

# Digitalisierung der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart (Teil 2)

## Digitalising the S-Bahn Stuttgart Core (part 2)

Martin Büttner | Mahir Celik | Michael Kümmling | Jan Lübs | Patrick Seeger | Marc-André Testa | Markus Vens | Stefan Wallberg

Die in SIGNAL+DRAHT 9/2023 [1] vorgestellte Planung zur Digitalisierung der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart wird inzwischen Schritt für Schritt Realität. Im Fokus des vorliegenden Beitrags stehen Erfahrungen aus der laufenden Umsetzung, dem betrieblich-verkehrlichen Nutzen und einigen Optimierungspotenzialen. Ein Ausblick auf die nächsten Schritte rundet den Beitrag ab.

### 1 Umsetzung

#### 1.1 Überblick

Um die Digitalisierung sowie zahlreiche begleitende Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen umzusetzen, wurde und wird die Stammstrecke in den Sommerferien 2021 bis 2025 jeweils vollständig gesperrt. Ein Großteil der Maßnahmen an der Leit- und Sicherungstechnik (LST) und weiteren Gewerken wird gebündelt während dieser jeweils sechswöchigen Totsperrungen erledigt, da die über rund 20 Stunden des Tages dicht befahrene, weitgehend unterirdische Strecke sonst kaum zugänglich ist. Standen 2021 noch Arbeiten abseits der LST (wie Oberbau und Stationssanierung) im Mittelpunkt, wurden 2022, parallel zu Modernisierungsarbeiten an weiteren Gewerken, zunächst fast 100 von rund 170 km der Kabel des neuen Stellwerks eingebaut. Im Rahmen der am 8. September abgeschlossenen Sperrung 2023 lag der Schwerpunkt auf der LST. 167 weitere LST-Kabel mit einer Gesamtlänge von 69 km wurden ebenso gezogen wie 37 km Kabel für Telekommunikation. Unter anderem wurden mehr als 200 der insgesamt rund 350 Achszählpunkte eingebaut (Bild 1). Ausgespart wurden zunächst insbesondere Bereiche, in denen im kommenden Jahr noch Schienen- oder Weichentausch bzw. der Einbau neuer Weichen geplant ist. Daneben wurden diverse Kabeltrassen, Trogauslässe, erste Kabelschränke und Tafeln für European Train Control System (ETCS) errichtet sowie der Aufbau von FEAK/FEAS vorbereitet. Auch die Versorgung mit öffentlichem Mobilfunk wurde grundlegend erneuert, dabei wurde auch ein Funkloch in der Wendeschleife Schwabstraße (für Automatic Train Operation Grade of Automation 2, ATO GoA 2) geschlossen. Darüber hinaus wurden u. a. eine neue Tunnelsicherheitsbeleuchtung sowie Elektranten nachgerüstet. Daneben wurde die Modernisierung von Verkehrsstationen vorangetrieben und wurden begleitende Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt. Die Vollsperrung wurde ebenfalls dafür genutzt, um gezielte Aufmaße zu erstellen, um die Planungssicherheit weiter zu erhöhen.

#### 1.2 Fortschreibung der Planung

Die umfangreichen Arbeiten stießen dabei an einige Grenzen. So erforderten die im Feld vorgefundenen Bedingungen in dem rund 50 Jahre alten Tunnel immer wieder Ad-hoc-Anpassungen.

The planning for the digitalisation of the Stuttgart S-Bahn Core presented in SIGNAL+DRAHT 9/2023 [1] is now becoming reality step by step. This article focuses on experiences from the current implementation, the benefits and some optimisation potentials. An outlook on the next steps rounds off the article.

### 1 Implementation

#### 1.1 Overview

In order to implement the digitisation and numerous accompanying renovation and modernisation measures, the Core has been and will be completely closed during the summer holidays of 2021 to 2025. A large part of the measures on the control command and signalling (CCS) and other trades will be carried out during these six-week total closures, as the largely underground line, which is heavily trafficked for around 20 hours a day, is otherwise hardly accessible.

While the focus in 2021 was on work outside the CCS (such as tracks and station refurbishment), in 2022, parallel to modernisation work on other trades, almost 100 of around 170 km of the cables for the new interlocking were installed as a first step.



Bild 1: Verkabelte redundante Achszählpunkte

Fig. 1: Wired redundant counter detection points

Quelle / Source: DB

Beispielsweise erwiesen sich einige vorhandene Kabelgleisquerungen vor Ort als nicht nutzbar, weitere mussten zunächst freigespült werden. Infolgedessen konnten einige der geplanten Kabel nicht, verspätet oder nur auf alternativen Wegen geführt werden. Derartige Änderungen zogen nicht selten weitere Anpassungen nach sich, da beispielsweise alternative Kabelwege wiederum geänderte Auslässe aus Kabeltrögen oder zu verlegende Kabelschränke zur Folge hatten.

Wie bei allen derartigen Projekten, erwiesen sich einige der geplanten Standorte von Achszählpunkten vor Ort als so nicht umsetzbar. So dürfen die für Achszähler notwendigen Bohrungen an Schienen beispielsweise nicht an Schweißungen, Erdungen anderer Gewerke oder Walzzeichen gesetzt werden. Bei den oft mit oder nahe der Mindestlänge (von 30 m) geplanten Gleisfreimeldeabschnitten können jedoch auch geringfügige Verschiebungen wiederum schnell zur Verschiebung benachbarter Achszählabschnitte führen, in Extremfällen auch zum Entfall von Blockkennzeichen. Die redundanten Zählpunkte, die möglichst auf einer Höhe angeordnet werden sollen, sowie „Rücken an Rücken“ stehende Blockkennzeichen (von Richtung und Gegenrichtung) stellen weitere Restriktionen dar. Zusätzlich wird auch die auf die Stellwerksplanung aufbauende ETCS-Planung ständig berücksichtigt, insbesondere im Hinblick auf die regelwerkskonforme Anordnung von Datenpunkten. Die Signalplanung und die ETCS-Planung sind aufeinander aufbauende Planungen, die sich zwangsläufig wechselseitig beeinflussen.

### 1.3 Signalanordnung

Die Tafeln für ETCS (ETCS-Halttafeln/Stop Marker, Blockkennzeichen/Location Marker) werden in der „kleinen“ Ausführung von 40x40 cm geplant. Unter Abwägung vielfältiger Restriktionen und Randbedingungen sollen sie grundsätzlich im Gleis der Regelfahrtrichtung (rechtes Gleis) rechts und im „Gegengleis“ (linken Gleis) links aufgestellt werden. In der Wendeschleife Schwabstraße werden sie aus Sichtgründen stets bogenaußen angeordnet, in den eingleisigen Tunnelquer schnitten südlich der Schwabstraße allerdings genau andersherum (jeweils über dem Fluchtweg), um Konflikte mit dem Lichtraumprofil zu vermeiden (Bild 2).

Die in München umgesetzte Lösung mit angewinkelt auf der Schwelle montierten Blockkennzeichen [2] wurde verworfen, da sie häufig gereinigt werden müssen (Bremsstaub) und Gefährdungen bei Arbeiten im Gleis darstellen.

### 1.4 Große Metallmassen

Als besondere Herausforderung haben sich die an neuen Weichen der Stammstrecke geplanten hydraulischen Weichenantriebe (Unistar HR) erwiesen – zumindest bei mehr als zwei mittig im Gleis angeordneten Stell- und Verschlusseinheiten, für Zweiggleisradian von wenigstens 760 m (80 km/h, Bild 3). Unmittelbar am nördlichen Bahnsteigende der Station Mittnachtstraße beginnen derartige Weichen (Bild 6) 3 m „hinter“ der ETCS-Halttafel am Bahnsteigende. Als problematisch erwies sich dabei der kurze Abstand mehrerer aufeinander folgender Metallobjekte, die in der ETCS-Spezifikation [3] nicht eindeutig geregelt ist und nach DB-Regelwerk [4] als eine einzige große Metallmasse zu behandeln ist. Per se dürfen solche Objekte 16 m vor [5] Balisen nicht angeordnet werden, die jedoch gleichzeitig an ETCS-Halttafeln zwingend erforderlich sind, welche ihrerseits wieder nicht verschoben werden können. Hierzu sind verschiedene Lösungsvarianten in Diskussion.

## 2 Nutzen

Die Digitalisierung der Stammstrecke ist kein Selbstzweck: Dem erheblichen Aufwand steht auch ein großer betrieblich-verkehrlicher Nutzen gegenüber. Bereits die S-Bahn-ETCS-Untersuchung

During the 2023 closure, which was completed on 8 September, the focus was on the CCS. 167 additional CCS cables with a total length of 69 km were pulled as well as 37 km of cables for telecommunications. Among other things, more than 200 of the total of around 350 counter detection points in the existing tunnel were installed (fig. 1). Initially, areas where rail or point replacement or the installation of new points is still planned for the coming year were particularly spared. In addition, various cable routes, trough outlets, first cable cabinets and panels for European Train Control System (ETCS) were installed and the installation of FEAK/FEAS was prepared. The supply of public mobile radio was also fundamentally renewed, and a radio gap was closed in the Schwabstraße turning loop (for Automatic Train Operation Grade of Operation 2, ATO GoA 2). In addition, new tunnel safety lighting and electrants were retrofitted. Also, the modernisation of traffic stations was advanced and accompanying maintenance measures were carried out. The full closure was also used to take specific measurements in order to further increase planning reliability.

### 1.2 Updating the planning

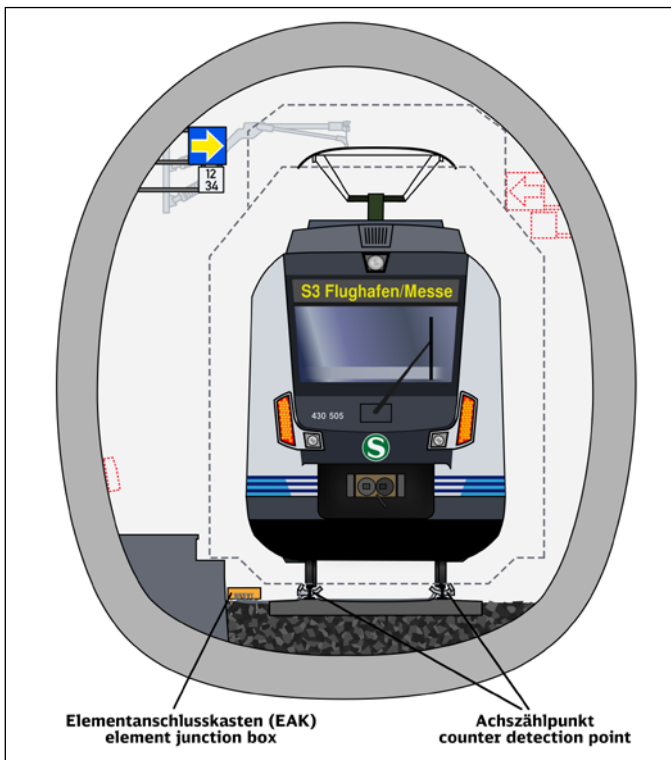
The extensive work reached a number of limits. The conditions found in the field in the approximately 50-year-old tunnel repeatedly required ad-hoc adjustments. For example, some existing cable track crossings proved to be unusable on site, and others had to be flushed free first. As a result, some of the planned cables could not be routed, or could only be routed with delays or along alternative routes. Such changes often resulted in further adjustments, as alternative cable routes, for example, in turn resulted in modified outlets from cable troughs or cable cabinets that had to be relocated.

Like in all projects of this kind, some of the planned locations of counter detection points on site proved to be so unworkable. For example, the boreholes on rails required for axle counters must not be placed at welds, earths of other trades or rolling signs. However, with track clearance sections often planned at or near the minimum length (of 30 m), even minor displacements can in turn quickly lead to the displacement of neighbouring axle counting sections, and in extreme cases even to the elimination of location markers. The redundant counter detection points, which should be arranged at the same height as far as possible, as well as “back-to-back” location markers (of direction and opposite direction) represent further restrictions. In addition, ETCS planning, which is based on interlocking planning, is also constantly taken into account, particularly with regard to the arrangement of data points in accordance with the regulations. Signal planning and ETCS planning build on each other and inevitably influence each other.

### 1.3 Signal arrangement

The boards for ETCS (stop markers, location markers) are planned in the “small” version of 40x40 cm. Under consideration of various restrictions and boundary conditions, they are to be installed in the track of the normal direction of travel (right track) on the right and in the “opposite track” (left track) on the left. In the Schwabstraße reversing loop, they are always positioned on the outside of the curve for visibility reasons, but in the tunnels with single-track cross-sections south of Schwabstraße they are positioned the other way round (above the escape route) in order to avoid conflicts with the loading gauge (fig. 2).





**Bild 2: Querprofil in eingleisigem Bestandstunnel unter beengten Verhältnissen**

Fig. 2: Cross-section in existing single-track tunnel under cramped conditions

Quelle / Source: DB

von 2018 ließ – unter konservativen Prämissen – gegenüber konventioneller LST eine Verkürzung der Mindestzugfolgezeiten um fast eine halbe Minute bzw. einen deutlichen Verspätungsabbau erwarten. Der Großteil dieses Effekts ging auf den Hochleistungsblock im Bahnsteigbereich – mit im Wesentlichen 55 m langen Blöcken – zurück, unterstützt von späteren Bremsereinsatzpunkten bzw. verringerten Pufferzeiten mit ATO GoA 2. Dem wirkten eher flachere Bremskurven sowie verlängerte Systemlaufzeiten ein Stück weit entgegen. [6, 7]

In einer eng aufeinander abgestimmten Optimierung von Fahrzeug- und Infrastrukturausrüstung haben einige der damals ausgewiesenen Potenziale einen Härtegrad erreicht, dass sie als gesichert umsetzbar gelten (Bild 4):

- Die Blockteilung wurde mikroskopisch optimiert, die Mindestlänge von 50 auf 30 m verkürzt und somit eine leistungsfähigere und gleichzeitig einfachere Blockteilung als in der Studie von 2018 geschaffen. [8] Neben kürzeren Mindestzugfolgezeiten wird damit auch ermöglicht, dichter „hinter“ einem noch am Bahnsteig haltenden Zug zu halten bzw. nachzufahren.
- Die erwarteten Systemlaufzeiten konnten im Ergebnis eines Vergabeverfahrens, bei dem diese in den Fokus gerückt wurden, um 9 Sekunden verkürzt werden. [11] In Verbindung mit verkürzten Fahrzeugverarbeitungszeiten sowie FRMCS wird letztlich eine Verkürzung der Ende-zu-Ende-Laufzeit (ohne Weichen) von prognostizierten 14 Sekunden auf 2 Sekunden erwartet. [12, 13]
- Auch Effekte optimierter ETCS-Bremskurven werden voraussichtlich zu Leistungssteigerungen führen. [14]
- Durch nahezu metergenau projektierte ( $Q_{LOCACC}=2$  m), als Referenzpunkt (LRBG) dienende Balisen in Verbindung mit einer besonders präzisen Odometrie (nominell 0 m  $\pm$  1 % des zurückgelegten Weges [12]) werden typische Wegmessfehler von etwa 5 anstatt 55 m realisiert werden können.

The solution implemented in Munich, with location markers mounted at an angle on the sleeper [2], was rejected because they have to be cleaned frequently (brake dust) and present hazards when working on the track.

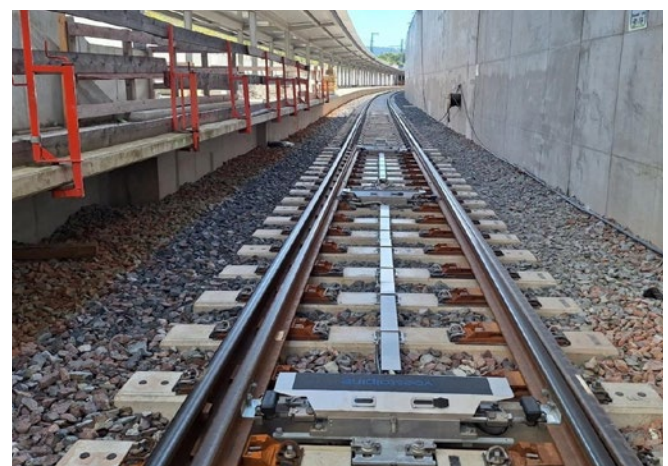
#### 1.4 Big metal masses

The hydraulic point machines (Unistar HR) planned for new points on the Core proved to be a particular challenge – at least for more than two setting and locking units arranged centrally in the track, for branch track radii of at least 760 m (80 kph, fig. 3). Directly at the northern end of the platform at Mitnachtstraße station, such points (fig. 6) start 3 m “behind” the ETCS stop marker at the end of the platform. The short distance between several consecutive metal objects, which is not clearly regulated in the ETCS specification [3] and is to be treated as a single big metal mass according to DB regulations [4], proved to be problematic. Per se, such objects may not be placed 16 m in front of [5] balises, which are, however, mandatory at the same time at ETCS stop markers, which in turn cannot be moved. Various solution variants are currently under discussion.

#### 2 Benefits

The digitalisation of the Core is not an end in itself: the considerable effort is also offset by a large operational and traffic benefit. The S-Bahn ETCS study of 2018 already suggested – under conservative premises – a reduction in headways by almost half a minute or a significant reduction in delays compared to conventional CCS. Most of this effect was due to the high-density block in the platform area – with essentially 55 m long blocks – supported by later brake application points or reduced buffer times with ATO GoA 2. Rather flatter braking curves as well as extended system delays counteracted this to some extent. [6, 7] In a closely coordinated optimisation of vehicle and infrastructure equipment, some of the potentials identified at that time have reached a degree of hardness that they are now considered to be feasible (fig. 4):

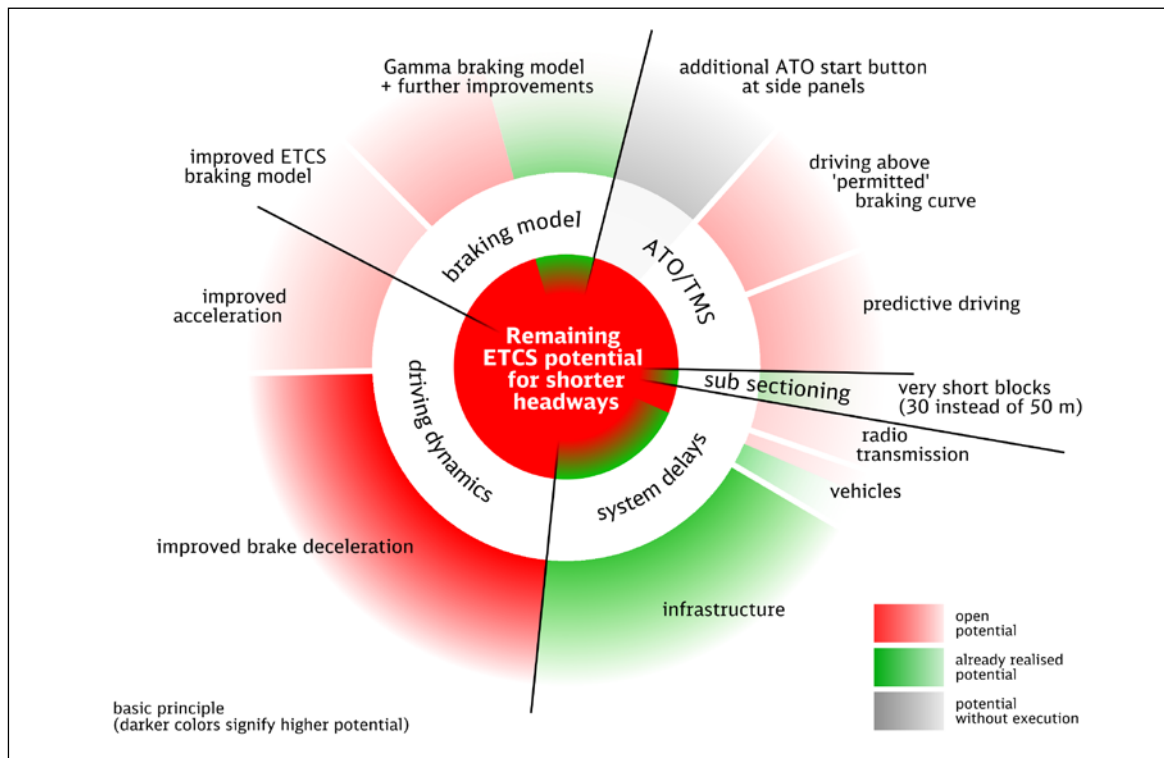
- The block division was microscopically optimised. Compared to the 2018 study the minimum length was shortened from 50 to 30 m and a more efficient block division (also leading to shorter headways). [8] In addition to shorter head-



**Bild 3: Hydraulischer Weichenantrieb an der Station Mitnachtstraße (Bauzustand September 2023)**

Fig. 3: Hydraulic point drive at Mitnachtstraße station (as built in September 2023)

Quelle / Source: Dilshod Ishchanov



**Bild 4: Gehobene und verbleibende Potenziale für die Fahrwegkapazität**

Fig. 4: Risen and remaining potentials for track capacity

Quelle / Source: DB

Im Vergleich zu konventioneller LST werden in Summe rund 35 % kürzere Mindestzugfolgezeiten erwartet. [9, 10]

Um besonders kurze Systemlaufzeiten zu erreichen, wird auf eine Fahrerlaubnis-Anforderung (MA Request) als Fahrstraßenanstoß verzichtet. Ferner wird ein im Vergabeverfahren von der Firma Thales dargelegter Vorschlag umgesetzt, an Blockkennzeichen ohne anschließende Weichen bzw. ohne erforderliche Durchrutschweg-Wahl am Zielsignal den Stellanstoß direkt im Stellwerk zu generieren, sobald der vorausliegende Teilblockabschnitt frei ist – also ohne Nutzung der üblichen Zuglenkung (ZL), analog dem früheren Selbststellbetrieb. An (für die Leistungsfähigkeit weniger wichtigen) Blockkennzeichen mit anschließender Fahrwegverzweigung sowie ETCS-Halttafeln wird hingegen weiterhin die „klassische“ Zuglenkung verwendet. Der neue, ESTW-interne Stellanstoß wird als „ZL direkt“ bezeichnet. Hinsichtlich Bedienung und Anzeige erfolgt die Realisierung dabei vollumfänglich konform zu den generischen Bedienregelwerken, etwa durch Übersetzung der Bedienkommandos auf die der „klassischen“ Zuglenkung. Auch wenn die Zulassung zunächst auf den Einzelfall beschränkt bleibt, ist die Systementwicklung so für eine generische Anwendung vorbereitet.

Über den bloßen Nutzen für dichtere Zugfolgen im Regelbetrieb hinaus werden noch weitere Effekte erwartet: Zahlreiche Optimierungen für ein robustes Gesamtsystem lassen einen stabileren Betrieb erwarten. [12, 15] Auch können verspätete Züge zukünftig schneller fahren – 80 statt 60 km/h zwischen Hauptbahnhof und Schwabstraße, 100 statt 80 km/h im südlichen Zulauf auf die Schwabstraße. Die Möglichkeit von ETCS, über praktisch beliebig viele Abschnitte hinweg zu signalisieren, sowie überschaubare Anpassungen an der technischen Ausrüstung der Infrastruktur (wie Tunneltüren) bilden dafür die Grundlage. Die Umwandlung der gesamten Stammstrecke in einen Bahnhof [15] und die Ausrüstung aller Stationen mit ETCS-Halttafeln ermöglicht es, in allen Stationen zu wenden. Und durch die Ausrüstung von Weichentrapezen mit ETCS-Halttafeln werden Zugfolgezeiten bei Wenden und eingleisigem Betrieb verkürzt.

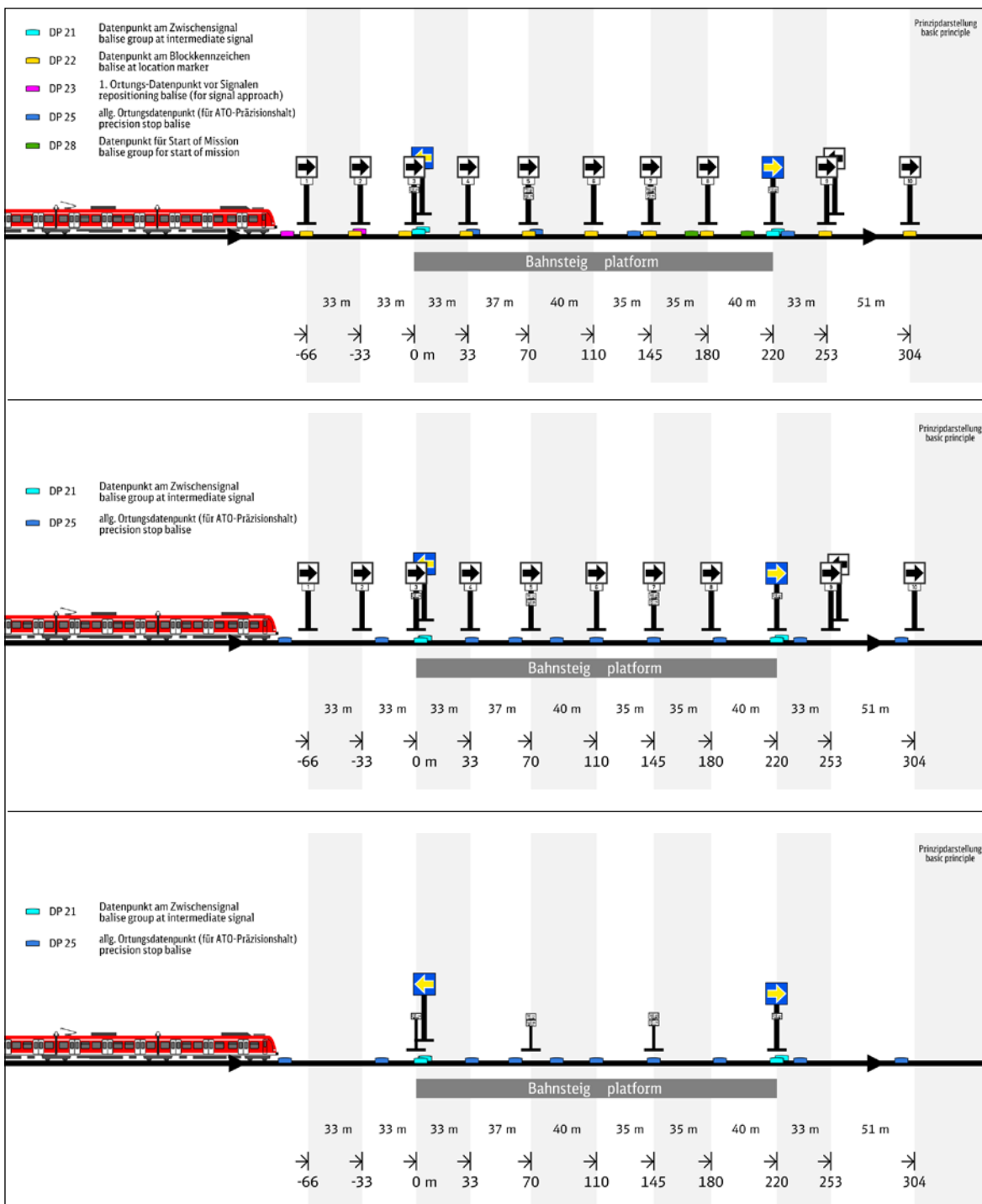
Während in Konzepten, Planungen und Simulationen vieles bereits auf den Prüfstand gestellt wurde, wird manches erst die Betriebspra-

ways, this also enables trains to stop or follow more closely “behind” a train that is still stopping at the platform.

- The expected system delays were shortened by 9 s as a result of an award procedure in which these were brought into focus. [11] In combination with reduced vehicle processing times as well as FRMCS, the end-to-end delays (without points) is ultimately expected to be reduced from a previously predicted 14 s to 2 s. [12, 13]
- Effects of optimised ETCS braking curves are also expected to lead to performance improvements. [14]
- With balises planned almost to the nearest metre ( $Q_{LO-CACC}=2$  m), serving as reference points (LRBG), in conjunction with particularly precise odometry (nominally 0 m  $\pm 1$  % of the distance travelled [12]), it will be possible to realise typical distance measurement errors of about 5 instead of 55 m.

Compared to conventional CCS, a total of around 35 % shorter headways are expected. [9, 10]

In order to achieve particularly short system delays, a movement authority request (MA Request) as a route trigger is dispensed with. Furthermore, a proposal presented by Thales (now GTS Deutschland GmbH) in the award procedure will be implemented to generate the actuating signal directly in the interlocking at location markers without subsequent points or without a required slip-through path selection at the destination signal, as soon as the preceding partial block section is free – i.e. without using the usual train control, similar to the previous “self-setting mode”. On the other hand, “classic” automatic route setting continues to be used at location markers with subsequent track branching and ETCS stop boards (which are less important for performance). The new, interlocking internal control impulse is called “ZL direct”. In terms of operation and display, the implementation is fully compliant with the generic operating rules, for example by translating the operating commands to those of the “classic” automatic route setting. Even if



**Bild 5: Optimierung des Balisenteppichs: Verzicht auf TSR-Datenpunkte, auf weitere Datenpunkte sowie Hybrid „Level 3“**

Fig. 5: Optimisation of the balise littering: abandonment of TSR balises, of further balises as well as hybrid "Level 3"

Quelle / Source: DB

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für GTS Deutschland GmbH / Thales, safe Trail GmbH,  
DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH, CERS, DB Regio AG, DB Engineering & Consulting GmbH /  
Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten  
genehmigt / © DVV Media Group GmbH

xis umfassend zeigen: Beispielsweise sieht die ETCS-Spezifikation seit Baseline 3 R2 (SRS 3.6.0) vor, bei Verlängerung der Fahrterlaubnis unter laufender Bremskurvenüberwachung (TSM) mittels eines Pieptons (S\_info) zu informieren. [16] Beim dichten Nachfahren mit kurzen Blöcken ist insofern mit einer erheblichen akustischen Belastung auf dem Führerstand zu rechnen. Da dies im ATO-Betrieb unterdrückt wird, kommt ATO eine zusätzliche Bedeutung zu, um tatsächlich regelmäßig dichte Zugfolgen zu realisieren. Gegenstand vertiefender Untersuchungen ist auch noch, Sollbremskurven (Guidance Curves) in einer Weise zu parametrisieren, die weder zu „steil“ noch zu „flach“ ist, sodass Triebfahrzeugführer ihnen in der Praxis gut folgen können, ohne regelmäßig früher als nötig zu bremsen. Welche Bremskurven letztlich mit ATO genutzt werden (können), ist dabei

the approval is initially limited to the individual case, the system development is thus prepared for a generic application. Beyond the mere benefit for denser train sequences in regular operation, further effects are expected: Numerous optimisations for a robust overall system lead us to expect a more stable, resilient operation. [12, 15] Delayed trains will also be able to run faster in the future – 80 instead of 60 kph between the main station and Schwabstraße, 100 instead of 80 kph in the southern approach to Schwabstraße. The possibility of ETCS to signal over practically any number of sections as well as manageable adjustments to the technical equipment of the infrastructure (such as tunnel doors) form the basis for this. Redefining the entire Core as a station ("Bahnhof") in terms of railway operation [15] and



noch offen. Abzuwägen sind auch der Nutzen präziser Halte und die bei besonders präzisen Halten drohenden „Schleichfahrten“.

### 3 Weitere Potenziale

Um die skizzierten Nutzen ab 2025 schrittweise zu erreichen, wird ein erheblicher Planungs- und Bauaufwand betrieben. Die im Projekt gewonnenen Erfahrungen zeigen gleichsam auf, wie derartige Hochleistungsstrecken in einiger Hinsicht einfacher, leistungsfähiger und robuster geplant, gebaut und betrieben werden können.

#### 3.1 Balisenteppiche, Hybrid Level 3

Bei den Balisenteppichen sowie der zugrunde liegenden Blockteilung und Gleisfreimeldung zeigen sich besonders deutliche Potenziale zur Vereinfachung.

Bereits die speziell für Stammstrecken entwickelte Richtlinie [17] eröffnet die Möglichkeit, auf TSR-Datenpunkte zu verzichten (Bild 6 in [1]), wenn die SR-Geschwindigkeit (Staff Responsible, SR) per Nationalem Wert im gesamten Bereich auf 20 km/h gesenkt wird (Bild 5, oben). Eine solche Lösung kam für die Stammstrecke noch nicht in Frage, da bislang je Radio Block Centre (RBC) nur einheitliche Nationale Werte verwendet werden können und insbesondere abseits der Stammstrecke eine derartige Einschränkung betrieblich nicht akzeptabel wäre.

Bild 5, Mitte, zeigt, wie weit der Balisenteppich ausgedünnt werden könnte, falls es längerfristig gelänge, weitere Potenziale zu heben:

- Entfall der Datenpunkte am Blockkennzeichen durch Verzicht auf eine komplexe Haltfallbewertung im RBC und den dafür notwendigen Position Report am Blockkennzeichen [18]
- Entfall der TSR- und SoM-Datenpunkte durch Nachweis einer wesentlich geringeren Wahrscheinlichkeit einer Fahrt in SR als bislang angenommen, beispielsweise aufgrund von Betriebserfahrungen, erhöhter EVC-Verfügbarkeit sowie Cold Movement Detection [12]
- Entfall von gesonderten Ortungsdatenpunkten vor Signalen bzw. Blockkennzeichen durch vorausschauendes Fahren mit ATO und CTMS. [19] Langsame Annäherungen an Haltsignale außerhalb von Bahnsteigen, die nur der flüssigen Zugfolge dienen, wären damit sehr selten und eine besonders genaue Ortung davor potenziell nicht erforderlich.

Ausgehend von den weiterhin (aus Sicherheitsgründen) erforderlichen Datenpunkten an ETCS-Halttafeln sowie Ortungsdatenpunkten (insbesondere für den ATO-Präzisionshalt) würde ungefähr ein Dutzend Balisen je Bahnsteigkantenbereich verbleiben. Derartige Vereinfachungen lassen nicht nur einen verminderten Aufwand, sondern ein robusteres System erwarten. Auch führen die vielen Balisen zu vielen Position Reports sowie Anpassungen der von Fahrzeugen und Infrastruktur genutzten gemeinsamen Bezugspunkte (LRBG), zum Teil im Sekunden-takt. Potenziell könnten damit auch gesonderte Anforderungen an das Bremsvermögen [17] sowie Sonderregelungen für Bau- und Instandhaltungsfahrzeuge entfallen.

Abseits der Balisen bietet langfristig ETCS mit teilweiser Gleisfreimeldung durch den Zug („Hybrid Level 3“) das Potenzial, auf Achszählpunkte abseits von ETCS-Halttafeln und Weichen zu verzichten (Bild 5, unten). Die S-Bahn-Triebzüge werden bereits entsprechend ausgerüstet [12, 20], und die Umsetzung im Bereich der Deutschen Bahn mit APS [21] ist langfristig absehbar. Dass die zugrunde liegenden Position Reports frühestens nach Ablauf der Offenbarungszeit der Zugtrennung (bislang 3,5 Sekunden) abgesetzt werden [20], lässt im Vergleich zu Ende-zu-Ende-Laufzeiten von gerade einmal 2 Sekunden eine geringfügig spätere Gleisfreimeldung und damit eine um wenige Sekunden verlängerte Mindestzugfolgezeit erwarten. Das für TIMS zu berücksichtigende Vertrauensintervall der Ortung verstärkt diesen Effekt weiter.

equipping all stations with ETCS stop markers makes it possible to turn trains around in all stations. And by equipping crossovers with ETCS stop markers, headways are shortened during turns and single-track operation.

While much has already been put to the test in concepts, planning and simulations, some things will only be comprehensively demonstrated in operational practice: For example, since Baseline 3 R2 (SRS 3.6.0), the ETCS specs require to inform the drivers by means of a beep (S\_info) when the movement authority is extended while the train is in target speed monitoring (TSM). [16] When following a preceding train closely with short blocks, a considerable acoustic load on the driver's cab is to be expected in this respect. Since this is suppressed in ATO operation, ATO is of additional importance in order to actually realise regularly dense headways. Another subject of in-depth research is to parameterise guidance curves in a way that is neither too “steep” nor too “flat”, so that drivers can follow them well in practice without regularly braking earlier than necessary. Which braking curves can ultimately be used with ATO is still an open question. The benefits of precise stops and the threat of “creeping” in case of particularly precise stops must also be weighed up.

### 3 Further potentials

In order to gradually achieve the outlined benefits from 2025 onwards, a considerable planning and construction effort will be made. The experience gained in the project shows, as it were, how such high-performance lines can be planned, built and operated more simply, efficiently and robustly in some respects.

#### 3.1 Balise littering, hybrid level 3

The balise littering and the underlying block division and track vacancy detection show particularly clear potential for simplification.

The rules specifically developed for S-Bahn Cores [17] already opens up the possibility to relinquish TSR balise (fig. 6 in [1]) if the SR (Staff Responsible) speed is reduced to 20 km/h in the entire area by national value (fig. 5, top). Such a solution was not yet considered for the Core, as so far only uniform national values can be used per Radio Block Centre (RBC) and especially away from the Core such a restriction would not be acceptable from an operational point of view.

Fig. 5, centre, shows how far the balise littering could be thinned out if it were possible to exploit further potential in the longer term:

- Elimination of the data points on the location markers by dispensing with a complex signal-to-stop evaluation in the RBC and the position report on the location marker required for this [18].
- Elimination of TSR and SoM balises by demonstrating a much lower probability of a journey in SR than previously assumed, for example due to operational experience, increased EVC availability and cold movement detection [16].
- Elimination of separate repositioning balises for in front of signals or location markers due to anticipatory driving with ATO and CTMS. [19] Slow approaches to stop signals outside platforms, which only serve the fluid train sequence, would thus be very rare and a particularly precise localisation in front of them would potentially not be necessary.

Based on the data points still required (for safety reasons) at ETCS stop markers as well as repositioning balises (especially for ATO precision stop), about a dozen balises would remain

### 3.2 Weiterführende Leistungspotenziale

Um kürzere Zugfolgezeiten bzw. weniger Verspätungen zu erreichen, verbleiben einige weiterführende Potenziale, wie teils auch aus Bild 4 ersichtlich: Ein paar Sekunden Potenzial für die Mindestzugfolgezeit liegen noch in einigen Optimierungen der ETCS-Bremskurven, die teils auch Änderungen an der ETCS-Spezifikation erfordern [14]. Weitere Sekunden liegen im vorausschauenden Fahren, nahe der Schnellbremseinsatzkurve (EBI), wie sie im Zusammenspiel von ATO mit dem zukünftigen Kapazitäts- und Verkehrsmanagementsystem CTMS geplant ist [19, 22]. Auch in der Optimierung des Zulaufs und der Prozesse wie bspw. der Einfädelung liegen noch Chancen.

Oft liegen Potenziale auch in gänzlich unerwarteten Bereichen: So könnten am nördlichen Ende der Stammstrecke, von wo S-Bahnen wechselweise nach Feuerbach und Bad Cannstatt weiterfahren, Zugfolgezeiten verkürzt werden, indem die Verzweigungsweiche erst umläuft, wenn der nachfolgende Zug zum Halt gekommen ist (Bild 6) Am anderen Ende des hochbelasteten Kernbereichs, in der Wendeschleife Schwabstraße, könnten Wendezeiten um eine volle Minute schlicht durch schneller ladende Fahrpläne (z. B. mittels FRMCS) verkürzt werden. [13]

### 3.3 Zukünftige Neufahrzeuge

Bereits am Horizont ist der zukünftige, ab voraussichtlich 2032 geltende Verkehrsvertrag erkennbar, in dessen Rahmen wohl zumindest ein Teil der Bestandsflotte (Baureihe 423) durch Neufahrzeuge ersetzt werden wird. Daraus ergeben sich einige Chancen: im „digitalen“ Bereich beispielsweise eine verkürzte TMS-Offenbarungszeit, optimierte ETCS-Bremskurven [14] und ein vorausschauender Anstoß der Türöffnung an einer präzise durch das ATO-Bordgerät geplanten Trajektorie. Noch größere Hebel für kürzere Zugfolgen liegen in einer verbesserten Fahrdynamik [9, 10] sowie, abseits der Digitalisierung, in einem möglichen Verzicht auf (haltezeitverlängernde) Türspaltüberbrückungen, die es in dieser Form bei deutschen S-Bahnen nur in Stuttgart gibt.

## 4 Ausblick

Die Stellwerks- und Kabelplanung wurde anhand der im Feld gewonnenen Erkenntnisse fortgeschrieben. Zwischenzeitliche Überlegungen, den Abschnitt zwischen Hauptbahnhof (tief) und

per platform edge area. Such simplifications not only lead to a reduced effort but also to a more robust system.

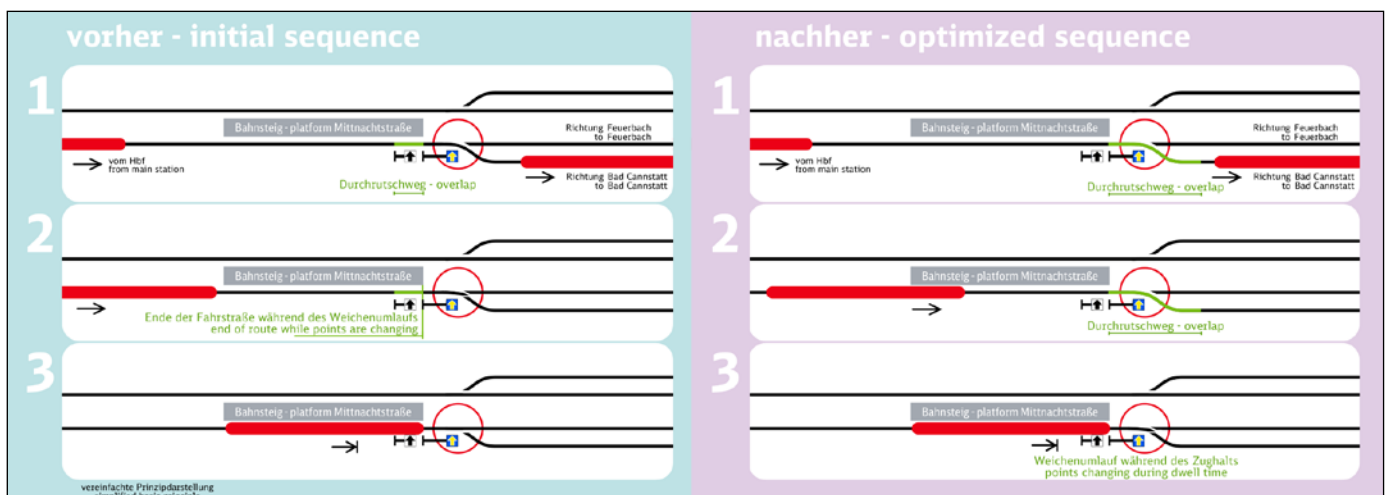
Based on the balises that are still required (for safety reasons) at stop markers and repositioning balises (in particular for the ATO precision stop), approximately a dozen balises per platform edge area would remain. Simplifications of this kind not only allow for reduced effort, but also a more robust system. Also the many balises lead to many position reports and adjustments to the common reference points used by vehicles and infrastructure reference points used by vehicles and infrastructure (LRBG), sometimes every second. Also, special regulations for braking capacity [17] as well as for construction and maintenance vehicles could be potentially omitted.

Apart from the balises, ETCS with partial track vacancy detection by the train (‘Hybrid Level 3’) offers the potential in the long term to dispense with axle counting points aside from ETCS marker boards and points (fig. 5, bottom). The S-Bahn EMUs are already equipped accordingly [16] and the implementation in the Deutsche Bahn area with APS [21] is foreseeable in the long term. The fact that the underlying position reports are sent at the earliest after the expiry of the disclosure time for train separation (so far 3.5 s) [17] means that, compared to end-to-end system delays of just 2 s, a slightly later track clearance announcement and thus a headway extended by a few seconds can be expected. The odometry confidence interval to be considered for TMS further amplifies this effect.

### 3.2 Further performance potentials

In order to achieve shorter headways or fewer delays, some further potentials remain. For example, a few seconds of potential headway still lie in some optimisations of the ETCS braking curves, which partly also require changes to the ETCS specification [14]. Further seconds lie in predictive driving, close to the emergency brake application curve (EBI), as planned in the interaction of ATO with the future Capacity & Traffic Management System CTMS [19, 21]. There are also opportunities in the optimisation of adjacent tracks and processes such as merging trains into the Core.

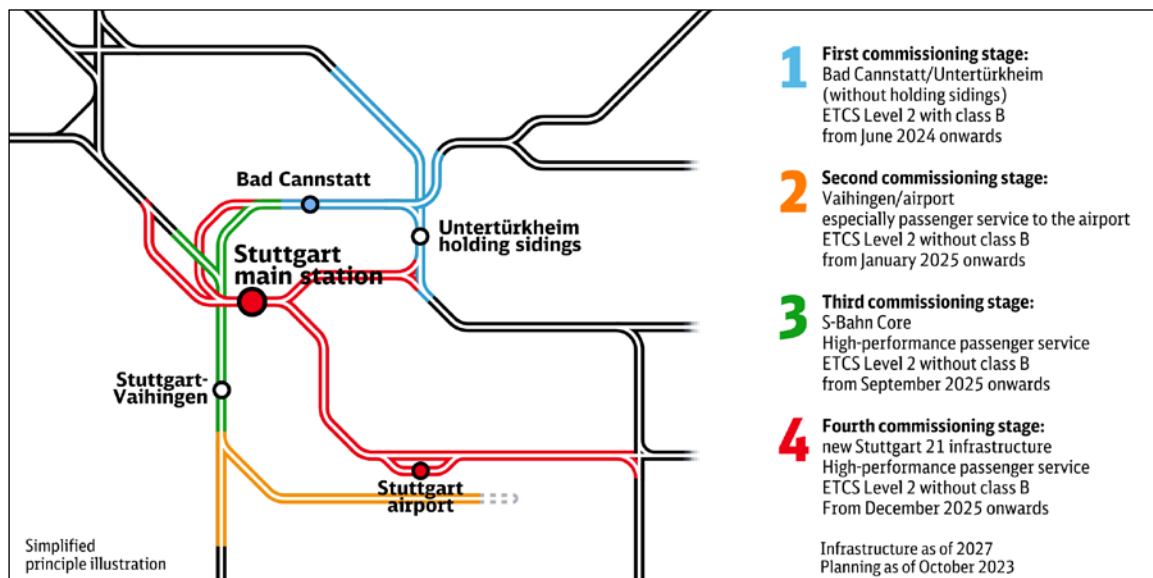
For example, at the northern end of the Core, from where commuter trains continue alternately to Feuerbach and Bad Cannstatt, train sequence times could be shortened by not changing the branching point until the following train has come



**Bild 6:** Im gezielten Weichenumlauf während des Halts liegt wesentlicher Spielraum für kürzere Zugfolgezeiten am nördlichen Ende der Stammstrecke.

Fig. 6: There is considerable scope for shorter headways at the northern end of the Core in the point rotation during the stop.

Quelle / Source: DB



**Bild 7: Wesentliche Inbetriebnahmestufen von ETCS im Kern des DKS**

Fig. 7: Essential commissioning stages of ETCS in the core of the Stuttgart Digital Node Quelle / Source: DB

Bad Cannstatt als eine Art Teststrecke vorzeitig in Betrieb zu nehmen, wurden verworfen und wurde stattdessen auf ein einziges Planpaket für den Endzustand fokussiert.

Nach der Sommerferiensperre 2023 laufen inzwischen die Vorbereitungen für die Sperrung 2024. Neben zahlreichen LST-Maßnahmen – mit einem Großteil der Tafeln und Eurobalisen, etlichen Achszählpunkten, Kästen sowie Restarbeiten an Kabeln – sind zahlreiche Parallelprojekte wie bspw. Oberbaumaßnahmen vorgesehen.

Die Inbetriebnahme der „digitalisierten“ Strecke ist mit Abschluss der Sommerferiensperre 2025 geplant (Bild 7). Die kommerzielle Inbetriebnahme der neuen LST wird dann u.a. durch die Anbindung der neuen Gleise an den Bestand am Nordbahnhof und in Bad Cannstatt begleitet. Damit dies gelingen kann, sind noch zahlreiche begleitende Schritte zu gehen. Neben (bereits laufenden) Labortests bei Alstom (Fahrzeuge) und GTS (Infrastruktur) sind vorläufig zwei wesentliche Inbetriebnahmestufen für ETCS abseits der Stammstrecke geplant (Bild 7): Mitte 2024 soll ETCS – in „Doppelausrüstung“ – zunächst im Bereich Bad Cannstatt/Untertürkheim zu Testzwecken zur Verfügung stehen, während der Regelbetrieb hier zunächst noch mit konventioneller LST läuft. In einem zweiten wesentlichen Schritt soll dann im Januar 2025 erstmals die Umstellung einer deutschen Bestandsstrecke auf L2oS folgen: auf der S-Bahn-Strecke zum Flughafen, die mit vier Zügen pro Stunde und Richtung vergleichsweise schwach befahren ist.

Um die ohnehin große Komplexität nicht weiter zu erhöhen, liegt der Fokus zunächst auf DSTW und ETCS. Weitere Technologiesprünge wie ATO folgen erst ab 2026. Auch das geplante Verkehrsangebot soll zunächst bei 24 Zügen pro Stunde und Richtung im hochbelasteten Kernbereich liegen, die Effekte der Digitalisierung bislang rein der Qualitätsverbesserung dienen. Im südlichen Anschluss, zwischen Schwabstraße und Vaihingen, soll das Verkehrsangebot von zwölf auf 16 Züge pro Stunde und Richtung angehoben werden.

Im Jahr 2024 ist ein weiterer Beitrag geplant, welcher weitere Eindrücke und Erfahrungen aus der voranschreitenden Umsetzung und den Vorbereitungen zur Inbetriebnahme der ersten ETCS-Hochleistungsstrecke in Deutschland zum Inhalt haben soll. ■

to a stop (fig. 6). At the other end of the highly congested Core, in the Schwabstraße reversing loop, turning times could be shortened by a full minute simply by faster-loading timetables (e.g. by means of FRMCS). [13]

### 3.3 Future new vehicles

Already on the horizon is the future transport contract, which is expected to come into force in 2032, in the context of which at least part of the existing fleet (class 423) will likely be replaced by new vehicles. This will result in a number of opportunities: in the “digital” domain, for example, a shortened disclosure time for train separation, optimised ETCS braking curves [14] and a predictive triggering of the door opening at a trajectory precisely planned by the ATO on-board unit. Even greater levers for shorter train sequences lie in improved driving dynamics [9, 10] as well as, away from digitisation, in a possible abandonment of (dwell-time-extending) door gap bridging, which only exists in this form on German commuter trains in Stuttgart.

## 4 Outlook

The interlocking and cable planning has been updated on the basis of the findings gained in the field. Considerations in the meantime to put the section between the main station (low) and Bad Cannstatt into operation prematurely as a kind of test section were discarded and instead focused on a single plan package for the final state.

After the summer holiday closure in 2023, preparations are now underway for the closure in 2024. In addition to numerous CCS measures – with a large part of the ETCS boards and Eurobalises, several axle counting points, boxes and remaining work on cables – numerous parallel projects such as tracks measures are planned.

The commissioning of the “digitised” line is planned for the end of the summer holiday closure in 2025 (fig. 7). The commercial commissioning of the new CCS will then be accompanied by, among other things, the connection of the new tracks to the existing ones at Nordbahnhof and in Bad Cannstatt. In order for this to succeed, numerous accompanying steps still need to be taken. In addition to (already ongoing) laboratory tests at Alstom (vehicles) and GTS (infrastructure), two essential commissioning stages for ETCS are planned in advance away from the Core (fig. 7): In mid-2024, ETCS – along with class B signalling – will initially be made available in the



Das Projekt wird kofinanziert von der Europäischen Union.  
The project is co-financed by the European Union.



## LITERATUR | LITERATURE

- [1] Achilles A.; Behrooz, A.; Beyer, M.; Lehmann, F.; Lies, R.; Schleede, M.; Trenchel, D.; Wanstrath, S.: Die Digitalisierung der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart (Teil 1). Signal+Draht 9/2023 (<https://bit.ly/46AzFOF>).
- [2] Hornemann, K.: Neue LZB bei der S-Bahn München. Signal+Draht 9/2005.
- [3] ETCS-Spezifikation, SUBSET-036, Annex G.
- [4] Die einzelnen Stell- und Verschlusseinrichtungen sind der Kategorie 1a gemäß Richtlinie 819.1344, Abschnitt 4.1, Abschnitt 14, zuzuordnen. Sie bilden zusammen ein zusammenhängendes Metallobjekt.
- [5] 0,2 s bei v<sub>max</sub> von 80 km/h
- [6] Ingenieurgesellschaft Machbarkeitsstudie ETCS S-Bahn Stuttgart: Untersuchung zur Einführung von ETCS im Kernnetz der S-Bahn Stuttgart (<https://bit.ly/2Yyaw6h>).
- [7] Beyer, M.; Jurtz, S.; Langhof, M.; Reinhart, P.; Vogel, T.: ETCS als Trägersystem zur Leistungssteigerung bei der S-Bahn Stuttgart. Signal+Draht 6/2019 (<https://bit.ly/2MJ4zAY>).
- [8] 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>).
- [9] Kümmling, M.; Wanstrath, S.: „Digitale“ Kapazitätssteigerungen: ein Sachstand. Eisenbahn Ingenieur Kompendium 2024.
- [10] Reinhart, P.: Viel mehr Kapazität mit ETCS (& Co.) – aber wie? Tagungsband des Scientific Railway Signalling Symposiums 2023 (<https://bit.ly/3u44wW7>).
- [11] Behrens, M.; Caspar, M.; Distler, A.; Fries, N.; Hardel, S.; Kreßner, J.; Lau, K.; Pensold, R.: Schnelle Leit- und Sicherungstechnik für mehr Fahrwegkapazität. Der Eisenbahningenieur 6/2021 (<https://bit.ly/47RFeZJ>).
- [12] Dietrich, F.; Erdmann, J.; Jost, M.; Raichle, F.; Sane, N.; Vogel, T.; Wagner, P.: Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart. ZE-Vrail 5/2022 (<https://bit.ly/3DHZl0S>).
- [13] 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>).
- [14] 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>).
- [15] 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>).
- [16] ETCS Driver Machine Interface (ERA\_ERTMS\_015560), Version 3.6.0, 7.4.1.
- [17] 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.
- [18] Bolay, R.: Haltfallbewertung unter ETCS. Diplomarbeit TU Dresden 2023 (<https://bit.ly/3NanwsZ>).
- [19] Kümmling, M.; Wanstrath, S.: Maximierung der Fahrwegkapazität mit Digitaler Leit- und Sicherungstechnik. Eisenbahntechnische Rundschau 7+8/2021 (<https://bit.ly/3eYOapT>).
- [20] 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>).
- [21] Skowron, F.; Treydel, R.: Blöcke waren gestern – Chancen einer zugentrischen LST. Der Eisenbahningenieur 11/2022 (<https://bit.ly/3UXNYaH>).

Bad Cannstatt/Untertürkheim area for test purposes, while regular operation here will initially still run with conventional CCS. In a second major step, the conversion of a German existing line to ETCS only is to follow in January 2025 for the first time: on the S-Bahn line to the airport, which is comparatively lightly used with four trains per hour and direction.

In order not to further increase the already high complexity, the focus is initially on DSTW and ETCS. Further technological leaps, such as ATO, will only follow from 2026 onwards. Also, 24 trains per hour and direction are still planned in the particularly heavily used section, the effects of digitalisation serving purely to improve quality for the time being. In the southern part, between Schwabstraße and Vaihingen, the service will be increased from twelve to 16 trains per hour and direction.

A further article is planned for 2024, which will contain further impressions and experiences from the progressing implementation and the preparations for the commissioning of the first ETCS high-performance line in Germany. ■

## AUTOREN | AUTHORS

**Martin Büttner**

Senior Project Manager Deployment  
GTS Deutschland GmbH/Thales  
Anschrift/Address: Thalesplatz 1, D-71254 Ditzingen  
E-Mail: martin.buettner@urbanandmainlines.com

**Mahir Celik**

CEO  
safeTrail GmbH  
Anschrift/Address: Europaallee 26, D-66113 Saarbrücken  
E-Mail: mahir.celik@safetrail.de

**Michael Kümmling**

Rules & Technology  
DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH  
Anschrift/Address: Rappelnstr. 17, D-70191 Stuttgart  
E-Mail: michael.kuemmling@deutschebahn.com

**Jan Lübs**

Engineer for railway signalling  
CERSS Kompetenzzentrum Bahnsicherungstechnik GmbH  
Anschrift/Address: Bernhardstraße 77, D-01127 Dresden  
E-Mail: jan.luebs@cerss.com

**Patrick Seeger**

ETCS/ATO/FRMCS expert  
DB Regio AG  
Anschrift/Address: Eisenbahnstr. 42, D-73207 Plochingen  
E-Mail: patrick.seeger@deutschebahn.com

**Marc-André Testa**

Design Engineer for CCS  
safeTrail GmbH  
Anschrift/Address: Europaallee 26, D-66113 Saarbrücken  
E-Mail: marc-andre.testa@safetrail.de

**Markus Vens**

Commissioning/equipment DKS  
DB Engineering & Consulting GmbH  
Anschrift/Address: Rappelnstraße 19, D-70191 Stuttgart  
E-Mail: markus.vens@deutschebahn.com

**Stefan Wallberg**

Deployment Manager Field Installation  
GTS Deutschland GmbH/Thales  
Anschrift/Address: Thalesplatz 1, D-71254 Ditzingen  
E-Mail: stefan.wallberg@urbanandmainlines.com