

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

Frank Dietrich
Programmleiter Fahrzeugumrüstung ETCS/ATO, DB Regio AG

Jens Pätzold
Projektleiter Fahrzeugumrüstung ETCS/ATO, DB Regio AG

Frank Schiller
Projektmanager, Alstom

Christian Schunke-Mau
Vertriebsleiter Digitalisierung DACH, Alstom

Peter Reinhart
DB InfraGO AG

Internet-Publikation mit Genehmigung des Verlags Minirex AG

Motivation und Hintergrund

Die Digitalisierung der Eisenbahn ist kein Selbstzweck. Sie muss sich an ihrem konkreten Nutzen für ihre Kunden messen lassen. Die bisherigen Erfahrungen gerade mit ETCS in der Schweiz sind in der Tat durchgewachsen; es werden beispielsweise durchaus Kapazitätsrückgänge beobachtet (zum Beispiel [1, 2, 3]). Die Skepsis, inwieweit die Ausrüstung von Knoten und anderen Hochleistungsbereichen mit ETCS sinnvoll ist, begleitet seit jeher auch den Digitalen Knoten Stuttgart (DKS).

Der DKS ist ein Pilotprojekt im Starterpaket der Digitalen Schiene Deutschland (DSD), in dessen Rahmen wesentliche Grundlagen für die flächenhafte Einführung Digitaler Stellwerke (DSTW), des ETCS und weiterer Techniken in Deutschland gelegt werden sollen [4, 5]. Erstmals in Deutschland wird dabei ein grosser Eisenbahnknoten entsprechend ausgerüstet. Das Projekt verfolgt dabei eine ganze Reihe von Zielen. Unter anderem sollen die Effekte einer eng aufeinander abgestimmten Fahrzeug- und Infrastrukturausrüstung ebenso aufgezeigt werden wie die Möglichkeiten und Grenzen „digitaler“ Kapazitätssteigerungen [6].

Der Zündfunke für den DKS lag in der seit Mitte der 2010er Jahre erwogenen ETCS-Ausrüstung der S-Bahn-Stammstrecke. Diese Strecke gliedert sich in zwei Teilbereiche: Im 1978 in Betrieb genommenen nördlichen Teil, vom Hauptbahnhof bis zur Wendeanlage Schwabstrasse, ist die Leit- und Sicherungstechnik (LST) weitreichend optimiert, unter anderem mit teils 0,3 km kurzen Hauptsignalabständen und dem Verzicht auf Vorsignale, um planmässig 2,5-Minuten-Zugfolgen (mit rund 205 m langen Langzügen, 30 Sekunden Haltezeit und Pufferzeit) zu fahren. Dieser Abschnitt wird aus dem Relaisstellwerk (RSTW) Hauptbahnhof gesteuert. Eine Erweiterung im Norden um die Station Mitternachtstrasse war im Rahmen von Stuttgart 21 (S 21) bereits damals im Bau. Seit 1985 in Betrieb ist der südliche Teil der Stammstrecke, über die Universität bis nach Stuttgart-Vaihingen, mit einer planmässigen Fünf-Minuten-Zugfolge [7].

Das Stellwerk am Hauptbahnhof sollte nach der (damals für 2021 geplanten) S-21-Inbetriebnahme zurückgebaut und durch mehrere ESTW ersetzt werden. Damit einhergehend, sollten neue Kombinationsignale (Ks-Signale) an die Stelle der bisherigen Signale des Haupt-/Vorsignal-Systems (H/V-System) treten. Eine solche 1:1-Erneuerung hätte im Kern des schon damals unter rückläufiger Pünktlichkeit leidenden S-Bahn-

Systems [8, 9, 10] zwar zu einem enormen Aufwand (unter anderem für zahlreiche Lichtsignale, PZB-Geschwindigkeitsprüfabschnitte, Kabel), aber zu keinen spürbaren Verbesserungen geführt. Weitere Stellwerke sollten im Rahmen von S 21 weitreichend umgebaut werden, darunter das den südlichen Teil der Stammstrecke steuernde RSTW Stuttgart-Vaihingen, unter anderem um die geplante Rohrer Kurve einzubinden [11].

Nach vielen skeptischen Stimmen zeigte eine vom Land Baden-Württemberg, dem Verband Region Stuttgart (VRS) und der DB gemeinsam in Auftrag gegebenen Machbarkeitsstudie Ende 2018 auf, dass ETCS Level 2 und teilautomatisiertes Fahren mit Triebfahrzeugführer (ATO GoA 2) nicht nur technisch machbar ist, sondern auch eine erhebliche Kapazitätssteigerung erwarten lässt: Selbst unter konservativen Prämissen wurden eine Verkürzung der mittleren Mindestzugfolgezeiten auf der Stammstrecke von rund 20 % beziehungsweise einer halben Minute und deutlich grössere Kapazitätssteigerungen im Umfeld erwartet [12, 13, 14]. Gleichzeitig bot die im Januar 2018 von Dezember 2021 auf Dezember 2025 verschobene S-21-Inbetriebnahme die Chance, auch die Konzeption der LST von S 21 grundlegend zu überdenken, die bis dahin weitgehend eine Doppelausrüstung (Ks/PZB und ETCS Level 2) vorsah, wobei ETCS fast ausschliesslich von Fernverkehrszügen genutzt werden sollte.

Vor diesem Hintergrund packten die Partner Bund, DB, Land und VRS in den Jahren 2019 und 2020 die Gelegenheit beim Schopf und stellten die Weichen für den DKS. Anstelle der im Rahmen von S 21 ursprünglich neu geplanten und umfassend umzubauenden Stellwerke entsteht nun ein DSTW. Auf dieser einheitlichen Grundlage setzen ETCS Level 2 und weitere Techniken auf. Der DKS geht dabei weit über S 21 hinaus und umfasst im Endzustand die gesamten Netzbezirke Stuttgart und Plochingen, die insgesamt rund 500 Streckenkilometer und somit rund anderthalb Prozent des DB-Netzes ausmachen. Technisch beinhaltet er weit mehr als DSTW und ETCS, nämlich beispielsweise auch ATO GoA 2, ein Verkehrsmanagementsystem (Capacity and Traffic Management System, CTMS) sowie den kommenden Bahnbetriebsfunk FRMCS (Future Railway Mobile Communication System). Das Projekt gliedert sich dabei in drei räumlich-funktionale Bausteine (siehe [11 und 16]):

– Baustein 1 basiert auf der Machbarkeitsstudie und umfasst die Infrastruktur im

Kernbereich der S-Bahn und die Ausrüstung der gesamten S-Bahn-Fahrzeugflotte.

- Baustein 2 beinhaltet die Ausrüstung von S 21 sowie die dadurch notwendige Ausrüstung von Regionaltriebzügen [17].
- Baustein 3 umfasst die Ausrüstung der übrigen Region, mindestens bis zu den Grenzen der Netzbezirke Stuttgart und Plochingen, somit unter anderem das gesamte heutige S-Bahn-Netz. Ferner werden weitere Techniken im gesamten DKS eingeführt, darunter CTMS und FRMCS.

Aus einer Reihe grundsätzlicher Erwägungen [18] und Praxiserfahrungen im In- und Ausland (zum Beispiel in der Schweiz [19]) wurde bereits 2019 entschieden, grundsätzlich ETCS Level 2 in der Ausprägung „ohne Signale“, das heisst insbesondere ohne Licht-Haupt- und -Vorsignale und ohne PZB, auszurüsten. Dies setzt eine entsprechend vorauslaufende Ausrüstung der Fahrzeuge voraus (Vehicle-First-Ansatz unter anderem nach Schweizer Vorbild).

Lediglich zwei Bereiche (Stuttgart-Vaihingen bis Böblingen sowie der Raum Stuttgart-Bad Cannstatt/-Untertürkheim/-Münster) sollten eine vorübergehende Doppelausrüstung erhalten. Damit sollte zum einen dem regelmässigen (und in Deutschland noch nicht umfassend mit ETCS ausgerüsteten) Güterverkehr Rechnung getragen werden, aber auch Bereiche geschaffen werden, in denen bereits ab etwa 18 Monate vor Aufnahme des Hochleistungsbetriebs mit ETCS Level 2 „ohne Signale“ (aber durchaus mit Blechtafeln; L2oS) auf der Stammstrecke und der Infrastruktur von Stuttgart 21 ETCS auf Herz und Nieren getestet und Kinderkrankheiten beseitigt werden sowie Mitarbeiter Erfahrungen sammeln können.

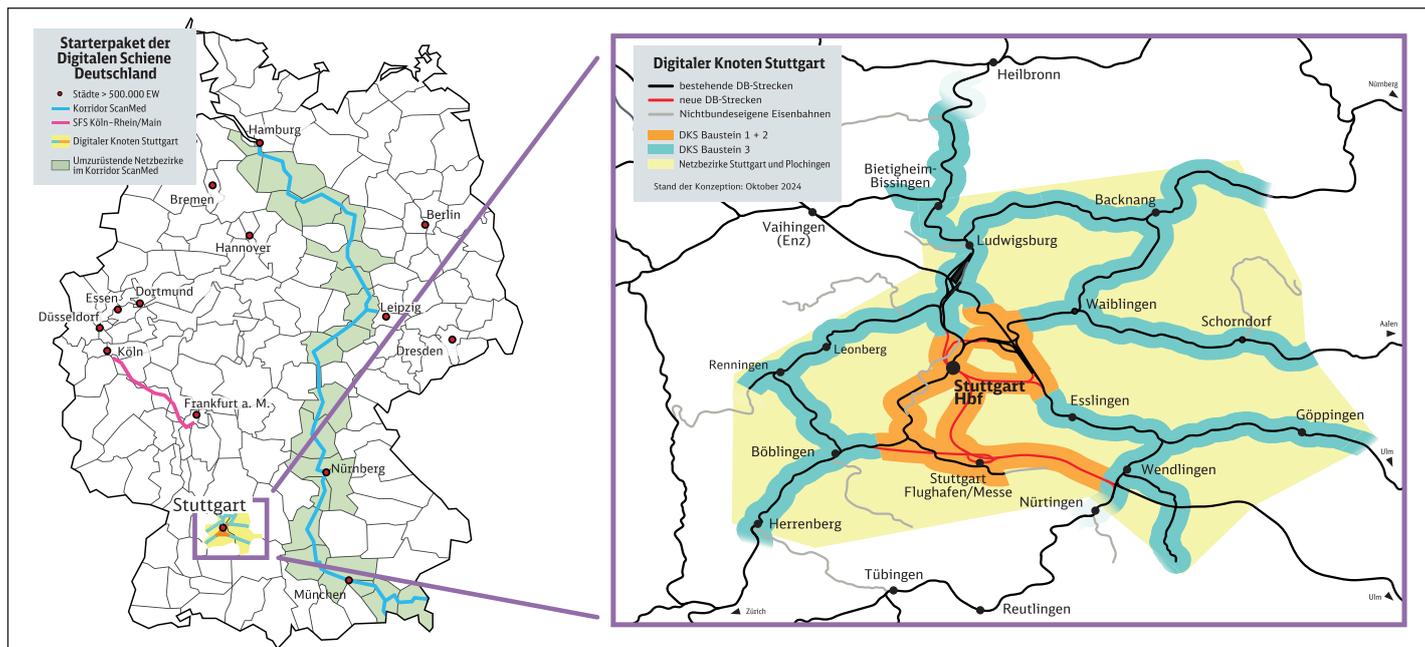
Ablauf

Ausgangssituation

Bereits die L2oS-Infrastrukturausrüstung der Stammstrecke erfordert, sämtliche 215 Triebzüge der S-Bahn Stuttgart vorab mit ETCS auszurüsten:

- 60 Triebzüge der Baureihe (BR) 423 aus den frühen 2000er Jahren [20],
- 97 Triebzüge der BR 430.0 aus den 2010er Jahren sowie
- 58 Triebzüge der BR 430.2, die 2021 und 2022 gebaut wurden.

Die vierteiligen, rund 68 m langen und 140 km/h schnellen Züge wurden von Bom-



Der Digitale Knoten Stuttgart als Teil des DSD-Starterpakets mit einem Teil des Korridor Scan/Med und der SFS Köln – Rhein/Main (Zeichnung: DB).

bardier Transportation (seit 2021 Alstom) gebaut. Mit ihnen wurden 2023 auf dem 215 km langen Streckennetz mit seinen 83 Stationen planmässig werktäglich 958 Züge gebildet (überwiegend in Dreifachtraktion), insgesamt rund 10 Millionen Zugkilometer gefahren und dabei 101 Millionen Fahrgäste befördert [21]. Die Triebzüge wurden beziehungsweise werden im Rahmen eines 2009 abgeschlossenen [22] und seit Mitte 2013 laufenden Verkehrsvertrags von DB Regio S-Bahn Stuttgart betrieben und instandgehalten.

Bereits im Januar 2019 hatte die Regionalversammlung des VRS mit Blick auf den DKS beschlossen, den Verkehrsvertrag um vier Jahre bis Ende Juni 2032 zu verlängern. Teil des fast 1 Milliarde Euro umfassenden Gesamtpakets war neben der Fahrzeugumrüstung für den DKS auch die Beschaffung von 58 neuen S-Bahn-Zügen der BR 430.2 sowie eine Erneuerung der Inneneinrichtung und Aussendesign sämtlicher Triebzüge. Zusammen mit einigen begleitenden ergänzenden Infrastrukturmassnahmen sollten sowohl das Angebot wesentlich ausgeweitet als auch die rückläufige Betriebsqualität verbessert werden [23, 24].

Mit der Beschaffung der 58 Triebzüge der BR 430.2 war 2019 eine letzte Option aus dem ursprünglichen Liefervertrag vom April 2009 gezogen und vollständig ausgereizt worden. Entsprechend dem Vertrag ist die BR 430.2 weitgehend baugleich zur ursprünglichen BR 430.0, abgesehen von einigen zwingenden Änderungen, beispielsweise veränderten akustischen Türsignalen gemäss der zwischenzeitlich fortgeschriebenen TSI. Daher war auch die BR 430.2 in die Fahrzeugumrüstung wie auch das Redesign einzubeziehen.

Konzeption und Ausschreibung

Bereits in der Machbarkeitsstudie von 2017/2018 wurde die Fahrzeugausrüstung detailliert betrachtet. Auf dieser und weiteren

Grundlagen baute 2020 nahtlos die Konzeption der Fahrzeugumrüstung auf. Dabei gab es drei wesentliche Randbedingungen:

Zum einen galt es, die Flotten rechtzeitig vor der L2oS-Inbetriebnahme im Kernknoten vollständig auszurüsten. Vorlaufend zu der für Dezember 2025 geplanten S-21-Inbetriebnahme sollte die Stammstrecke (mit zunächst weiterhin 24 Zügen pro Stunde und Richtung) bereits im September 2025 mit L2oS in Betrieb gehen. Dem vorgeschaltet wurde insbesondere die für Januar 2025 geplante kommerzielle L2oS-Inbetriebnahme auf dem Ast zum Flughafen mit vier Zügen pro Stunde und Richtung. Zu Testzwecken sollte ETCS „mit Signalen“ in einem ersten Bereich um Bad Cannstatt und Untertürkheim bereits ab April 2024 zur Verfügung stehen [19, 25]. Damit war zumindest ein wesentlicher Teil der Triebzüge bis Ende 2024 und alle bis spätestens Mitte 2025 umzurüsten, auch um noch ausreichend Zeit für ausgiebige Tests und zur Beseitigung von Kinderkrankheiten zu haben.

Zum zweiten zeigte sich frühzeitig, dass die Umrüstung nur vernünftig zusammen mit dem Redesign erfolgen kann. Beispielsweise waren für beide Aktionen die Fahrzeuge aus dem Betrieb zu nehmen und zu überführen, neue Kabel zu verlegen und dafür unter anderem sowohl neue Übergänge zwischen den Wagenkästen zu schaffen als auch diverse Verkleidungen auszubauen. Der Preis für diese Synergien war eine erhöhte Komplexität. Beispielsweise wäre das Redesign allein (gemäss dem vierten Eisenbahnpaket) nicht genehmigungspflichtig gewesen, da die Charakteristik des Fahrzeugs nicht verändert wird. In Verbindung mit der Umrüstung sind nun gleichwohl auch die Änderungen durch das Redesign für die Genehmigung (Wiederzulassung) aufzuarbeiten.

Zum dritten waren zur Erfüllung von DKS-Projektzielen und Förderbedingungen verschiedene Weiterentwicklungen und Optimierungen zu berücksichtigen, die über bisherige ETCS-Ausrüstungsprojekte in Deutschland hinausgingen und die voraussichtlich nicht für eine kommerzielle Betriebsaufnahme Anfang 2025 zugelassen zur Verfügung stehen würden: beispiels-

weise ATO GoA 2 over ETCS, das erstmals in der für 2022 erwarteten nächsten TSI stabil und interoperabel spezifiziert zur Verfügung stehen sollte. Zu den weiteren Elementen zählten unter anderem eine Zugintegritätsüberwachung (für Moving Block/„ETCS Level 3“) und FRMCS [26].

Aus einer Reihe von Erkenntnissen, unter anderem einer 2016/2017 durchgeführten Markt- und Produkterkundung sowie Abstimmungen in der DB und Partnern (2019/2020), entwickelten der Bereich Beschaffung der DB und DB Regio ein Zwei-Stufen-Konzept: In Stufe 1 sollte sichergestellt werden, dass alle Triebzüge 2025 mit ETCS im Knoten fahren können und das Redesign durchlaufen haben. In Stufe 2 sollte dann ein Upgrade auf die nächste ETCS-Spezifikation folgen. Angesichts der tiefgreifenden Eingriffe, die bereits für eine blosse ETCS-Umrüstung erforderlich sind, sollte das Gesamtpaket möglichst „aus einem Guss“ geplant und stufenweise umgesetzt werden. Dafür wurde unter anderem eine Innovationskooperation (IK) vorgesehen [27].

Frühe Erwägungen, den Umbau im Betriebswerk der S-Bahn in Plochingen, nahe Stuttgart, durchzuführen, wurden aufgrund des zu grossen Aufwands und der zur Verfügung stehenden Zeit verworfen. Aus mehreren Überlegungen wurde schliesslich ein zweistufiges Umrüstungskonzept entwickelt: Der Auftragnehmer für die Umrüstung sollte demnach nur die ersten Triebzüge einer Baureihe (First of Class, FoC) selbst umrüsten; der serienmässige Umbau sollte hingegen durch die DB Fahrzeuginstandhaltung (FzI) erfolgen, die dazu von DB Regio beauftragt werden sollte. Der Ausrüster sollte hierfür alle Materialien, Werkzeuge und Arbeitsanweisungen bereitstellen und die Umrüstung vor Ort unterstützen. Das gesamte Redesign, auch für die FoC-Züge, sollte durch FzI erfolgen.

Auf diesen Grundlagen wurde die Umrüstung für beide S-Bahn-Baureihen im Juli 2020 mit jeweils einem Los ausgeschrieben [28]. Die zu vergebenden Aufträge umfassten neben Entwicklung, Herstellung, Einbau beziehungsweise Lieferung und Begleitung des Einbaus der Fahrzeugausrüstung, unter

anderem auch eine IK, die Zulassung und Wiederinbetriebsetzung, die Koordination mit dem Redesignprojekt sowie der DKS-Infrastruktur, diverse Dokumentationen, Ersatzteilversorgung sowie einen Hard- und Software-Pflegevertrag.

Angesichts der besonderen Komplexität des Projekts wurde ein Teilnahmewettbewerb vorgeschaltet, in dem unter anderem wesentliche Erfahrungen mit ETCS, ATO und Umrüstprojekten nachzuweisen waren. Es gingen vier Teilnahmeanträge ein. Nach Bewerbergesprächen und der Nachreichung von Unterlagen blieben zwei geeignete Bewerber übrig. Diese erhielten am 26. Oktober 2020 Verdingungsunterlagen und wurden zur Abgabe eines Erstangebots aufgefordert, das nach einer Verlängerung bis 1. Februar 2021 vorliegen sollte. Die Zuschlagskriterien waren Preis (75 %), Vertrag (20 %, anhand verhandelbarer Bedingungen) und Technik (5 %, anhand weniger Soll-Kriterien). Darüber hinaus konnten beide Bewerber Fahrzeuge in Plochingen in Augenschein nehmen und beispielsweise Masse aufnehmen. Nach Verhandlungen (im Februar 2021) wurden die Bieter am 1. März zu einem finalen Angebot (final offer) aufgefordert. Zwischenzeitlich, im November 2020, wurde die Infrastruktur der Bausteine 1 und 2 an Thales (heute Hitachi Rail) vergeben [29] und Bombardier Transportation mit dem Redesign an Prototypen der BR 423, 430.0 und 430.2 beauftragt.

Angebotslegung und Zuschlag

Bis Januar 2021 erarbeitete Alstom ein gemeinsames Angebot für beide Lose. Eine wesentliche Grundlage war dafür neben den von der DB bereitgestellten Unterlagen auch eine Vermessung relevanter Teile der Züge per Laser, aus denen 3D-Modelle entstanden. Das Angebot umfasste mehr als 40 Konzepte (in acht Kapiteln beziehungsweise mehr als 1000 A4-Seiten) und beinhaltete insbesondere Aussagen zu

- Technik wie Systemarchitektur und Funktion, Integration in die Fahrzeugleittechnik (Train Control Management System, TCMS) sowie der Innovationskooperation,
- Organisation, beispielsweise zur Koordination zwischen dem Nachrüst- und dem Redesignprojekt,
- begleitenden Themen, beispielsweise zur betrieblichen Leistungsfähigkeit, Verfügbarkeit, Bedienung, Schulung und CO₂-Fussabdruck.

Die technische Grundlage des Angebots war die neue EVC-3-Plattform, mittlerweile Teil von Alstoms Onvia-Cab-Produktfamilie für Zugbeeinflussungssysteme auf Fahrzeugen, in der die bislang getrennten Plattformen Alstom ATLAS beziehungsweise Bombardier EBICAB aufgegangen sind. Der ETCS-Fahrzeugrechner (European Vital Computer, EVC) ist dabei der Kern der Fahrzeugausrüstung, die auch weitere Elemente wie Antennen (für Balisen und Funk) und Sensoren (insbesondere für die Odometrie) umfasst.

Der EVC-3 ist die dritte Generation der ETCS-Fahrzeugausrüstung von Alstom und folgt auf den EVC-1 der 2000er Jahre, mit dem unter anderem der ICE T ausgerüstet wurde, und den EVC-2 der 2010er Jahre, zu finden unter anderem auf den ICE der BR 401, 403 und 407. Die Entwicklung der EVC-3-Plattform begann im Jahr 2019 und basiert unter anderem auf mittlerweile rund

25 Jahren Betriebserfahrung und der Ausrüstung von mehr als 19 000 ETCS-Fahrzeuggeräten in mehr als 200 Fahrzeugtypen. Auch zahlreiche Impulse von Kunden, wie der DB, sowie absehbare neue Anforderungen, wie aus dem DKS, flossen in die Entwicklung des EVC-3 ein.

Eine Reihe von Neuerungen des EVC-3 spielen auch für das S-Bahn-Nachrüstprojekt im Rahmen des DKS eine wesentliche Rolle, insbesondere:

- der um rund 60 % reduzierte Raumbedarf des EVC (650 x 530 x 330 mm), wodurch der EVC im Deckenbereich (und somit ohne Sitzplatzverlust) integriert werden kann,
- die Integration der bislang EVC-externen Funkmodule (ETCS Data Only Radio, EDOR), der Stillstandsüberwachung abgerüsteter Fahrzeuge (Cold Movement Detection, CMD) sowie Schnittstellen zur weiteren Peripherie,
- die verbesserte Bedien- und Instandhaltbarkeit sowie Diagnose und geringe Lebenszykluskosten,
- die vervielfachte Rechenleistung und wesentlich verkürzte Verarbeitungszeiten,
- die im EVC-3 als Software integrierte ATO GoA 2 ohne zusätzlichen Hardwarebedarf,
- die Upgradefähigkeit auf den zukünftigen Funkstandard FRMCS,
- zahlreiche weitere Optimierungen, beispielsweise eine verbesserte Odometrie und Cybersecurity.

Die rechtzeitige und schrittweise Bereitstellung der neuen Technik war dabei nur eine von mehreren grossen Herausforderungen des Projekts. Die technische Ausrüstung ist komplexer als bei allen bisherigen Nachrüstprojekten Alstoms in Deutschland. Eine weitere lag und liegt in der schieren Menge der auszurüstenden Fahrzeuge und der dafür zur Verfügung stehenden Zeit, die mit etwa dreieinhalb Jahren – vom erwarteten Zuschlag bis zur geplanten ersten L2oS-Betriebsaufnahme im Januar 2025 – sehr knapp bemessen war.

Mit seiner langjährigen Erfahrung aus grossen nationalen ETCS-Nachrüstprogrammen in verschiedenen Ländern Europas oder auch der ICE-Flotte traute sich Alstom zu, hochgradig parallelisiert zu arbeiten. Die beiden S-Bahn-BR (wie auch die beiden Regionalzugreihen) sollten zunächst parallel pilothaft ausgerüstet (First of Class, FoC) und binnen zweieinhalb bis drei Jahren zur Zulassung geführt werden, um auf dieser Grundlage binnen rund einem Jahr die übrigen mehr als 200 S-Bahn- und weitere rund 110 Regional-Triebzüge auszurüsten.

Auch mit Blick auf den damals erwarteten zügigen Rollout von ETCS und weiteren Techniken auf Fahrzeugen und Infrastruktur in Deutschland wurden eine ganze Reihe von Investitionen und Optimierungen auf den Weg gebracht. Beispielsweise sollten

- im Werk Hennigsdorf eine „First of Class Factory“ für ET entstehen mit Infrastruktur, Kompetenzen und Ressourcen ausgestattet werden, um bis zu 25 FoC-Projekte parallel durchführen zu können.
- bei der EVC-3-Produktentwicklung die für den DKS weiterentwickelten Lastenhefte der DB umgesetzt werden, um darauf aufbauend einen höheren generischen Anteil

und somit Vereinfachungen für Folgeprojekte zu erreichen.

- die Fahrzeugschnittstelle weiter durch einen standardisierten Daten-Koppler (DACO) vereinfacht werden, um sicherheitskritische TCMS-Funktionen und den Datentransfer zum ETCS zu realisieren.

Eine weitere Herausforderung lag im Dreiecksverhältnis von Alstom, DB Regio und Fzl. Kooperationen mit Werkekapazitäten des Auftraggebers sind bei Umrüstprojekten nicht unüblich. Beispielsweise hat Alstom bei ICE-Triebzügen in Deutschland (mit Fzl) oder ÖBB-Talent-Triebzügen in Österreich (mit ÖBB-Technische Services) als Unterlieferanten durchaus gute Erfahrungen gemacht. In der Konstellation für das S-Bahn-DKS-Projekt bedeutete die neu gewählte Struktur jedoch nicht nur mehr Umrüstkazität, sondern auch eine grössere Komplexität: Einerseits sollte der Lieferant grundsätzlich als Turnkey-Lieferant agieren, die neue Technik tief in die Bestandsfahrzeuge integrieren und letztlich „schlüsselfertig“ umgerüstete Triebzüge bereitstellen – auf der anderen Seite sollte Fzl durch DB Regio vertraglich gebunden und dem Lieferanten beigestellt werden.

Alstom erhielt im Juni 2021 den Zuschlag für beide Lose. Mit der Übernahme von Bombardier Transportation durch Alstom wurden Umrüstung und Redesign bei Alstom konzentriert. Der Umbau von Prototypen sollte bei Alstom Hennigsdorf erfolgen, der Serienumbau bei Fzl, begleitet durch Alstom. Der Auftragswert für Alstom betrug rund 130 Millionen Euro. Alstom erhielt auch die Aufträge zur Umrüstung von 118 Regional-Triebzügen und zur Ausrüstung von zunächst 130 neuen Coradia-Max-Doppelstock-Triebzügen (2022) mit derselben Technik [17].

First of Class (FoC)

Bereits vor Erteilung des Zuschlags waren die wesentlichen Produktentwicklungen (EVC-3 in 2019 und EBICAB-PZB-Upgrade Anfang 2021) auf den Weg gebracht worden. Die generische ETCS-Softwareentwicklung erfolgte gemäss der ETCS-Spezifikation, zusätzlichen nationalen Anforderungen, Kundenanforderungen und Erfahrungsrückflüssen aus dem Betrieb.

Parallel startete Alstom mit dem Signaltechnikprojekt (nach CENELC-V-Zyklus-Methodik). Die Integration eines Alstom-EVC in Bombardier-Fahrzeuge erfolgte in diesem Projekt zum ersten Mal. Weiterhin wurden das Fahrzeuginstallationsdesign detailliert ausgearbeitet und die ersten acht Triebzüge, vier Triebzüge der BR 423 sowie je zwei Triebzüge der BR 430.0 und 430.2, pilotartig ab April 2022 am Alstom-Standort in Hennigsdorf umgerüstet.

Die Anzahl und Auswahl der FoC-Triebzüge ergab sich für die BR 423 aufgrund dreier verschiedener Serien, die an unterschiedlichen Standorten und zu unterschiedlichen Zeiten gefertigt wurden, sich zumindest in Details unterscheiden und auch unterschiedliche Gewichte aufweisen. Auch die BR 430.0 und 430.2 weisen einige Unterschiede auf und sind eigenständige Fahrzeugtypen, weil sie jeweils zu unterschiedlichen Zeiten in unterschiedlichen Rechtsrahmen zugelassen wurden. Weitere Triebzüge, darunter ein vierter Triebzug der BR 423, waren für die (Wieder-)Zulassung für Fahrten in allen denkbaren Kombinationen von Mehrfachtraktion

erforderlich [26]. Dieser Ansatz und die dahinterstehende umfangreiche Nachweisleistung war neu und wurde frühzeitig auch mit dem Eisenbahn-Bundesamt (EBA) abgestimmt.

Zu den vielen Facetten der Planung beider Baureihen gehörten unter anderem Einbauräume und Kabelwege ebenso wie die Auswirkungen auf Massebilanz, Energieversorgung, Kühlung und Lüftung (unter anderem am EVC) sowie Brandschutz. Für beide BR konnte dabei der Nachweis erbracht werden, dass Umrüstung und Redesign gemeinsam belastungsneutral sind. Bei der für ETCS vorbereiteten BR 430 war ETCS in der Masse- und Energiebilanz von Beginn an berücksichtigt worden, und es konnten auch Freiräume und Befestigungsmöglichkeiten im Unterflurbereich genutzt werden. Einer vertiefenden Untersuchung bedurfte hingegen die energetische Auslegung der älteren Fahrzeuge der BR 423, die im Laufe der Jahre einige Änderungen (wie LED-Beleuchtung) erfahren hatten. Eine wesentliche Herausforderung lag in der Fahrzeugdokumentation (abgesehen von der Baureihe 430.2), beispielsweise weil Dokumente in Archiven zu recherchieren waren oder zwar digital vorlagen, jedoch in alten Dateiformaten.

Ein grosses Augenmerk lag früh auch auf der tiefen Integration der Techniken in die Fahrzeugsteuerung (TCMS). Bereits für das Zugbeeinflussungssystem ETCS greift der EVC-3 daraus zahlreiche Informationen ab: beispielsweise zu Traktion und Bremse, um sowohl Bremskurven zu berechnen als auch den Status auf den Displays (Driver Machine Interface, DMI) darzustellen. Weitere Informationen, wie aktuelle Geschwindigkeit, Betriebsbremsanforderungen oder die eingegebene Zugnummer, werden an das TCMS zurückgespielt. Für ATO GoA 2 war die Integration weiter zu vertiefen, beispielsweise um Traktion und Bremse präzise zu steuern oder auch, um eine ganze Reihe von Fahrzeugzustandsdaten abzugreifen und für betriebliche Optimierungen nutzbar zu machen. Bei der älteren BR 423 waren einige Anpassungen an der TCMS-Hardware erforderlich, beispielsweise Repeater. Bei beiden Baureihen konnte Alstom auf TCMS-Spezialisten zurückgreifen, wodurch die Integration vereinfacht wurde. Zur minimal-invasiven Umsetzung wurde für die BR 423 im übrigen ein DACO entwickelt.

Nach einem Dreivierteljahr Planung kam am 21. März 2022 ein erster Triebzug, der 423 462, in Hennigsdorf an; weitere fünf folgten bis 28. Februar 2023 oder wurden der Produktion vor Ort entnommen (BR 430.2). Die ersten Züge dienten zunächst wesentlich dazu, die Planung zu validieren, beispielsweise zu prüfen, ob Einbauräume wie geplant zugänglich sind, und die Technik sukzessive mechanisch einzubauen und elektrisch in Betrieb zu setzen. Dies wurde begleitet von einer Reihe von Designrunden, in denen die Planung im 3D-Modell und am Fahrzeug begutachtet und immer weiter optimiert wurde.

Ende 2022 begannen umfangreiche Integrationstests an den ersten ausgerüsteten Zügen. Dazu wurden auch fahrbare TCMS-Testschränke auf die Züge gebracht, um bei

Balisenantenne an vorgerüstetem Einbaurahmen (Foto: DB Regio / Niedermüller).



Tests mit einer Vielzahl von Varianten und Konfigurationen Softwarefehler möglichst frühzeitig zu erkennen und zu beseitigen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse flossen wiederum in die (generische) EVC-3-Softwareentwicklung ein, die bei Alstom in Charleroi im Gang war.

Um die herausfordernden zeitlichen und inhaltlichen Ziele des Projekts in Einklang zu bringen und die Züge schrittweise wieder in Einsatz zu bringen, sollte (und soll) die neu entwickelte EVC-3-Software in mehreren Versionen (Baselines) bereitgestellt werden:

- erstes Release (3.1) für PZB-Betrieb und Testzwecke, ohne aktives ETCS,
- 4.0 off, für PZB-Betrieb mit Fahrgästen, mit softwareseitig unterdrücktem ETCS, einschliesslich erstmaliger Kuppelbarkeit zwischen BR 430.0 und 430.2,
- 4.0 on, für ETCS-Betrieb mit Fahrgästen,
- 5.0 zusätzlich mit ATO GoA 2 für Testzwecke,
- 5.2 zusätzlich mit ATO GoA 2 mit Zulassung für Fahrgastbetrieb,
- weitere Softwareversionen folgen im Rahmen der Stufe 2 mit ETCS nach TSI ZZS 2023 oder höher (mit ETCS-Systemversion 3.0) und FRMCS (momentan mit TSI 2027 erwartet).

Bis Ende 2023 war die Integration so weit gediehen und in Tests auf dem Alstom-Werksgelände erprobt, dass auf dieser Grundlage die Serienumrüstung an allen drei Standorten beginnen konnte.

Wiederum parallel absolvierten die FoC-Fahrzeuge Testfahrten auf dem Werksgelände in Hennigsdorf. Die umfangreiche Testinfrastruktur an diesem Standort wurde für ETCS- und zukünftige ATO-Testfahrten

noch weiter ertüchtigt. Bis zum Frühjahr 2024 waren auch die Software des EVC-3, der aktualisierten PZB, der Fahrzeugleittechnik und des parallelen Redesignprojekts hinreichend gereift, um im April 2024 erstmals Testfahrten (mit PZB) im DB-Netz durchzuführen und die Software in den folgenden Monaten weiter zu verbessern. Am 16. Oktober 2024 erbrachte schliesslich ein FoC-Triebzug bei ETCS-Fahrten auf der Strecke Berlin – Dresden den Nachweis der Fahrzeug-Strecke-Systemkompatibilität (ETCS System Compatibility, ESC) an einer ETCS-Streckenzentrale (Radio Block Centre, RBC) von Siemens, ohne jede Auffälligkeit. Auf dieser Grundlage wird die EVC-3-Plattform für den ETCS-Betrieb im Netz der DB erstmals zugelassen werden [5]. Am 28. November 2024 folgten auf der Rheintalbahn bei Freiburg weitere erfolgreiche ESC-Tests mit einem RBC von Hitachi.

Am 19. Dezember 2024, rund zweieinhalb Jahre nach dessen Übergabe, wurde ein erster ausgerüsteter FoC-Triebzug (430 070) von Hennigsdorf nach Plochingen überführt und zunächst zur Schulung von Betriebspersonal verwendet. Die weiteren FoC-Triebzüge der BR 430 werden bis März 2025 erwartet, jene der BR 423 gegen Ende 2025.

Verschiebungen

Noch während der First-of-Class-Phase und noch bevor die Serienausrüstung begann, zeichnete sich im Laufe des Jahres 2023 ab, dass die seit 2020 verfolgte und auch der Ausschreibung zugrundeliegende Inbetriebnahmesequenz für die neue LST-Infrastruktur gefährdet war. Erste, ab dem Jahreswechsel 2023/2024 geplante Inbetriebnahmen von DSTW und ETCS zu Testzwecken wurden verfehlt [30, 31]. Am 11. Juni

Zwei S-Bahn-Triebzüge während der First-of-Class-Ausrüstung im Dezember 2022 in Hennigsdorf (Foto: Alstom).



Umrüstung der S-Bahn-Triebzüge

	2024 (Ist)			2025 (Plan)			2026 (Plan)			Total
	423	430.0	430.2	423	430.0	430.2	423	430.0	430.2	
Hennigsdorf	4	2	2	–	–	–	56	–	–	64
Villeneuve	–	–	10	–	–	46	–	8	–	64
DB FZI	–	9	–	–	57	–	–	21	–	87
	4	11	12	0	57	46	56	29	0	
Total		27			103			85		215

2024 gab die DB schliesslich eine neue Sequenz bekannt: Die erste L2oS-Inbetriebnahme, auf der Flughafen-S-Bahn, war nunmehr im Mai 2026 statt Januar 2025 geplant; die L2oS-Inbetriebnahme der Stammstrecke wurde um ein Jahr auf September 2026 verschoben [5, 32].

Da sowohl die Infrastruktur als auch die FoC-Phase mehr Zeit in Anspruch nahm als zunächst geplant, wurde entschieden, die pünktlich Ende 2023 gestartete Serienausrüstung zu verlangsamen und in einiger Hinsicht neu zu organisieren:

- Anstatt die BR 423 und 430 weitgehend parallel umzurüsten, erfolgt dies nun eher sequenziell: Zunächst wird ein grosser Teil der Baureihe 430.0/2 ausgerüstet, bevor die Baureihe 423 folgt. Dies eröffnet auch die Chance, aus der ersten Baureihe für weitere zu lernen und die Baureihe 423 direkt mit der Baseline 4.0 on auszurüsten, anstatt die Zwischenschritte Baseline 3.1 und Baseline 4.0 off zu durchlaufen.
- Die Verteilung der Triebzüge auf verschiedene Werke wurde neu bewertet (siehe Tabelle oben): Insbesondere wurde das Alstom-Werk Villeneuve hinzugezogen und die Umrüstung von 64 Triebzügen dort vorgesehen [33]. Bei Alstom in Hennigsdorf erfolgt nun nicht mehr nur die FoC-Ausrüstung, sondern auch die Serienumrüstung der 56 Triebzüge der BR 423. Über diesen geänderten Leistungsinhalt, der auch das Redesign der entsprechenden Triebzüge einschliesst, unterzeichneten Alstom und DB Regio im März 2024 einen Ergänzungsvertrag. Die übrigen 87 Triebzüge sollen weiter durch DB FzI in Nürnberg und Hagen (Westfalen) nachgerüstet werden, wobei Nürnberg den Grossteil dieser Arbeiten übernimmt und die exakte Aufteilung noch nicht feststeht.



Das Werk Villeneuve gehörte zu Bombardier Transportation und wurde im Rahmen der 2021 rechtlich vollzogenen Übernahme von Alstom übernommen [34]. Nachdem im Jahr 2022 die seit 2014 am Standort laufende Endmontage und Inbetriebsetzung der Fernverkehrs-Doppelstock-Triebzüge (FV-Dosto) RAB(D)e 502 abgeschlossen war, wurde das Werk als Produktions- und Servicestandort neu positioniert und dafür umfassend umgebaut und erweitert. Nachdem bereits 2022/2023 ein Umrüstungsprojekt für 23 Prima-H4-Lokomotiven der SBB Infrastruktur durchgeführt worden war, sollen der Erfahrungsschatz und die Kapazitäten des Standorts auch verstärkt für weitere (ETCS-) Umrüst-Projekte zur Verfügung stehen.

Die Einbindung des Schweizer Werks führte auch zu wesentlichen Veränderungen am Logistikkonzept. So war durch Alstom die grenzüberschreitende Zu- und Abführung zu regeln, die auch die Zollabfertigung in Villeneuve (mit vorübergehender Ein- und Ausfuhr in die Schweiz und Zollabfertigung in Villeneuve) und die umsatzsteuerrechtliche Behandlung der in ihrem Wert gesteigerten Züge sowie die Ein- und Ausfuhr von Material einschliesst.

Serienausrüstung

Aufgrund des engen Zeitplans liefen die Vorbereitungen für die Serienausrüstung bereits im Frühjahr 2023 an, inmitten der noch laufenden FoC-Phase. Nachdem die FoC-Ausrüstung einen befriedigenden Stand erreicht hatte, wurden im November 2023 erste Triebzüge der BR 430.0 nach Villeneuve, Nürnberg und Hagen überführt, um Mitarbeiter zu schulen, die vorbereiteten Umrüstprozesse einzuüben und dabei auch Arbeitsanweisungen und -schritte in den Werken zu detaillieren. Der eigentliche Umbau begann an allen drei Standorten im Januar 2024.

Die ersten Züge galten als „First of Serie“ (FoS) und dienten der praktischen Erprobung der erarbeiteten Umrüstprozesse. Dies führte in den ersten Monaten für Umrüstung und Redesign zu insgesamt mehr als 100 notwendigen Detailklärungen, insbesondere zu:

- einzelnen Inkonsistenzen innerhalb der Umrüstdokumentation,
- Unterschieden zwischen der Dokumentation und den vorgefundenen Fahrzeugen,
- unterschiedlichen Vorgehens- und Sichtweisen von Alstom und FzI,
- anzuwendenden Normen, notwendigen Zertifizierungen und Qualifikationen für bestimmte Tätigkeiten, beispielsweise für das Kleben.

Umrüstwerke der S-Bahn-Triebzüge für den Digitalen Knoten Stuttgart (Zeichnung: DB).

Erschwert wurde der Anlauf durch einige Änderungen, die aus den vorausgehenden FoC-Projekten in die anlaufende Serienausrüstung zurückflossen. Auch wurde eine Reihe von Verbesserungsmöglichkeiten erkannt, beispielsweise in Kabelkonzepten oder bei der Platzierung sowie Montage-Reihenfolge einzelner Komponenten. Die Optimierungen umfassten dabei auch Kleinmaterial wie schneller einbaubare Stecker oder Typen von Schrauben. Viele Änderungen waren wiederum in der noch parallel laufenden FoC-Ausrüstung zu berücksichtigen, um später für einheitlich umgerüstete Triebzüge die Zulassung wieder zu erlangen. Diese Klärungen und Optimierungen nahmen einen grossen Teil des Jahres 2024 in Anspruch.

Im Zuge von Umrüstung und Redesign werden in jeden Triebzug zwei Lkw-Ladungen an Material eingebaut: Ein grosser Teil davon sind Redesign-Teile wie Sitze, Verkleidungen und Monitore, der kleinere Teil für die Umrüstung, zum Beispiel Sensoren, Displays, Abdeckungen. Dazu kommen mehr als zehn Kilometer verschiedenster Kabel sowie zahlreiche in grossen Mengen benötigte Kleinteile wie Schrauben und weitere Normteile. Während mit dem Redesign das Fahrzeuggewicht geringfügig abnimmt, wird im Rahmen der Umrüstung etwa 500 kg neues Material eingebaut.

Alstoms Logistikzentrum in Braunschweig koordiniert und prüft die Lieferungen eigener und weiterer Lieferanten und lagert das Material ein. Die für das Redesign benötigten Grossteile sind dabei bereits konfektioniert und werden im wesentlichen nur durchgeführt. Für das Retrofit werden hingegen aus dem Lagerbestand zunächst einzelne Waren wie Schrauben und Klemmen abgezählt beziehungsweise Kabel zugeschnitten, etikettiert und verpackt. Aus diesen Verpackungen werden wiederum definierte Einbausätze (Kits) zusammengestellt. Diese umfassen für einen Vorgang wie den Einbau eines Sensors neben den dafür notwendigen Teilen auch Checklisten, die nach Einbau und Prüfung zu quittieren sind. Sämtliche Kits für einen bestimmten Zug werden wiederum zu Ladungsträgern (wie Gitterschränken, Paletten und Boxen) zusammengestellt. Auf Abruf des jeweiligen Werkes werden die benötigten rund 30 Ladungsträger auf zwei Lkw ausgeliefert. Mehrweg-Behälter und nicht verwendetes Material werden später nach Braunschweig zurückgeführt. Im übrigen werden auch Reserven an Einzelteilen vorgehalten.

Als wesentliche Herausforderung erwies sich vor Beginn der Serienausrüstung die Lieferbarkeit einzelner, aber im Hinblick auf termingerechte Verfügbarkeit kritischer Komponenten, beispielsweise bestimmter Mikrochips. Auch werden einige Kleinteile zunehmend von den Werken direkt beschafft und bereitgestellt werden.

Nachdem viele Startschwierigkeiten überwunden worden sind, nimmt die Serienausrüstung inzwischen Fahrt auf. Am 8. November 2024 kam der erste in Serie umgerüstete, jedoch noch nicht zugelassene Triebzug aus Nürnberg geschleppt in Plochingen an, am 12. November 2024 folgten die ersten beiden aus Villeneuve. Am 17. Januar 2025 wurde in Plochingen ein Triebzug (430 220) der Öffentlichkeit vorgestellt. Bis Ende Januar 2025 wurden weitere vier Triebzüge nach Plochingen gebracht, weitere

Triebzug 430 beim Umbau im Werk Villeneuve (Foto: Alstom).

fertig ausgerüstete Züge standen noch an anderen Standorten. Sie werden mit eigener Kraft nach Plochingen fahren und eingesetzt werden, sobald die Zulassung für PZB-Betrieb voraussichtlich Anfang Februar 2025 vorliegt.

Die ersten Triebzüge (FoS) der BR 423 sollen ab April 2025 umgerüstet werden. Mit wachsenden Erfahrungen und Optimierungen sollen die Triebzüge beider Baureihen in eingeschwungenem Zustand binnen vier Wochen je Triebzug im Mehrschichtbetrieb umgerüstet werden; bei Einschichtbetrieb dauert die Umrüstung entsprechend länger. Jene vier Wochen beinhalten neben Retrofit und Redesign (jeweils rund eine Woche) auch Begleitprozesse wie Überführungsfahrten, Ausser- und Inbetriebsetzung, Abnahmeprüfung, Dokumentation, Wiederinbetriebnahme und Zulassung/Typkonformitätserklärung. Je Triebzug sind für Retrofit und Redesign insgesamt mehr als 1500 Fertigungsstunden erforderlich. Die Umrüstung und vor allem die Zustandsfeststellung der ersten Züge wurde durch DB Regio und den Fahrzeugexperten der DB AG eng begleitet.

(Wieder-)Zulassung und Wiederinbetriebsetzung

Ein erheblicher und nicht zu unterschätzender Teil des Projekts liegt in vielerlei Zulassungsthemen. Insgesamt erwies sich der Zulassungsaufwand im Projekt als weitaus grösser als zu Beginn gedacht.

Dazu fanden und finden auch frühzeitige Abstimmungen mit dem EBA als Genehmigungsbehörde statt (sogenanntes Pre-Engagement). Alstom liefert das technische Dossier zur Erlangung der Genehmigung, DB Regio lädt dies (als Inhaber der Typgenehmigung) auf dem One-Stop-Shop-Portal der ERA hoch und ist erster Ansprechpartner für die Aufsichtsbehörde. Im Mittelpunkt stehen dabei die FoC-Triebzüge, während für die in Serie umgerüsteten Triebzüge lediglich die Übereinstimmung mit diesen Typen zu erklären ist (Conformity To Type, CTT). Alle geänderten Fahrzeuge sind schliesslich erneut in das europäische Fahrzeugeinstellungsregister (European Centralised Virtual Vehicle Register, ECVVR) einzutragen.

Die EU-Richtlinie 2018/545 sieht in Artikel 15 (1) a bis d vier verschiedene Kategorien von Zulassungsverfahren vor (siehe Tabelle rechts). Wesentlich ist dabei insbesondere, ob

- das technische Dossier, das heisst technische Unterlagen als Teil der EG-Prüferklärung für Teilsysteme, geändert werden.
- grundlegende Fahrzeugeigenschaften (Basic Design Character, BDC) geändert werden.
- ein Schwellwert in Bezug auf gewisse „annehmbare Parameter“ gemäss den TSI überschritten wird.

Für die erste Baseline (3.1) ist aufgrund der grundlegenden Änderungen (BDC) gegenüber nicht umgebauten Fahrzeugen ein Zulassungsverfahren nach Kategorie „d“ zu durchlaufen. Aufgrund der vergleichsweise überschaubaren Änderungen der Baseline „4.0 off“ ist ein Verfahren der Kategorie „b“



erforderlich. Für den Wechsel nach „4.0 on“ ist aufgrund erheblicher Änderungen (durch die Nutzung von ETCS) wiederum ein Verfahren nach Kategorie „d“ notwendig. Mit der kommerziellen Nutzung von ATO GoA 2 (Baseline 5.2) ist ebenfalls ein Zulassungsverfahren erforderlich. Im Pre-Engagement wurde ein Verfahren nach Kategorie „c“ vorgeschlagen.

Für jede Hard- und Software-Änderung ist ein solches Verfahren für jeden der drei Fahrzeugtypen 423, 430.0, 430.2 zu durchlaufen. Für die Kategorien c und d ist wiederum für jeden Triebzug zusätzlich ein CTT-Verfahren notwendig. Für jede Baseline der Fahrzeugsoftware sind allein für Validierung/Verifikation durch Alstom und Gutachter ein halbes Jahr anzusetzen; für die abschliessende Genehmigung hat das EBA weitere sechs Monate Zeit. Jeder Baseline-Wechsel erschwert den Betrieb, da innerhalb einer Baureihe (423 beziehungsweise 430) nur Triebzüge gleicher Baseline miteinander kuppelbar sind. Nicht zuletzt zieht jede neue Baseline auch eine entsprechende Ausbildung der Mitarbeiter nach sich. Das gemeinsame Ziel von Alstom und DB Regio ist daher, grundsätzlich so wenig Baseline-Wechsel wie möglich vorzunehmen.

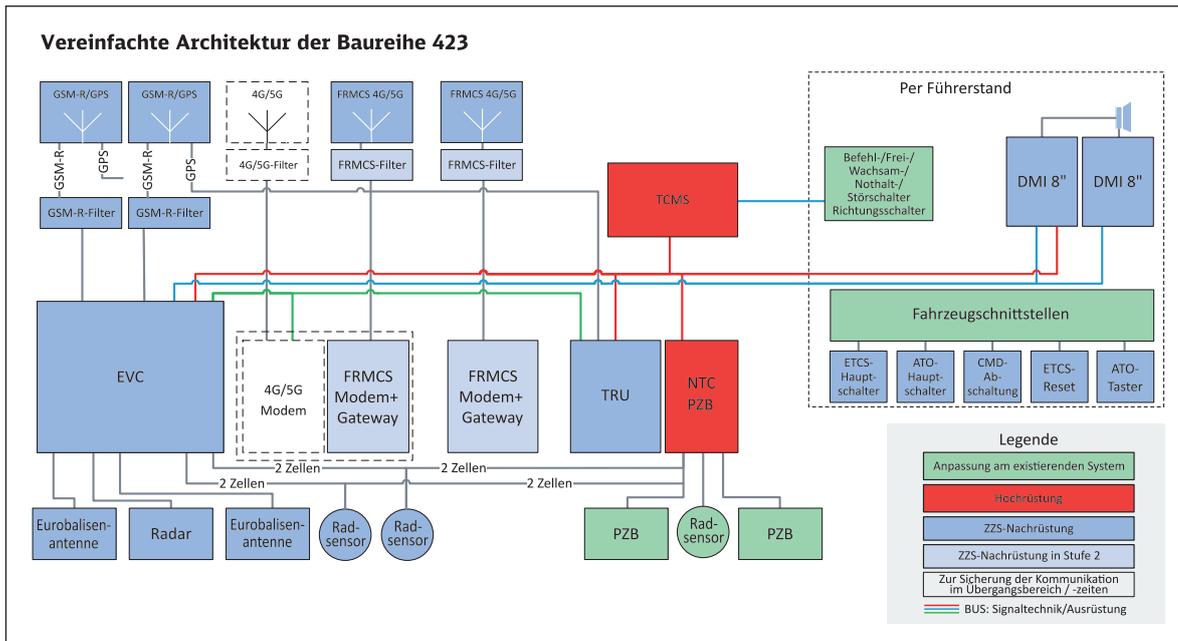
Von grosser Bedeutung ist dabei auch eine verlässliche und vorausschauende Planung der Infrastruktur. Durch die späteren ETCS-Inbetriebnahmen kann bei der BR 423 nun die Baseline „4.0 off“ übersprungen und direkt „4.0 on“ zur Zulassung beantragt und

ausgerüstet werden. Noch in Abstimmung zwischen Alstom und DB ist derzeit beispielsweise, wann ATO gemäss „Pre-TSI“ und wann nach der TSI ZZS 2023 genutzt wird.

Die Baseline 3.1 diente lediglich zu Tests und hatte keine Bedeutung für den Fahrgastbetrieb. Der entsprechende Antrag für die BR 430.0 und 430.2 wurde im Februar 2024 eingereicht. Die Genehmigung erging am 9. August 2024. Bis zum Dezember 2024 erfolgte dann der Eintrag ins Register genehmigter Fahrzeugtypen (ERATV). Auf dieser Grundlage wurden CTT-Anträge für die Baseline „4.0 off“ für erste Triebzüge der BR 430.0 am 12. Dezember 2024 gestellt beziehungsweise am 2. Januar 2025 für die BR 430.2. Der Antrag zur Genehmigung für „4.0 on“ (für BR 430) wird im Februar 2025 gestellt und Mitte 2025 erwartet. Anschliessend soll die BR 430 von „4.0 off“ auf „4.0 on“ wechseln, auch um damit Testfahrten mit ETCS zu absolvieren. Im Dezember 2025 wird die Zulassung der BR 423 für „4.0 on“ erwartet, womit umgerüstete Triebzüge wieder im Fahrgastbetrieb (zunächst mit PZB) eingesetzt werden können. Damit ist der Betrieb aller Fahrzeuge für die Inbetriebnahme der S-Bahn-Stammstrecke mit ETCS L2oS abgesichert. Parallel zu diesen Aktivitäten werden die nächsten Zulassungsschritte für die kommende Baseline „5.2“ (vor allem ATO GoA 2) und die Stufe 2 (unter anderem Upgrade auf die TSI ZZS 2023) vorbereitet und vorangetrieben.

Einstufung der Fahrzeugänderungskategorie gemäss Artikel 15(1) der DVO (EU) 2018/545

Kategorie „a“	Kategorie „b“	Kategorie „c“	Kategorie „d“
keine Abweichung des technischen Dossiers	Abweichung des technischen Dossiers, aber kein Einfluss auf BDC und Gesamtsicherheitsniveau nicht beeinträchtigt	Abweichung des technischen Dossiers, Einfluss auf BDC, aber unter Schwellwert für Auslösung einer Genehmigungspflicht und Gesamtsicherheitsniveau nicht beeinträchtigt (s. [35])	Abweichung des technischen Dossiers, Einfluss auf BDC, aber über Schwellwert für Auslösung einer Genehmigungspflicht und Gesamtsicherheitsniveau beeinträchtigt
		Folge: Fahrzeugtyp-Version	Folge: neuer Fahrzeugtyp oder Typ-Variante



Vereinfachte Darstellung der Architektur der Fahrzeugausrüstung der Baureihe 423 (Zeichnung: DB).

Technik

Die technische Ausrüstung der Triebzüge reicht weit über eine möglichst einfache ETCS-Ausrüstung hinaus und war bereits Gegenstand mehrerer Berichte [unter anderem 27, 36, 37]. Im Rahmen des Pilotprojekts DKS werden nicht nur neue Techniken (wie ATO GoA 2, FRMCS und ETCS Level 2 mit Zugintegritätsüberwachung) in einem grossen Knoten erprobt, sondern auch eine eng aufeinander abgestimmte Fahrzeug- und Infrastrukturausrüstung, die nicht nur eine wesentlich leistungsfähigere, sondern auch erheblich einfachere Infrastruktur erwarten lässt [5, 31]. Die Fahrzeugausrüstung erfolgt dabei so weit wie möglich „aus einem Guss“ und beinhaltet Elemente, die in der Infrastruktur erst in einigen Jahren eingeführt und somit fahrzeugseitig genutzt werden.

Architektur

Im Rahmen des Retrofits werden einige Dutzend neue Komponenten in die Triebzüge eingebaut (siehe Bild). Als Herzstück

erhält jeder Zug einen EVC, an den unter anderem zwei Displays je Führerraum, fünf Funk-Antennen, zwei Balisenantennen, vier Odometrie-Sensoren sowie diverse Taster und Schalter angebunden werden. Um die bestehende PZB mit dem EVC mittels standardisierter Schnittstelle (Specific Transmission Module, STM) zu verbinden, wird diese bei den Bestandsfahrzeugen von EBICAB 500 auf 600 hochgerüstet; die Baureihe 430.2 erhält diese ab Werk, bei der BR 423 wird die I60R hochgerüstet. Die bestehende Datenschreiberkassette wird durch einen standardisierten und per Funk auslesbaren Datenschreiber (Juridicial Recording Unit, JRU) ersetzt.

ETCS

Die ETCS-Ausrüstung ist für die ETCS Level 0 bis 3 sowie STM PZB geeignet und erfolgt in zwei Schritten im Rahmen des Zwei-Stufen-Konzepts:

- In der Stufe 1 zunächst nach Baseline 3 Release 2 (SRS 3.6.0), einschliesslich

empfohlener Korrekturen der ERA von 2019, für die ersten Betriebsaufnahmen im DKS.

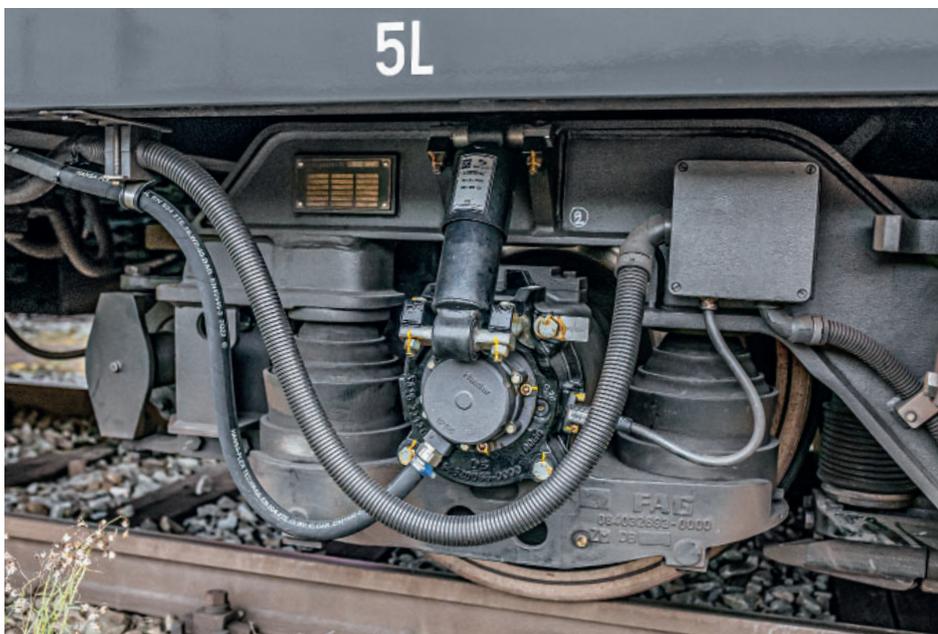
- In der Stufe 2 erfolgt die Hochrüstung auf ETCS gemäss TSI ZZS 2023 (Baseline 4, SRS 4.0.0) und funktionsfähigem FRMCS.

Die Ausrüstung geht erheblich über die Mindestanforderungen der TSI und des DB-Netztes hinaus und beinhaltet beispielsweise CMD und weitere Funktionen, die im folgenden beschrieben werden.

Die Weg- und Geschwindigkeitsmessung (Odometrie) basiert auf vier Sensoren je Triebzug: Die Grundlage sind zwei Wegimpulsgeber, die beidseitig an einem Lauf-radsatz ungefähr in der Mitte der Züge angeordnet sind. Bei der BR 423 ist dieser Radsatz, im Gegensatz zur BR 430, auch nicht gebremst. Die beiden Sensoren sollten damit weitgehend unempfindlich gegenüber Gleiten und Schleudern sein. Zusätzlich wird ein auf das Gleis ausgerichtetes Doppler-Radar eingebaut und ein Beschleunigungs-sensor (im EVC) genutzt. Im Zusammen-spiel sollen die Sensoren im Regelbetrieb eine sichere Ortung gewährleisten, die auf +/- 1% des seit der letzten als Referenz genutzten Balisengruppe zurückgelegten Weges genau arbeiten – wesentlich genauer als die Mindestanforderung von +/- 5% gemäss ETCS-Spezifikation [36].

ATO GoA 2

Angesichts des tiefen Eingriffs, den bereits die Integration von ETCS bedeutet, werden die Triebzüge „aus einem Guss“ auch mit ATO GoA 2 ausgerüstet. Es ist entsprechend der ETCS-Spezifikation als nicht sicherheits-relevantes System konzipiert, das sich nur im sicheren Rahmen von ETCS bewegen kann, und wird auf einer ohnehin vorhande-nen Steckkarte des EVC-3 ausgeführt. Der Mehraufwand liegt bei nur wenigen Prozent der Gesamtkosten der Fahrzeugausrüstung.



Neuer Wegimpulsgeber für die Odometrie an einem Triebzug der Baureihe 430 (Foto: DB Regio / Niedermüller).

Führerraum mit zentral angeordnetem Driver Machine Interface (DMI) (Foto: DB Regio / Nieder-müller).

Die Infrastruktur gibt dem Zug dabei vor, wann er an welchem Ort sein soll, und stellt auch etliche über ETCS hinausgehende (Infrastruktur-)Daten bereit. Der Zug meldet wiederum selbstständig unter anderem zurück, ob und gegebenenfalls mit welcher Abweichung er diese Vorgaben einhalten kann. Der Triebfahrzeugführer ist noch an Bord, überwacht die Fahrt und kann jederzeit eingreifen, während ATO den Zug fährt. Der Triebfahrzeugführer kann ATO in geeigneten Bereichen über einen ATO-Taster im Führerpult aktivieren, jederzeit deaktivieren und auch verminderte Reibwerte einstellen. Ebenfalls obliegt ihm weiterhin die Öffnung der Türen und die Abfertigung. An den Bahnsteigen der Stammstrecke sollen die Triebzüge mit einer Genauigkeit von ± 50 cm genau anhalten [7, 36, 37].

Die Umsetzung erfolgt im vornormativen Bereich, da ATO GoA 2 erst mit der TSI 2023 spezifiziert ist. Dazu wurde eine DKS-spezifische Spezifikation im April 2023 mit der DB Netz AG und dem Streckenausrüster Thales vereinbart. Auf Basis dieser Spezifikation erfolgte die Entwicklung der Generik und der projektspezifischen Implementierung durch Alstom. Da die notwendige paketvermittelte Datenübertragung nicht (wie für ETCS) per GSM-R erfolgen kann, werden die ATO-Daten zunächst über öffentlichen Mobilfunk (mehrfach verschlüsselt und gesichert) und später über FRMCS übertragen.

Mit der Baseline 5.0 wird ATO GoA 2 seit Januar 2025 zu Testzwecken in Hennigsdorf und anschließend im Netz, voraussichtlich auf der Schnellfahrstrecke Wendlingen – Ulm, verwendet. Die Baseline 5.2 wird für das Tuning und die Charakterisierung auf allen Baureihen und den kommerziellen Betrieb genutzt. Im Fahrgastbetrieb eingesetzt werden soll ATO etwa ein Jahr nach der ETCS-Betriebsaufnahme der Stammstrecke.

Innovationskooperation (TIMS, OCORA, TCR, FRMCS)

Da aufgrund der Neuartigkeit von Funktionen die Leistung des Auftragnehmers zur Vergabe noch nicht abschliessend detailliert



werden konnte, wurden im Rahmen einer IK für vier Innovationsgegenstände Lasten- und Pflichtenhefte gemeinsam ausgearbeitet, die entsprechend umgesetzt werden [27, 38]. Unmittelbar nach dem Zuschlag wurden in den ersten sechs Monaten die Innovationsthemen in enger Zusammenarbeit mit der DSD zum Abschluss gebracht. Die Ergebnisse wurden in der ETCS-Generik, in der Planung der Umrüstung sowie bei der Integration in das Fahrzeug berücksichtigt.

Ein Gegenstand war die Bereitstellung der Information über Zugvollständigkeit und Zuglänge (Train Integrity Monitoring System, TIMS) als Voraussetzung für ETCS Level 3 (inzwischen Level 2). Hierzu wurde ein System konzipiert, das ohne Mitwirkung des Triebfahrzeugführers die Zuglänge mit höchster Zuverlässigkeit (Safety Integrity Level 4, SIL 4) und die Integrität mit sehr hoher Zuverlässigkeit (SIL 2) ermittelt. Eine ungewollte Zugtrennung, die in aller Regel ohnehin zu einer Zwangsbremmung führt, war zusätzlich binnen 3,5 s zu erkennen [38]. Die entwickelte Lösung ist eine Softwareapplikation im EVC-3 und erfordert lediglich bei der BR 423 einen zusätzlichen Schalter am Kupplungskopf der auto-

matischen Mittelpufferkupplung. Die TIMS-Funktion läuft inzwischen auf den ersten ausgerüsteten Zügen, um frühzeitig Verfügbarkeitserfahrungen zu sammeln, obwohl sie infrastrukturseitig erst in einem Teilbereich des DKS ab 2031 [5] genutzt werden soll.

Im Rahmen der IK wurden auch die bislang nicht standardisierten Schnittstellen zwischen der ETCS- beziehungsweise ATO-Fahrzeugausrüstung und dem Fahrzeug („SUBSET 119/139“) aus der Initiative OCORA (Open CCS On-board Reference Architecture) aufgegriffen, punktuell detailliert und abgestimmt umgesetzt. Damit würde ein späterer Ersatz der ETCS/ATO-Fahrzeugausrüstung vereinfacht [38, 39].

Im Rahmen der IK wurden auch Fahrzeugzustandsdaten (Train Capability Report, TCR) definiert [38]. Weit über die bereits durch ETCS laufend übermittelten Positions- und Geschwindigkeitsdaten (Position Report) hinaus, werden rund 35 Typen von Informationen über die ATO-Fahrzeug-Infrastrukturschnittstelle aus der Leittechnik des Fahrzeugs abgegriffen und übermittelt: beispielsweise der Status von Traktion, Bremsen, Türen und Stromabnehmern. Damit soll

Doppler-Radar der Odometrie auf einem der First-of-Class-Triebzüge (Foto: Alstom).



ATO-Taster neben dem Fahr-/Bremsschalter (Foto: DB Regio / Nieder-müller).





Drei aufgeständerte Antennen auf dem Dach der BR 430 (links vorne und hinten für FRMCS, rechts für öffentlichen Mobilfunk) (Foto: Alstom).

die laufende betriebliche Optimierung durch das geplante Verkehrsmanagementsystem CTMS zukünftig wesentlich verbessert werden.

Ein weiteres Element der IK war die Detaillierung der zweistufigen FRMCS-Fahrzeugausrüstung.

Funk

Bereits vor der Umrüstung waren die Triebzüge mit sechs Funkantennen ausgerüstet: je zwei für Energiedaten und die Aussen-

anbindung des Fahrgast-WLAN sowie je eine für GSM-R-Sprachfunk und Diagnosebeziehungswise Ortungsdaten. Mit der Umrüstung kommen zunächst fünf weitere Antennen hinzu: jeweils zwei (redundant) für GSM-R und FRMCS sowie eine weitere für öffentlichen Mobilfunk (für ATO GoA 2). Auch diese Planung und Umsetzung erfolgt „aus einem Guss“, beispielsweise im Hinblick auf die Architektur des Gesamtsystems sowie die Positionierung von Antennen, Filtern und Kabeln. Aufgrund der relativ vielen und bis nahe an die Grenze des Regellichtraums

ragenden Aufbauten wie Klimakoffern, wechselnden Höhenniveaus und notwendiger Abstrahlung über die Klimageräte hinaus wurden für die Antennen massive Ständer konstruiert.

Eine Besonderheit ist die zweistufige Ausrüstung und nicht nur Vorrüstung der Triebzüge mit FRMCS [40]. Obwohl mit einer stabilen und anwendungsreifen Version der FRMCS-Spezifikation nicht vor Ende 2026 gerechnet wird, waren wesentliche Eckpunkte des zukünftigen Funksystems im DB-Netz (zum Beispiel 5G-Standard als Grundlage, Frequenzbänder) bereits zur Vergabe hinreichend genau bekannt, um die tatsächliche Ausrüstung mit auszuschreiben und zu vergeben. Nachdem in der IK das Lastenheft detailliert und ein Pflichtenheft ausgearbeitet wurde, wird ein Grossteil der Technik (Antennen, Kabel, Netboxen) nun zusammen mit ETCS in die Fahrzeuge eingebaut. Lediglich die Modems mit noch zu entwickelnder Software und Filter folgen im Rahmen der Hochrüstung auf die Stufe 2, die einschliesslich Tests und CTT je Triebzug nur eine Woche in Anspruch nehmen soll. Den Vorteilen der frühen Ausrüstung und den Synergieeffekten des „Aus-einem-Guss“-Ansatzes stehen dabei Restrisiken durch verbleibende Unsicherheiten gegenüber. Diese könnten zu einer Überdimensionierung (beispielsweise in der Anzahl der Antennen) oder zu nachträglichen Änderungen an der Hardware führen.

(Fortsetzung folgt)