

Die Umrüstung von S-Bahn-Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart

Frank Dietrich
Programmierer Fahrzeugumrüstung ETCS/ATO, DB Regio AG

Jens Pätzold
Projektleiter Fahrzeugumrüstung ETCS/ATO, DB Regio AG

Frank Schiller
Projektleiter, Alstom

Christian Schunke-Mau
Vertriebsleiter Digitalisierung DACH, Alstom

Peter Reinhart
Mitarbeiter der Gesamtprogrammleitung Knoten Stuttgart, DB InfraGO AG

Internet-Publikation mit Genehmigung des Verlags Minirex AG

(Fortsetzung aus Heft 3/2025)

Begleitende Facetten

Qualifikation der Mitarbeiter

Die Umrüstung sämtlicher Triebzüge bringt auch einige Neuerungen für den Grossteil der rund 850 Mitarbeiter der S-Bahn Stuttgart. Zwar stehen die mehr als 450 Triebfahrzeugführer (einschliesslich der Auszubildenden) und rund 180 Mitarbeiter in der Instandhaltung im Fokus der notwendigen Qualifikation – bei genauerem Hinsehen bedeutet das Vorhaben auch Veränderungen und Arbeit für viele weitere Mitarbeiter, beispielsweise in Disposition und Planung sowie dem Fahrzeugmanagement.

Um diese weitreichende Transformation und Qualifikation – weit über die blosse Technik der Fahrzeugausrüstung hinaus – erfolgreich zu gestalten, hat die S-Bahn Stuttgart bereits 2020 das Team „S-Bahn 2025“ aufgebaut. Es besteht aus rund zehn Mitarbeitern, Ingenieuren und Betriebspraktikern mit zusammen mehr als 150 Jahren Bahnbetriebserfahrung. Sie decken mit ihrer Expertise und Erfahrung nicht nur das gesamte Spektrum des S-Bahn-Betriebs ab, sondern fahren zum Teil auch weiterhin regelmässig die Triebzüge selbst. Zusammen mit der Beschaffung der DB und mit Unterstützung externer Ingenieurbüros betreut das Team dabei auch Aus- und Nachrüstvorhaben des Landes Baden-Württemberg beratend, nachdem die DB Regio eine entsprechende Ausschreibung gewonnen hatte [17].

Die grösste Herausforderung der Qualifikation lag und liegt bei den Triebfahrzeugführern. Sie stellen nicht nur die mit Abstand grösste Gruppe, sondern sind besonders knapp. Die sechstägige Erstausbildung wurde daher bereits im Sommer 2022 begonnen, um jeweils höchstens fünf Triebfahrzeugführer gleichzeitig dem Betrieb zu entziehen und trotzdem bis zur zunächst für Januar 2025 geplanten ersten kommerziellen Inbetriebnahme alle Triebfahrzeugführer ausgebildet zu haben. In jenen sechs Tagen lernen die Teilnehmer ETCS in Theorie und Praxis (am Simulator) kennen und absolvieren eine schriftliche, mündliche und praktische (Simulator) Prüfung. Inzwischen haben mehr als 80 % der Triebfahrzeugführer diese Schulung durchlaufen.

Die 16monatige Verschiebung der ersten kommerziellen ETCS-Inbetriebnahme führte dazu, dass zwischen der Schulung und der tatsächlichen Betriebspraxis nicht mehr zweieinhalb, sondern nahezu vier Jahre

liegen. Um die Qualifikation aufrechtzuerhalten, greift die S-Bahn Stuttgart zu einer Vielzahl von Massnahmen:

- Jährlich erhält jeder Triebfahrzeugführer einen Tag Fortbildungsunterricht als Auffrischung speziell zu ETCS, mit einem Theorieblock (insbesondere zu Regelwerksänderungen) und Simulatorfahrten (mit Störszenarien, bei denen persönliche Wünsche berücksichtigt werden).
- Halbjährlich alternierend dazu hat jeder Triebfahrzeugführer auf seinem dienstlichen Tablet ein webbasiertes Training (einschliesslich Wissenstests) zu absolvieren. Bei Themen, in denen sich die Triebfahrzeugführer trittsicher fühlen, kann direkt auf die Fragen gesprungen werden, die übrigen Lernbausteine werden zunächst in Bild und Ton durchlaufen und erst danach die Fragen zur Beantwortung vorgelegt. Dieses webbasierte Training (WBT) wurde von DB Regio zentral auf der Grundlage von Impulsen der S-Bahn Stuttgart entwickelt.
- Zusätzlich stehen mittlerweile Videos zu verschiedenen betrieblichen Situationen zur Verfügung, die im Simulator nachgestellt wurden und weiterführende Informationen (wie Regelwerkshinweise) enthalten.
- Mit dem Zulauf der ersten Triebzüge erhalten sämtliche Triebfahrzeugführer einen eintägigen Technikunterricht direkt am Fahrzeug, können diese Informationen „begreifen“, „erfahren“ und Fragen stellen. Dies wird begleitet durch eine schriftliche Handreichung für alle Triebfahrzeugführer.

Die verspäteten Inbetriebnahmen der Infrastruktur führen im laufenden Betrieb zu wesentlichen Erschwernissen: Nachdem die ursprünglich zum Jahreswechsel 2023/2024 geplante erste Stellwerksinbetriebnahme (im Bereich Bad Cannstatt / Untertürkheim) nicht erfolgt ist, waren die im Jahresfahrplan 2024 hinterlegten Signalstandorte hinfällig. Eine mehr als 100seitige Fahrplananordnung, die zusätzlich zu den betrieblichen Fahrplänen zu beachten ist, war die Folge – weitere derartige Unterlagen folgten. Auch die zahlreichen, oft kurzfristigen und teils weitreichenden Streckensperrungen, um die neue Technik ins Feld zu bringen, sind eine grosse Erschwernis für Triebfahrzeugführer sowie weitere Mitarbeiter der S-Bahn Stuttgart und stellen die Akzeptanz in Politik und Öffentlichkeit für die Digitalisierung der Schiene insgesamt auf eine harte Probe. Eine Herausforderung ist von daher, die

Motivation der fahrenden und disponierenden Kollegen aufrechtzuerhalten: nicht nur für ETCS und die weitere Technik, sondern auch schlicht für den täglichen, ohnehin schon vielen Erschwernissen und Störungen geprägten Betrieb. Beispielsweise waren die Einschränkungen im S-Bahn-Fahrplan 2024 fünfmal grösser als noch 2022.

Kurz nachdem die ersten umgebauten Triebzüge in Plochingen eingetroffen waren, begann im Dezember 2024 auch die Qualifikation der Instandhalter daran. Im Mittelpunkt der Ausbildung steht dabei die planmässige Instandhaltung, während die korrektive und präventive Instandhaltung während der Gewährleistungsphase noch durch Alstom erfolgt. Ende Januar wurden die zuvor erarbeiteten Instandhaltungshandbücher „verlesen“ und im Detail auf Praxis-tauglichkeit geprüft.

Stabiler Hochlaufbetrieb und Resilienz

Die Reife und alltägliche Stabilität von ETCS wird oft unterschätzt. Beispielsweise waren im ersten Betriebsjahr der Schnellfahrstrecke (SFS) Wendlingen – Ulm weniger als 0,2 % von fast 30 000 Zugfahrten im Hinblick auf ETCS auffällig. Neben einer (mittlerweile behobenen) systemischen Schwachstelle im Zusammenspiel von Fahrzeugen und Strecke wurden wenige Einzelfehler an Fahrzeugen beobachtet [41]. Dies deckt sich mit weiteren Erfahrungen in Deutschland (zum Beispiel VDE 8) und der Schweiz. Ein entsprechend grosses Augenmerk für ein robustes Gesamtsystem liegt daher auf der Fahrzeugausrüstung und auf begleitenden betrieblichen Facetten. Die jeweils jahrzehntelangen Erfahrungen von Alstom, DB Regio und der Beschaffung der DB kommen auch in dieser Hinsicht dem Fahrzeugprojekt in vielen Details zugute, beispielsweise bei der Auswahl geeigneter Einbauorte, um potentielle Störquellen möglichst bereits im Design auszuschliessen.

Die eingebaute EVC-3-Plattform basiert nicht nur auf hochverfügbaren Elementen, sondern ist auch nahezu durchgängig redundant aufgebaut. So ist der EVC als 2-von-3-Rechner-System gestaltet; die Führer-raumdisplays und Antennen sind jeweils doppelt, und die Odometrie bleibt mit zwei (unterschiedlichen) von vier Sensoren noch funktionsfähig. Wenige nicht redundante Komponenten sind besonders hochverfügbar, unter anderem die Balisenantenne. Die von Alstom zugesagte Verfügbarkeit (Mean Time Between Failures, MTBF) der

ETCS-Fahrzeugausrüstung liegt mit 45 000 Stunden deutlich über der Mindestanforderung (der TSI) von 23 000 Stunden. [36]

Angesichts der schieren Menge der nachzurüstenden Triebzüge und der grossen Zahl der mit ETCS L2oS geplanten Fahrten – fast 1000 pro Tag allein über die Stammstrecke – liegt ein weiteres grosses Augenmerk seit jeher auf einer stabilen kommerziellen L2oS-Inbetriebnahme der S-Bahn. Eine zentrale Erfahrung aus anderen Projekten, beispielsweise der Inbetriebnahme der Schnellfahrstrecke Ebensfeld – Erfurt im Dezember 2017 [42], ist, alle mit ETCS nachgerüsteten Triebzüge rechtzeitig vor der kommerziellen ETCS-Inbetriebnahme der Infrastruktur ausgiebig zu testen und „einzufahren“. Damit sollen sowohl anfängliche Unregelmässigkeiten (wie unzureichend befestigte Verkabelungen) beseitigt als auch Erfahrungen gesammelt und Handlungssicherheit bei den vielen hundert beteiligten betrieblichen Mitarbeitern geschaffen werden.

Fehler, die im Zusammenspiel der späteren Fahrzeug- und Infrastrukturausrüstung auftreten können, werden weitgehend bereits durch umfangreiche Labortests ausgeschlossen. Bereits seit Juni 2024 finden dazu auch zahlreiche gemeinsame Labortests mit dem EVC-3 und den RBC des Infrastrukturausrüsters Hitachi Rail und der später im DKS genutzten Projektierung (zum Beispiel dichte Blockteilung) statt. Ein Grossteil der möglichen Einzelfehler, unter anderem bei der Verdrahtung, wird bereits in der Wiederinbetriebsetzungsphase durch mehrtägige Tests und kurze Testfahrten im Werk ausgeschlossen. Darauf aufbauend, hat jeder der acht Prototyp-Triebzüge wenigstens 4000 km im ETCS- und wenigstens 1000 km im PZB-Betrieb ohne wesentliche Störungen zu absolvieren, um die Stabilität der Fahrzeugausrüstung an sich im tatsächlichen Betrieb nachzuweisen. Für jeden einzelnen der 207 Serien-Triebzüge sind mehrere PZB- und ETCS-Fahrten ohne Fahrgäste vorgesehen, um insbesondere Fehler, die erst während oder nach der Überführung auftreten, möglichst auszuschliessen. Zusätzlich werden die ersten kommerziellen ETCS-Fahrten – jedes einzelnen Triebzuges und jedes einzelnen Triebfahrzeugführers – von wenigstens einem erfahrenen Mitarbeiter begleitet. Damit sollen nicht nur die Mitarbeiter an die Praxis herangeführt werden, sondern auch die Handlungssicherheit bei erwarteten seltenen Störungen erhöht wer-

den, die sich erst im ETCS-Bereich im Kern des Knotens offenbaren. Allein dafür werden bis zu 14 Mitarbeiter pro Tag eingesetzt.

Die Verfügbarkeit der Infrastruktur hat sich dabei als besondere Herausforderung herauskristallisiert: Statt ursprünglich geplanter rund 17 Monate (April 2024 bis September 2025) steht die tatsächliche (S-Bahn-)ETCS-Infrastruktur im DKS nur noch rund vier Monate (Mai 2026) vor der L2oS-Betriebsaufnahme der Stammstrecke (September 2026) zur Verfügung. Diese wird durch die ab Ende Juli 2026 geplante Vollsperrung der Stammstrecke bei gleichzeitig bereits unterbrochener Gäubahn erschwert. In dieser Phase werden die dann zwischen Stuttgart-Vaihingen und Flughafen/Filderstadt pendelnden Triebzüge nicht über die Stammstrecke fahren können, sondern einen etwa 30 km langen Umweg über Böblingen – Renningen – Stuttgart-Zuffenhausen mit mehreren Fahrtrichtungswechseln nehmen müssen, um das Werk Plochingen zu erreichen. Die ersten ETCS-Fahrten vieler Triebzüge werden daher überwiegend abseits des zukünftigen Einsatzgebiets erfolgen, voraussichtlich insbesondere in den Abschnitten Wendlingen – Mercklingen, später Stuttgart-Feuerbach – Mercklingen der Neubaustrecke Stuttgart – Ulm.

Vor diesem Hintergrund kommt der ebenso möglichst frühzeitigen wie weitreichenden Nutzung der Fahrzeugausrüstung eine grosse Bedeutung zu: Bereits im PZB-only-Betrieb (Baseline 4.0 off) wird ein grosser Teil der später auch für ETCS benötigten Hardware genutzt: EVC, Displays, Odometrie und JRU laufen bereits in dieser Betriebsphase voll mit. Nach früheren Erfahrungen können viele Fehler, die sich erst nach einigen Tagen oder Wochen manifestieren – beispielsweise gewisse Verdrahtungsfehler oder unbeabsichtigte Wassereintritte – dann über die Diagnose erkannt und beseitigt werden. Auch Prozesse wie Zugdateneingabe und Prüfläufe werden dann genutzt und eingeübt. Noch nicht genutzt werden hingegen insbesondere Balisenantennen und Funk sowie der ETCS-spezifische Teil der EVC-Software.

Ein grosses Augenmerk liegt seit jeher auf der Diagnose. Die bereits sehr tiefe und über die Jahre weitreichend optimierte Fahrzeugdiagnose beider Baureihen wurde um die Komponenten der neuen Fahrzeugausrüstung erweitert. Zusätzlich stellt Alstom mit HealthHub [36] ein umfangreiches Diagnose- und Auswertesystem bereit. Die

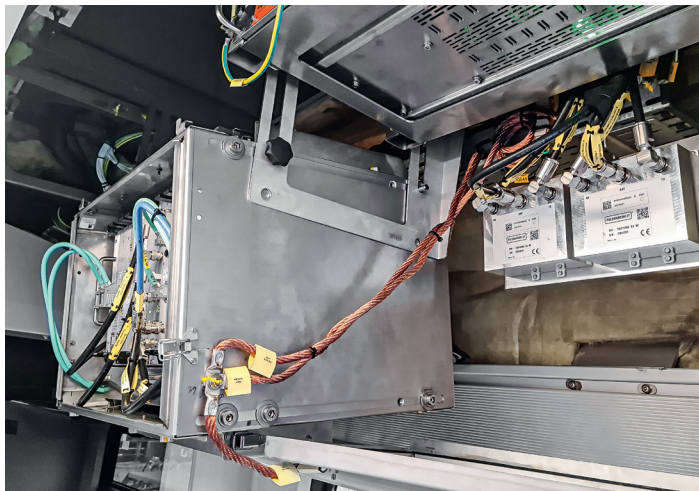
Grundlage für beides ist die sehr umfassend verbesserte Diagnose des EVC-3, die nicht nur neuen und vertieften Lastenheftanforderungen der DB entspricht, sondern auch in enger Zusammenarbeit von Alstom und DB Regio im Detail gestaltet wurde. Ganz grundlegend werden dabei Fehlermeldungen so präzise wie möglich erfasst: auf der Ebene einzelner Teile (wie Prozessoren), mit einem Orts- und Zeitbezug. Auch gehen Fehler beim Abschalten der ETCS-Fahrzeugausrüstung nicht mehr verloren. Ein weiterer Schwerpunkt lag auch darauf, zwar alle Fehler automatisiert und unmittelbar der Werkstatt vorzumelden, dem Triebfahrzeugführer jedoch nur schwerwiegende Fehler unmittelbar darzustellen und für ihn irrelevante Folgefehler zu unterdrücken. Alle Diagnose-daten stehen sowohl dem Betreiber als auch dem Ausrüster des Fahrzeugs zur Verfügung.

Diese und weitere Facetten sind dabei ein wesentlicher Teil der Optimierung des Gesamtsystems von Fahrzeugen, Infrastruktur und Betrieb. Neben einer praktisch durchgehenden Redundanz und vielen weiteren Optimierungen der Infrastruktur werden dabei auch betrieblich einige Register gezogen: So ist die Stammstrecke zukünftig formal der längste Bahnhof in Deutschland, um beispielsweise bei gravierenden Störungen mit einfacher mündlicher Verständigung ohne Zugbeeinflussung als Rangierfahrt die „Strecke“ räumen zu können [43]. Um die ohnehin schon grosse Komplexität nicht noch weiter zu erhöhen, werden für die ersten Inbetriebnahmen nicht zwingend notwendige weitere Techniken, wie ATO GoA 2, bewusst nachgelagert und schrittweise in Betrieb genommen, wenn sich ETCS L2oS im Betrieb bewährt hat und auf hohem Niveau weiter optimiert wurde. Eine Herausforderung bleibt dabei wiederum der Erhalt der Handlungssicherheit im Umgang mit Störungen, die jedoch spätestens nach Überwindung von Kinderkrankheiten sehr selten auftreten dürften.

Bedien-, Fahr- und Instandhaltbarkeit

Ein besonderes Augenmerk lag und liegt auch auf der Bedien-, Fahr- und Instandhaltbarkeit der umgerüsteten Triebzüge. Dabei geht es nicht zuletzt auch um wesentliche Beiträge für einen angenehmen und somit auch attraktiven Arbeitsplatz.

Bereits bei der Erstellung der Lastenhefte [55] wurden wesentliche Eckpunkte festgelegt, auch aufgrund von durchwachsenen Erfahrungen aus anderen Ausrüstungsprojekten und Betriebsbeobachtungen. Ein zentraler Punkt ist dabei, dass die Nutzbarkeit der Fahrzeuge nicht eingeschränkt und Prozesszeiten (wie beim Aufstarten oder Fahrtrichtungswechsel) durch die neue Ausrüstung nicht verlängert werden dürfen. Auf der Grundlage des schnellen EVC-3 und dessen tiefer Integration in das Fahrzeug wurde die Fahrzeugausrüstung von Alstom im engen Dialog mit DB Regio auch dahingehend optimiert. Beispielsweise müssen im Regelfall nur Triebfahrzeugführer- und Zugnummer einmalig (am DMI) eingegeben werden. Diese werden anschliessend in das Zugfunkgerät, den Buchfahrplan sowie das Fahrgastinformationssystem übernommen. Die Zuglänge und der Bremszustand werden automatisch ermittelt und lediglich zur Bestätigung vorgelegt. Die Zeitvorgaben für Prozesse wie das Aufstarten oder den tech-



Für Instandhaltungsarbeiten abgesenkter EVC (Foto: DB Regio).

Prinzipdarstellung der Blockteilung an einem Bahnsteig der S-Bahn-Stammstrecke (Zeichnung: DB).

nischen Vorbereitungsdienst wurden in Tests überprüft und unterschritten.

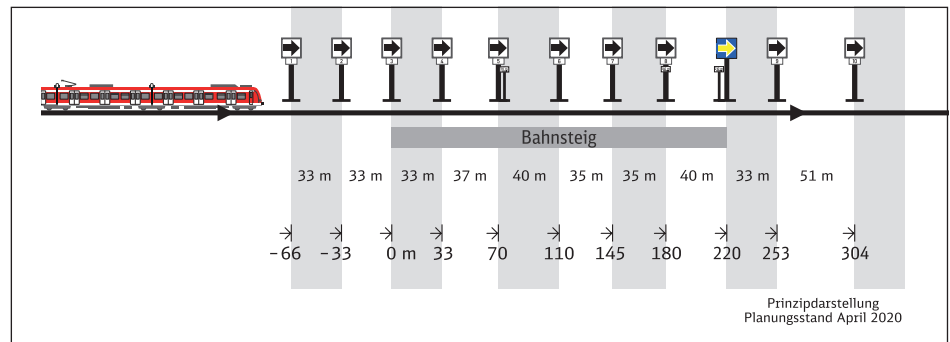
Ein grosses Augenmerk lag auch auf der Instandhaltbarkeit. In den FoC-Designrunden wurden viele Details verbessert, beispielsweise die Verläufe neuer Kabel möglichst in einer Weise geplant, damit diese der Instandhaltung nicht im Weg sind. Auch wurde die geplante Instandhaltung der Fahrzeugausrüstung auf die ohnehin geplanten Instandhaltungsintervalle abgestimmt. Baugruppen müssen ohne Spezialwerkzeug getauscht werden können, und auch der Ersatz beliebiger Komponenten darf nicht länger als zwei Stunden dauern, was auch im Rahmen einer Probeinstandhaltung nachzuweisen ist. Gegenüber der bisherigen Ausrüstung wird ein geringerer Instandhaltungsaufwand erwartet.

Ein weiteres wesentliches Thema sind dabei auch ETCS-Bremskurven. Die gerade auch in der Schweiz beobachteten Einschränkungen (wie „Schleichfahrten“) werden im DKS nicht auftreten, da Bremskurven nach den harmonisierten Bremsmodellen der ETCS-Baseline 3 (statt Baseline 2) berechnet werden, diese in einiger Hinsicht optimiert wurden und dem Triebfahrzeugführer auch transparent sind (ETCS-Mode „Full Supervision“ statt „Limited Supervision“) [44]. Um Sprüngen in der Sollgeschwindigkeitskurve (Permitted Speed) entgegenzuwirken, wird eine Führungskurve (Guidance Curve) mit neigungsabhängigen Korrekturfaktoren parametrisiert [45, 46]. Im ATO-GoA-2-Betrieb wird diese Bremskurve nicht genutzt und auch unerwünschte Pieptöne („S_info“) bei jeder verlängerten Fahrerlaubnis beim dichten Nachfahren unterdrückt [47]. Offen ist indes, wie die zumindest bei einer Einfahrt in teilbesetzte Gleise (zum Stärken) regelmässig vor dem Zielpunkt auftretende und hart überwachte Release Speed von 5 km/h tatsächlich fahrbar sein wird.

Nutzen

Die Modernisierung und damit auch „Digitalisierung“ der Leit- und Sicherungstechnik, einschliesslich einer darauf abgestimmten Fahrzeugausrüstung, ist kein Selbstzweck.

Ihr wohl wichtigster Nutzen liegt in der Möglichkeit, Züge dichter und vorausschauender zu fahren. Ein wichtiges, aber bei weitem nicht das einzige Element dafür liegt dabei in der Blockteilung: Bereits dank der Bildung von optimierten [48], 30 bis 75 m kurzen Blöcken in Bahnsteigbereichen der Stammstrecke kann die Mindestzugfolgezeit um fast eine halbe Minute verkürzt werden. Als gesichert erreichbar und in Umsetzung befindlich gelten auch kurze Systemlaufzeiten, optimierte ETCS-Bremskurven, eine auf wenige Meter genaue Ortung sowie eine erste, konservative Nutzung von ATO GoA 2. In Summe lässt dies um rund 45 s verkürzte Mindestzugfolgezeiten erwarten – rund 35 % kürzer als bei einer Ausrüstung mit ESTW, Ks-Signalen und PZB. Das heisst: Statt einiger Sekunden steht bei zunächst unverändertem Zugangebot auf der Stammstrecke zukünftig fast eine Minute Puffer zur Verfügung. Damit können beispielsweise fast alle im Betrieb beobachteten Haltezeitverlängerungen kompensiert werden, da



nachfolgende Züge wesentlich dichter nachrücken können.

Weitere Elemente wirken rein auf die Betriebsqualität, insbesondere schnelleres Fahren mit verspäteten Zügen. Darüber hinaus verbleibt eine Reihe von Potentialen, auch mit dem DKS-Baustein 3. Dazu gehören beispielsweise weiter verkürzte Systemlaufzeiten insbesondere durch FRMCS oder vorausschauendem Fahren bis kurzzeitig knapp unter die Zwangsbremseinsatzkurve (Emergency Brake Intervention, EBI) in Erwartung der Bewegung des vorausfahrenden Zuges (unter anderem mit dem Verkehrsmanagementsystem CTMS). Soweit es gelingt, Potentiale schrittweise zu härten und zu heben, ist eine Verkürzung der Mindestzugfolgezeiten um 50 % (und mehr) in Reichweite [45, 47, 49, 50]. Plastisch betrachtet würde das heissen: Ungefähr in dem Moment, in dem der vorausfahrende Zug den rund 220 m langen Bahnsteig geräumt hat, erreicht der nachfolgende in voller Fahrt den Bahnsteiganfang und beginnt mit der Zielbremsung.

Bei alledem geht es im übrigen gerade nicht darum, die Kapazität maximal auszureizen und so viele Züge wie technisch möglich in das System zu pressen – sondern zunächst, mit der neuen Technik Spielräume zu schaffen, die es heute aus technisch-betrieblichen Gründen so nicht gibt. Bei zunächst weiterhin 24 Zügen pro Stunde und Richtung wird im Kernbereich der Stammstrecke (Schwabstrasse bis Mittenbachstrasse) von 2026 an somit eine deutliche Verbesserung der Betriebsqualität und somit auch der Zufriedenheit der Kunden und Mitarbeiter erwartet. Wenn zu erwartende Kinderkrankheiten überwunden und Betriebserfahrungen gesammelt sind, wird es dann auch darum gehen, mit Augenmass mehr Züge zu fahren. Dabei sind auch ausserhalb der LST liegende Faktoren wie Aufenthaltsqualität und Räumzeiten von Bahnsteigen zu bedenken.

Nicht zuletzt können auf der Stammstrecke zusätzliche Züge nur gefahren werden, wenn sie auch im umgebenden (Mischverkehrs-) Netz sinnvoll untergebracht werden können. Die ohnehin notwendige Modernisierung der LST, wie sie im Rahmen des DKS-Bausteins 3 vorgesehen ist, verfügt dabei über ein grosses Potential für Kapazitätssteigerungen: Im Zusammenspiel von vielschichtigen LST-Optimierungen und überschaubaren konventionellen Ausbauten (wie schnell befahrbaren Weichen) könnte es gelingen, S-Bahnen während ohnehin geplanten, 30sekündigen Halten zu überholen [45, 51]. Bei unveränderten geplanten Fahrzeiten könnten dabei Geschwindigkeitserhöhungen im Bestand, wie sie im Rahmen des DKS ebenfalls verfolgt werden [52], als zusätz-

licher „Puffer“ (Fahrzeitzusammenhang) und als Spielraum für ein vorausschauend agierendes Verkehrsmanagementsystem dienen. Hierin könnte der zentrale Schlüssel für die langfristig vorgesehene, schrittweise Umstellung des S-Bahn-Systems vom 15- auf einen 10-Minuten-Takt liegen. Eine durchgehend vorausschauende Fahrweise, die unnötige Betriebshalte weitgehend vermeidet, lässt im Übrigen auch einen merklich geringeren Energiebedarf und Verschleiss erwarten.

Die präzise Lokalisierung und Sicherung durch ETCS, die Steuerung durch ATO GoA 2 sowie die breitbandige Funkkommunikation mit FRMCS/5G sind einige wesentliche Grundlagen für fahrerloses Fahren (ATO GoA 3 / 4). Im Rahmen des Projekts „Automated Train“ werden momentan zunächst weitere Grundlagen für eine vollautomatisierte Bereit- und Abstellung erarbeitet [53]. Hierzu wird 2025 auch ein Triebzug der S-Bahn Stuttgart (430 236) unter anderem mit Sensorik für Hinderniserkennung ausgerüstet, um ab Ende 2025 Fahrten zu absolvieren. Die Demonstrationen von vollautomatisierter Abstellung und Bereitstellung sind dabei mangels rechtzeitiger ETCS-Streckenausrüstung mittlerweile in Esslingen geplant. Die Vollautomatisierung dieser Prozesse und damit einhergehende Fahrten bis 40 km/h werden ein wesentlicher Schritt sein, um ATO GoA 4 in einigen Jahren, zunächst in der Bereitstellung, später auf der Strecke zu realisieren.

Während die Fahrzeugausrüstung mit ETCS und weiterer Technik deutlich aufwendiger wird, kann die Infrastruktur wesentlich vereinfacht werden. Eine mit Blick auf das Gesamtsystem Bahn gestaltete Fahrzeugausrüstung ebnet nicht nur den Weg für L2oS, sondern auch für weitere wesentliche Vereinfachungen der Infrastruktur, unter anderem ein vereinfachtes Funknetz oder eine wesentlich verschlankte Gleisfreimeldung (via TIMS) [5, 25]. Einige Vereinfachungen werden dabei nur im Dreiklang mit grundlegend überarbeiteten betrieblichen Regeln gelingen, beispielsweise im Hinblick auf den Verzicht auf Lichtsignale (Sperrsignale) zum Rangieren oder den zukünftigen Moving-Block-Betrieb.

Kosten, Finanzierung, Koordination

Wie die bisherigen Erfahrungen im DKS überdeutlich zeigen, führt eine klug im Gesamtsystem Bahn gestaltete Digitalisierung zu ungleich im System verteilten Nutzen und Kosten: Während die Infrastruktur erheblich vereinfacht werden kann – weit über den blossen Verzicht auf Lichtsignale hinaus – wird die Fahrzeugausrüstung deutlich aufwendiger. Eine Doppelausrüstung der Infrastruktur ist dabei nicht nur wesentlich teurer als eine L2oS-Ausrüstung einschliess-

Oben: Seit dem 3. März 2025 werden umgerüstete und neu zugelassene Triebzüge im Fahrgastbetrieb eingesetzt, wobei das eingebaute ETCS noch nicht aktiviert ist. Hier passieren die 430 231 + 070 + 217 unter den Esslinger Weinbergen den Gleisbahnhof Oberesslingen. Der mittlere Triebzug 070 wird den neuen Anstrich später erhalten (Foto: DB Regio / M. Sauer).

Unten: Überführung des im Werk Hagen der DB Fahrzeuginstandhaltung umgerüsteten Triebzugs 430 084 nach Plochingen bei der Überleitstelle Glems auf der Schnellfahrstrecke Mannheim – Stuttgart. Auch dieser Triebzug wurde inzwischen wieder zugelassen und kann wieder selbstständig fahren (Foto: A. Bickel, 1. März 2025).

Mehrkosten einen weitreichenden Nutzen in einem insgesamt deutlich einfacheren, leistungsfähigeren und sichereren Gesamtsystem Bahn.

Der DKS zeigt in weiten Teilen, wie die Digitalisierung der Eisenbahn in Deutschland gelingen kann: Damit tausende Triebfahrzeuge und zehntausende Streckenkilometer ausgerüstet werden können, bedarf es stabiler technischer Grundlagen, einer klaren, glaubwürdigen und verlässlichen Strategie, einhergehend mit einer gesicherten Finanzierung und Koordination, neben Transparenz und einer Preisdifferenzierung in der Infrastruktur. Es braucht aber auch wieder mehr Pragmatismus und Wege, die mittlerweile enorm aufwendigen Zulassungsverfahren zu vereinfachen. Nicht zuletzt sollten bei der Umrüstung von Bestandsfahrzeugen First of Class und Serie entkoppelt und nicht unbedingt notwendige Schnittstellen möglichst vermieden werden.

Die Fahrzeugnach- und -ausrüstung war und ist für Alstom ein wesentlicher Treiber für die Entwicklung der EVC-3-Plattform, die nun auch in weiteren Projekten wie der S-Bahn Köln oder neuen Regional-Triebzügen für Luxemburg und Schleswig-Holstein zum Einsatz kommt. Zukünftige Projekte werden von den im DKS gewonnenen Erfahrungen profitieren und auf eine bereits erprobte Plattform zurückgreifen können.

Noch in diesem Jahr soll in einem ersten Teilstück des DKS, von Stuttgart-Feuerbach über den neuen Hauptbahnhof bis Wendlingen, ein Vorlaufbetrieb ohne Fahrgäste beginnen [5]. Erstmals werden dann auch S-Bahnen im Knoten Stuttgart mit ETCS fahren, ab Mai 2026 dann auch mit Fahrgästen Richtung Flughafen, bevor im September 2026 die Stammstrecke in Betrieb gehen wird. Nach einem Jahrzehnt des Vorlaufs wird dann Hochleistungsbetrieb mit ETCS Realität; weitere Techniken (wie ATO) und Optimierungen werden folgen.



- [1] Donzé, R.: Die neue Zugsicherung führt zu Verspätungen. NZZ am Sonntag, 19. Februar 2023, S. 9.
- [2] Schweiz: ETCS bringt Fahrzeitverlängerungen. Schweizer Eisenbahn-Revue (SER) / Eisenbahn-Revue International (ERI) und Eisenbahn Österreich (EO) 2/2020, S. 100.
- [3] SBB-Strecke Sion – Sierre auf ETCS Level 2 umgestellt. SER/ERI/EO 12/2018, S. 622 – 625.
- [4] Bopp, S.; Drescher, O.; Friess, B.; Rothenstein, D.: Digitaler Knoten Stuttgart: Ein Pilotprojekt der Digitalen Schiene Deutschland. In: Die Zukunft der Mobilität: Digitale Schiene Deutschland. Trackmedia-Verlag. Leverkusen 2023. ISBN 978-3-96245-260-5.
- [5] Bitzer, F.; Dietrich, F.; Grell, A.; Lammerskitten, C.; Lück, B.; Schunke-Mau, C.; von Schaper, M.-L.; Vogel, T.; Wanstrath, S.: Sachstandsbericht Digitaler Knoten Stuttgart. Der Eisenbahningenieur 1/2025. (<https://bit.ly/40EHUg3>)

- [6] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung der Ausrüstung von Schienenfahrzeugen mit Komponenten des Europäischen Zugsicherungssystems ERTMS (European Rail Traffic Management System) und des automatisierten Bahnbetriebs (ATO) im Rahmen der infrastrukturseitigen Einführung von ERTMS im „Digitalen Knoten Stuttgart“. Bundesanzeiger, BAnz AT 05.02.2021 B2 (<https://bit.ly/3hX5CJx>).
- [7] 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>).
- [8] Implodiert die Stuttgarter S-Bahn? ERI 6/2013, S. 312 – 315.
- [9] Stuttgart: S-Bahn-Gipfel und Gipfel der Unpünktlichkeit. ERI 8-9/2015, S. 409 – 413.
- [10] Unmut über die DB im Raum Stuttgart. ERI 4/2017, S. 204.
- [11] Bandmann, B.; Beck, M.; Behlen, K.; Hoffmann, M. T.; Lorch, Z.: Der Technik- und Bedienstandort Waiblingen. Der Eisenbahningenieur 6/2024 (<https://bit.ly/46a0kCS>).
- [12] 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>).
- [13] Ingenieurgemeinschaft Machbarkeitsstudie ETCS S-Bahn Stuttgart: Untersuchung zur

Einführung von ETCS im Kernnetz der S-Bahn Stuttgart. Ergebnisbericht vom 31. Januar 2019 (<https://bit.ly/2Yyaw6h>).

- [14] 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>).
- [15] Pilotprojekt für ETCS und DSTW in Stuttgart. ERI 1/2019, S. 54.
- [16] Bitzer, F.; Kümmling, M.: Der betrieblich-verkehrliche Nutzen des Projekts Stuttgart 21. Der Eisenbahningenieur 6/2024 (<https://bit.ly/3xHzHbU>).
- [17] Eckhardt, M.; Glass, T.; Vogel, T.: Erfahrungen mit der Digitalen Schiene Deutschland in Baden-Württemberg. Der Eisenbahningenieur 6/2024 (<https://bit.ly/4cQKLt3>).
- [18] Drescher, O.: ETCS Level 2 ohne „Signale“ in einem grossen Knoten. Deine Bahn 3/2022 (<https://bit.ly/3O4n5i1>).
- [19] Neues vom Digitalen Knoten Stuttgart (DKS). ERI 5/2023, S. 244 – 246.
- [20] Neue S-Bahn in Stuttgart vorgestellt. ERI 1-2/1999, S. 52.
- [21] DB, S-Bahn Stuttgart, Verband Region Stuttgart: Jahresbericht 2023 (<https://bit.ly/4arR2UZ>).
- [22] Mehr S-Bahn für weniger Geld in Stuttgart. ERI 4/2009, S. 168.

- [23] S-Bahn Stuttgart: Mehr Züge, ETCS und automatisiertes Fahren. SER/ERI/EÖ 3/2019, S. 135.
- [24] Verband Region Stuttgart: Grosser Wurf für Schienenknoten Stuttgart. Presseinformation, 30. Januar 2019 (<https://bit.ly/3YV4Gvq>).
- [25] Bitzer, F.; Bateau, V.; Lammerskitten, C.; Lück, B.; Neuhäuser, N.; Vogel, T.; Wurmthaler, J.: Quo vadis Digitale Leit- und Sicherungstechnik? Der Eisenbahningenieur 11/2021 (<https://bit.ly/3Hv72X6>).
- [26] 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>).
- [27] Dietrich, F.; Meyer, M.; Neuhäuser, R.; Rohr, F.; Vogel, T.; Wenkel, W.: Fahrzeugnachrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart. Der Eisenbahningenieur 9/2021 (<https://bit.ly/3tFQWUB>).
- [28] ETCS/ATO Ausrüstung S-Bahn Stuttgart ET 423 / ET 430. Dokument 330889-2020 vom 14. Juli 2020 im Supplement zum EU-Amtsblatt (<https://ted.europa.eu/de/notice/-/detail/330889-2020>).
- [29] Fördermittel für ETCS-Ausrüstung in Stuttgart. ERI 3/2021, S. 114.
- [30] Erfahrungen mit der Gleisfeldvernetzung im Digitalen Knoten Stuttgart (Teil 1). Signal+Draht 4/2023 (<https://bit.ly/41Mkgb>).
- [31] Bitzer, F.; Bateau, V.; Dietrich, F.; Lammerskitten, C.; Lück, B.; Schmalle, F.; Schläpke, S.; Vogel, T.; von Schaper, M.-L.; Wanstrath, S.: Der Digitale Knoten Stuttgart zwischen Licht und Schatten. Der Eisenbahningenieur 3/2024 (<https://bit.ly/3PBmrv6>).
- [32] Stuttgart 21: schrittweise Inbetriebnahme 2026. SER/ERI/EÖ 7/2024, S. 322.
- [33] Bedeutender deutscher Umbauauftrag für Alstom Villeneuve. SER/ERI/EÖ 12/2023, S. 558.
- [34] Volles Haus in Villeneuve. SER/ERI/EÖ 12/2024, S. 552 – 556.
- [35] Artikel 12 Absatz 21 der Richtlinie (EU) 2016/797 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Mai 2016.
- [36] 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/3DHzl0S>).
- [37] Specht, F.; Köstlbacher, J.; Lesage, B.; Lupant, O.: Automatisierter Betrieb unter GoA 2 im Digitalen Knoten Stuttgart. Signal+Draht 12/2024.
- [38] 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>).
- [39] Mühlemann, R.: OCORA – Die europäische Initiative zur ETCS-Fahrzeugausrüstung der Zukunft. Signal+Draht 9/2020.
- [40] 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>).
- [41] Ein Jahr (ETCS-)Betriebserfahrungen auf der SFS Wendlingen – Ulm. Der Eisenbahningenieur 2/2024 (<https://bit.ly/49lOwr>).
- [42] Neubaustrecke VDE 8.1 eröffnet. SER/ERI/EÖ 2/2018, S. 70 – 72.
- [43] 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>).
- [44] 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>).
- [45] Kümmling, M.; Wanstrath, S.: „Digitale“ Kapazitätssteigerungen: ein Sachstand. Eisenbahn Ingenieur Kompendium 2024 (<https://bit.ly/4cHBOfi>).
- [46] Reinhart, P.: Leistungsfähigkeit mit ETCS & Co. im Spiegel der Praxis. Vortrag im Eisenbahnwesen-Seminar der TU Berlin, 10. Juli 2023 (<https://bit.ly/40y2ABQ>).
- [47] Büttner, M.; Celik, M.; Kümmling, M.; Lübs, J.; Seeger, P.; Testa, M.-A.; Vens, M.; Wallberg, M.: Die Digitalisierung der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart (Teil 2). Signal+Draht 12/2023 (<https://bit.ly/3RNd7FQ>).
- [48] 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>).
- [49] Reinhart, P.: Viel mehr Kapazität mit ETCS (& Co.) – aber wie? Tagungsband des Scientific Railway Signalling Symposiums 2023 (<https://bit.ly/3u44wW7>), S. 124 ff.
- [50] Büker, Th.; Heller, S.; Hennig, E.; Reinhart, P.; Weymann, F.: Zum verkehrlichen Nutzen der Digitalen Schiene Deutschland. Der Eisenbahningenieur 2/2024 (<https://bit.ly/3SMoME9>).
- [51] Ohmayer, R.: Optimierung von Überholvorgängen mit digitaler Leit- und Sicherungstechnik. Bachelorarbeit Mai 2022 (<https://bit.ly/3BbuPJR>).
- [52] Berger, F.; Behrens, M.; Falk, M.; Klaus, C.; Nehmsch, H.; Ketszem, R.; Mayerle, T.; Rupp, F.: Beschleunigung der LST-Planung im Digitalen Knoten Stuttgart. Der Eisenbahningenieur 11/2023 (<https://bit.ly/3GbKV95>).
- [53] Knitter, O.; Höhne, T.; Schultz, J.: Projekt AutomatedTrain: Betriebskonzept und Systemarchitektur. Deine Bahn 11/2024 (<https://bit.ly/42ajZmv>).
- [54] McKinsey & Company: Machbarkeitsstudie zum Roll-out von ETCS/DSTW. Zusammenfassung der Ergebnisse. Dezember 2018 (<https://bit.ly/3r2qral>).
- [55] Evaluierung der Förderrichtlinie des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr zur Förderung der Ausrüstung von Schienenfahrzeugen mit Komponenten des europäischen Zugbeeinflussungssystems ERTMS (European Rail Traffic Management System) und des automatisierten Bahnbetriebs (ATO) im Rahmen der infrastruktureitigen Einführung von ERTMS im „Digitalen Knoten Stuttgart“ (<https://bit.ly/457iC61>).
- [56] Stuttgart: Bund fördert ETCS für Fahrzeuge. ERI 4/2020, S. 170.
- [57] Schunke-Mau, C.; Vogel, T.: Quo vadis DSD-Fahrzeugausrüstung? Eisenbahntechnische Rundschau 6/2024 (<https://bit.ly/4bZ4VJl>).