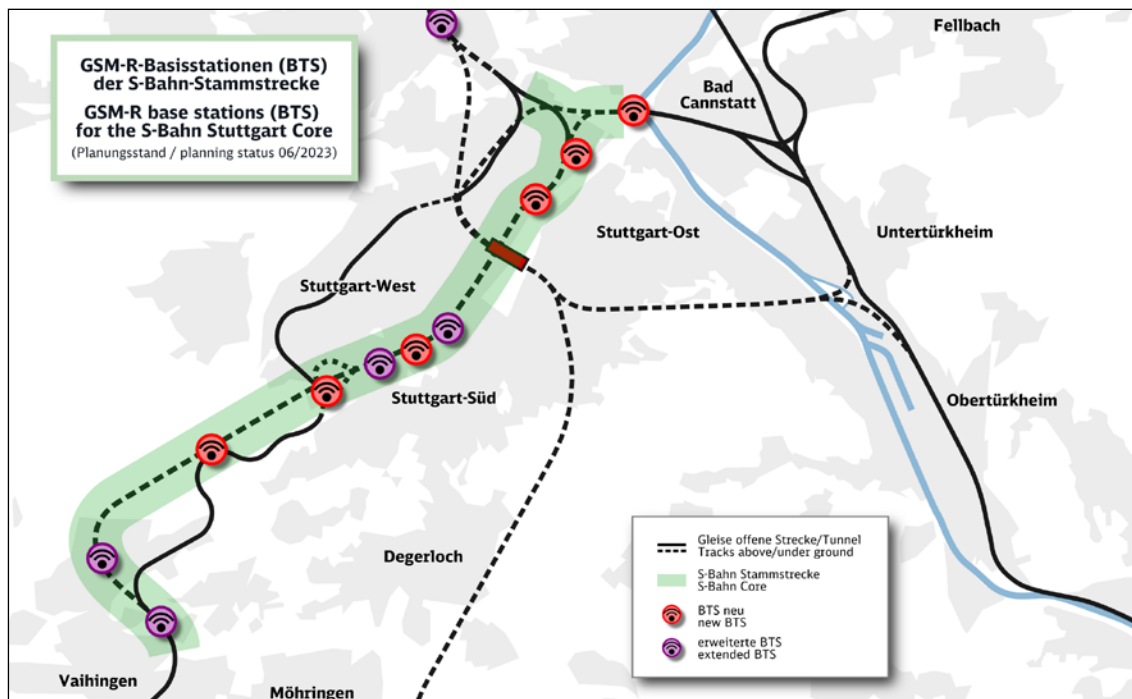


Bild 8: GSM-R-Basisstationen (BTS) in und an der Stammstrecke

Fig. 8: The GSM-R Base Transceiver Stations (BTS) in and near the Core

Daher wurde der ETCS-Gefahrpunktabstand am Ne 14, bei dessen Unterschreitung überhaupt TSR-Datenpunkte (TSR-DP, zwei Balisen) im Vorfeld anzuordnen sind, reduziert. Ebenso wurde der Bereich, in dem TSR-DP in solchen Fällen „hinter“ jedem vorgelagerten BK anzuordnen sind, verkürzt. Beides beruht auf dem vergleichsweise guten Bremsvermögen der S-Bahnen, die mit einer entsprechenden Technischen Nutzungsbedingung (TNB) sichergestellt wird. Zudem ist die bislang in Bahnhofsgleisen notwendige Verdopplung der TSR-DP hinter jedem BK nur noch hinter dem letzten BK vor dem zu schützenden Ne 14 erforderlich [34]. Mit diesen beiden Optimierungen sind nun noch ungefähr 30 je Bahnsteigkantenbereich zu planen und ist eine regelkonforme Umsetzung möglich (Bild 7 unten). Für die Zukunft verbleiben weitere Potenziale (siehe Teil 2).

4.5 Funk

Im Zuge der nach rund 20 Betriebsjahren ohnehin notwendigen Erneuerung der GSM-R-Technik (Swap) wird diese für den L2oS-Hochleistungsbetrieb fit gemacht. Mit den zukünftig elf Basisstationen (Base Transceiver Stations, BTS, Bild 8) wird eine besonders hochwertige Funkversorgung geschaffen, die auch bei Ausfall eines beliebigen Netzelementes keine Auswirkungen auf den laufenden Betrieb hat [21]. Jeweils zwei BTS sind in trassenredundanten Ringen alternierend mit zwei übergeordneten Netzelementen (BSC) verbunden. Es werden auch zukünftig konventionelle Antennen verwendet, die zuerst vorgeschlagenen [8] Schlitzkabel werden nicht eingesetzt. Mit jeweils zwei Trägern (TRX, „Frequenzen“), teils im erweiterten Frequenzband, können je BTS etwa 14 Züge parallel in ETCS geführt werden. Im Regelbetrieb werden nicht mehr als vier Züge erwartet, ausreichende Reserven für Betriebsstörungen (mit erhöhtem Sprachfunkaufkommen) sowie Ausfälle von GSM-R-Elementen verbleiben. Paketvermitteltes GSM-R (GPRS) ist nicht notwendig. Für das nicht sicherheitsrelevant spezifizierte und nicht betriebskritische ATO GoA 2 wird zunächst öffentlicher Mobilfunk (4G) genutzt. Eine einzelne Versorgungslücke in der nur von Leerzügen genutzten Wendeschleife wird dafür mit einem Repeater geschlossen. Perspektivisch wird die Strecke mit FRMCS ausgerüstet, und schrittweise werden ATO GoA 2, ETCS und weitere Applikationen

- individual balises, especially for ATO precision stops, for localisation in front of the location marker, as well as pairs of balises for the “Start of Mission” (without a valid position).

The majority of the balises were therefore not (primarily) used for positioning, but for other system functions. Due to various distance rules and other boundary conditions such as linking, this type of “balise littering” initially proved unfeasible.

Therefore, the ETCS danger point distance at the location marker, below which the TSR balise groups (TSR-DP, two balises) have to be arranged in the apron, was reduced. Likewise, the area in which the TSR-DP are to be arranged “behind” each upstream BK in such cases was also shortened. Both are based on the comparatively good braking capacity of the commuter trains, which has been ensured with a corresponding technical usage condition. In addition, the doubling of the TSR-DP behind each location marker, which was previously necessary on station tracks, is now only required behind the last location marker before the stop marker that has to be protected [34]. These two optimisations mean that approximately 30 balises per platform edge area can now be planned and a rule-compliant implementation is possible (fig. 7 below). Further potential remains for the future (see Part 2).

4.5 Radio

Based on the GSM-R renewal in the Core (“swap”), which is due anyway after about 20 years of use, GSM-R is made fit for ETCS-only high-performance operations. Eleven Base Transceiver Stations (BTS, fig. 8) will create particularly high-quality radio coverage, which will have no effect on ongoing operations, even if any of the network elements fail [21]. Two BTS are alternately connected in path-redundant rings with two superordinate network elements (BSC). Conventional antennas will also be used in the future; the leaky feeder cables proposed in [8] will not be used.

With two carriers (TRX, “frequencies”) each, partly in the extended frequency band, about 14 trains per BTS will be able to be run in parallel in ETCS. No more than four trains per BTS

darauf umgestellt. Die entsprechende Fahrzeugausrüstung ist bereits im Gang [18].

Im Heft 11/2023 wird der zweite Teil des Artikels folgen, mit Schwerpunkten zur laufenden Umsetzung im Feld, zum Nutzen, zu weiteren Optimierungsansätzen sowie einem Ausblick. ■

LITERATUR | LITERATURE

- [1] Signal- und Kommunikationstechnik. In: Der Tunnel. Kohlhammer, Stuttgart 1985, ISBN 3-925565-01-9, S. 214–218
- [2] Bauer, W.: Drei Jahre S-Bahn-Betrieb in Stuttgart, Die Bundesbahn 9/1981
- [3] Vallée, D.: Nachhaltige Leistungssteigerung im Stuttgarter S-Bahn-Netz, Der Nahverkehr 7/8 1997
- [4] Sweco, EBP, Via-Con: Machbarkeitsstudie „Perspektiven für die S-Bahn Stuttgart“. Untersuchungsbericht, 17. Oktober 2017, S. 14 ff.
- [5] Verband Region Stuttgart: Prüfung Umsetzbarkeit Zweite Stammstrecke (...). Sitzungsvorlage 060/2020 vom 7. April 2020
- [6] DB Netz: Fahrplanrobustheitsprüfung Ks-Signalisierung und ETCS S-Bahn Stuttgart. Foliensatz, 19. Oktober 2016, <https://bit.ly/42Ph6VU>
- [7] Hantsch, F.; Kerner, S.; Martin, U.: ETCS Level 2 im Schienenpersonennahverkehr am Beispiel der Stammstrecke S-Bahn Stuttgart. Vortrag auf dem Thales ERTMS/ETCS-Symposium Ditzingen. Foliensatz, 3. März 2015
- [8] Ingenieurgemeinschaft Machbarkeitsstudie ETCS S-Bahn Stuttgart: Untersuchung zur Einführung von ETCS im Kernnetz der S-Bahn Stuttgart (<https://bit.ly/2Yyaw6h>)
- [9] Beyer, M.; Jurtz, S.; Langhof, M.; Reinhard, P.; Vogel, T.: ETCS als Träger-system zur Leistungssteigerung bei der S-Bahn Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 6/2019 (<https://bit.ly/2MJ4zAY>)

are expected in regular operations; sufficient reserves remain for any operational disruptions (with increased voice radio volume), as well as any failures of the GSM-R elements. Packet-switched GSM-R (GPRS) is not necessary.

Public mobile radio (4G) will initially be used for the ATO GoA 2, which is specified as non-safety-relevant and not critical to operations. A single coverage gap in the reversing loop, which is only used by empty trains, will be closed with a repeater.

In the future, the line will be equipped with FRMCS and ATO GoA 2, while ETCS and other applications will gradually be converted to it. The corresponding vehicle refitting is already underway [18].

The second part of the article focusing on the ongoing implementation in the field, the benefits, further optimisation approaches and the outlook will follow in the 11/2023 issue. ■

AŽD

SAFELY TO YOUR DESTINATION

Traditional Czech supplier of modern control and railway signalling systems including ETCS

We are taking part in **15th TRAKO**
International Railway Fair
September 19 – 22, 2023
AmberEXPO in Gdańsk – Poland
We invite you to our
stand no. 27 , hall A

Join our programme >>



www.azd.cz

- [10] Verband Region Stuttgart: Großer Wurf für Schienenknoten Stuttgart. Presseinformation, 30. Januar 2019
- [11] Drescher, O.: ETCS Level 2 ohne „Signale“ in einem großen Knoten, Deine Bahn 3/2022 (<https://bit.ly/3O4n5i1>)
- [12] Bergmann, J.: Digitaler Knoten Stuttgart: Erklärung der DB Netz AG zu Inhalt und Zielen. 21. April 2020 (<https://bit.ly/3ESxJ7g>)
- [13] Beyer, M.; Blateau, V.; Bitzer, F.; Dietrich, F.; Lammerskitten C.; Lück, B.; Richter, R.; Rudolph, C.; Vogel, T.: Der Digitale Knoten Stuttgart wird Realität, DER EISENBAHNINGENIEUR 1/2023 (<https://bit.ly/3RCeqFR>)
- [14] Smith, K.; Fender, K.: Stuttgart leads the way in German ETCS rollout, International Railway Journal 4/2023
- [15] Thales Group: Thales wird die Signaltechnik der Deutschen Bahn in Stuttgart digitalisieren, um Kapazität, Pünktlichkeit und Komfort deutlich zu verbessern. Presseinformation, 16. Februar 2021
- [16] Dietrich, F.; Erdmann, J.; Jost, M.; Raichle, F.; Sane, N.; Vogel, T.; Wagner, P.: Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart, ZEVrail 5/2022 (<https://bit.ly/3DHZIOS>)
- [17] Flöter, C.; Raichle, F.; Höhne, T.; Köstlbacher, J.; Sane, N.; Sauer, M.; Schlichting, J.; Wagner, P.: Innovationskooperation Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 9/2022 (<https://bit.ly/3dxD0Z6>)
- [18] Chavalier, D.; Flöter, C.; Gonzalez-Isabel, J.; Kampschulte, B.; Raichle, F.; Fritzsche, R.; Sane, N.; Wagner, P.: FRMCS-Ausrüstung von 463 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 5/2023 (<https://bit.ly/3C5ZetG>)
- [19] Förster, J.; Kümmling, M.; Olesch, M.; Reinhart, P.; Vandoorne, K.; Vogel, T.: ETCS-Bremskurven im Spiegel der Praxis, DER EISENBAHNINGENIEUR 6/2023 (<https://bit.ly/3plqlhR>)
- [20] Dietrich, F.; Molterer, L.; Philippsen, F.; Reinhart, P.; Schunke-Mau, C.; Vogel, T.; Wester-Ebbinghaus, H.: Förderung der DSD-Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 4/2023 (<https://bit.ly/3N24h5o>)
- [21] Behrens, M.; Eschbach, A.; Kampschulte, B.; Paltian, A.; Schöppach, M.; Wiedenroth, A.: Robuste Leit- und Sicherungstechnik im Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2022 (<https://bit.ly/3hiu0ZL>)
- [22] Bojic, M.; El-Hajj-Sleiman, H.; Flieger, M.; Lies, R.; Osburg, J.; Retzmann, M.; Vogel, T.: ETCS in großen Bahnhöfen am Beispiel des Stuttgarter Hauptbahnhofs, SIGNAL+DRAHT 4/2021 (<https://bit.ly/3fiozoJ>)
- [23] Celik, M.; Ketszem, R.: Vorstellung LST-Planungswerkzeug safeTplan. 27. Sicherungstechnische Fachtagung. Foliensatz zur 27. Sicherungstechnischen Fachtagung der TU Dresden
- [24] Klaus, C.: Die digitale LST-Planung (PlanPro) als Wegbereiter der Digitalen Schiene, SIGNAL+DRAHT 1+2/2020
- [25] Hierzu folgt im „EISENBAHNINGENIEUR“ 11/2023 noch ein vertiefender Artikel
- [26] Hornemann, K.: Neue LZB bei der S-Bahn München, SIGNAL+DRAHT 9/2005
- [27] DB Netz: Planungsgrundsätze für selbsttätige Gleisfreimeldeanlagen mit Achszähltechnik. Richtlinienmodul 819.1100, gültig ab 1. September 2022, Abschnitt 5 (2)
- [28] Denißen, J.; Flieger, M.; Kümmling, M.; Küpper, M.; Wanstrath, S.: Optimierung der Blockteilung mit ETCS Level 2 im Digitalen Knoten Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 7+8/2021 (<https://bit.ly/3Ai0gQR>)
- [29] Barth, P.; Behrens, M.; Kümmling, M.; Mehnert, S.; Nenke, T.; Pieper, W.; Retzmann, M.; Trinckauf, J.: Innovationskooperation zur LST-Infrastruktur im Digitalen Knoten Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 7+8/2022 (<https://bit.ly/3PR8NRF>)
- [30] Böhm, M.; Paltian, A.; Schleede, M.; Voigt, B.; Winckler, M.: Erfahrungen mit der Gleisfeldvernetzung im Digitalen Knoten Stuttgart (Teil 1), SIGNAL+DRAHT 4/2023 (<https://bit.ly/41Mlkgb>)
- [31] Retzmann, M.: Digitaler Knoten Stuttgart: Besondere Ansätze bei der ETCS-Ausrüstung. Vortrag im Bahnsystemkolloquium der TU Dresden, 6. Mai 2021 (<https://bit.ly/3BOHsMk>), S. 41
- [32] Thales: CountingWorld. Kundenmagazin zu Achszählsystemen, 9/2013, S. 7
- [33] BTSF3, ESTW F8Z01, LHZ-BK01 – 415.9252Z01. 457.0201, 819.0519, 819.1344A02/A03, 819.1349 sowie Lastenhefte und Planungsleitfäden für ATO GoA 2 (für ATO-TS und ATO-Präzisionshalt)
- [34] DB Netz: Grundsätze zur Erstellung der Ausführungsplanung PT1 für ETCS Level 2. Ergänzende Planungsvorgaben für S-Bahnen. Richtlinienmodul 819.1349 [als Ergänzung zu 819.1344], gültig ab 20. Juni 2023
- [35] DB Netz: Projektspezifische Anwendungsvorgabe zur Länge von Teil-

- zugstraßen [als Ergänzung zu 819.1344A02]. Version 1.0 vom 28.01.2022
- [36] siehe Richtlinienmodul 819.1344
- [37] DB Projekt Stuttgart-Ulm: Erläuterungsbericht zum Antrag auf Baufreigabe in finanzieller Hinsicht. 18. Juni 2021, Abschnitt 4.1.5
- [38] Evaluierung der Förderrichtlinie des [BMDV] zur Förderung der Ausrüstung von Schienenfahrzeugen mit Komponenten des (... ERTMS ...) und (... ATO ...) im Rahmen der infrastrukturseitigen Einführung von ERTMS im „Digitalen Knoten Stuttgart“ (<https://bit.ly/457iC61>), PDF-Seite 192, Anforderung ...AA.394
- [39] DB Netz: Generischer Leitfadensplan ATO-Präzisionshaltedatenpunkte. Version 2.0, 19. Mai 2023
- [40] DB Netz: Grundsätze zur Erstellung der Ausführungsplanung PT1 für ETCS Level 2 (...). Richtlinienmodul 819.1344, gültig ab 12. Mai 2021
- [41] Bolay, R.: Haltfallbewertung unter ETCS. Diplomarbeit TU Dresden 2023 (<https://bit.ly/3NanwsZ>). (Hinweis auf EU-Kofinanzierung)

AUTOREN | AUTHORS

Albrecht Achilles

ATO-Fachexperte / Fachbereichsleiter ATO/TMS /
ATO Expert / Team lead ATO/TMS
Nextrail GmbH
Anschrift / Address: Unter den Linden 21, D-10117 Berlin
E-Mail: albrecht.achilles@nextrail.com

Behrooz Azarfar

Project Engineering
GTS Deutschland GmbH
Anschrift / Address: Thalesplatz 1, D-71254 Ditzingen
E-Mail: behrooz.azarfar@urbanandmainlines.com

Martin Beyer

Referent für Verkehrsplanung / Traffic planner
Verband Region Stuttgart
Anschrift / Address: Kronenstraße 25, D-70174 Stuttgart
E-Mail: beyer@region-stuttgart.org

Frank Lehmann

Projektleiter Planung LST / Project leader CCS planning
SafeTrail GmbH
Anschrift / Address: Europaallee 26, D-66113 Saarbrücken
E-Mail: frank.lehmann@safetrail.com

Roman Lies

Technisches Projektmanagement / Technical project management
DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH
Anschrift / Address: Rappensteinstraße 17, D-70191 Stuttgart
E-Mail: roman.lies@deutschebahn.com

Martin Schleede

Technisches Projektmanagement / Technical project management
DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH
Anschrift / Address: Rappensteinstraße 17, D-70191 Stuttgart
E-Mail: martin.schleede@deutschebahn.com

Daniel Trenschele

Planung ETCS, Fachautor Ril 819.1349 /
ETCS planning, technical author of guideline 819.1349
DB Netz AG
Anschrift / Address: Schweizer Straße 3b, D-01069 Dresden
E-Mail: daniel.trenschele@deutschebahn.com

Sven Wanstrath

Gesamtprogrammleitung Knoten Stuttgart /
Overall program management Stuttgart Node
DB Netz AG
Anschrift / Address: Rappensteinstraße 17, D-70191 Stuttgart
E-Mail: sven.wanstrath@deutschebahn.com