

Knoten Stuttgart

ETCS als Träger für Leistungs- und Qualitätssteigerungen

DB Netz AG /
DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH

Hannes Goers,
Peter Reinhart, Rüdiger Weiß

I.NMF 34 (M), I.GV(P), I.NM-SW

Berlin / Karlsruhe / Stuttgart,
09.01.2019

1 Hintergrund

Aufbauend auf der Serienreife von ETCS, den mannigfaltigen Erkenntnissen der vor dem Abschluss stehenden S-Bahn-ETCS-Untersuchung und im Lichte von Verzögerungen in einzelnen Rohbauabschnitten von Stuttgart 21 ergibt sich im Knoten Stuttgart kurzzeitig die einmalige Chance, mit wegweisenden Richtungsentscheidungen Weichen zu stellen. Falls es bis Anfang 2019 gelingt, die ETCS-Ausrüstung sämtlicher den neuen Knoten anfahrender Triebfahrzeuge mit ETCS sicherzustellen, könnte die Leit- und Sicherungstechnik des im Bau befindlichen Knotenprojekts deutlich qualitäts- und leistungsfähiger gestaltet werden.

Während bereits die im Rahmen von Stuttgart 21 entstehende Infrastruktur als solide „Hardware“-Basis gegenüber dem Status Quo deutliche Leistungs- und Qualitätssteigerungen ermöglicht, eröffnet sich nun die Chance, mit einer guten darauf aufsetzenden „Software“ – Digitale Stellwerke (DSTW), das europäische Zugbeeinflussungssystem ETCS und weitere darauf aufbauende Techniken – den Weg für nochmals sehr deutlich darüber hinaus gehende Leistungs- und Qualitätssteigerungen zu ebnen. Im Sinne eines sinnvollen Gesamtpakets sind damit einzelne flankierende Maßnahmen notwendig.

Während für die S-Bahn im Zuge der Untersuchung eine konkrete Planung entwickelt und unter konservativen Annahmen im Rahmen einer Eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchung ein deutlicher Nutzen aufgezeigt wurde, liegt eine ausgearbeitete Planung für eine optimierte „digitale“ Infrastruktur für den Fern- und Regionalverkehrsbereich im Realisierungszeitraum von Stuttgart 21 noch nicht vor – sie wäre im 1. Halbjahr 2019 umfassend auszuarbeiten und dann zur Ausschreibung zu bringen.

Als eine Handreichung für die anstehenden Grundsatzentscheidungen zeigt das vorliegende Dokument den Nutzen einer ETCS-Ausrüstung für den Regionalverkehr auf. Nach einer kurzen Einführung in ETCS fasst es die Kernergebnisse der S-Bahn-ETCS-Untersuchung zusammen, stellt die darauf aufbauende Drei-Baustein-Strategie für den Knoten Stuttgart vor und führt anschließend in die vielfältigen „harten“ Nutzen ein. Diese Nutzen werden anschließend im Rahmen für den besonders im Fokus stehenden Nordzulauf anhand von Bildfahrplänen und Qualitätskennzahlen verdeutlicht. Im Weiteren werden darauf aufbauende Potentialansätze verschiedener Härtegrade aufgezeigt, die nur mit ETCS realisiert werden können und einer weiterführenden Ausarbeitung und Bewertung bedürfen. Abschließend wird der akute Entscheidungsbedarf aufgezeigt.

Um den weiteren Zeitplan zur Umsetzung von Stuttgart 21 nicht zu gefährden, muss der grundsätzliche Planungsauftrag für den digitalen Knoten Anfang 2019 vorliegen. Ebenfalls muss dann der Startschuss zur Ausrüstung von rund 400 Regional- und S-Bahn-Zügen aus wenigstens 13 verschiedenen Baureihen fallen, um ab Ende 2023 Infrastruktur und Fahrzeuge im Zusammenspiel ausgiebig zu testen und unter den hohen Leistungsanforderungen des Großknotens 2025 in Betrieb zu gehen.

Im Rahmen der „Digitalen Schiene Deutschland“ ist der bis 2025 zu realisierende Knoten als Pilotprojekt für Knoten vorgesehen. Die im Rahmen der Umsetzung des Pilotprojekts gewonnenen Erkenntnisse würden den ab 2025 vorgesehenen Rollout der digitalen Schiene maßgeblich prägen.

Inhaltsverzeichnis

1 Hintergrund	2
2 Zusammenfassung	5
3 Einführung	6
3.1 ETCS	6
3.2 ETCS als Träger für Leistungs- und Qualitätssteigerungen	7
3.3 Bisherige ETCS-Planung im Rahmen von Stuttgart 21 (Nullfall)	10
3.4 Drei-Baustein-Strategie zum digitalen Knoten Stuttgart	12
3.4.1 Baustein 1: S-Bahn-ETCS	12
3.4.2 Baustein 2: ETCS als führendes Leit- und Sicherungssystem im Knoten Stuttgart	13
3.4.3 Baustein 3: Ausrüstung des übrigen S-Bahn-Netzes	14
4 Unmittelbare Kapazitäts- und Qualitätsnutzen von ETCS	15
4.1 Sehr kurze Zugfolgeabschnitte/Signalabstände	15
4.2 Kurze Durchrutschwege	16
4.3 Präzise Geschwindigkeiten	17
4.4 Fahrzeugspezifische Bremskurven	19
4.5 Bremswege über mehrere Zugfolgeabschnitte hinweg	19
4.6 Entfall der PZB-Restriktionen	20
4.7 Flexiblere Bahnsteignutzung	22
4.8 Optimierte Bremsmodelle für Triebzüge (Gamma-Modell)	22
4.9 Vollumfängliche Nutzung der Möglichkeiten eines Zuges	23
4.10 Betriebsoptimierung anhand umfassender Ist-Daten	23
4.11 Robustere Infrastruktur mit weniger Störungen	24
5 Beispiel Nordzulauf	25
5.1 Hintergrund	25
5.2 Kapazitätswirkungen	26
5.2.1 Prämissen	26
5.2.2 Methodik	27
5.2.3 Ergebnisse	28
5.2.4 Effekte	30
6 Weiterführende Potentialansätze auf Grundlage von ETCS	32
6.1 Automatisierter Fahrbetrieb (ATO)	32
6.2 Leittechnik (TMS)	33
6.3 Schnellere Einfahrten ins teilbesetzte Gleis	35
6.4 ETCS Level 3 Hybrid	35
6.5 Weiterführende Optimierungen am Bremsmodell	36
7 Ausblick, weiteres Vorgehen	37
8 Abkürzungsverzeichnis	38

2 Zusammenfassung

- Im Rahmen der 2017 begonnenen S-Bahn-ETCS-Untersuchung traten die Potentiale des Systems ETCS für die Leistungs- und Qualitätssteigerungen in den Fokus.
- Bereits unter konservativen Annahmen können mit ETCS und ATO die Mindestzugfolgezeiten selbst auf der Stammstrecke um rund 20 Prozent verkürzt werden, im Mittel werden nicht mehr Verspätungen auf-, sondern deutlich abgebaut. Eine Betrachtung des Nordzulaufs zeigt für ETCS ähnliche Effekte. In beiden Untersuchungen verbleibt dabei eine Reihe von Potentialen für weitere Leistungssteigerungen.
- Um die Vorteile von ETCS auf den von S-Bahnen und Regionalzügen gemeinsam genutzten Abschnitten zu nutzen, liegt eine Ausrüstung des übrigen Regionalverkehrs mit ETCS nahe. Damit wären alle den neuen Stuttgarter Hauptbahnhof anfahrenden Züge mit ETCS ausgerüstet.
- Die Beibehaltung von konventioneller Leit- und Sicherungstechnik (LST) parallel zu ETCS würde Rahmenbedingungen schaffen, die die technische Weiterentwicklung und Ausweitung von ETCS im Knoten Stuttgart auf absehbare Zeit verzögern könnte. Das volle Potential von ETCS und Digitaler Stellwerkstechnik kann nur gehoben werden, wenn dies als führendes System geplant und umgesetzt wird.
- Aktuell besteht eine einzigartige Chance, um den Knoten Stuttgart mit einem mehrstufigen Umsetzungsplan zur Digitalen Stellwerkstechnik und ETCS zum ersten digitalen Schienen-Hochleistungsknoten in Deutschland zu entwickeln, beginnend mit den Neubaustrecken des Projektes Stuttgart - Ulm und weiteren, damit zusammenhängenden Abschnitten.
- Nur auf der Basis der Digitalisierung und Umsetzung ETCS können im Knoten Stuttgart qualitativ und kapazitiv weiterführende Systeme wie modernste Verkehrsleittechnik (TMS - Traffic Management System) mit automatisiertem Störungsmanagement und ATO (Automatic Train Operation), um nur einige Beispiele zu nennen, umgesetzt werden.
- Ein quantitativer Nachweis für die Steigerung der Betriebs- und Leistungsfähigkeit durch ETCS im Vergleich mit der konventionellen LST kann - analog zur S-Bahn-Studie - für den Fern- und Regional erbracht werden, wenn eine gefestigte Planung zur ETCS-Ausrüstung in den nachfolgend aufgeführten Abschnitten vorliegt.

3 Einführung

3.1 ETCS

Das European Train Control System (ETCS) zeichnet sich im Vergleich zur konventionellen Leit- und Sicherungstechnik durch einige wesentliche neue Systemeigenschaften aus. In der im Knoten Stuttgart zunächst vorgesehenen Ausprägung Level 2 sind dies:

- Züge orten sich regelmäßig an im Gleis verlegten Eurobalisen – einer Art „elektronischen Kilometersteinen“ – und bestimmen mittels Sensoren (Odometrie) laufend ihren genauen Standort und ihre Geschwindigkeit.
- Fahrzeuge und Strecke stehen über Funk (GSM-R) im laufenden Datenaustausch. Während die Strecke dem Fahrzeug u. a. Fahrterlaubnisse und den weiteren Weg übermittelt, teilt der Zug der Strecke alle paar Sekunden u. a. seine genaue Position, Fahrtrichtung und Geschwindigkeit mit.
- Lichtsignale an der Strecke sind nicht mehr erforderlich. Die für die Fahrt notwendigen Informationen, beispielsweise die Erlaubnis zur Einfahrt in Gleisabschnitte, werden per Funk von der Strecke an den Zug übertragen und dem Triebfahrzeugführer über ein Display angezeigt. Falls Lichtsignale vorhanden sind, sind diese in der Regel dunkel.
- Während mit konventioneller Zugbeeinflussung (PZB) grundsätzlich bis zu einer Beeinflussung gefahren werden darf, ist bei ETCS Level 2 in der Regel eine explizite Fahrterlaubnis erforderlich, um das Fahrzeug zu bewegen.
- Anhand der von der Strecke übermittelten Informationen berechnet das Fahrzeug seine Bremskurven entsprechend der fahrzeugspezifischen Möglichkeiten selbst.

Abbildung 1 verdeutlicht die Funktionsweise.

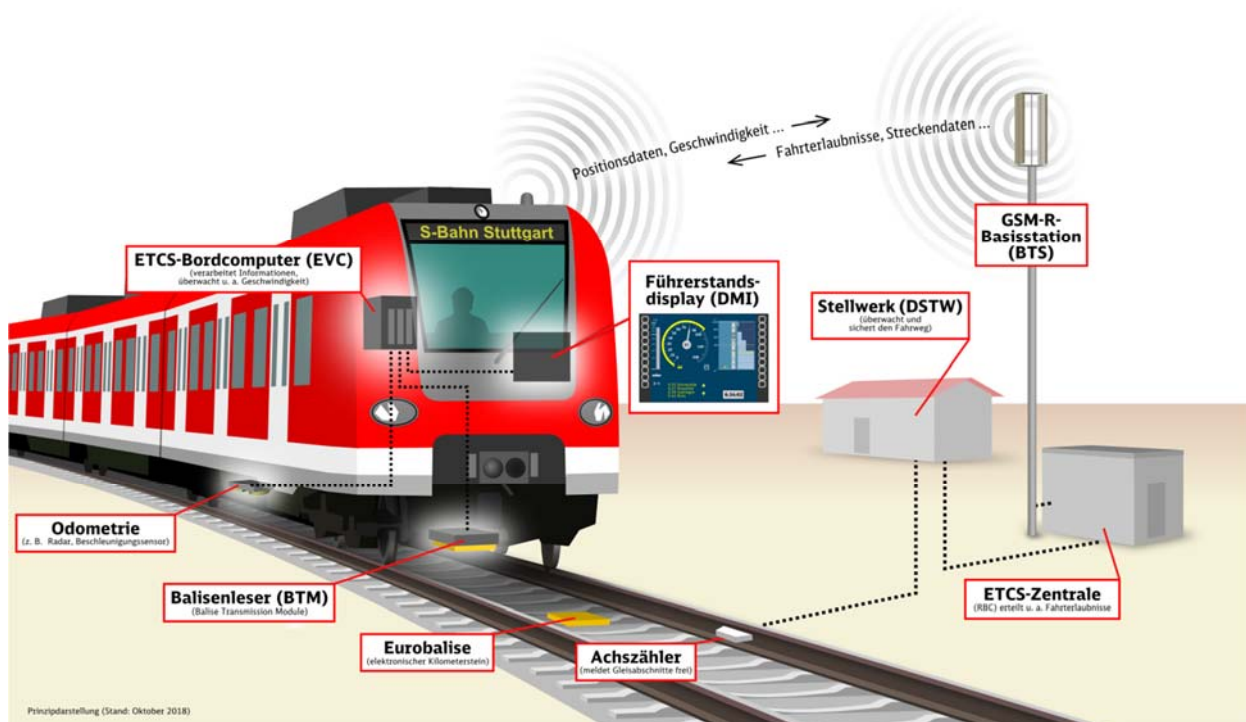


Abbildung 1: Wesentliche Komponenten und funktionale Zusammenhänge des Betriebs unter ETCS Level 2

3.2 ETCS als Träger für Leistungs- und Qualitätssteigerungen

Wurde die Einführung von ETCS in Deutschland bislang vorrangig unter dem Blickwinkel der Interoperabilität und des Hochgeschwindigkeitsverkehrs diskutiert, rückten u. a. im Rahmen der S-Bahn-ETCS-Untersuchung Potentiale des Systems für Leistungs- und Qualitätssteigerungen auf der hochbelasteten Stammstrecke in den Fokus. Die im September 2017 begonnene und vor dem Abschluss stehende Untersuchung wurde im Rahmen einer 2. Stufe ab März 2018 auf umliegende Streckenabschnitte ausgedehnt (Abbildung 2).

Obwohl auf der S-Bahn-Stammstrecke die Möglichkeiten der konventionellen Leit- und Sicherungstechnik – mit zumeist nur noch rund 400 m langen Hauptsignalabständen – weitestgehend ausgeschöpft sind und obwohl der Untersuchung durchweg konservative Annahmen zu Grunde gelegt wurden, ist der Effekt deutlich: Auf der Stammstrecke können die Mindestzugfolgezeiten um rund 20 Prozent verkürzt werden (Abbildung 3), im Mittel werden nicht mehr Verspätungen auf-, sondern deutlich abgebaut (Abbildung 4). Zahlreiche weitere Potentialansätze für Kapazitäts- und Qualitätssteigerungen wurden aufgezeigt und sind einer weiteren Vertiefung vorbehalten (Abbildung 5, Abbildung 6). Diese und weitere Potentiale werden im Kapitel 6 vertieft.

Eine weitere Erkenntnis der Untersuchung ist, dass ETCS als führendes Sicherungssystem geplant werden muss, um das volle Potential des Systems zu heben. Eine eventuell verbliebene konventionelle Leit- und Sicherungstechnik muss dem untergeordnet werden. Um die maximale Leistungsfähigkeit nach dem Stand der Technik mit ETCS auf der Stammstrecke zu realisieren, kann eine verbliebene konventionelle Lichtsignalisierung daher die Leistungsanforderungen von heute 24 Zügen pro Stunde und Richtung nicht mehr erfüllen. Dies bedingt letztlich die Ausrüstung aller Fahrzeuge mit ETCS.

Ebenfalls ist es erforderlich, die besonderen Möglichkeiten von ETCS auch konsequent zu nutzen. Wird ETCS **nur** auf eine konventionelle Leit- und Sicherungstechnik aufgesetzt und dessen besondere Möglichkeiten nicht konsequent genutzt, kann die Einführung des neuen Systems unter konservativen Annahmen sogar zu einer reduzierten Leistungsfähigkeit bzw. Betriebsqualität führen.

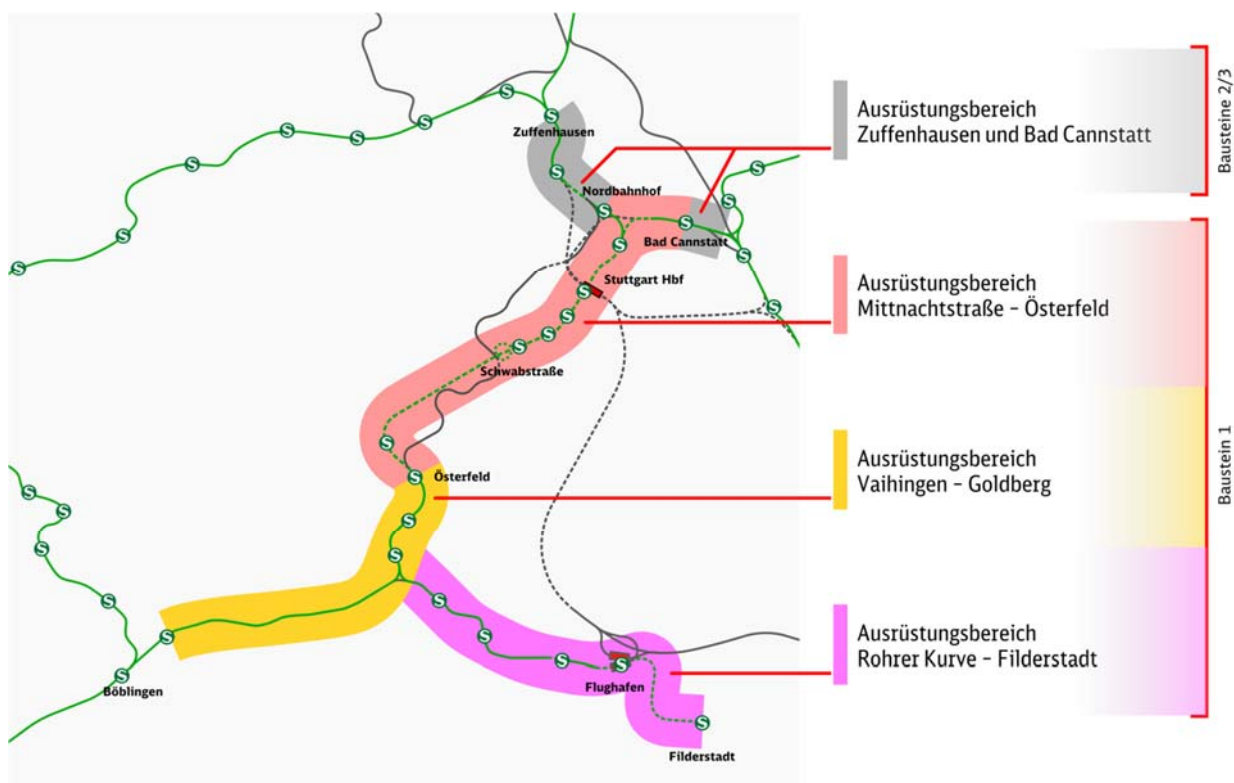


Abbildung 2: Untersuchungsraum der S-Bahn-ETCS-Untersuchung. Stand zunächst die Stammstrecke (Mitnachtstraße bis Schwabstraße) im Fokus, wurden im Rahmen der im März 2018 begonnenen 2. Stufe der Untersuchung auch weitere Ausrüstungsbereiche betrachtet. Die Untersuchung legte den Grundstein für die aus drei Bausteinen bestehende Konzeption des digitalen Knotens Stuttgart (siehe Abschnitt 3.4).

Mindestzugfolgezeiten der verschiedenen Ausrüstungsvarianten in Sekunden

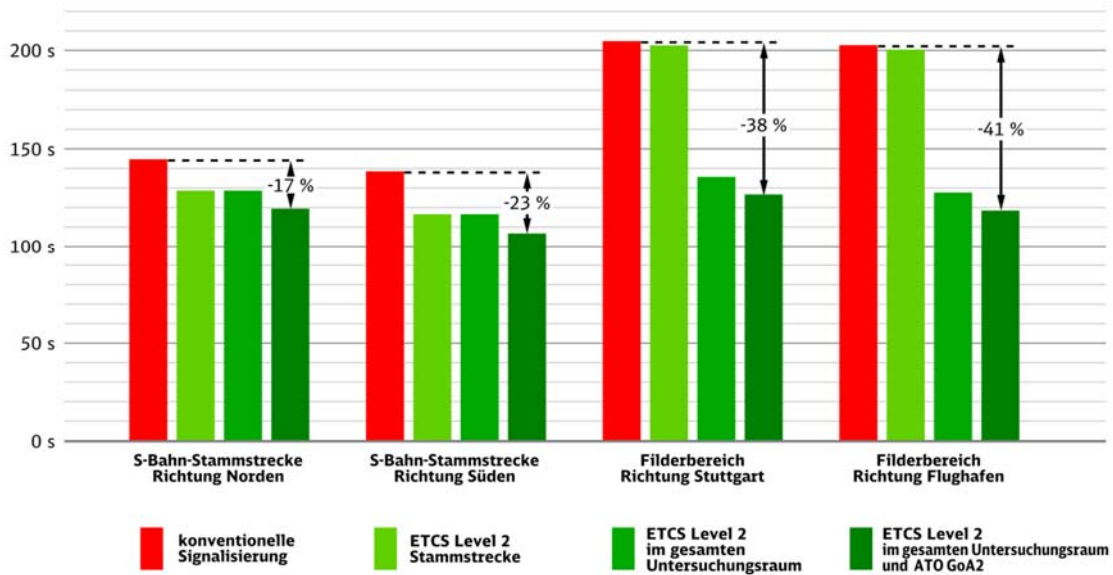


Abbildung 3: Mit ETCS können die Mindestzugfolgezeiten im Vergleich zu konventioneller Leit- und Sicherungstechnik (H/V bzw. Ks in Verbindung mit PZB) um rund 20 Prozent auf 2 Minuten verkürzt werden. Im Umfeld der Stammstrecke können zukünftig 2,5-Minuten-Zugfolgen stabil gefahren werden.

Mittlere Verspätungsänderung über alle Zugfahrten

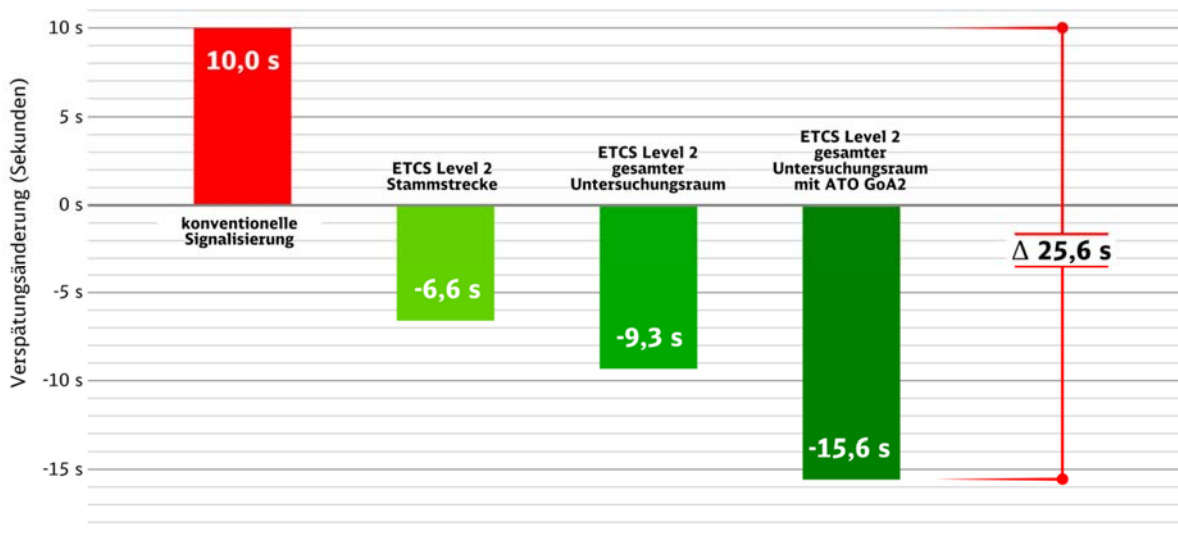


Abbildung 4: Während mit konventioneller Leit- und Sicherungstechnik Verspätungen aufgebaut werden, führt bereits ein einfaches ETCS auf der Stammstrecke zu einem Verspätungsabbau. Eine weitere Ausdehnung des ETCS-Bereichs ermöglicht einen weiteren Verspätungsabbau, der durch automatisierten Fahrbetrieb (ATO GoA 2) weiter verstärkt werden kann.

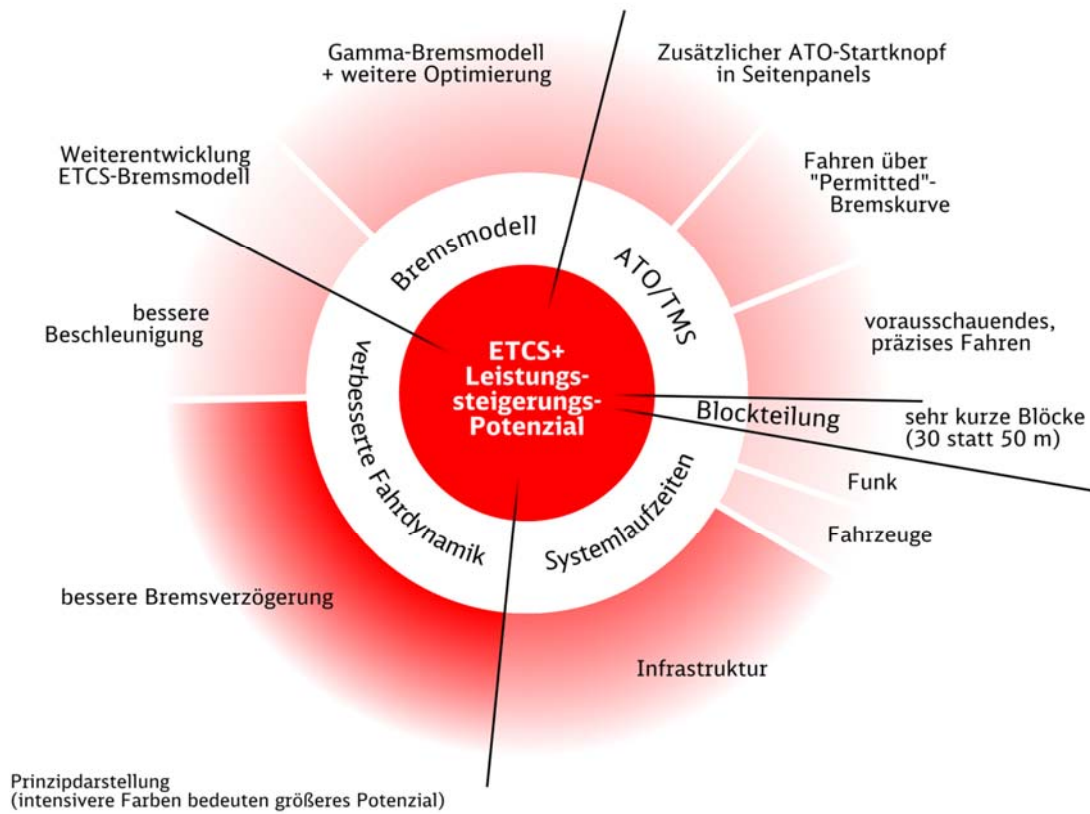


Abbildung 5: Die S-Bahn-ETCS-Untersuchung hat zahlreiche Potentiale für weiterführende Leistungssteigerungen aufgezeigt.

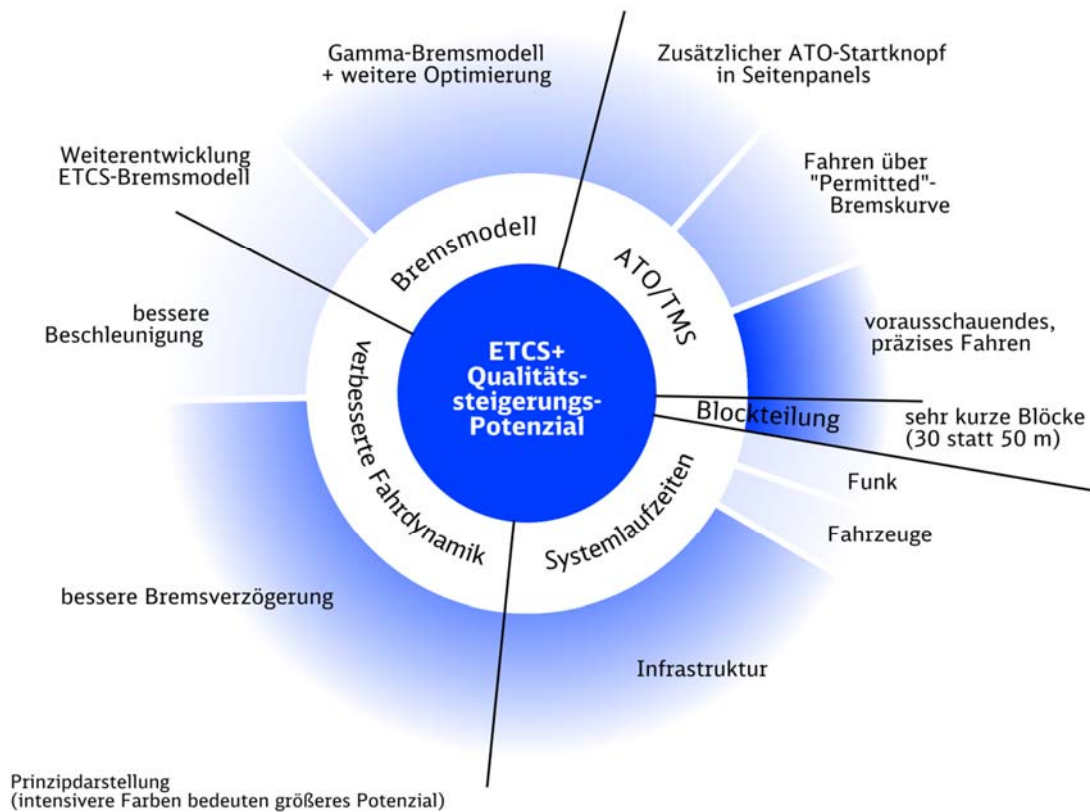


Abbildung 6: Sehr kurze Blöcke sowie vorausschauendes, präzises Fahren entfalten darüber hinaus ein besonders großes Potential zum Verspätungsabbau.

3.3 Bisherige ETCS-Planung im Rahmen von Stuttgart 21 (Nullfall)

Die im Rahmen von Stuttgart 21 neu entstehende Infrastruktur wird in jedem Fall mit ETCS ausgerüstet (Abbildung 7). Die neu entstehenden Stellwerke legen die technische Grundlage für ETCS Level 2. Das Relaisstellwerk Stuttgart Hauptbahnhof, das u. a. die S-Bahn-Stammstrecke steuert, ist sowieso zurückzubauen und durch ein Elektronisches Stellwerk zu ersetzen. Dabei würde per se ein aufwendiger 1:1-Ersatz Leit- und Sicherungstechnik erfolgen, an Stelle der dichten H/V-Lichtsignalisierung aus den 1970er Jahren würde eine Ks-Lichtsignalisierung treten, die dieselbe Leistungsfähigkeit bietet. Die Inbetriebnahme des Gesamtsystems (Fern- und S-Bahn) ist für 2025 vorgesehen.

Im Fokus der bisherigen ETCS-Planung standen die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Aspekte Interoperabilität und Hochgeschwindigkeitsverkehr. Im Rahmen des Projekts war bislang überwiegend Level 2 vorgesehen, teils auch Level 1 (Abbildung 8). ETCS wurde dabei als Aufsatz zu konventioneller Leit- und Sicherungstechnik (Ks, PZB) konzipiert, womit nur ein Teil des Leistungs- und Qualitätspotentials von ETCS gehoben werden kann. Rund 40 Prozent der den neuen Stuttgarter Hauptbahnhof anfahrenenden Züge – der gesamte Fernverkehr sowie der Regionalverkehr über die Neubaustrecke Stuttgart–Ulm – würden in diesem Szenario unter ETCS-Führung verkehren. Der übrige Regional- sowie der gesamte S-Bahn-Verkehr würden mit konventioneller Leit- und Sicherungstechnik fahren.

Verzögerungen in einzelnen Rohbauabschnitten des Projekts eröffnen nun ein kurzes Zeitfenster, an Stelle einer aufwendigen konventionellen Leit- und Sicherungstechnik Lösungen nach dem modernsten Stand der Technik zum Einsatz zu bringen.

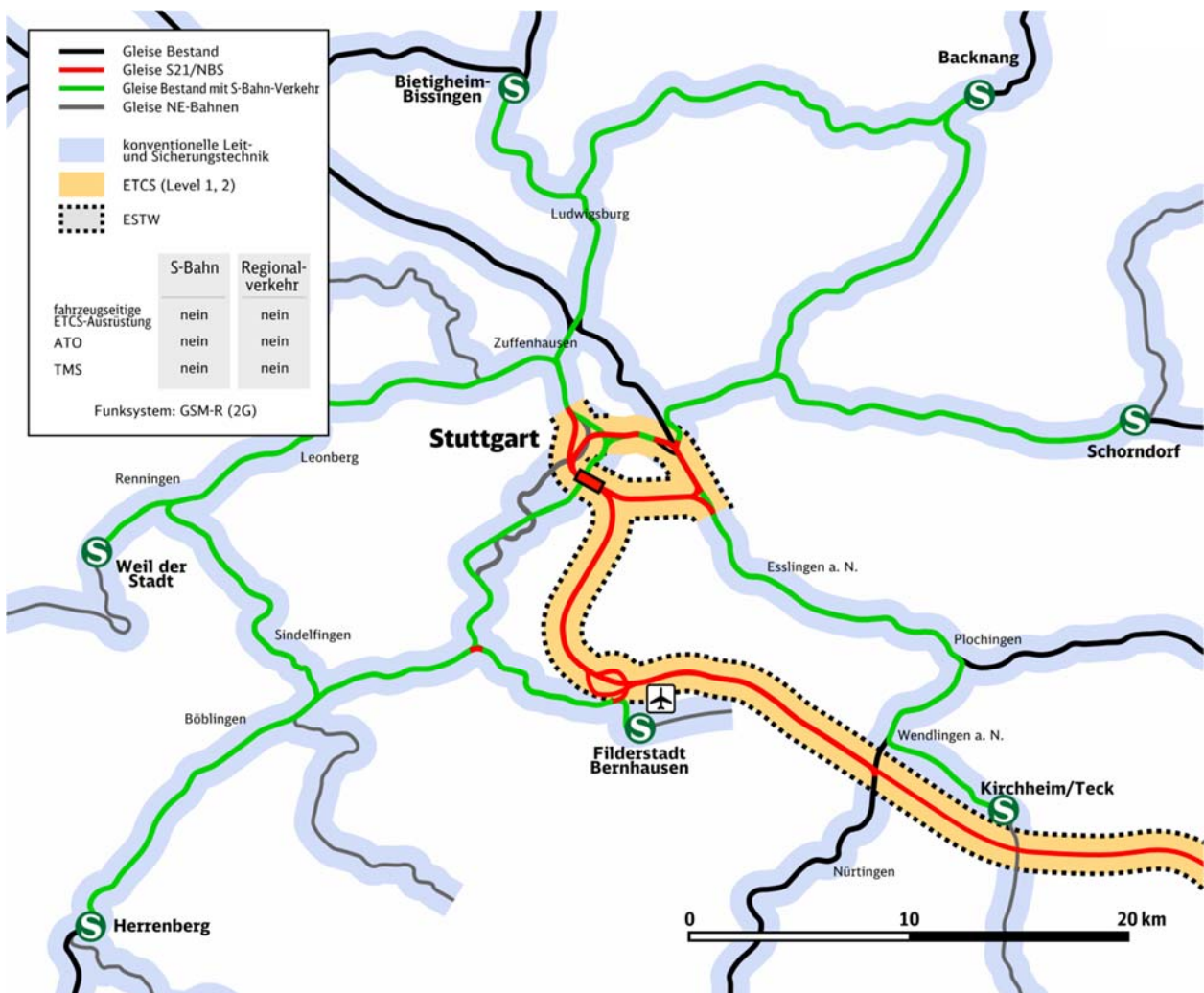


Abbildung 7: Die im Rahmen des Bahnprojekts Stuttgart–Ulm neu entstehende Infrastruktur (rot) wird in jedem Fall mit ESTW und ETCS (Level 1 und 2, orange) ausgerüstet. Weiterführende Optimierungen wie automatisierter Fahrbetrieb (ATO) sowie ein hochentwickeltes Verkehrsleitsystem (TMS) sind nicht vorgesehen. Für S-Bahnen und Regionalzüge wird eine zusätzlich eine sehr leistungsfähige konventionelle Leit- und Sicherungstechnik hergestellt. Dieser „Nullfall“ bildet die Basis für die Knotenkonzeption.

ETCS als Träger für Leistungs- und Qualitätssteigerungen im Knoten Stuttgart

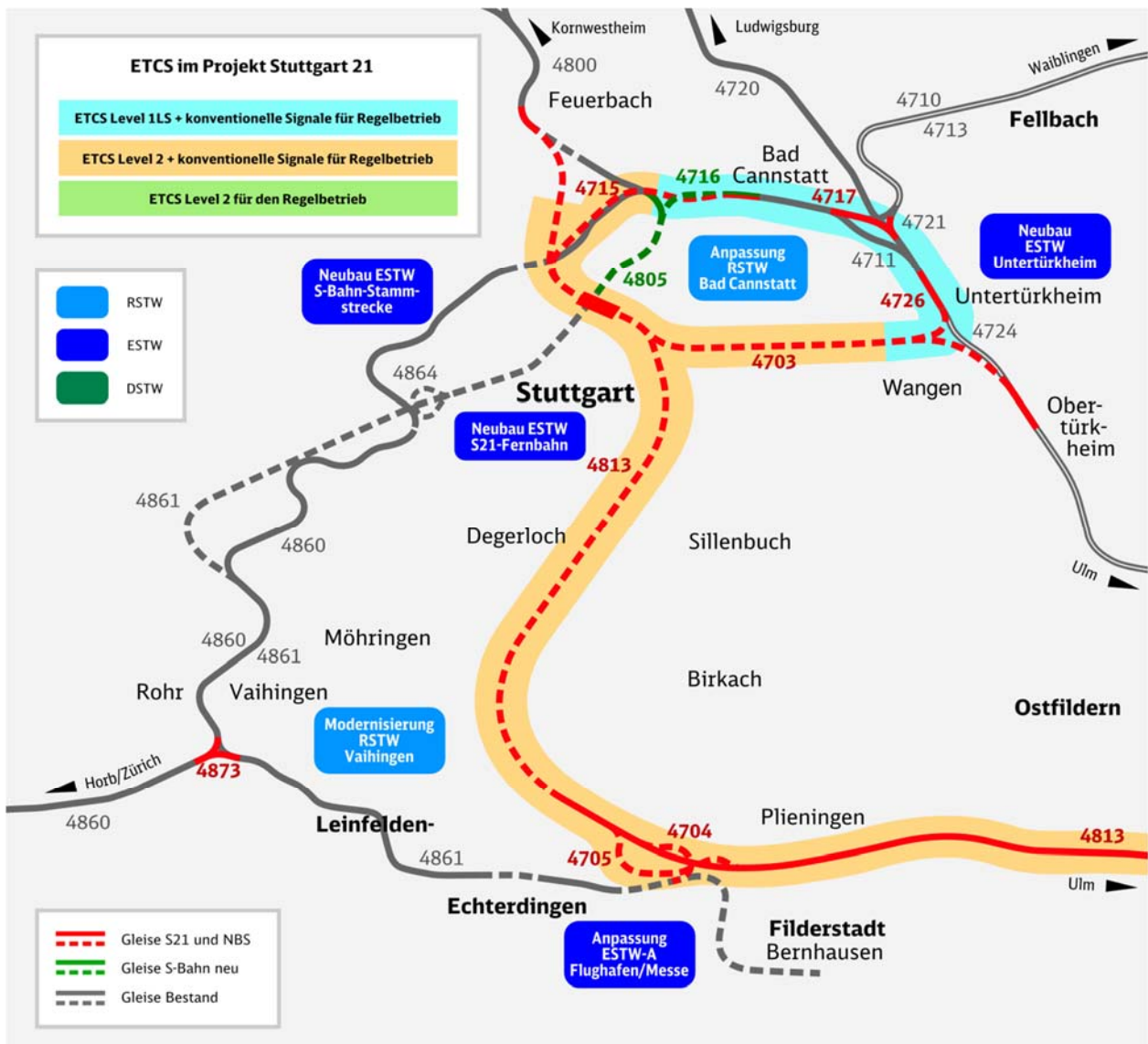


Abbildung 8: Im Rahmen von Stuttgart 21 entstehen neue ESTW (u. a. für die S-Bahn-Stammstrecke), bestehende Relaisstellwerke (RSTW) müssen umfassend angepasst werden. Aus technischen Gründen kann im Bereich von RSTW dabei nur ETCS Level 1 hergestellt werden, das keine Leistungssteigerungen erlaubt.

3.4 Drei-Baustein-Strategie zum digitalen Knoten Stuttgart

3.4.1 Baustein 1: S-Bahn-ETCS

Aus der vor dem Abschluss stehenden S-Bahn-ETCS-Studie ging die Empfehlung für eine Ausrüstung der S-Bahn-Stammstrecke mit Erweiterungen bis Böblingen-Goldberg sowie nach Filderstadt-Bernhausen (einschließlich Flughafen) hervor. Daraus wurde der in Abbildung 9 dargestellte Baustein 1 der Drei-Baustein-Strategie gebildet, der Stuttgart 21 erweitert und ergänzt.

Während auf der Stammstrecke mit ETCS eine deutlich bessere Betriebsqualität realisiert werden kann, ebnet die Ausrüstung der südlich daran anschließenden Bereiche, zusätzliche Züge beispielsweise bis Stuttgart-Vaihingen oder zum Flughafen fahren zu lassen.

An das ohnehin vorgesehene neue Stellwerk der Stammstrecke würde eine deutlich reduzierte Zahl von konventionellen (Ks-)Lichtsignalen angebunden werden, die damit verbundenen Einsparungen im Projektbudget von Stuttgart 21 bilden den Grundstock für die Finanzierung.

Um die technische Grundlage für ETCS Level 2 auch im südlichen Anschluss herzustellen, ist das Relaisstellwerk Stuttgart-Vaihingen durch ein ESTW/DSTW zu ersetzen. Die S-Bahn-Bestandsflotte – 157 Triebzüge der Baureihen 423 und 430 – ist dabei ebenso mit ETCS nachzurüsten wie rund 50 zusätzliche Triebzüge, um zusätzliche Verkehre zu fahren, die durch ETCS erst möglich werden. Der Aufgabenträger (VRS) will die Fahrzeuge darüber hinaus für automatisierten Fahrbetrieb mit Triebfahrzeugführer (ATO GoA 2) ausrüsten. Der Aufwand für die Infrastruktur des Bausteins 1 beträgt 160 Mio. Euro, zzgl. Kosten der Fahrzeugausrüstung.

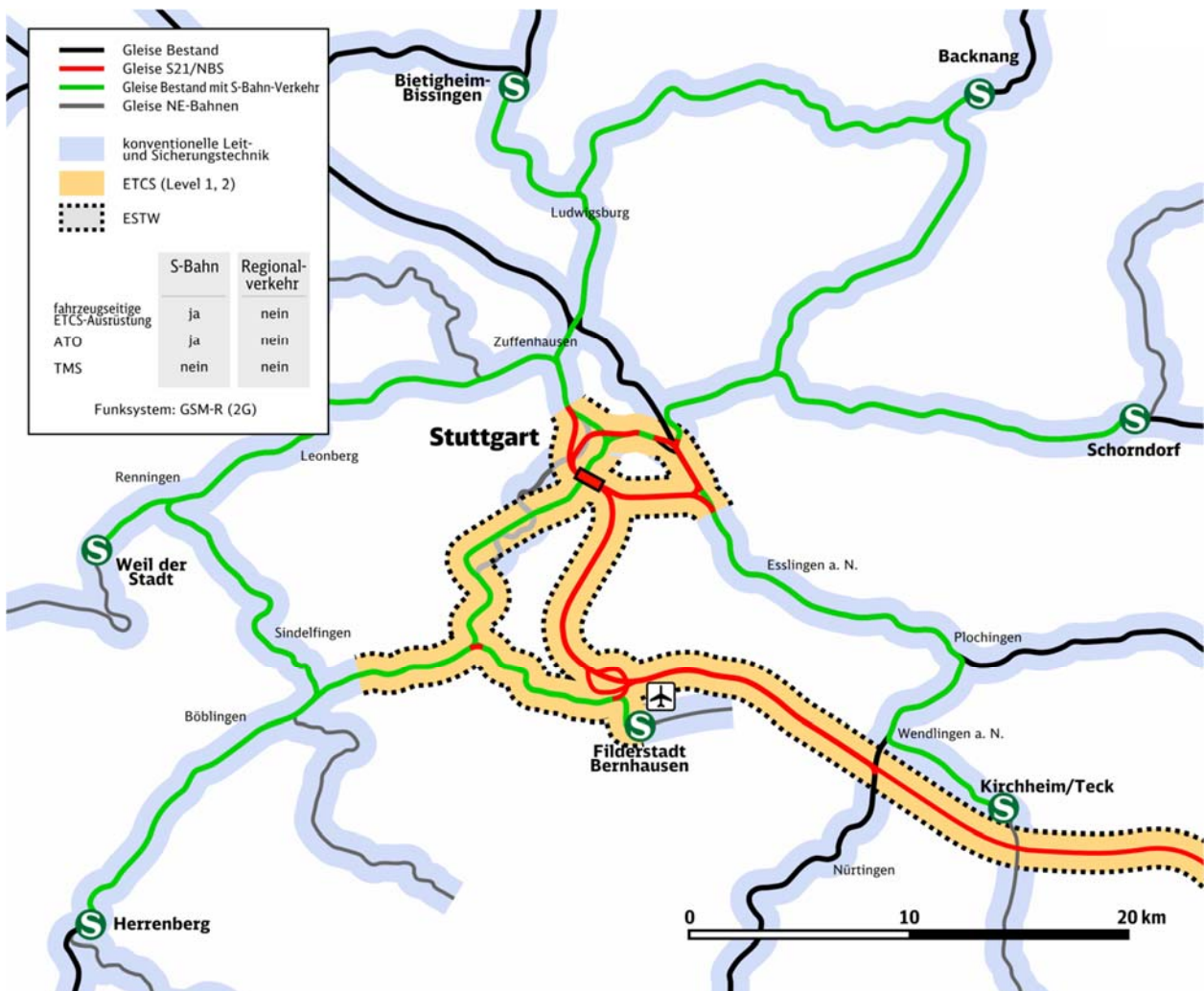


Abbildung 9: Die Empfehlungen der S-Bahn-ETCS-Studie mündeten in den Baustein 1 der Konzeption des digitalen Knotens Stuttgart. Während der Ausrüstungsbereich und -Umfang des Bahnprojekts Stuttgart – Ulm (rot) unverändert ist (teils noch Relaisstellwerke, teils noch ETCS Level 1), wird die S-Bahn-Stammstrecke und ihre Erweiterung bis in den Flughafenbereich bzw. bis Böblingen mit ETCS Level 2 ausgerüstet. Aus technischen Gründen muss das südlich an die Stammstrecke anschließende Stellwerk Relaisstellwerk Vaihingen vorzeitig durch ein ESTW ersetzt werden. Damit einher geht die Ausrüstung der gesamten S-Bahn-Flotte mit ETCS und ATO. ETCS als Träger für Leistungs- und Qualitätssteigerungen im Knoten Stuttgart

3.4.2 Baustein 2: ETCS als führendes Leit- und Sicherungssystem im Knoten Stuttgart

Um die betrieblichen und verkehrlichen Potentiale von ETCS im Knoten Stuttgart vollumfänglich zu heben, ist die Ausrüstung von Regionalzügen mit ETCS erforderlich. Fahrzeugseitig wären damit alle den neuen Stuttgarter Hauptbahnhof anfahrennden Triebfahrzeuge mit ETCS ausgerüstet – infrastrukturseitig wäre eine konventionelle Leit- und Sicherungstechnik für den Regelbetrieb dann nicht mehr nötig. Infolgedessen könnte auf den Aufbau zahlreicher Licht-Hauptsignale verzichtet werden, der entsprechende Anteil am Budget von Stuttgart 21 für eine umso leistungsfähigere Lösung mit ETCS als führendem Leit- und Sicherungssystem verwendet werden. Der gesamte engere Knotenbereich, einschließlich des Ringsystems mit dem Abstellbahnhof, wäre dann durchgehend mit ETCS Level 2 ausgerüstet. Im Ergebnis entsteht der in Abbildung 10 dargestellte Baustein 2 der Knotenkonzeption.

Um eine Lücke im Level-2-System zu vermeiden, ist das Relaisstellwerk Stuttgart-Bad Cannstatt durch ein ESTW/DSTW zu ersetzen und rund 200 Triebzüge bzw. Lokomotiven des Regionalverkehrs aus wenigstens elf Baureihen mit ETCS nachzurüsten (u. a. diverse „Flirt“- und „Talent“-Varianten). Dabei ist seitens des Aufgabenträgers (Land Baden-Württemberg) ebenfalls eine Ausrüstung mit ATO GoA 2 vorgesehen.

Der Baustein 2 ergänzt und erweitert nochmals Stuttgart 21 und soll zusammen mit dem Projekt Ende 2025 in Betrieb gehen. Die Kosten für Infrastrukturausrüstung betragen insgesamt 140 Millionen Euro, zzgl. Kosten der Fahrzeugausrüstung.

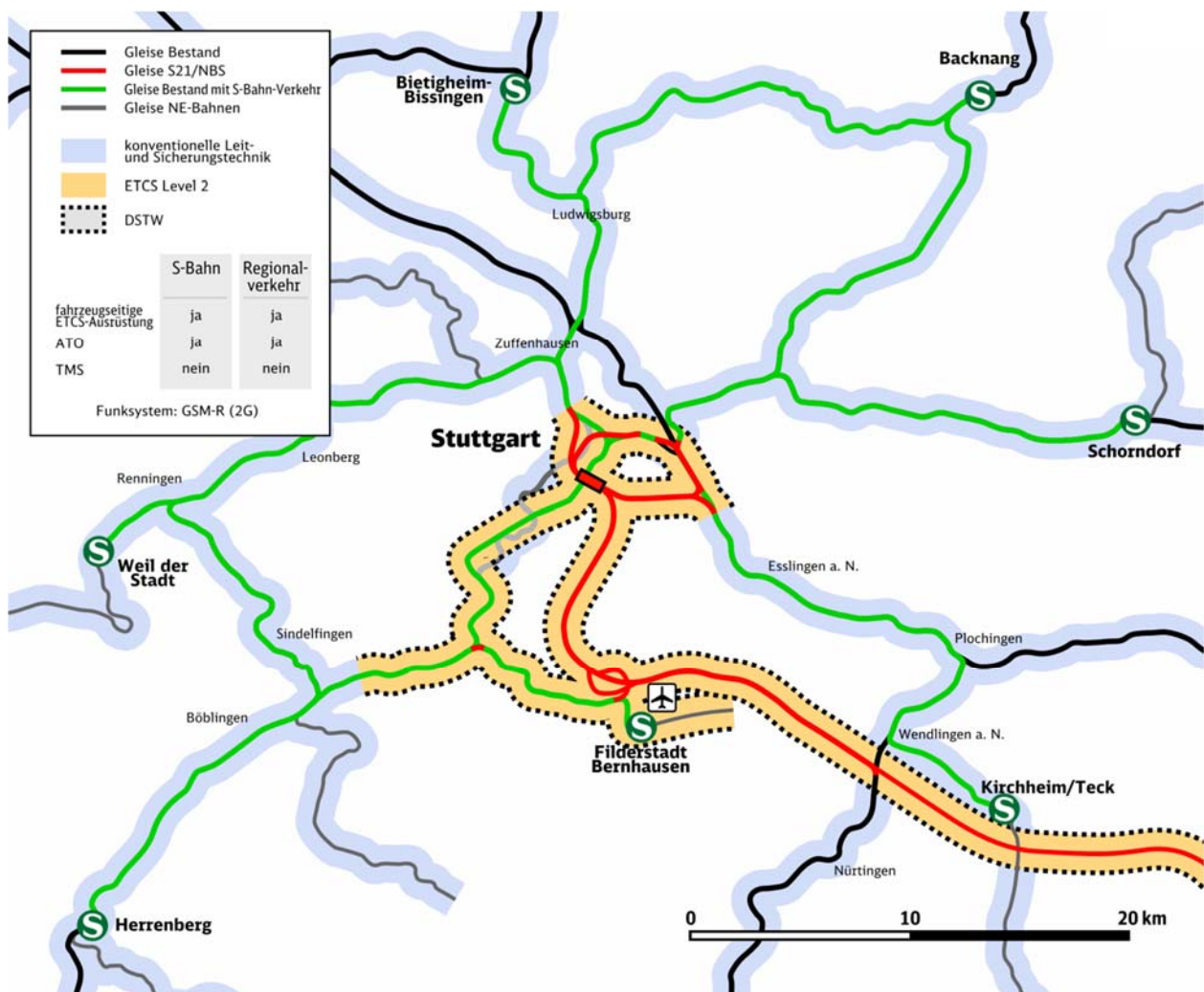


Abbildung 10: Die Ausrüstung des Regionalverkehrs mit ETCS ebnet den Weg für eine auf ETCS fokussierte Planung im Bahnprojekt Stuttgart – Ulm. Bei vergleichbaren Kosten können zahlreiche (vergleichsweise aufwendige) Lichtsignale entfallen und durch eine dichte Folge virtueller Signale für ETCS ersetzt werden. Für den gesamten Ausrüstungsbereich wird ein Digitales Stellwerk (DSTW) errichtet, das auch das Relaisstellwerk Bad Cannstatt ersetzt, um eine durchgängige Ausrüstung mit ETCS Level 2 zu gewährleisten. Die Inbetriebnahme des Gesamtsystems ist, zusammen mit Stuttgart 21, 2025 geplant.

3.4.3 Baustein 3: Ausrüstung des übrigen S-Bahn-Netzes

Wenn alle im Knoten Stuttgart verkehrenden Triebfahrzeuge mit ETCS ausgerüstet sind, ist die Modernisierung der übrigen Infrastruktur der gebotene finale Schritt der Knotenstrategie. Dabei werden zahlreiche weitere, zumeist störungsanfällige und technisch abgängige Altstellwerke – sämtliche verbliebene Stellwerke im Bereich des S-Bahn-Netzes – durch Digitale Stellwerke ersetzt. Auf den Aufbau einer dichten konventionellen Lichtsignalisierung könnte aufgrund der durchgehenden Fahrzeugausrüstung zu Gunsten von ETCS verzichtet werden und die sich daraus ergebenden Einsparungen für ETCS-Optimierungen verwendet werden.

Die räumliche Ausdehnung geht dabei mit der Einführung weiterer Techniken einher: DSTW, ETCS und ATO ebnen den Weg für ein effektives, hochentwickeltes Verkehrsleitsystem (TMS), das in Verbindung mit neuem, schnellen Funk (FRMCS/5G) ermöglicht, sämtliche Züge anhand der laufend aktualisierten Betriebslage präzise fernzusteuern. (Der Triebfahrzeugführer ist weiterhin an Bord, es fährt in der Regel jedoch ein „Autopilot“.) (Abbildung 11, Abschnitt 6.2)

Um die geforderte Verdichtung des 15-Minuten-S-Bahn-Takts zum 10-Minuten-Takt mit möglichst geringem Infrastrukturaufwand und möglichst zeitnah umzusetzen, wäre die Realisierung des Bausteins 3 eine wesentliche Grundvoraussetzung.

Der Baustein kostet eine Milliarde Euro – dagegen steht der Aufwand, der für den Ersatz der Alttechnik in konventioneller Leit- und Sicherungstechnik ohnehin erforderlich wäre.

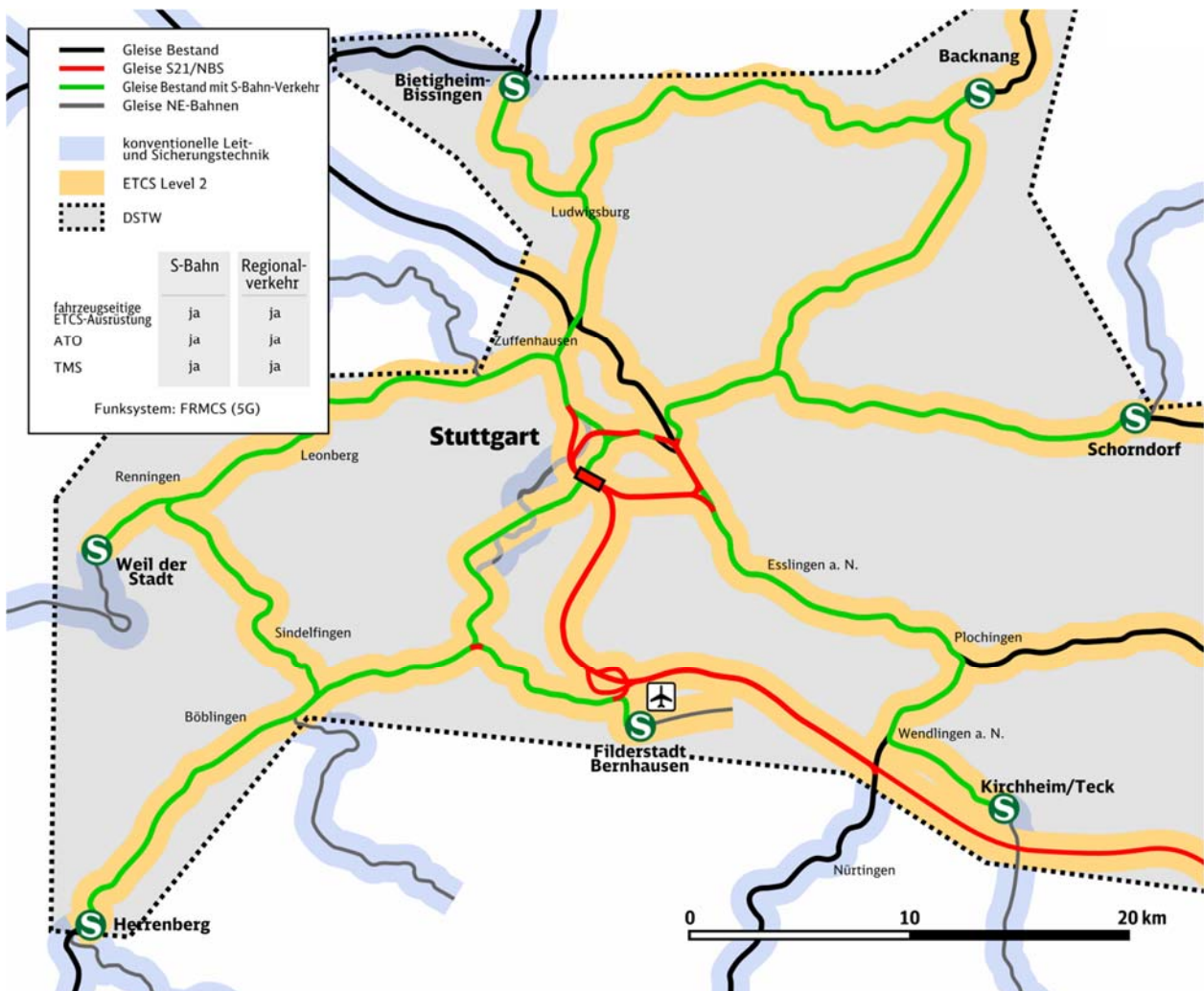


Abbildung 11: Nachgelagert zur Inbetriebnahme von Stuttgart 21 soll das gesamte Stuttgarter S-Bahn-Netz (rund 230 Streckenkilometer) mit ETCS Level 2 ausgerüstet werden. Die flächendeckende Ausrüstung der beiden Netzbezirke Stuttgart und Plochingen Digitalen Stellwerken bildet dafür die Basis. In Verbindung mit dem zukünftigen Bahnbetriebsfunk (FRMCS/5G) werden alle Regionalzüge und S-Bahnen im gesamten Bereich ferngesteuert. Ein hochentwickeltes Verkehrsleitsystem (TMS) optimiert dabei laufend den Betrieb. Die stufenweise Umsetzung wird bis Ende der 2020er Jahre angestrebt.

4 Unmittelbare Kapazitäts- und Qualitätsnutzen von ETCS

Im vorliegenden Abschnitt werden für Leistungsfähigkeit und Betriebsqualität wesentliche Möglichkeiten von ETCS Level 2 vorgestellt, die zur ETCS-Inbetriebnahme im Knoten Stuttgart gesichert zur Verfügung stehen werden.

4.1 Sehr kurze Zugfolgeabschnitte/Signalabstände

Während der Abstand zweier Licht-Hauptsignale mit konventioneller Leit- und Sicherungstechnik auf hochbelasteten Strecken typischerweise ein Kilometer beträgt, können mit ETCS Level 2 nahezu beliebig kurze Zugfolgeabschnitte gebildet werden. Im S-Bahn-Bereich sind dabei Mindestlängen von rund 30 m geplant, um ein möglichst dichtes Nachrücken hinter einem haltenden Zug zu ermöglichen. Abbildung 12 verdeutlicht das Prinzip. Derart kurze „Blöcke“ sind ein wesentlicher Hebel für kürzere Zugfolgezeiten, wie sie in der S-Bahn-ETCS-Untersuchung nachgewiesen wurden (Abbildung 3).

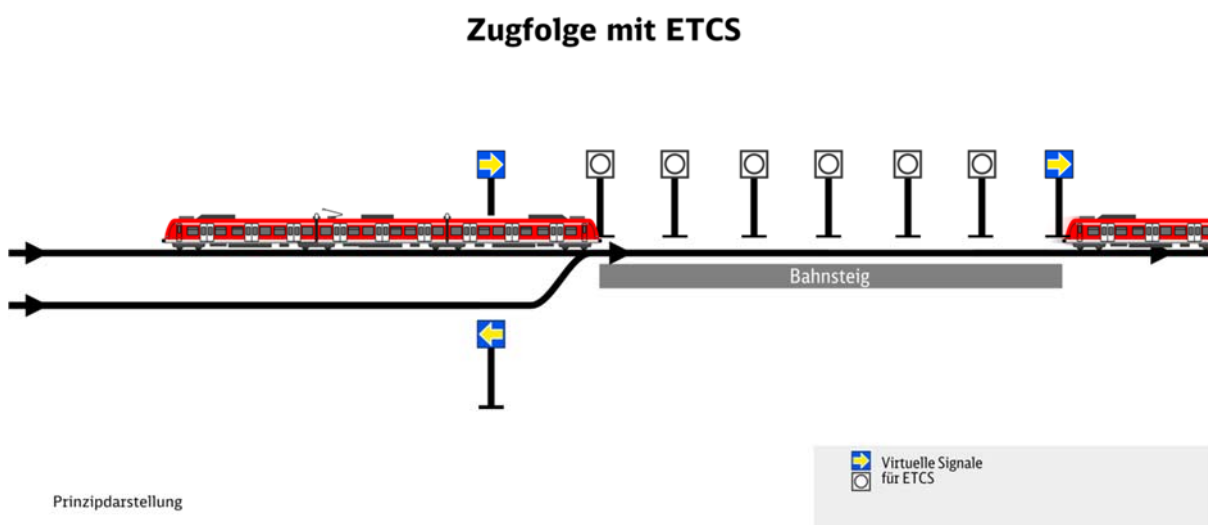


Abbildung 12: Im Betrieb mit ETCS Level 2 sind keine Lichtsignale erforderlich. An Stelle eines vor dem Bahnsteigangang und am Bahnsteigende stehenden Lichtsignals treten einfache Tafeln. Im vorliegenden Beispiel wird der Bahnsteigbereich in sieben kurze Abschnitte unterteilt.

Im Fern- und Regionalverkehrsbereich ist der zu erwartende Effekt aus der Abschnittsbildung gegenüber der S-Bahn wesentlich größer, da die typische Länge der von Lichtsignalen unterteilten Abschnitte in den für die Leistungsfähigkeit kritischen Knotenbereichen aus betrieblich-technischen Gründen in der Regel mindestens rund einen Kilometer betragen muss und dieser mit ETCS nahezu beliebig verkürzt werden kann. Abbildung 13 verdeutlicht den Effekt in Bezug auf Wiederbelegung eines Bahnsteiggleises im neuen Stuttgarter Hauptbahnhof.

Mindestzugfolge bezogen auf ein Bahnsteiggleis im Hauptbahnhof

Prinzipdarstellung der Zugfolge schnellstmöglicher Einfahrten, ohne technische Laufzeiten, ohne Pufferzeiten, ohne ATO

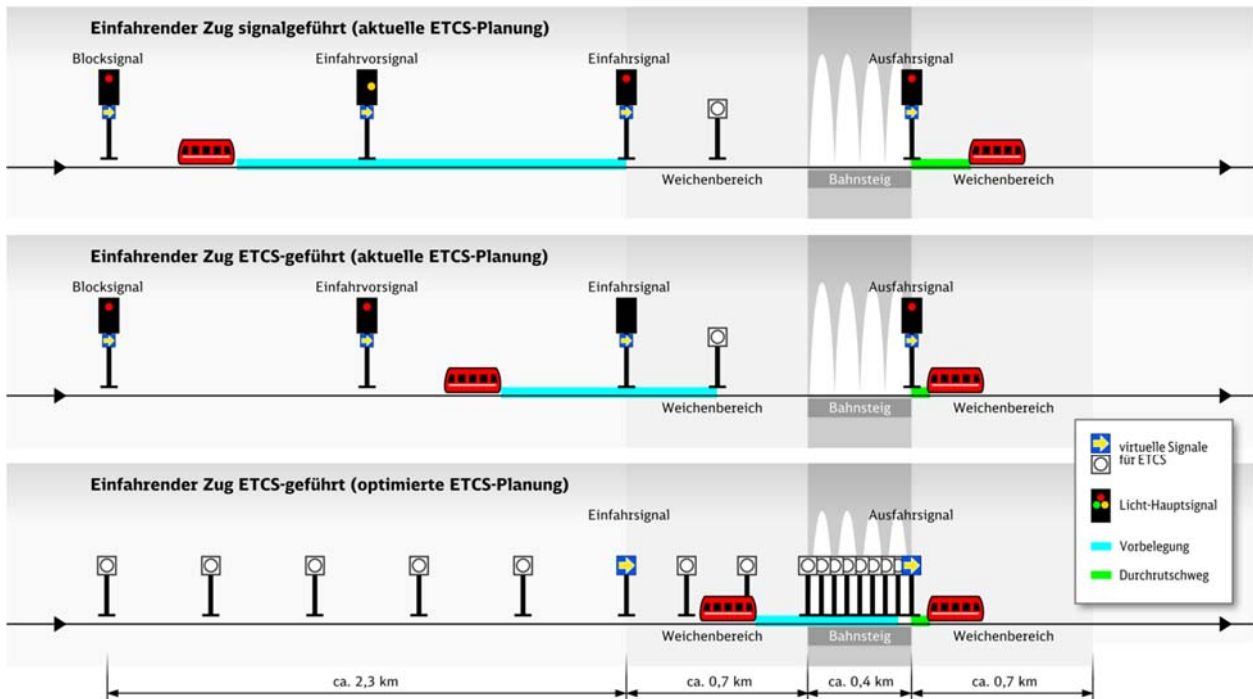


Abbildung 13: Mit konventioneller Signalisierung beträgt der Mindestabstand zweier unbehindert fahrender Züge im neuen Stuttgarter Hauptbahnhof rund 3 km. Mit ETCS kann dieser Abstand auf einen Kilometer reduziert werden.

4.2 Kurze Durchrutschwege

Für schnelle Einfahrten (> 60 km/h) sind in der konventionellen Leit- und Sicherungstechnik 200 m lange Durchrutschwege erforderlich, die im Gefälle auf bis zu 300 m verlängert werden müssen und aufgrund örtlicher Gegebenheiten noch größere Längen erreichen können. Maßgebend dafür ist die in der konventionellen Technik in der Regel nur punktuell mögliche Geschwindigkeitsüberwachung, die entsprechend große Sicherheitsräume für den Fall einer zu schnellen Annäherung an das Zielsignal erfordert.

Dem gegenüber werden in Deutschland für ETCS Level 2 maximal 70 m lange Durchrutschwege in Anspruch genommen. Grundlage ist die kontinuierliche, präzise Überwachung des Zuges, mit der zu schnelle Annäherungen an einen Halt jederzeit zuverlässig unterbunden werden.

Während im neuen Stuttgarter Hauptbahnhof beispielsweise für schnelle Einfahrten aus dem Gefälle von Süden (Flughafen/Filder) rund 300 m lange Durchrutschwege erforderlich sind, reichen für schnelle Einfahrten mit ETCS die kürzesten vorgesehenen Durchrutschwege von rund 60 m aus. Diese sind stets so kurz, dass sie vor der ersten Weiche enden, die von einer parallelen Ausfahrt in Anspruch genommen werden. Der Betrieb wird durch parallele Fahrmöglichkeiten wesentlich flexibilisiert. Abbildung 14 verdeutlicht das Prinzip.

Um lange Durchrutschwege und die damit verbundenen Ausschlüsse für andere Fahrmöglichkeiten (Fahrstraßen) zu vermeiden, werden im Fahrplan in der Regel langsamere Einfahrten mit kürzerem Durchrutschweg geplant (z. B. 60 km/h mit 100 m Durchrutschweg). Schnelle Einfahrten mit ETCS führen damit zu kürzeren Fahrzeiten oder schaffen zusätzliche Fahrzeitreserven – zu Gunsten der Betriebsqualität.

Bei neuen Gleisanlagen, die mit ETCS als vorrangigem Leit- und Sicherungssystem geplant werden, führen insgesamt wesentlich kürzere Durchrutschwege zu einer flexibleren Spurplangestaltung. Beispielsweise können Signale damit näher an Weichen herangerückt werden und mit zusätzlicher Entwicklungslänge zusätzlicher Spielraum für die Spurplangestaltung gewonnen werden.

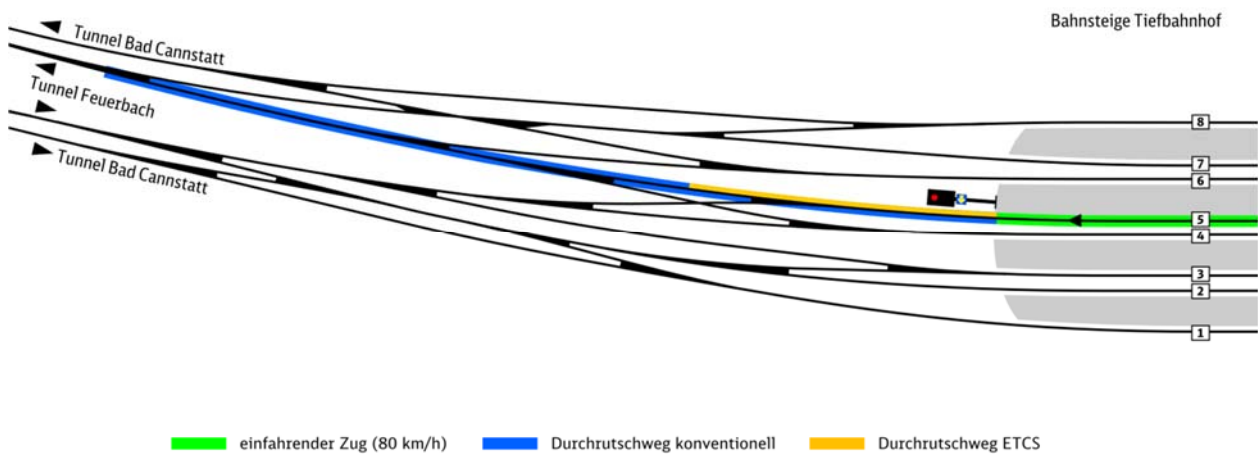


Abbildung 14: Während für eine schnelle konventionelle Einfahrt aus dem Gefälle der lange Durchrutschweg (blau) in Anspruch genommen werden muss, kann mit ETCS bei gleicher Einfahrtsgeschwindigkeit ein kurzer Durchrutschweg (gelb) eingestellt werden. Damit bleibt beispielsweise die Möglichkeit einer parallelen Ausfahrt aus den Gleisen 6 bis 8 Richtung Feuerbach erhalten.

4.3 Präzise Geschwindigkeiten

Während in der konventionellen Leit- und Sicherungstechnik Geschwindigkeitswechsel nur an Signalen und typischen Mindestabständen von einigen hundert Metern signalisiert werden dürfen, können mit ETCS Level 2 nahezu beliebig feine Geschwindigkeitsabstufungen definiert werden. ETCS „kennt“ dabei metergenau die in einzelnen Gleisen zulässige Geschwindigkeit, einschließlich der einzelnen Weichen und stellt deren Einhaltung jederzeit sicher.

Die folgenden Grafiken verdeutlichen die Effekte anhand von Beispielen im Projekt Stuttgart – Ulm. Bei einer typischen Fahrt durch den mit ETCS ausgerüsteten Knoten werden in Summe Fahrzeiten um einige Zehntelminuten verkürzt und somit zusätzliche Reserven im Betrieb geschaffen.

Im Übrigen können auch „krumme“ Geschwindigkeiten – ganzzahlige Vielfache von 5 statt 10 km/h – signalisiert und damit punktuelle Geschwindigkeitserhöhungen umgesetzt werden.

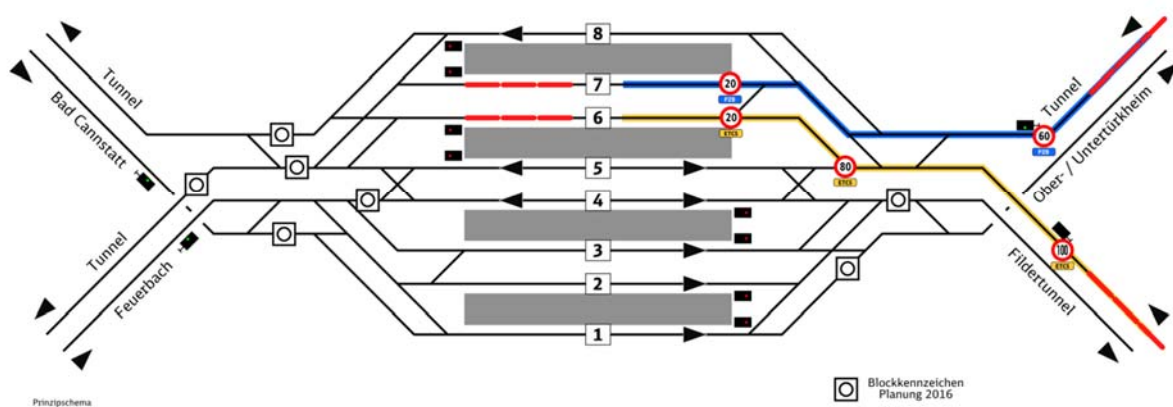


Abbildung 15: Vergleich einer konventionellen Einfahrt (blau) mit einer ETCS-Einfahrt (gelb) in teilbesetzte Gleise des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs. Während konventionell bereits ab dem Einfahrtssignal (0,7 km vor dem Bahnsteig) die Geschwindigkeit der am langsamsten befahrenen Weiche signalisiert und gefahren werden muss, führt ETCS den einfahrenden Zug gezielt erst zur entsprechenden Weiche auf die Zielgeschwindigkeit herunter. Bei der konventionellen Einfahrt leuchtende Lichtsignale werden dabei für ETCS-Einfahrten dunkelgeschaltet.

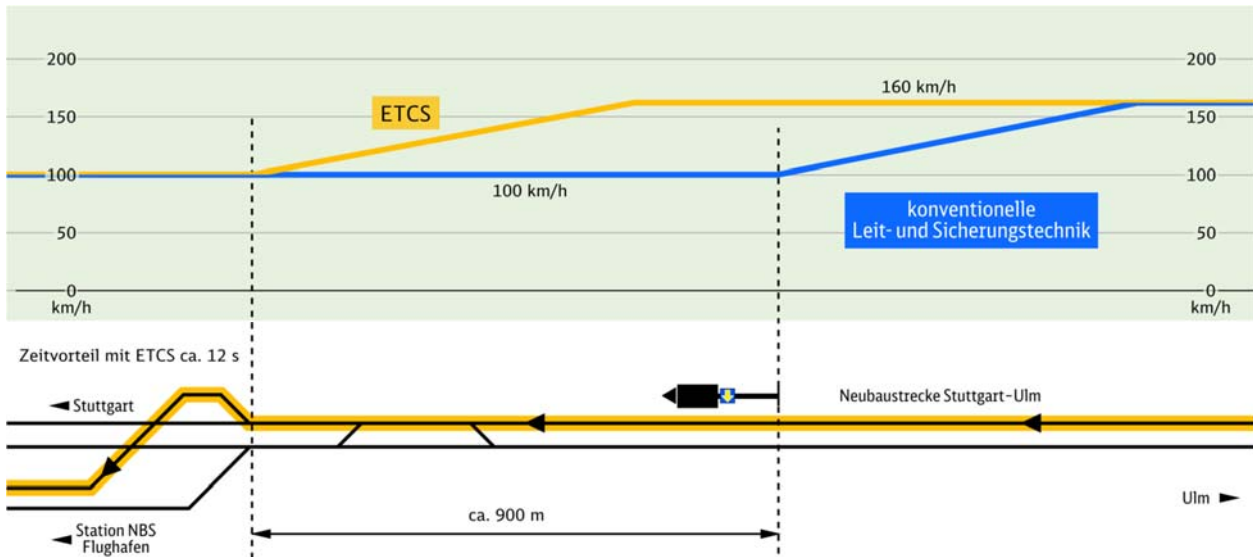


Abbildung 16: Während in konventioneller Leit- und Sicherungstechnik Züge in Richtung Station NBS (Flughafen) ab dem deckenden Licht-Hauptsignal die an der 0,9 km später folgenden Weiche zulässigen 100 km/h fahren müssen, werden sie mit ETCS gezielt zur Weichenspitze auf diese Geschwindigkeit heruntergeführt. Damit kann bis zu rund 0,9 km länger mit 160 statt 100 km/h gefahren werden, entsprechend einer rund 12 s kürzeren Fahrzeit. Durch die schnellere Räumung der Neubaustrecke wird ferner deren Kapazität erhöht.

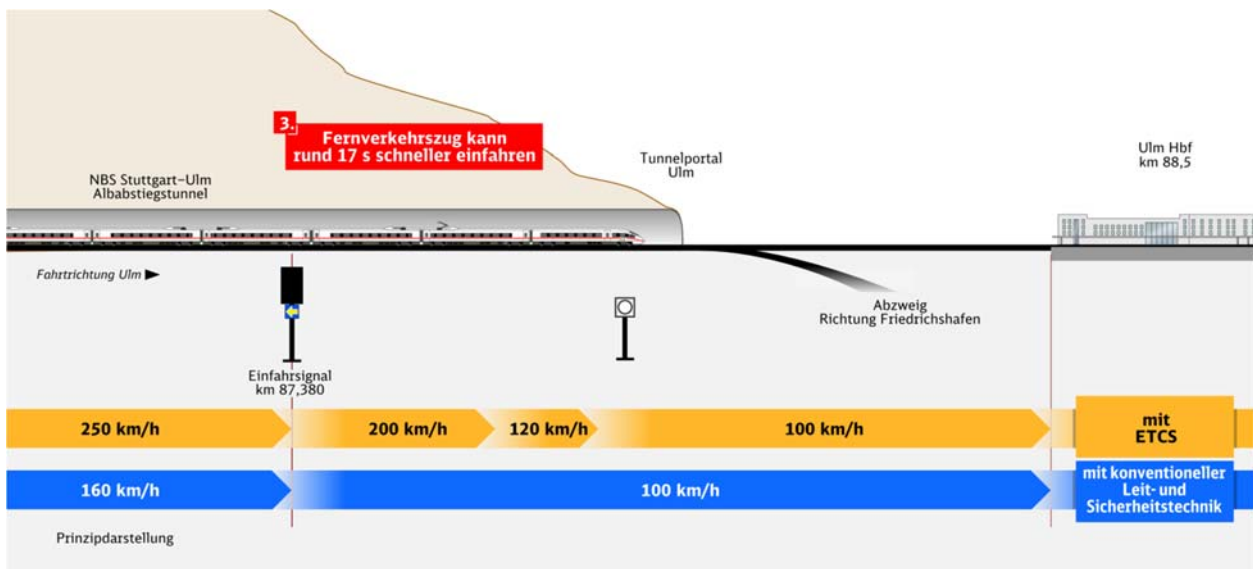


Abbildung 17: Während zulässige Geschwindigkeiten mit konventioneller Leit- und Sicherungstechnik nur in gewissen Mindestabständen signalisiert werden dürfen, können mit ETCS Geschwindigkeiten nahezu beliebig fein gestaffelt werden können. Damit können die tatsächlichen Möglichkeiten der Infrastruktur besser genutzt werden. Die Abbildung zeigt die Effekte, die durch eine Ausdehnung des heute am „Einfahrtsignals“ endenden ETCS-Bereichs der aus Stuttgart kommenden Neubaustrecke in Ulm entstehen würden. Die Einfahrt wird um eine Viertelminute beschleunigt.

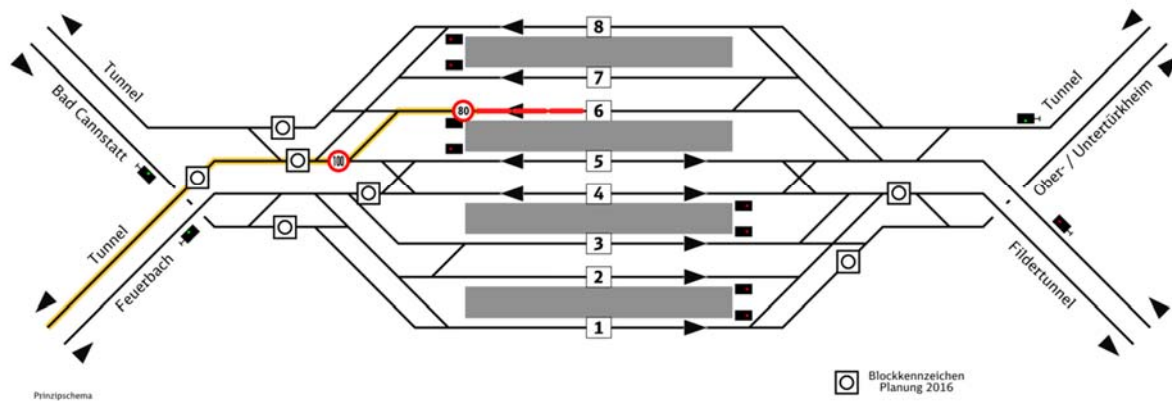


Abbildung 18: Bei Ausfahrten aus dem Bahnhof ermöglicht ETCS, früher zu beschleunigen. Während bei konventioneller Leit- und Sicherungstechnik in der Regel erst nach Räumung der letzten Weiche mit der letzten Achse des Zuges beschleunigt werden darf, erlaubt ETCS zu beschleunigen, sobald die entsprechende Weiche geräumt wurde. Bei einer Ausfahrt aus Gleis 6 des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs Richtung Feuerbach/Mannheim kann somit 0,2 km früher beschleunigt werden.

4.4 Fahrzeugspezifische Bremskurven

ETCS-geführte Fahrzeuge berechnen ihren Bremsweg anhand ihres Bremsvermögens selbst. Der Bremseninsatzpunkt ergibt sich damit nicht mehr aus dem Standort von Vorsignalen, sondern aus fahrzeugspezifischen Möglichkeiten und Erfordernissen. Besonders gut bremsende (Regional-)Fahrzeuge können damit in dichterem Abstand fahren als bei konventioneller Leit- und Sicherungstechnik.

4.5 Bremswege über mehrere Zugfolgeabschnitte hinweg

Während bei konventioneller Leit- und Sicherungstechnik ein Zug stets zwischen Vor- und Hauptsignal zum Stehen kommen muss, können bei ETCS Level 2 Bremswege über mehrere derartige Abschnitte hinweg gebildet werden (Abbildung 19). Damit können beispielsweise Züge mit moderatem Bremsvermögen im Gefälle mit fahrzeug- bzw. streckenseitiger örtlich zulässiger Geschwindigkeit verkehren.

Güterzüge können damit beispielsweise vielfach 120 statt etwa 100 km/h fahren und sich damit besser in den Geschwindigkeitsmix mit schnellen Personenzügen integrieren, womit mehr Kapazität für nachfolgende Züge geschaffen wird. S-Bahnen können im steilen Abschnitt zwischen Universität und Schwabstraße 100 statt 80 km/h fahren und allein damit bei Bedarf mehr als eine halbe Minute Verspätung aufholen. Mit der höheren Geschwindigkeit einher geht eine längere Vorbelegung.

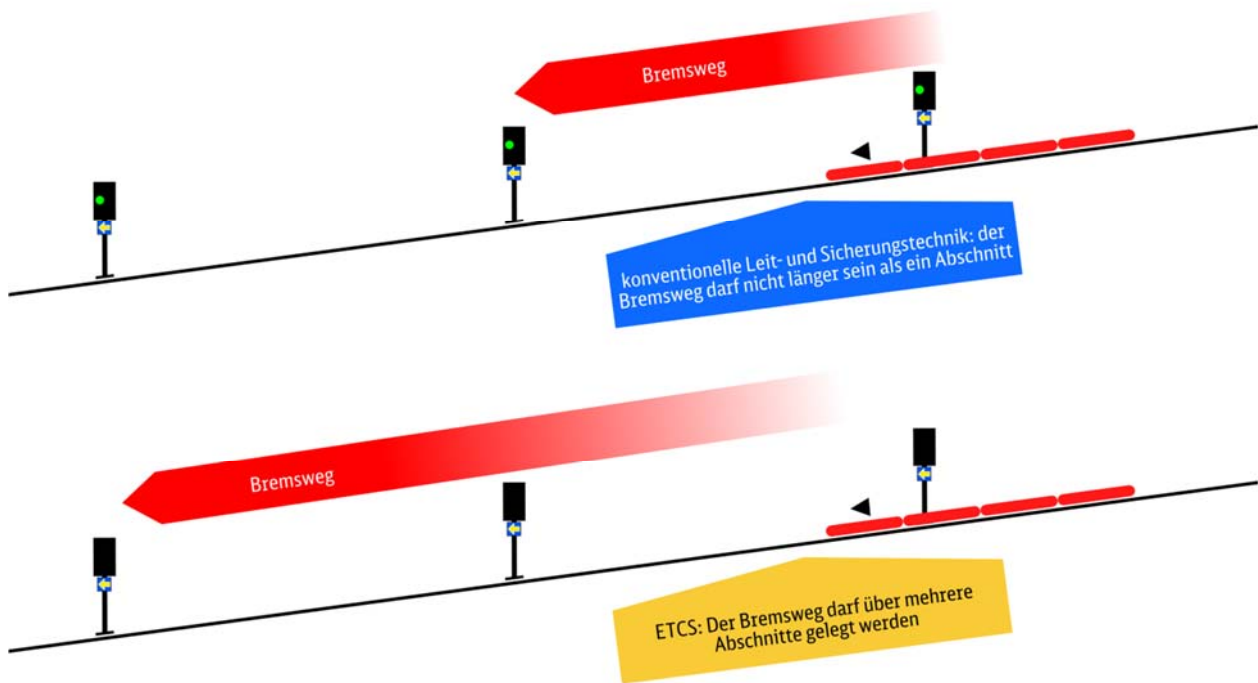


Abbildung 19: Durch die Bildung von Bremswegen über mehrere Abschnitte hinweg können beispielsweise im Gefälle größere Geschwindigkeiten auch von Zügen mit geringerem Bremsvermögen erreicht werden.

4.6 Entfall der PZB-Restriktionen

Einfahrten in große Bahnhöfe erfolgen zumeist auf „Halt“ zeigendes Ausfahrtsignal. Bei der nur punktuell (punktförmig) wirkenden konventionellen Leit- und Sicherungstechnik beschränkt eine 500-Hz-Beeinflussung die Geschwindigkeit bei der Ausfahrt auf zunächst auf 25 km/h, um eine schnelle Anfahrt gegen ein möglicherweise noch „Halt“ zeigendes Ausfahrtsignal zu verhindern. Bei ETCS hat der Zug in derselben Situation dagegen längst per Funk eine Fahrerlaubnis für eine Ausfahrt ohne eine derartige Geschwindigkeitsbeschränkung erhalten. (Abbildung 20)

Ein ähnlicher Effekt tritt nach einem Fahrtrichtungswechsel auf. In der Regel kennt ETCS auch nach einem Fahrtrichtungswechsel (aus Eurobalisen und Odometrie, Abbildung 1) noch den genauen Standort des Zuges und kann über die Funkverbindung eine Fahrerlaubnis anfordern. Eine pauschale Geschwindigkeitsbegrenzung nach Fahrtrichtungswechsel, wie in der konventionellen Leit- und Sicherungstechnik, ist damit nicht nötig (Abbildung 21). Im Gegensatz zur konventionellen Technik (PZB, LZB) können ferner auch kurze Abschnitte (Teilblöcke/Teilfahrstraßen) nach Fahrtrichtungswechsel befahren werden. Die Räumung längerer Abschnitte (Ganzblock/Fahrstraße) durch einen vorausfahrenden Zug muss nicht abgewartet werden – damit sind insbesondere in großen Knoten erheblich dichtere Zugfolgen möglich.

Im Übrigen entfällt auch die bei schnell fahrenden Regionalzügen besonders hemmende 1000-Hz-Beeinflussung mit ETCS. Sobald ein vorausliegender Abschnitt frei von Zügen ist, wird dem folgenden Zug dies mitgeteilt. Eine zwingend notwendige Absenkung der Geschwindigkeit bei „Halt erwarten“ zeigendem Vorsignal von bis zu 160 km/h auf höchstens 85 km/h, um anschließend wieder zu beschleunigen, ist nicht notwendig. (Abbildung 22)

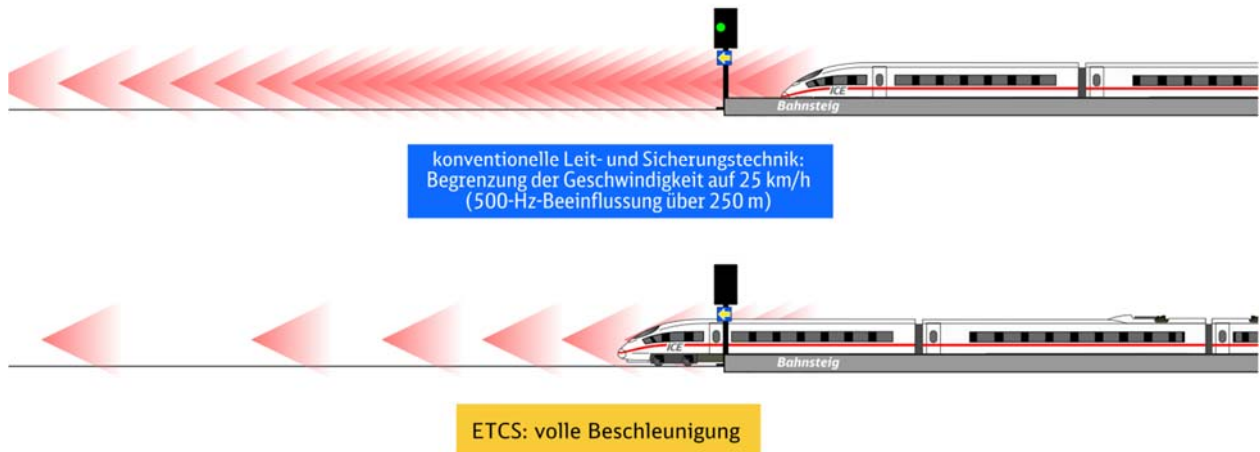


Abbildung 20: Dank des laufenden Datenaustausches zwischen Zug und Strecke benötigt ETCS die zusätzlichen Geschwindigkeitsbeschränkungen der nur punktuell wirkenden konventionellen Leit- und Sicherungstechnik nicht.

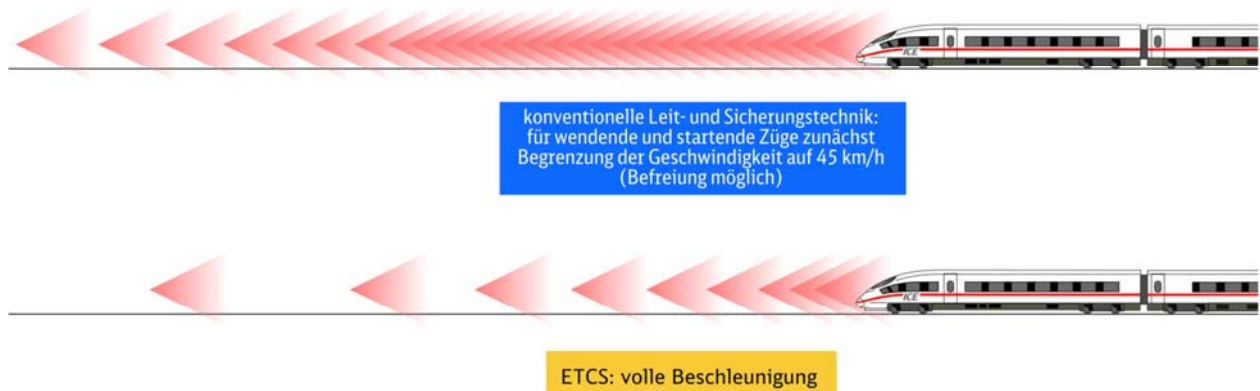


Abbildung 21: Auch nach einem Fahrtrichtungswechsel kann in der Regel ohne pauschale Geschwindigkeitsbegrenzung angefahren werden.

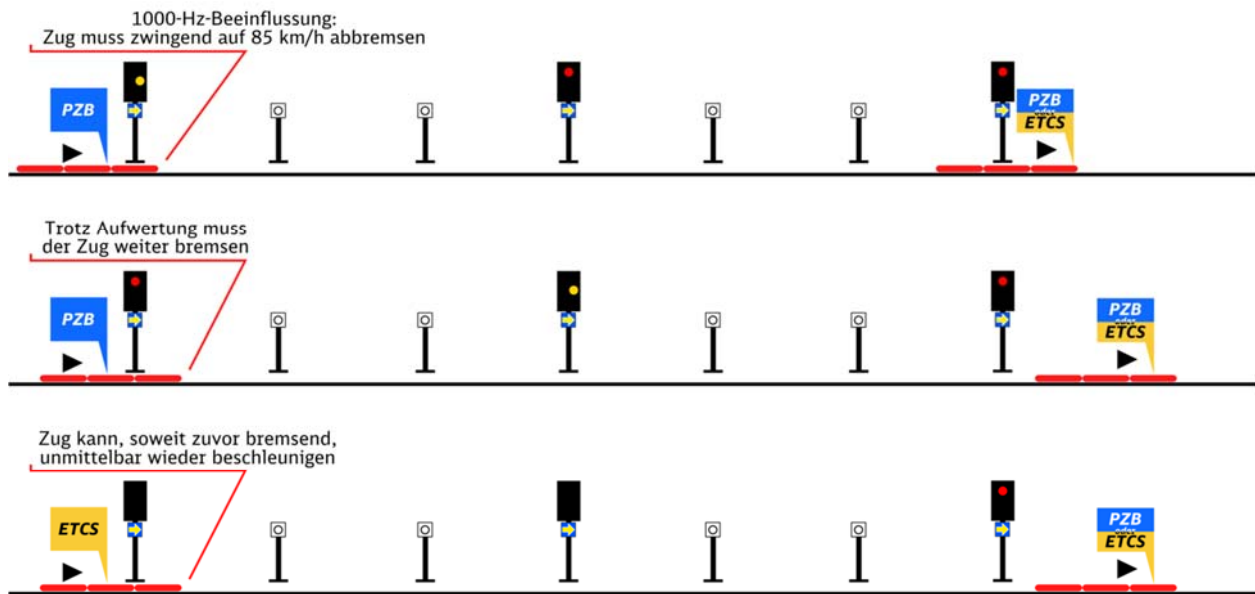


Abbildung 22: Auch die 1000-Hz-Beeinflussung, bei der ein konventionell geführter Zug zwingend auf höchstens 85 km/h abbremsen muss, entfällt mit ETCS. Unnötige Bremsungen werden damit vermieden.

4.7 Flexiblere Bahnsteignutzung

Bei einer Nutzlänge von rund 430 m sind die Bahnsteige des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs in zwei jeweils rund 215 m lange Abschnitte geteilt, die hintereinander belegt werden können. Aufgrund fehlenden Durchrutschwegs erfolgt die Einfahrt ins bereits teilbesetzte Gleis mit 20 km/h. Sollen zwei Züge im Gleis stehen, darf kein Zug länger als rund 200 m sein.

Kurze Zugfolgeabschnitte am Bahnsteig (Abbildung 13) könnten neben erheblich dichteren Zugfolgen am Bahnsteig auch für eine Flexibilisierung der Gleisnutzlängen genutzt werden. In Abhängigkeit von der tatsächlichen Unterteilung könnten dies beispielsweise sein:

- Ein langer und ein kurzer Zug im Gleis (z. B. 230 und 150 m)
- Mehr als zwei Züge im Gleis (z. B. 3x100 m)

Bleibt zwischen zwei Zügen dabei ein Abschnitt frei, könnte dieser als Durchrutschweg genutzt werden, um ohne starre 20-km/h-Geschwindigkeitsrestriktion einzufahren.

4.8 Optimierte Bremsmodelle für Triebzüge (Gamma-Modell)

ETCS bietet zwei Modelle, um Bremswege (Bremskurven) anhand der Fahrzeugeigenschaften zu berechnen:

- Das *Lambda-Modell* (auch *Conversion Model* oder *Bremshundertstel-Modell*) berechnet Bremskurven aus den auch im konventionellen Betrieb üblichen Parametern Bremsstellung, Zuglänge und Bremsleistung. Es ist für alle Arten von Zügen bis 200 km/h anwendbar.
- Das *Gamma-Modell* berechnet Bremskurven aus der Bremsaufbauzeit und Bremsverzögerungen (ggf. unterschieden nach Geschwindigkeitsstufen) unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren. Zwingend notwendig für schnell fahrende Züge (über 200 km/h), kann das Modell grundsätzlich für alle Triebzüge angewendet werden.

Basierend auf zehntausenden von Bremsversuchen verschiedenster Züge liefert das Lambda-Modell zwar ebenso wie das Gamma-Modell sichere Bremskurven. Die aus den wenigen, vergleichsweise einfachen Eingangsdaten abgeleiteten „Lambda-Bremskurven“ können dabei

ETCS als Träger für Leistungs- und Qualitätssteigerungen im Knoten Stuttgart

spezifische Stärken eines bestimmten Triebzuges nicht berücksichtigen. So wird für den Bremsaufbau – der Zeit von der Bremsanforderung bis zum Aufbau der Bremskraft – ein Mindestwert von mehr als 5 Sekunden angesetzt, obwohl gerade Triebzüge des Regionalverkehrs durchaus Werte von 1 bis 2 Sekunden realisieren können. Ebenfalls nicht berücksichtigt werden beispielsweise besonders „gute“ Bremsverzögerungen in bestimmten Geschwindigkeitsbereichen.

Erkenntnisse aus der S-Bahn-ETCS-Untersuchung lassen ein Kapazitätspotential für die Zugfolgezeit von mehreren Sekunden erwarten. Bereits die im Gamma-Modell präzise modellierbaren geringeren Bremsaufbauzeiten führen im Übrigen bei Bremsungen auf Geschwindigkeitsschwellen (Abschnitt 4.3) zu einem späteren notwendigen Bremsensatz und damit zu geringfügig kürzeren Fahrzeiten.

Mit dem gegenüber dem Lambda-Modell größeren Potential geht ein deutlich größerer Aufwand einher: Während die Parameter für das Lambda-Modell bereits aus dem konventionellen Betrieb vorliegen, sind für das Gamma-Modell u. a. Simulationen und Bremsversuche durchzuführen.

4.9 Vollumfängliche Nutzung der Möglichkeiten eines Zuges

Auch über die bislang dargestellten Effekte hinaus kann ETCS die Möglichkeiten von Zügen und Strecke besser zu nutzen. So profitieren lange Züge des Regionalverkehrs von einer per ETCS automatisch möglichen Erhöhung der Oberstrombegrenzung auf dafür geeigneten Streckenabschnitten – und können damit schneller beschleunigen. Züge, die eine erhöhte Seitenbeschleunigung zulassen (bis hin zur aktiven Neigetechnik) können ohne zusätzlichen Infrastrukturaufwand größere Geschwindigkeiten zugewiesen werden.

4.10 Betriebsoptimierung anhand umfassender Ist-Daten

Vor Einfahrt in einen ETCS-Bereich baut ein Zug eine Funkverbindung zur Strecke auf. Das Fahrzeug teilt fortan der Strecke in Abständen von wenigen Sekunden u. a. seine Position und seine Geschwindigkeit mit. Diese Daten können aufgezeichnet und zur Optimierung des Betriebs (z. B. der Dispositionsgestaltung) herangezogen werden. Beispielsweise wird transparent, wann und wo Züge aufgrund vorausfahrender Züge ausgebremst wurden.



Abbildung 23: Mit ETCS stehen Zug und Strecke in einem laufenden Datenaustausch. Die gewonnenen Daten können zur Optimierung des Betriebs genutzt werden.

4.11 Robustere Infrastruktur mit weniger Störungen

Nationale (VDE 8) wie auch internationale Betriebserfahrungen (z. B. Schweiz, Italien) zeigen übereinstimmend, dass in einem eingeschwungenen ETCS-System eine höhere Verfügbarkeit / größere Stabilität als konventionelle Leit- und Sicherungstechnik erreicht wird. Neue ETCS-Infrastruktur wird zunehmend „ohne Signale“ aufgebaut, an zunächst mit Lichtsignalen aufgebauten ETCS-Strecken wie der NBS Mattstetten – Rothrist wurden Lichtsignale zurückgebaut, da sie sich häufigste Störquelle im Sinne der Gesamtsystemverfügbarkeit erwiesen hatten.

5 Beispiel Nordzulauf

5.1 Hintergrund

Der Nordzulauf auf Stuttgart, von Zuffenhausen bis zum Hauptbahnhof, steht in vielfacher Weise im Fokus. Mit 17 (von insgesamt 49) Ankünften in Spitzenstunde der Stresstests zu Stuttgart 21 ist er der am stärksten belastete Zulauf auf den neuen Stuttgarter Hauptbahnhof. Mit 12 (von 35) Zügen trägt er auch im Grundtakt des im Oktober 2018 vorgelegten „Deutschland Takt“-Gutachterentwurfs die größte Last der vier Zuläufe.

Während die hinreichende Leistungsfähigkeit des Zulaufs bereits im Rahmen des Stresstests eingehend nachgewiesen wurde, wird im Rahmen einer laufenden Untersuchung im Auftrag von Regionalverband (VRS) und Verkehrsministerium Baden-Württemberg geprüft, inwieweit in dem Abschnitt zwei zusätzliche Ferngleise ergänzt werden können. Eine optimierte Leit- und Sicherungstechnik spielt dabei eine untergeordnete Rolle.

Sowohl vor als auch nach der Inbetriebnahme von Stuttgart 21 liegt der für die Mindestzugfolgezeit maßgebende Abschnitt dabei im nördlichen Bereich von Zuffenhausen. Vergleichsweise große Signalabstände, die sich aus betrieblich-technischen Gründen nicht mehr substantiell reduzieren lassen, führen in Verbindung mit einer vergleichsweise geringen Geschwindigkeit (rund 100 km/h) und umlaufenden Weichen zu einer Mindestzugfolgezeit von drei Minuten (ohne Puffer). Abbildung 24 stellt den Mindestabstand zweier von der Neubaustrecke aus Mannheim kommender Züge dar: Während sich der vorausfahrende Zug bereits im Bahnsteigbereich des Bahnhofs Zuffenhausen befindet, liegt der nachfolgende Zug noch im Tunnel Langes Feld. Der Mindestabstand aus der Blockteilung (einschließlich Durchrutschweg am Signal 602) beträgt 3 Kilometer, zuzüglich notwendiger 12 s anzusetzender Sichtzeit (zum Vorsignal am Hauptsignal 559) sowie technischer Laufzeiten (u. a. Umlauf von Weichen) ergibt sich ein Mindestabstand von mehr als vier Kilometern – ohne zusätzlich vorzusehende Pufferzeiten.

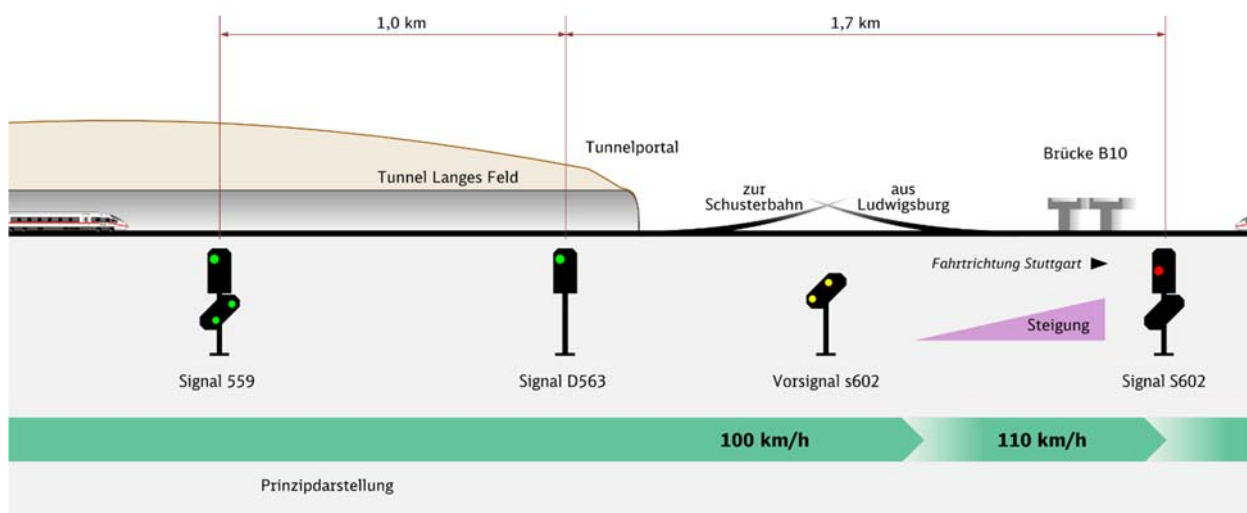


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Zugfolgeabschnitte am südlichen Ende der NBS Mannheim – Stuttgart. Der Mindestabstand zweier unbehindert fahrender Züge beträgt in dieser Momentaufnahme rund dreieinhalb Kilometer und reicht vom Sichtabstand vor dem Signal 559 bis zum Ende des Durchrutschwegs hinter dem Signal 602. Dazu kommen technische Laufzeiten, Reaktionszeiten und Pufferzeiten. Der 1,7-km-Abschnitt zwischen Signal 563 und Signal 602 kann aufgrund verschiedener betrieblich-technischer Grenzen der konventionellen Leit- und Sicherungstechnik nicht mehr weiter verkürzt werden (Mindestabstand von Vor- und Hauptsignalen, Mindestabstand von Hauptsignalen zu Weichen sowie elektrischen Schaltabschnittsgrenzen, Durchrutschwege).

Dem steht ein aus Sicherheitsgründen notwendiger Abstand von gerade einmal einem halben Kilometer gegenüber, den ein mit rund 100 km/h fahrender ICE benötigt, um jederzeit sicher vor dem vorausfahrenden Zug anhalten zu können. Der Mindestabstand, der sich aus den ETCS als Träger für Leistungs- und Qualitätssteigerungen im Knoten Stuttgart

Beschränkungen der konventionellen Leit- und Sicherungstechnik ergibt, ist damit sehr viel größer als der aus Sicherheitsgründen notwendige Abstand. Dazwischen liegen eine Reihe von Potentialen und Potentialansätzen für deutlich kürzere Zugfolgen und damit deutlich mehr Leistungsfähigkeit.

Mit ETCS können solche kritischen Abschnitte grundsätzlich in nahezu beliebig kurze „Hochleistungsblöcke“ unterteilt, die Zugfolge bereits damit wesentlich verkürzt werden (Abbildung 25).

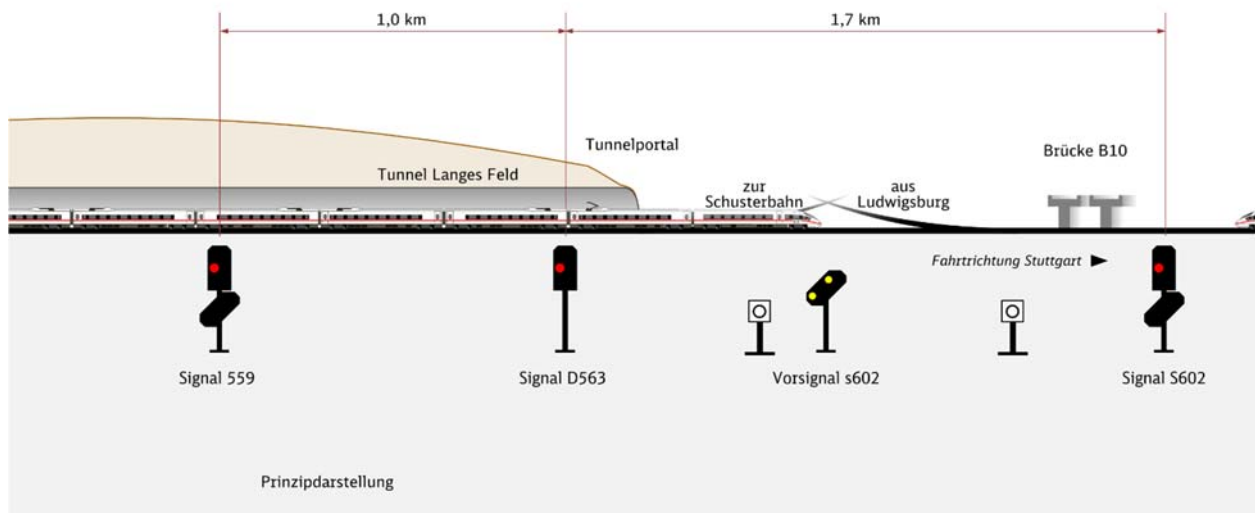


Abbildung 25: Mit ETCS-Blockkennzeichen, hier exemplarisch zwischen den Signalen 563 und 602 dargestellt, können für die Zugfolge kritische Abschnitte in nahezu beliebig kurze Abschnitte unterteilt und der Mindestabstand zwischen zwei Zügen dadurch erheblich reduziert werden. (Prinzipdarstellung)

5.2 Kapazitätswirkungen

Um die Kapazitätswirkung von ETCS Level 2 aufzuzeigen, wurde der bislang geplante S21-Inbetriebnahmestand mit einer für ETCS optimierten Planung verglichen.

5.2.1 Prämissen

Um die mit ETCS Level 2 nach dem Stand der Technik umsetzbaren Kapazitätspotentiale (Kapitel 4) zu erhärten, wurde für den Nordzulauf eine einfache ETCS-Blockteilung entwickelt, die alle im Zuge der bisherigen ETCS-Planung von Stuttgart 21 bekannt gewordenen Restriktionen und Rahmenbedingungen berücksichtigt. An Stelle der im Abstand von 1 bis 2 km angeordneten Licht-Hauptsignale wurden mit ETCS Zugfolgeabschnitte mit einer typischen Länge von 0,5 km gebildet. Die heutigen Lichtsignale spielen dabei keine Rolle.

Der Regelabstand wurde im Bereich von Weichen noch weiter verkürzt, um die in diesen Bereichen höheren Fahrstraßenbildezeiten zu kompensieren. Eine Verkürzung (auf 0,4 km) erfolgte auch im Gefälle vor dem neuen Hauptbahnhof sowie in den Bahnsteiggleisen des Hauptbahnhofs (auf rund 50 m). Die mit 0,6 km längsten Abschnitte ergaben sich aufgrund der momentan noch starren Mindestabstände zwischen Signalen/Blockkennzeichen und elektrischen Schaltabschnittsgrenzen (siehe 6.2) in Zuffenhausen, Feuerbach sowie im neuen Hauptbahnhof. Eine weitere Optimierung der Abschnitte, wie sie im Zuge einer vertiefenden Planung in einem iterativen Prozess erfolgen würde, wurde nicht vorgenommen und verbleibt ebenfalls als weiterführendes Potential.

Durchrutschwege und Gefahrpunktabstände wurden, in Ermangelung eines bislang für den Bereich der DB noch nicht vorliegenden gesonderten Regelwerks, entsprechend der Mindestwerte des konventionellen Regelwerks angeordnet. Für Einfahrtsignale wurden dabei 200 m angesetzt, für Blockkennzeichen 50 m sowie der Durchrutschweg an Zwischen- und Ausfahrtsignalen auf 50 m gesetzt. Verkürzungen und Verlängerungen aufgrund von Längsneigungen wurden vereinfachend nicht berücksichtigt. Die Einfahrt ins teilbesetzte Gleis wurde, entsprechend des konventionellen Regelwerks, mit 20 km/h unterstellt.

Fahrzeugseitig wurde eine ETCS-Ausrüstung aller Züge unterstellt nach Baseline 3 R2 (SRS 3.6.0) unterstellt. Die Vorbelegung beginnt mit Erreichen der Bremsvorankündigung (Indication). Für die bereits heute mit ETCS ausgerüsteten ICE-Flotten wurden zur Bremskurvenberechnung aufgrund vorliegender Parameter vereinfachte Gamma-Modelle (siehe 4.8) herangezogen, für den Regionalverkehr wurden Bremskurven nach dem Lambda-Modell gebildet (Zuglänge, Bremsstellung, Bremshundertstel). Die Nutzung von Gamma-Modellen für den Regionalverkehr verbleibt damit ebenfalls als Potential.

Die Fahrstraßenauflösezeit betrug 3 s, die Fahrstraßenbildezeit 9 s (ohne Weichen) bzw. 12 s (mit Weichen). Hinzu kommen jeweils 4 s für Übertragungs- und Verarbeitungsprozesse in ETCS. Zusätzliche Reaktionszeiten für stellrechnerübergreifende Fahrstraßen werden ebenso ausgeschlossen wie Verlängerungen für RBC-Wechsel – beide wären im Rahmen der konkreten Planung auszuschließen bzw. durch besonders dichte kurze Zugfolgeabschnitte zu kompensieren.

Der fahrzeugseitig angenommene Ortungsfehler wurde pauschal mit 20 m angesetzt.

5.2.2 Methodik

Im Zuge der Untersuchung wurden zwei Szenarien miteinander verglichen:

- Der bislang geplante Inbetriebnahmestandard von Stuttgart 21, mit einem Mischbetrieb von anzeige- und signalgeführten Zügen auf einer Infrastruktur, in der ETCS als nachrangiges System auf eine konventionelle Leit- und Sicherungstechnik aufgesetzt wurde (ETCS als Overlay).
- Ein für ETCS optimiertes Szenario, in dem alle Züge anzeigegeführt mit einer für den reinen ETCS-Betrieb optimierten Leit- und Sicherungstechnik fahren. Eine eventuell verbliebene konventionelle Leit- und Sicherungstechnik würde als nachrangiges System fungieren, das einem für maximale Leistungsfähigkeit optimierten ETCS untergeordnet wäre.

Abbildung 13 verdeutlicht das Prinzip.

Mit dem Werkzeug Railsys (Version 11.4.52) wurde der aktuelle Arbeitsstand des Inbetriebnahmefahrplans mittels Kompressionsmethode (Abbildung 26) zusammengeschoben und darauf aufbauend die mittlere Mindestzugfolgezeit und der Belegungsgrad ermittelt. Ausgewertet wurde dabei der besonders dicht belegte, 7 km lange Abschnitt zwischen der Ein- bzw. Ausfädelung von/zur Neubaustrecke aus Mannheim und den südlichen Ausfahrtsignalen des neuen Hauptbahnhofs. Die Untersuchung erfolgte für beide Szenarien und in beiden Richtungen für den Zeitraum 13 bis 20 Uhr.

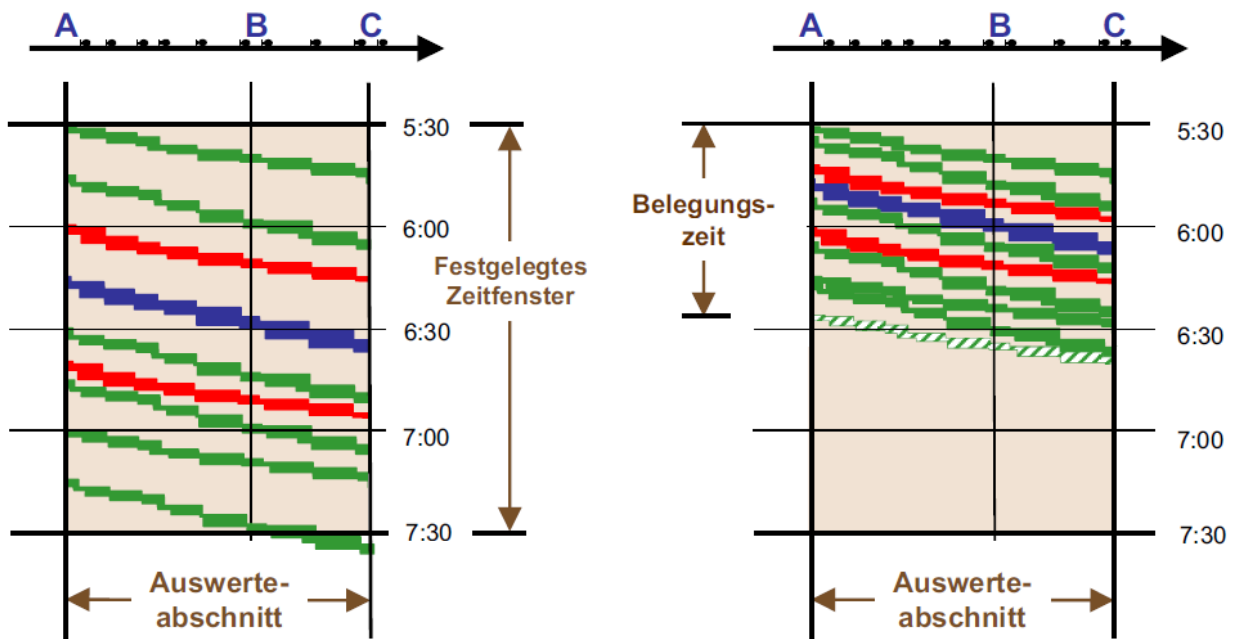


Abbildung 26: Prinzipdarstellung der Kompressionsmethode nach UIC-Kodex 406. Die Sperrzeiten der Fahrplanrassen werden dabei bis an die technische Grenze zusammengeschoben (komprimiert). Aus der Summe ihrer Mindestzugfolgezeiten ergibt sich die Belegungszeit, deren Anteil am Untersuchungszeitraum den Belegungsgrad der Strecke (als Maß für die Auslastung der Infrastruktur) ergibt.

5.2.3 Ergebnisse

Im Vergleich mit dem bislang geplanten Inbetriebnahmeszenario können mit einer optimierten ETCS-Planung die Belegungsgrade wie auch die Mindestzugfolgezeiten um jeweils rund 20 Prozent reduziert werden (Abbildung 27, Abbildung 28). Der für die Mindestzugfolgezeit überwiegend maßgebende Abschnitt liegt stadteinwärts dabei im Nordkopf des neuen Hauptbahnhofs (Abbildung 29), stadtauswärts steht überwiegend ein Abschnitt im Nordkopf des Bahnhofs Zuffenhausen noch kürzeren mittleren Mindestzugfolgezeiten im Weg (Abbildung 30).

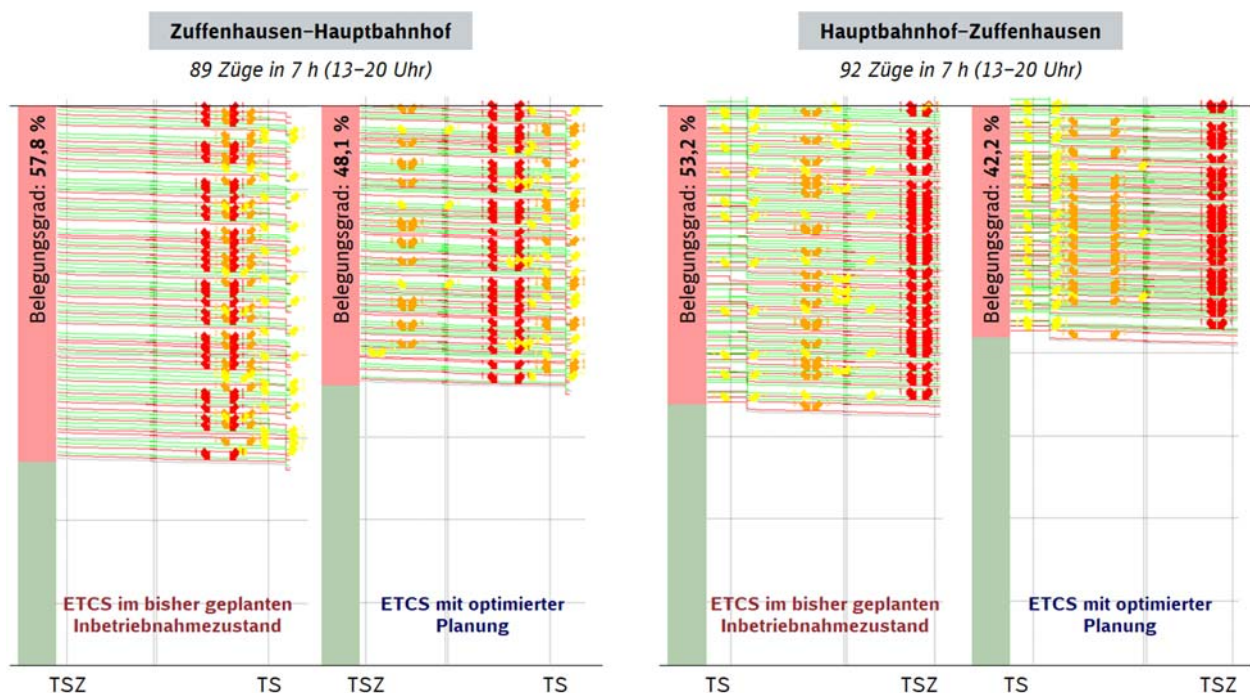


Abbildung 27: Der Belegungsgrad für die Städteinwärtsrichtung geht um 17 % zurück, der Belegungsgrad stadtauswärts um 21 %.

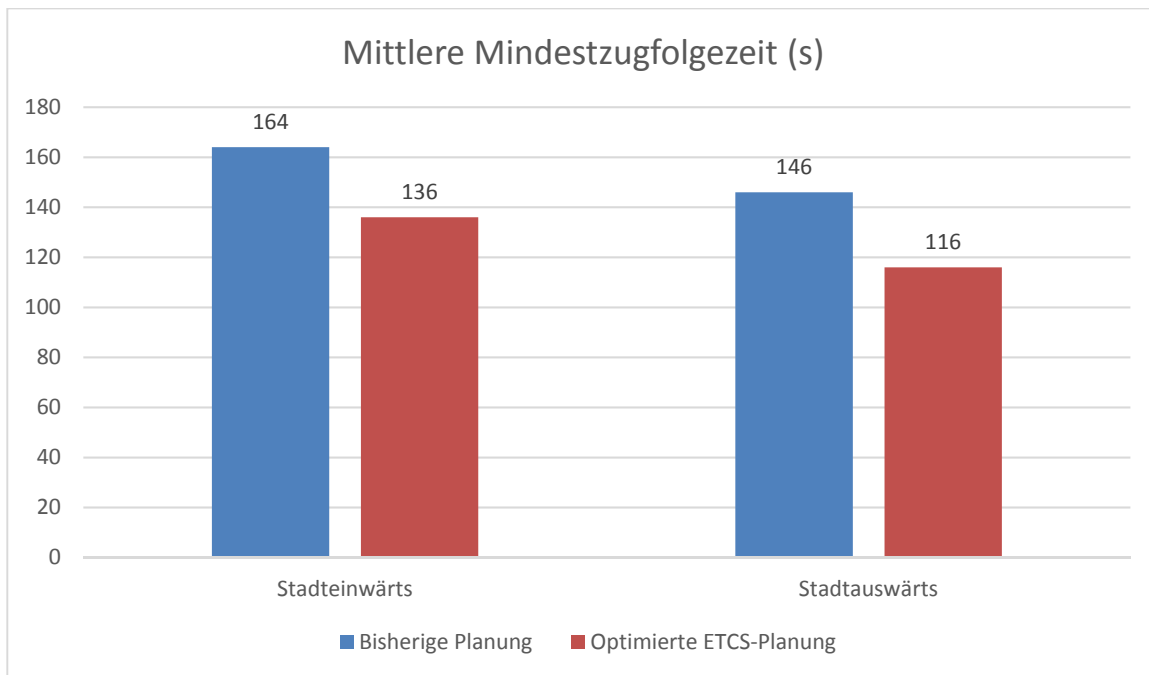


Abbildung 28: Im Szenario mit optimierter ETCS-Planung gehen die mittleren Mindestzugfolgezeiten stadteinwärts um 28 s (17 %) zurück, stadtauswärts um 30 s (21 %).

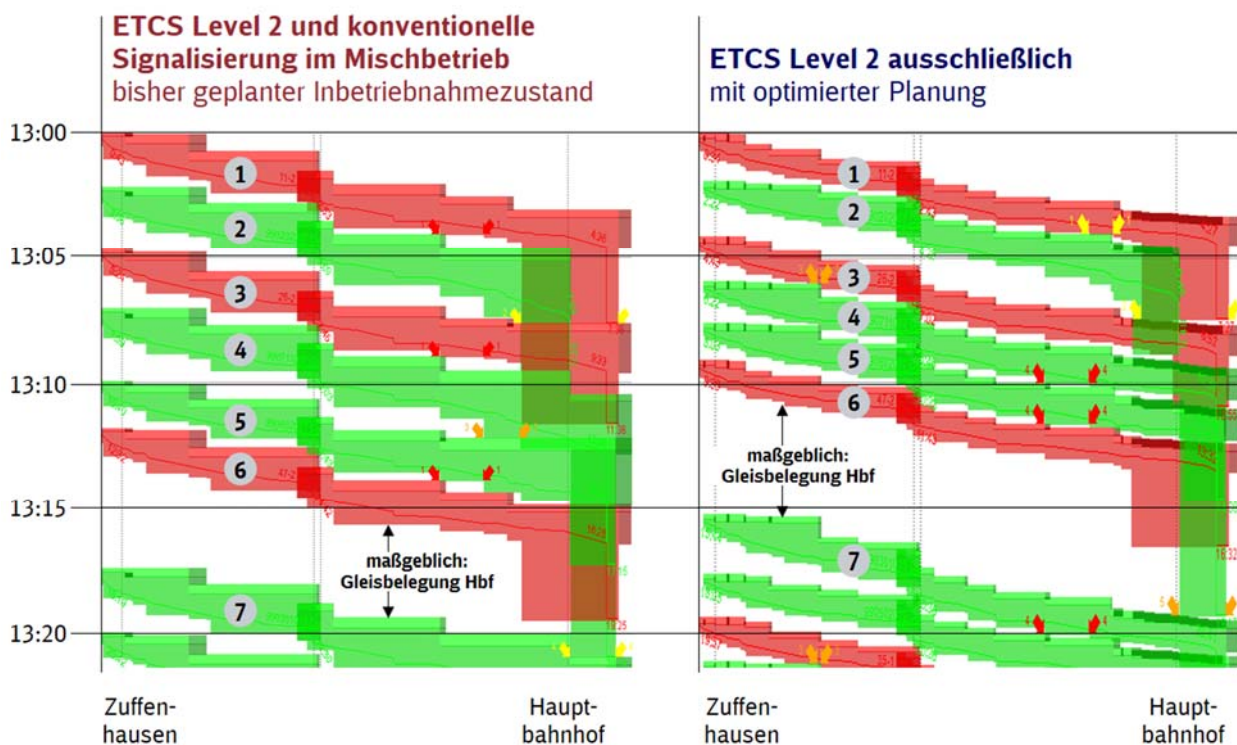


Abbildung 29: Darstellung der komprimierten Sperrzeitentreppen, exemplarisch für den Beginn des festgelegten Zeitfensters. Für die Zugfolge stadteinwärts ist dabei der neue Hauptbahnhof maßgeblich (siehe Beschriftung und Pfeile). Einer weiteren Verkürzung der Mindestzugfolgezeiten mit ETCS steht dabei überwiegend der 0,6 km lange Abschnitt in der Einfahrt des neuen Hauptbahnhofs entgegen.

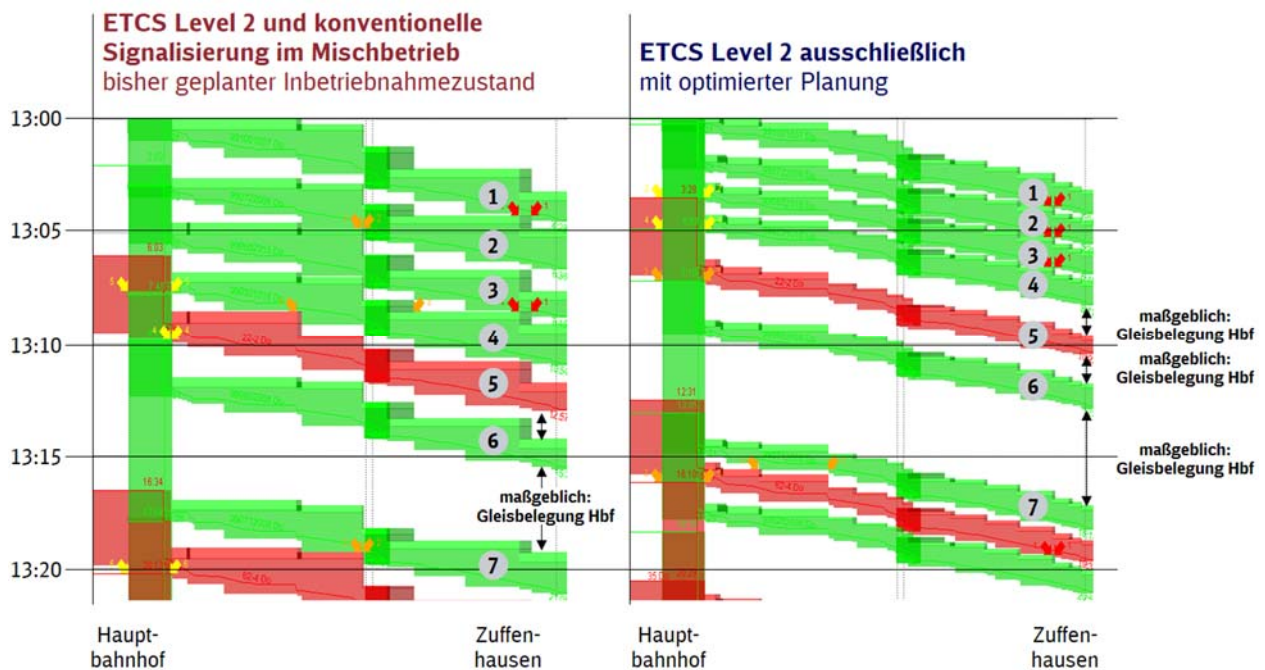


Abbildung 30: Stadtauswärts erweist sich mit dem Nordkopf des Bahnhofs Zuffenhausen überwiegend wiederum ein 0,6 km langer Abschnitt für die Belegung als kritisch, in dem aufgrund der Mindestabstände zu elektrischen Streckentrennungen keine kürzeren Zugfolgeabschnitte gebildet werden können.

5.2.4 Effekte

Der dargelegten Leistungssteigerung im Nordzulauf liegen im Wesentlichen zwei Effekte zu Grunde:

- Der Großteil der Kapazitätssteigerung geht auf die Bildung kürzerer Zugfolgeabschnitte (s. Abschnitt 4.1) zurück: Die Verkürzung der im Betrachtungsbereich konventionell bis zu 1,6 km langen Zugfolgeabschnitte auf typischerweise 0,5 km. Bei einer typischen örtlich zulässigen Geschwindigkeit von 100 km/h macht dieser Effekt, bezogen auf die einzelnen Zugfolgeabschnitte, bis zu rund 40 Sekunden aus.
- Ein weiterer Effekt ergibt sich aus der Nutzung der fahrzeugspezifischen Bremskurven (s. Abschnitt 4.4): Bei konventioneller Leit- und Sicherungstechnik muss die „Fahrt erwarten“-Stellung im Sichtabstand (12 s) zu einem ortsfesten Vorsignal vorliegen – womit bei 1,0 km Vorsignalabstand und örtlich zulässigen 100 km/h in der Ebene die Vorbelegung bereits 1,3 km vor dem zugehörigen Hauptsignal beginnt. Im Betrieb mit ETCS beginnt die Vorbelegung dagegen mit Erreichen der ersten ETCS-Bremskurve (Pre-Indication bzw. Indication), die wiederum aus dem tatsächlichen Bremsvermögen des Zuges errechnet wird. Bei den im Nordzulauf verkehrenden Regionalzügen (mit ihren etwa 200 Bremshundertstel) beginnt die Vorbelegung erst rund 1,0 km vor dem Signal. Die erst 0,3 km später einsetzende Vorbelegung führt zu einem weiteren Kapazitätseffekt in Höhe von rund 10 s. Bei größeren Vorsignalabständen ergibt sich ein noch größerer Vorteil.

Diesem „Brutto“-Effekt von rund 50 Sekunden wirken entgegen:

- Die Mindestabstände zwischen Signalen/Blockkennzeichen und elektrischen Schaltabschnittsgrenzen (s. Abschnitt 6.2). Das momentan geltende Regelwerk führt zu Mindestabständen von 0,6 km in Bereichen, in denen ein Halt in kritischen Bereichen der Fahrleitung mit entsprechenden „Sicherheitsabständen“ verhindert werden soll. In Verbindung mit der im Vergleich zur Strecke verminderten Einfahrtgeschwindigkeit entsteht dadurch stadteinwärts die längste, kritische Belegung. Stadtauswärts wird der Mindestabstand im Nordkopf Zuffenhausen zur maßgebenden Restriktion, aufgrund der dort größeren Geschwindigkeit gleichwohl in geringerem Umfang als am neuen Hauptbahnhofs.

- Eine zusätzliche technische Reaktionszeit von 4 Sekunden, die für die Übertragung der Informationen vom Stellwerk zum RBC, der Verarbeitung im RBC, der Übertragung der Fahrerlaubnis zum Fahrzeug sowie deren Verarbeitung auf dem Fahrzeug angesetzt wird.

Potentiale, die erst im Rahmen der vertiefenden Planung gehoben werden können (Kapitel 4) sowie weiterführende Potentiale (Kapitel 6) sind darin noch nicht berücksichtigt, beispielsweise:

- Die Auflösung der bislang starren Mindestabstände zwischen Signalen/Blockkennzeichen und elektrischen Schaltabschnittsgrenzen (Abschnitt 6.2). Dazu wurden im Rahmen einer im Dezember 2018 verteidigten Masterarbeit bereits mehrere Lösungsansätze ausgearbeitet, die 2019 einer Umsetzung im Projekt zugeführt werden sollen.
- Nutzung des automatisierten Fahrbetriebs (ATO) und damit Nutzung steilerer Bremskurven (Abschnitt 6.1).
- Optimierte Bremskurven für Regionalfahrzeuge (Abschnitt 4.8).
- Kürzere technische Laufzeiten, beispielsweise durch Nutzung von ETCS Level 3 Hybrid (Abschnitt 6.4).
- Schnellere Einfahrten ins teilbesetzte Gleis (Abschnitt 6.3).

In der vorliegenden, rein kapazitiven Betrachtung ebenfalls nicht berücksichtigt wurden Potentiale, die vorrangig oder ausschließlich auf die Qualität wirken, beispielsweise Leittechnik (Abschnitt 6.2) sowie das Potential einer flexibleren Bahnsteignutzung im neuen Hauptbahnhof (Abschnitt 4.7).

Grundvoraussetzung für die Realisierung der Effekte ist die Ausrüstung sämtlicher Triebfahrzeuge mit ETCS. Die Ergebnisse stehen im Übrigen allein für den betrachteten Abschnitt Hauptbahnhof-Zuffenhausen. Sie lassen sich ohne weitere Untersuchungen nicht auf den weiteren Knotenbereich oder das gesamte Netz übertragen.

6 Weiterführende Potentialansätze auf Grundlage von ETCS

Aufbauend auf den in Kapitel 4 eingeführten Nutzen, die sich mit dem in Deutschland verfügbaren Stand der Technik heute realisieren lassen, ebnet ETCS den Weg für weiterführende und noch vertieft auszuarbeitende Potentiale verschiedener Härtegrade. Während die Möglichkeiten der konventionellen Leit- und Sicherungstechnik weitgehend ausgeschöpft sind, spannt ETCS dabei einen breiten Bogen weiterführender Potentiale auf.

6.1 Automatisierter Fahrbetrieb (ATO)

Beginnend mit Baustein 1 der Drei-Baustein-Strategie soll automatisierter Fahrbetrieb (ATO GoA 2) eingeführt werden. Der Triebfahrzeugführer ist dabei weiterhin an Bord. Während der Computer straff und effizient fährt, obliegt ihm weiterhin u. a. die Abfertigung und Fahrwegbeobachtung. Derartige „Autopilot“-Lösungen sind technisch vergleichsweise einfach, werden auf dem Markt anhand vorliegender europäischer Spezifikationen angeboten und sind bereits im Einsatz, beispielsweise beim Projekt Thameslink in London. Aufbauend auf ETCS erfährt das Gesamtsystem nur wenige Ergänzungen: Im einfachsten Fall wird zu Beginn der Zugfahrt ein Fahrplan per Funk an den Zug übertragen und von diesem anschließend bestmöglich abgefahren (Abbildung 31). Der Triebfahrzeugführer kann jederzeit eingreifen.

Eine weitergehende Automatisierung für den Betrieb ohne Triebfahrzeugführer (ATO GoA 3) bzw. ohne Personal (ATO GoA 4) ist technisch wesentlich aufwendiger, noch im Versuchsstadium (frühe Spezifikationsphase) und lässt ohnehin keine wesentlichen weiteren Vorteile zur Erreichung dichter Zugfolgen mehr erwarten.

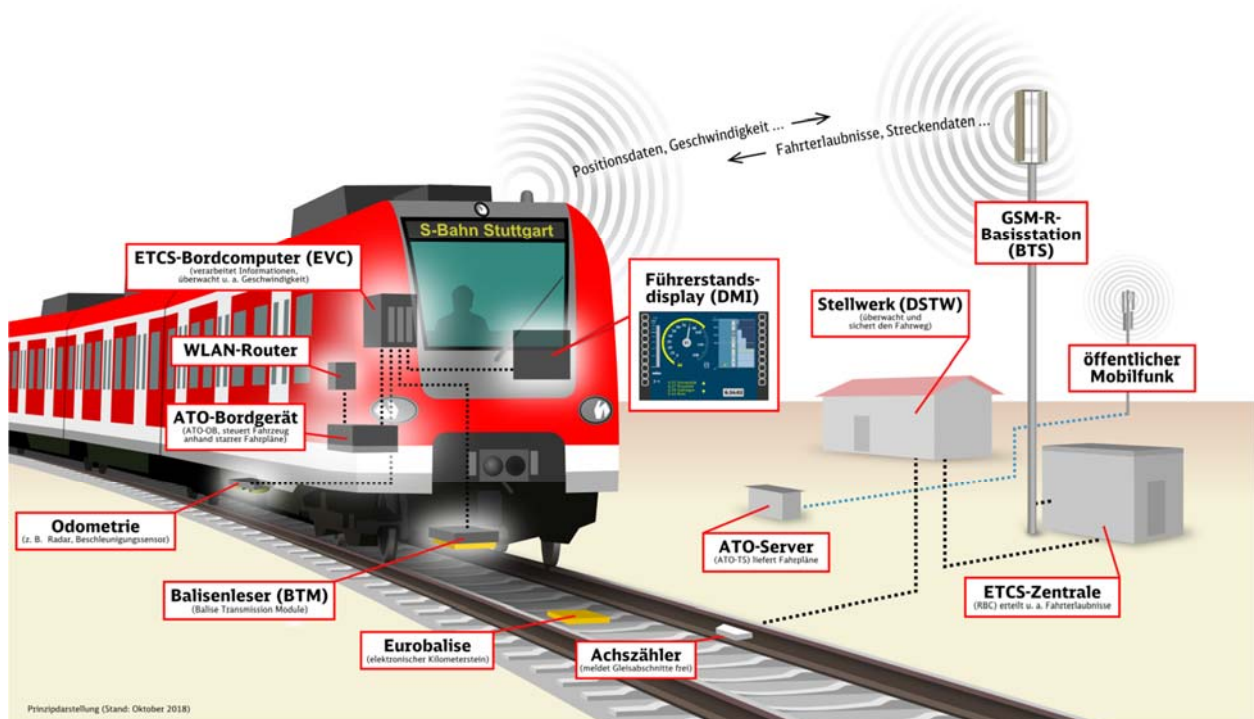


Abbildung 31: Für den automatisierten Fahrbetrieb mit Triebfahrzeugführer (ATO GoA 2) sind nur wenige Ergänzungen am Gesamtsystem erforderlich: Ein Fahrplannerserver (ATO-Server) überträgt per Funk – z. B. öffentlichen Mobilfunk an ohnehin vorhandene WLAN-Router auf den Fahrzeugen – einen Fahrplan, der vom ATO-Bordgerät – einer Art „Autopilot“ – anschließend bestmöglich abgefahren wird.

Mit ATO GoA 2 kommt eine ganze Reihe von betrieblich-verkehrlichen Vorteilen ins Spiel:

- Den Reaktionszeiten des Triebfahrzeugführers Rechnung tragend, liegt im manuellen ETCS-Betrieb (ohne ATO) zwischen erster Bremsvorankündigung und dem Erreichen der sicheren Bremskurve, an der das System mit einer Zwangsbremmung eingreift, eine Viertelminute. Während in der Fahrplankonstruktion angenommen wird, dass der

Triebfahrzeugführer stets ohne akustisch-visuelle Bremsvorankündigung fahren soll, gilt im ATO-Betrieb nur die sichere Zwangsbremskurve des ETCS-Systems. Alle weiteren Bremskurven werden unterdrückt und sind für den Triebfahrzeugführer nicht sichtbar. Bereits durch ein Fahren dicht unterhalb der Zwangsbremskurve kann die im Fahrplan anzusetzende Zugfolgezeit um bis zu zwei Zehntelminuten reduziert werden.

- Durch die präzise, straffe Fahrweise der ATO können im Fahrplan vorzusehende Zuschläge (Regelzuschlag), die die „Tagesform“ des Triebfahrzeugführers ausgleichen sollen, reduziert werden. Damit können Fahrzeiten wie auch Zugfolgezeiten weiter verkürzt werden.
- Während Fahrpläne für Personenzüge heute in der Regel mit einer Bremsverzögerung von $0,7 \text{ m/s}^2$ aufgestellt werden, erreichen typische Regionaltriebzüge heute deutlich größere Bremsverzögerungen. Unter Beachtung von Komfortkriterien können ggf. größere Bremsverzögerungen angesetzt werden, die fahrzeitverkürzend und leistungssteigernd wirken.
- Halte können wenige Dezimeter genau realisiert werden, woraus sich mehrere Potentiale ergeben:
 - Bei der Ermittlung der Bahnsteignutzlänge anzusetzende Zuschläge können entfallen, die Nutzlänge damit erhöht werden. Manche Halte, die im konventionellen Betrieb nicht realisierbar sind, können mit ATO realisiert werden.
 - Ggf. kann die Nutzlänge noch weiter erhöht werden, indem gezielt die erste Tür für Fahrgäste genau vor dem Bahnsteigende zum Halt gebracht wird und die Zugspitze (mit Hochleistungsblock hinter dem Ausfahrtsignal) bereits über das Bahnsteigende hinaussteht.
 - Durch Vorankündigung der Türpositionen des einfahrenden Zuges können Türbereiche vorab visuell gekennzeichnet, Fahrgastwechselzeiten verkürzt werden.

In Verbindung mit hochentwickelter Leittechnik (TMS) können darüber hinaus noch weitere Potentiale erschlossen werden (siehe 6.2).

6.2 Leittechnik (TMS)

Ein hochentwickeltes Verkehrsleitsystem (*Traffic Management System*, TMS) ist ein weiterer wesentlicher Hebel für Leistungs- und Qualitätsverbesserungen. Auf der Grundlage eines laufenden Informationsflusses zwischen Zug und Strecke, über ETCS und ATO, gelingt eine laufende, dynamische Optimierung des Betriebs. Dazu zählen beispielsweise:

- Information von Triebfahrzeugführern per Textmeldung, beispielsweise mit Geschwindigkeitsempfehlungen (soweit nicht per ATO geführt) oder besondere Ereignisse auf dem weiteren Weg.
- Weitestgehende Automatisierung des Regelbetriebs, einschließlich automatisierter Optimierung bei Verspätungen (z. B. automatische Anordnung von Überholungen oder gezielte Heranführung von Zügen an eingleisige Abschnitte).
- Realisierung (kapazitäts-)optimaler Trajektorien: Wenn Position und Geschwindigkeit jedes einzelnen Zuges bekannt sind, jeder Zug de facto ferngesteuert werden kann und zusätzlich präzise Erwartungen an das Verhalten der Infrastruktur (z. B. Freimeldung einer Weiche) bestehen, können Züge noch wesentlich dichter als im manuellen ETCS-Betrieb fahren. Wenn es gelingt, den richtigen Zug zur richtigen Zeit an den richtigen Ort mit der richtigen Geschwindigkeit zu führen, wird die Kapazität insbesondere in Knoten maximiert. Abbildung 32 verdeutlicht das Prinzip anhand der Zugfolge zweier fahrdynamisch optimierter S-Bahnen an einem Halt.

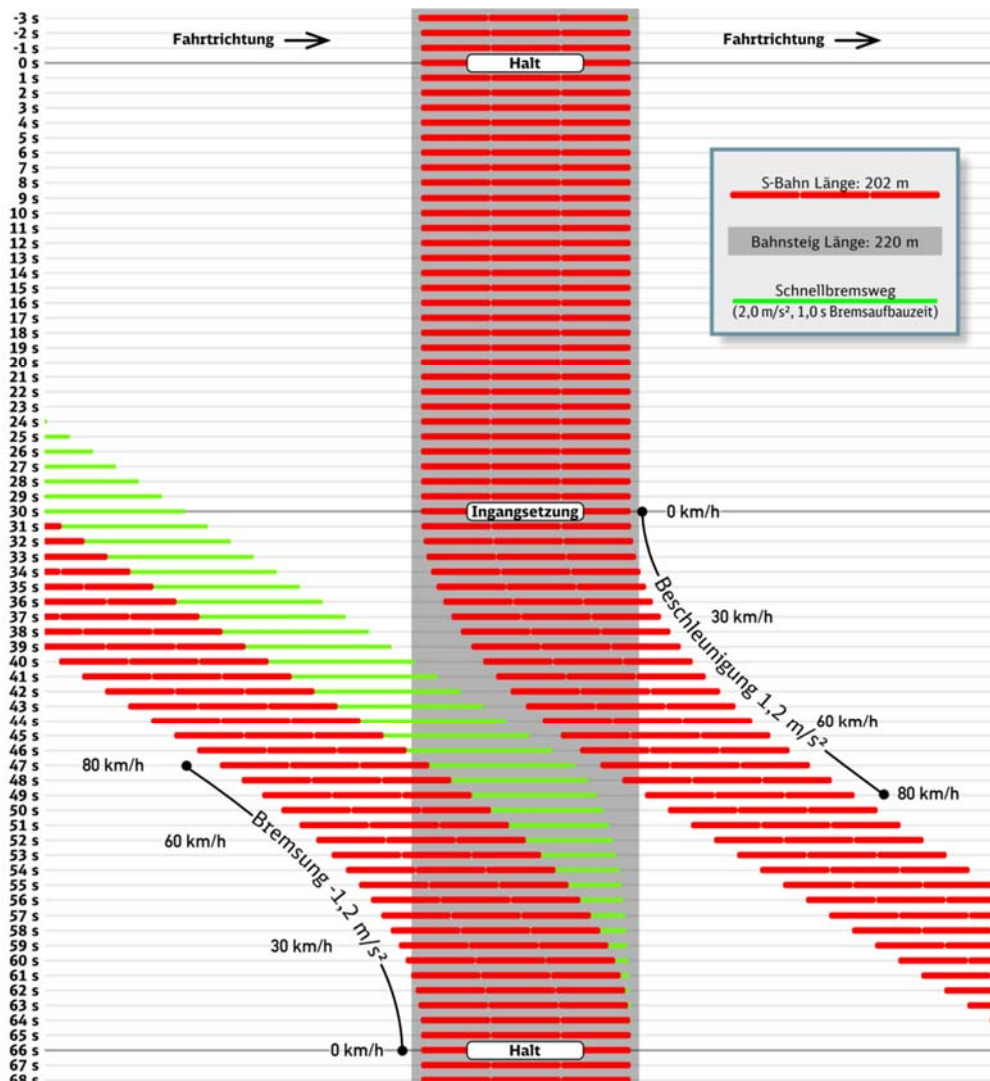


Abbildung 32: Optimierung der Zugfolge zweier Züge an einem Halt, mit optimierter, dem Stadtbahn-Betrieb entlehnter Fahrtdynamik. Der Darstellung liegt ein idealisiertes Modell zu Grunde, das u. a. weder u. a. weder technische Laufzeiten, Blockteilungen noch Längsneigungen berücksichtigt. Die unter Praxisbedingungen realisierbaren Zugfolgezeiten sind länger.

- In Verbindung mit weiteren Optimierungen und optimierten Betriebsstellen könnte es im Umland (Baustein 3) gelingen, haltende S-Bahnen und Regionalzüge durch Regional- bzw. Fernverkehrszüge ohne Haltezeitverlängerung für den überholten Zug zu überholen. Mit vergleichsweise geringem Infrastrukturaufwand würde die Leistungsfähigkeit massiv erhöht werden.
- An Stelle starrer Störfallprogramme können bei Großstörungen in Sekundenschnelle Optimierungen berechnet und auf Knopfdruck umgesetzt werden. Muss beispielsweise auf einer hochbelasteten Strecke eines von zwei Gleisen abschnittsweise gesperrt werden, können Züge in einem Dreiklang von ETCS, ATO und TMS gezielt im Bündel an den vorübergehend eingleisigen Bereich herangeführt werden und den Bereich in dichtestmöglicher Folge durchfahren, um eine möglichst große Restleistungsfähigkeit bei möglichst geringen Verspätungen zu erreichen.
- Während zwischen Signalen/Blockkennzeichen und elektrischen Streckentrennungen heute starre Mindestabstände vorgesehen sind, die ungefähr der maximalen Zuglänge entsprechen (Abbildung 33), könnten mit ETCS und TMS zusätzliche Signale/Blockkennzeichen nach der Streckentrennung angeordnet werden, die von kürzeren Zügen mit genutzt werden können. Es obliegt dabei dem TMS, die Nutzung von Fahrten auf derartige Signale/Blockkennzeichen zu erlauben, wenn geeignete Bedingungen (z. B. Zuglänge, Stromabnehmerposition) erfüllt sind.

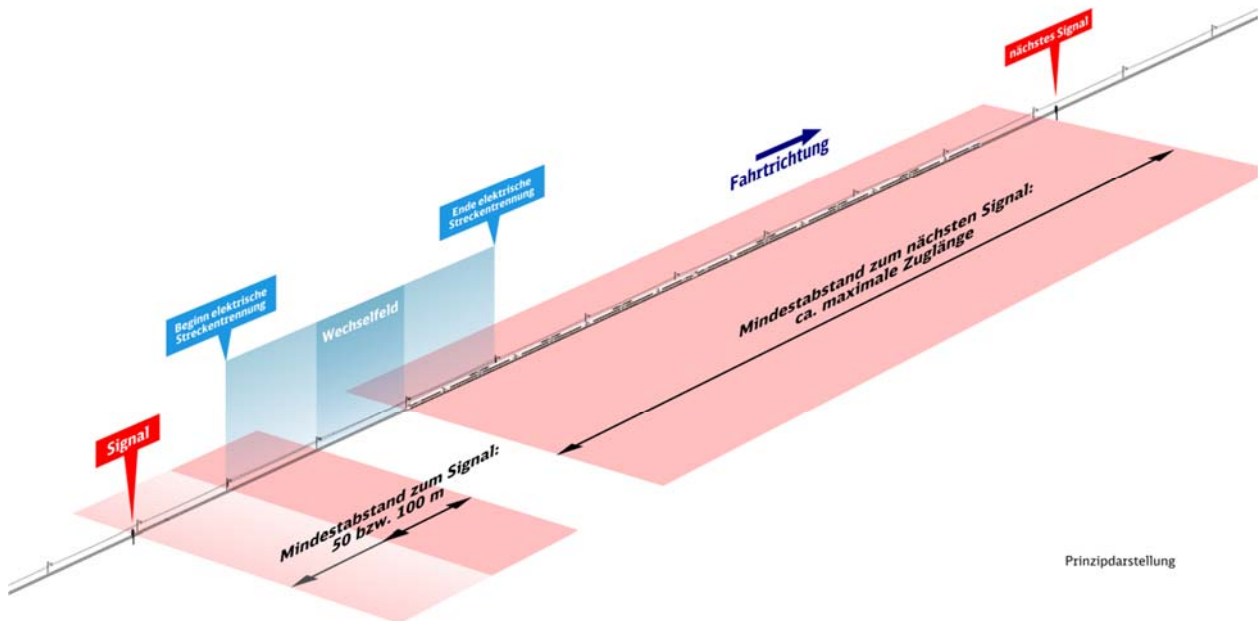


Abbildung 33: Der Mindestabstand zwischen Signalen bzw. Blockkennzeichen und elektrischen Streckentrennungen, wie sie auch am Übergang vom Bahnhof zur freien Strecke angeordnet werden, führt dazu, dass in den für die Kapazität kritischen Bereichen auf einer Länge von mehr als einem halben Kilometer kein Signal/Blockkennzeichen angeordnet werden darf. Damit soll eine Überbrückung zweier Speiseabschnitte durch den Stromabnehmer eines an der Streckentrennung haltenden Zuges vermieden werden.

- Während heute starre Oberstrombegrenzungen für Züge gelten, könnte ein TMS unter Nutzung aktueller Betriebs- und Energie-Daten je nach aktueller Lage über ETCS eine höhere oder niedrigere Oberstrombegrenzung kommandieren. Einem verspäteten ICE 3 in Doppeltraktion könnten dabei beispielsweise in Abschnitten, die heute einheitlich nur 900 A je Zug erlauben, auch die für volle Traktion notwendige rund 1.400 A erlauben, wenn sonst keine weiteren Züge in dem entsprechenden Speiseabschnitt der Oberleitung verkehren.

6.3 Schnellere Einfahrten ins teilbesetzte Gleis

Nach geltendem Regelwerk dürfen Einfahrten ins teilbesetzte Gleis – auch unter ETCS-Führung – im Bahnsteigbereich nur mit 20 km/h erfolgen (siehe Abbildung 15). Die im Vergleich zur konventionellen Leit- und Sicherungstechnik jedoch wesentlich präzisere Weg- und Geschwindigkeitsüberwachung könnte den Weg ebnen, um eine größere Einfahrtgeschwindigkeit zuzulassen. Damit würden Fahrzeiten verkürzt und die Kapazität aufgrund der schnelleren Räumung des Weichenbereichs erhöht.

Denkbar wäre auch, Einfahrten in besetzte Gleisabschnitte auf Sicht und mit präzise überwachter sehr niedriger Geschwindigkeit (z. B. 10 km/h) zu erlauben, um die verfügbare Bahnsteiglänge bestmöglich zu nutzen.

6.4 ETCS Level 3 Hybrid

In der Ausprägung Level 3 kann auf die streckenseitige Gleisfreimeldung (Achszähler in Abbildung 1) verzichtet werden. Die Gleisfreimeldung erfolgt dabei durch die einzelnen Züge, die neben ihrem Standort der Strecke dabei auch ihre Integrität bestätigen. Anhand dieser Informationen meldet die ETCS-Streckenzentrale (RBC) Gleisabschnitte frei. Neben diskreten Blöcken kann dabei alternativ auch ein „Moving Block“ umgesetzt werden.

ETCS Level 3 *Hybrid* ist eine Kombination von konventioneller und zuggestützter Gleisfreimeldung. Längere, durch Achszähler freigemeldete Abschnitte werden dabei in kleinere, durch den Zug und das RBC freigemeldete Abschnitte unterteilt.

Unter ETCS Level 2 entfällt der größte Anteil der Laufzeit im Gesamtsystem (Abbildung 1) auf das vergleichsweise langsame Stellwerk. Selbst ohne Umlauf von Weichen liegen die Reaktionszeiten zwischen der tatsächlichen (physischen) Räumung eines Gleisabschnitts und der vorliegenden Erlaubnis zur Nutzung dieses Abschnitts für den folgenden Zug (ETCS-Fahrerlaubnis) rund 10 Sekunden.

Da die virtuellen Blöcke rein in der ETCS-Streckenzentrale (RBC) verwaltet werden und das Stellwerk dabei umgangen wird, könnten mit ETCS Level 3 (Hybrid) wesentlich kürzere Laufzeiten realisiert werden. In Verbindung mit dem ab Mitte der 2020er Jahre erwarteten, voraussichtlich auf 5G aufsetzenden neuen Bahnbetriebsfunk (FRMCS) würden Ende-zu-Ende-Laufzeiten von nur noch wenigen Sekunden in greifbare Nähe rücken und gleichzeitig die Infrastruktur weiter vereinfacht werden. Die Mindestzugfolgezeiten könnten damit weiter verkürzt, die Leistungsfähigkeit weiter erhöht werden.

Voraussetzung ist die Umsetzung einer sehr sicheren Zugintegritätsprüfung auf dem Fahrzeug.

6.5 Weiterführende Optimierungen am Bremsmodell

Am Horizont ebenfalls erkennbar sind Weiterentwicklungen am ETCS-Bremsmodell (Change Request 874 zur ETCS-Spezifikation). Unter anderem durch Verbesserungen beim momentan noch unnötig restriktiven Umgang mit Gefälleabschnitten können sich daraus noch etwas kürzere Mindestzugfolgezeiten ergeben.

Aufbauend auf dem Gamma-Bremsmodell (siehe Abschnitt 4.8) besteht schlussendlich auch in der situationsbedingten Variation des Sicherheitsziels noch ein Potentialansatz für noch kürzere Zugfolgezeiten:

- Die Strecke teilt dem Zug mit, mit welcher Sicherheit ein Bremsweg einzuhalten ist. In Deutschland darf eine von zehn Millionen Bremsungen das Ziel verfehlen (Konfidenzlevel).
- Die nominelle, in Bremsversuchen ermittelte Bremsverzögerung wird mit einem Sicherheitsfaktor (zwischen 0 und 1) multipliziert, der im Rahmen von Simulationen ermittelt wurde. Anhand des von der Strecke vorgegebenen Konfidenzlevels einen Wert aus, um das Sicherheitsziel der Infrastruktur zu erfüllen.
- Beispiel: Bei einer nominellen Verzögerung von $1,0 \text{ m/s}^2$ und einem Sicherheitsfaktor von 0,8 würde sich eine Verzögerung von $0,8 \text{ m/s}^2$ ergeben, der von ETCS unterstellte Bremsweg gegenüber dem in Bremsversuchen ermittelten Bremsweg also um 20 Prozent verlängert werden. Eine Verlängerung erfährt damit auch die Zugfolgezeit.
- Das Sicherheitsziel (1 zu 10.000.000) gilt heute für alle Fahrten – für Folgefahrten (gleiches Gleis, gleiche Richtung) ebenso wie für drohende Flanken- oder Gegenfahrten (bei Verfehlung des Gefährpunktes).
- Nach dem Vorbild der *bedingten Belegungsprüfung* auf den ETCS-Level-2-Strecken in der Schweiz könnte für reine Folgefahrten ein niedrigeres Sicherheitsziel kommandiert werden, womit das Fahrzeug einen höheren Sicherheitsfaktor heranziehen und einen kürzeren Bremsweg unterstellen könnte. Durch die Berücksichtigung von Betriebsfall (Folgefahrt) sowie Position und Geschwindigkeit des vorausfahrenden Zuges könnte letztlich dieselbe Sicherheit erreicht werden. Ggf. könnte bei drohenden Flanken- und Gegenfahrten sogar gezielt ein größerer Konfidenzlevel (z. B. eins zu einer Milliarde) gewählt werden, die Sicherheit des Gesamtsystems letztlich erhöht werden.

Ein solcher dynamischer Konfidenzlevel könnte Zugfolgezeiten nochmals um mehrere Sekunden reduzieren.

7 Ausblick, weiteres Vorgehen

Im Rahmen des Bahnprojekts Stuttgart – Ulm wird der gesamte Großknoten Stuttgart vollständig neu konzipiert und umgestaltet.

Damit ergibt sich die einmalige Chance im Rahmen dieses Projekts die neuste und in der Zwischenzeit zur Serienreife entwickelte Leit- und Sicherungstechnik mit DSTW und ETCS umzusetzen. Darüber hinaus steht auch im politischen Umfeld die Förderung neuer innovativer Techniken auf dem Weg zur „Digitalen Schiene Deutschland“ im Fokus. Aufgrund der steigenden Luftverschmutzung in den Ballungszentren, die in Stuttgart immer wieder die Maßnahmen des „Feinstaubalarms“ notwendig machen, wächst die Nachfrage nach öffentlichem Personennahverkehr und hierbei insbesondere Schienenpersonennahverkehr (SPNV).

Wie auf den vorangegangenen Seiten dargestellt, ist eine qualitative und kapazitive Steigerung durch die Umsetzung von digitaler Technik mit DSTW und ETCS möglich. Darüber hinaus bieten diese Techniken die erforderliche Basis für weitere innovative Entwicklungsmöglichkeiten und zeigen einen stufenweisen Weg auf, wie die bestehenden Herausforderungen zu bewältigen sind.

Würde die aktuelle Chance zur Umsetzung von ETCS im Schienenknoten Stuttgart nicht genutzt, ist auf Jahrzehnte eine Erneuerung nicht mehr zu erwarten und damit wären auch die durch die Nachfragesteigerungen anstehenden Herausforderungen im Schienenverkehr auf absehbare Zeit voraussichtlich nicht zu bewältigen.

Das Entscheidungsfenster zur Umsetzung der digitalen Technik im Schienenknoten Stuttgart ist im Moment offen und sollte unbedingt umgehend genutzt werden. Eine Richtungsentscheidung ist bis Anfang des Jahres 2019 zwingend anzuraten, um die notwendigen Planungen und Projektierungen sowohl auf der Infrastrukturseite als auch auf der Fahrzeugseite starten zu können. Eine Verzögerung dieser Entscheidung würde zwangsläufig dazu führen, dass die Umsetzung im Großknoten Stuttgart zum Dezember 2025 nicht möglich wäre und damit weiterhin weitgehend mit konventioneller Leit- und Sicherungstechnik gefahren werden müsste. Insbesondere die Finanzierung der optimierten Planung müsste daher in den nächsten Wochen geklärt und festgeschrieben werden. Entsprechende Gespräche und Diskussionen sind gestartet und sollten nun final beschieden werden.

8 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
ATO	Automatic Train Operation
CR	Change Request/Änderungsanforderung
D-Weg	Durchrutschweg
DSTW	Digitales Stellwerk
EBA	Eisenbahn-Bundesamt
ESTW	Elektronisches Stellwerk
ETCS	European Train Control System
FRMCS	Future Rail Mobile Communication System
GoA	Grade of Automation (Automatisierungsgrad [bei ATO]): GoA 2 automatisierter Betrieb mit Überwachungsfunktion durch Triebfahrzeugführer GoA 3 Betrieb ohne Triebfahrzeugführer GoA 4 Betrieb ohne Personal (auch für Abfahrauftrag)
GSM-R	Global System for Mobile Communications - Rail
Hbf	Hauptbahnhof
H/V	H/V-Signalsystem (Haupt-/Vorsignal-System)
HVZ	Hauptverkehrszeit
IBN	Inbetriebnahme
km/h	Kilometer pro Stunde
Ks(-Signal)	Kombinationssignalsystem
LST	Leit- und Sicherungstechnik
LZB	Linienzugbeeinflussung
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung
RBC	Radio Block Centre (ETCS-Streckenzentrale)
RSTW	Relaisstellwerk
S-Bahn	Stadtschnellbahn
TMS	Traffic Management System
VRS	Verband Region Stuttgart (Aufgabenträger)