

„Digitale“ Kapazitätssteigerungen: ein Sachstand

Michael Kümmling und Sven Wanstrath

1 Motivation

Die Frage, ob und inwieweit mit „digitalen“ Mitteln tatsächlich mehr Züge auf bestehenden Gleisen fahren können oder zumindest die Betriebsqualität verbessert werden kann, ist hochumstritten. Vielfach zu hörende Prozentwerte sind meist öffentlich nicht weiter fundiert und bleiben nicht selten ohne Bezug. Dagegen sind viele Praxiserfahrungen ernüchternd, erweist sich neue Technik beispielsweise als langsamer und weniger flexibel. [1, 2] Oft reichen Diskussionen auch nicht über die Blockteilung bzw. die Perspektive „Moving Block“ und einzelne Facetten wie Bremskurven hinaus.

Der vorliegende Beitrag fasst den Stand der Erkenntnisse aus der Arbeit am Digitalen Knoten Stuttgart (DKS) zusammen, einem Pilotprojekt im Starterpaket der Digitalen Schiene Deutschland (DSD). Er führt dabei eine ausführliche Darstellung von 2019 [3] fort und ergänzt ferner den Beitrag zur DSD im vorliegenden EIK [4]. Er fußt auf zahlreichen Fachbeiträgen und Vorträgen, fasst wesentliche Erkenntnisse zusammen und ergänzt diese um weitere Erfahrungen aus der laufenden Konzeption, Planung und Umsetzung des Projekts (Abb. 1).

Im Rahmen des DKS wird erstmals die Leit- und Sicherungstechnik (LST) in einem großen deutschen Knoten umfassend „digitalisiert“. Auf der Grundlage Digitaler Stellwerke (DSTW) und des Zugbeeinflussungssystems ETCS (European Train Control System) werden Schritt für Schritt rund 500 km bzw. rund 1,5 % des DB-Streckennetzes ausgerüstet und weitere Techniken in Betrieb genommen. [5] Eng darauf abgestimmt erhalten zunächst 333 bestehende und 130 neue Triebzüge (Tz) eine vollwertige DSD-Fahrzeugausrüstung, die neben ETCS auch weitere Elemente umfasst. [6, 7, 8] Im Rahmen eines Modellvorhabens fördert der Bund die Fahrzeugausrüstung, u. a. geknüpft an 24 technische Bedingungen, die weit über bloßes ETCS hinausgehen. [9] Anlässlich des DKS beschafft das Land Baden-Württemberg eine Ersatzfahrzeugflotte von 28 Tz mit DSD-Fahrzeugausrüstung [10], und es werden bis zu 127 Instandhaltungsfahrzeuge [11] nachgerüstet.

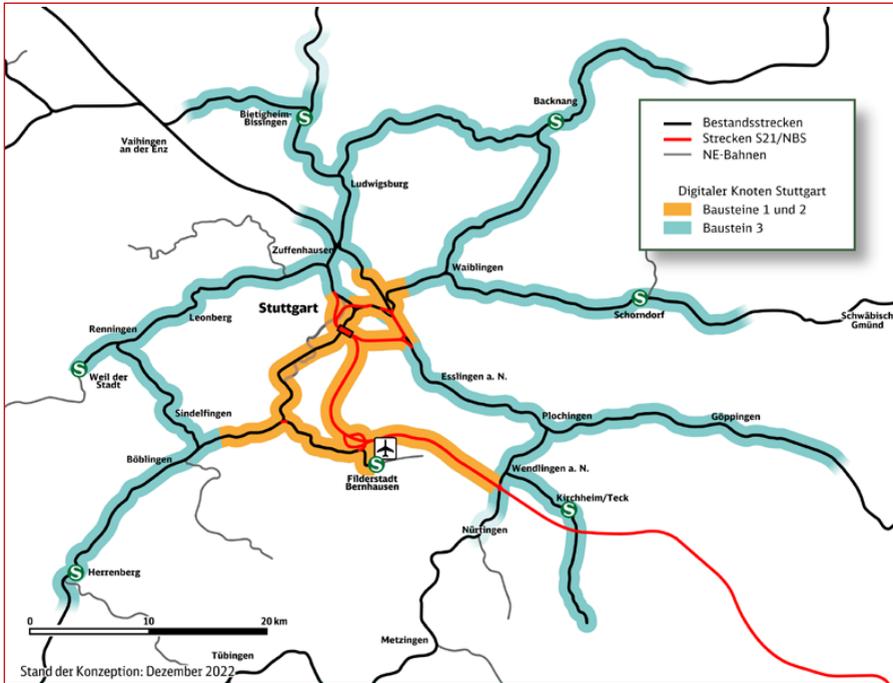


Abb. 1: Der DKS ist ein Pilotprojekt im Starterpaket der Digitalen Schiene Deutschland.

(Quelle aller Abbildungen: Deutsche Bahn)

Ein wesentliches Ziel des Pilotprojekts liegt darin, die Kapazität und Leistungsfähigkeit des Fahrwegs zu erhöhen und dabei die Möglichkeiten und Grenzen entsprechender Optimierungen zu ergründen, unter anderem durch eine eng aufeinander abgestimmte Fahrzeug- und Infrastrukturausrüstung. [9, 12, 13, 14]

Das in Abb. 2 umrissene Zusammenwirken im Endzustand des DKS fußt dabei auf drei Säulen:

- Die Fahrzeugausrüstung reicht weit über einfaches ETCS hinaus und beinhaltet u. a. hochautomatisiertes Fahren (ATO GoA 2, mit Triebfahrzeugführer (Tf)), eine Zugintegritätsüberwachung (TIMS) sowie Fahrzeugzustandsdaten (TCR). [6, 15]
- Die Infrastrukturausrüstung beinhaltet neben DSTW, ETCS-Zentralen (RBC) und dem integrierten Leit- und Bediensystem (iLBS) [16] insbesondere auch ein Kapazitäts- und Verkehrsmanagementsystem (CTMS) [17] sowie einen Server für ATO (ATO-TS).
- Damit einher geht ein grundlegend modernisiertes und teils neu gefasstes betriebliches Regelwerk, insbesondere eine neue Fahrdienstvorschrift (Richtlinie 400), die ab Dezember 2027 im DKS pilotiert werden soll. [5, 18]

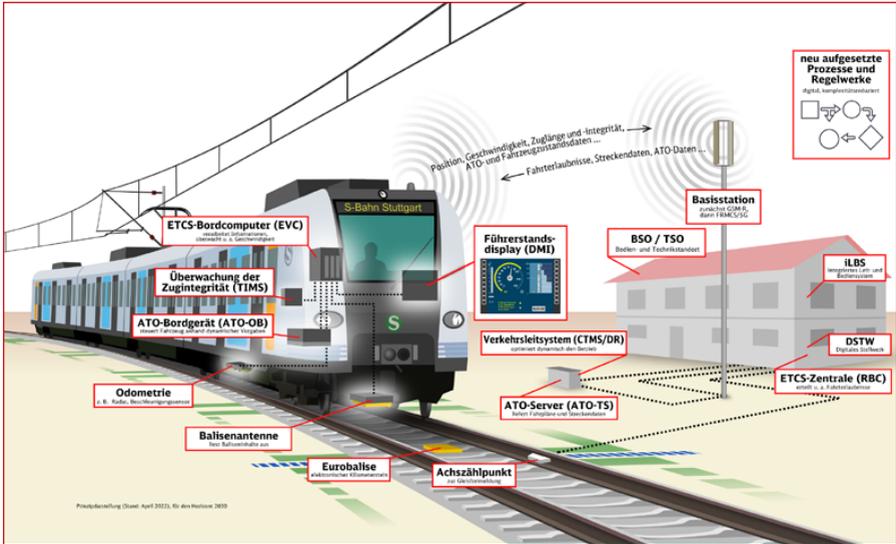


Abb. 2: Vereinfachte Darstellung des Zusammenwirkens von Fahrzeug- und Infrastrukturausrüstung samt betrieblicher Regelwerke (im Endzustand, Horizont 2030)

Zündfunke für den DKS waren um 2015 Überlegungen, die S-Bahn-Stammstrecke anstatt mit neuer, im Rahmen von Stuttgart 21 (S21) ohnehin notwendiger neuer LST (Ks-Signale und PZB) mit ETCS auszurüsten. Das Land Baden-Württemberg, der Verband Region Stuttgart (als Aufgabenträger der S-Bahn) und die Deutsche Bahn AG (DB) beauftragten 2017 gemeinsam eine mit rund 1 Mio. EUR ausgestattete Studie. Der Anfang 2019 vorgelegte, 422-seitige Abschlussbericht zeigte, dass ETCS und eine erste Anwendung von ATO nicht nur technisch machbar, sondern auch betrieblich sinnvoll ist: Unter konservativen Prämissen wurden, im Vergleich zu konventioneller LST, auf der Stammstrecke rund 20 % kürzere Mindestzugfolgezeiten erwartet. [19, 20, 21] Auf der Grundlage dieser Ergebnisse fielen in den Jahren 2019 und 2020 wegweisende Entscheidungen. [22]

Bis 2025 soll zunächst der Kern des Knotens mit einem Umfang von rund 125 Streckenkilometern mit DSTW und ETCS Level 2 ausgerüstet werden. Darin enthalten ist die S-Bahn-Stammstrecke, die neue Infrastruktur von S21 sowie weitere angrenzende Bereiche von Stellwerken (Stw), die im Rahmen des Großprojekts ohnehin umfassend angepasst worden wären und die nun ebenfalls in einem DSTW aufgehen. Die in Abb. 3 dargestellte ETCS-Ausrüstung erfolgt überwiegend „ohne Signale“ – lediglich in zwei Bereichen mit regelmäßigem Güterverkehr, der bis 2025 noch nicht vollständig mit ETCS ausgerüstet sein wird, erfolgt eine vorübergehende Doppelausrüstung, die bereits ab 2024 Tests von ETCS ermöglicht, während der Regelbetrieb zunächst noch konventionell läuft.

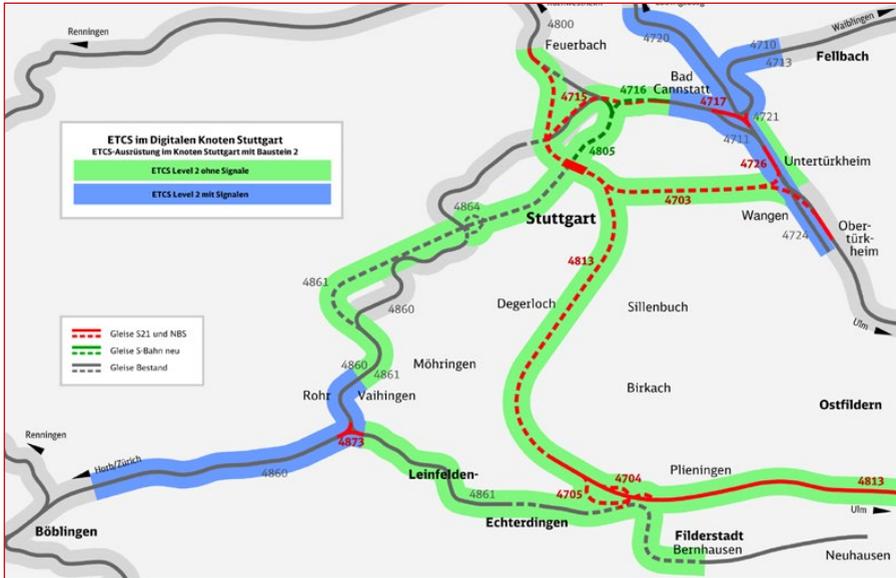


Abb. 3: ETCS-Ausrüstung nach Umsetzung der Bausteine 1 und 2

2 „Digitale“ Optimierungen

Ein wesentlicher Teil der Optimierungen zur Erhöhung der betrieblich-verkehrlichen Leistungsfähigkeit liegt weitgehend in der LST selbst.

2.1 Blockteilung

Die naheliegendste „digitale“ Optimierung liegt in einer dichten Blockteilung. ETCS selbst kennt keine Untergrenze für die Länge von Zugfolgeabschnitten, gleichwohl setzt die zugrunde liegende Gleisfreimeldung der DB Netz AG eine untere Grenze von 30 m. [20] Während konventionelle Signalisierung – mit Haupt- und davor angeordneten Vorsignalen – in Deutschland zumeist nur über zwei Abschnitte vorausschauend, kann ETCS Level 2 (mit Führerraumsignalisierung) über praktisch beliebig viele derartige Abschnitte hinweg signalisieren. Dies ermöglicht sowohl, besonders kurze Abschnitte zu bilden und zu nutzen (ETCS lässt dann ggf. nur eine geringe Geschwindigkeit zu – siehe Abschnitt 2.4) als auch eine Fahrterlaubnis über viele Abschnitte bzw. einige Kilometer hinweg zu erteilen – und somit schneller zu fahren, als dies konventionell, mit Vorsignalen im Kilometerabstand, möglich wäre.

Die Blockteilung für den Kern des DKS wurde in dem in [23] beschriebenen Verfahren mikroskopisch, d.h. über eine Vielzahl von erwarteten Zugfolgefällen hinweg,

optimiert, um möglichst kurze Sperrzeiten zu erreichen. Daraus gingen gezielt dichte Blockteilungen in Bereichen hervor, die für kurze Zugfolgezeiten besonders wichtig sind: beispielsweise an Weichen, in Bahnhofsbereichen oder an anderen Geschwindigkeitswechseln.

Für die S-Bahn-Stammstrecke wurde eine Teilung bis zu 30 m kurzen Blöcken in Bahnsteigbereichen entwickelt (Abb. 4). Besonders kurze Abschnitte werden dabei insbesondere vor und am Bahnsteiganfang angeordnet, um hinter einem zunächst langsam anfahrenden Zug möglichst zügig nachrücken zu können. Nach dem Bahnsteigende wurden ein bis zwei zusätzliche Blöcke vorgesehen, um selbst mit ungünstigen ETCS-Bremskurven eine „freie“ Betriebsbremsung zum Bahnsteigende zu ermöglichen. Zwischen den Stationen, wo Züge planmäßig bis zu 80 km/h durchfahren, reichen hingegen bis zu 1,3 km lange Abschnitte aus. [21] Im besonders hochbelasteten Kernbereich der Stammstrecke können damit die Mindestzugfolgezeiten um eine halbe Minute verkürzt werden. [20]

Im Fildertunnel, der von Fern- und Regionalverkehrszügen mit 100 bis 250 km/h befahren wird und in dem u. a. eine 160 – 250-km/h-Schwelle ungefähr in der Tunnelmitte liegt [25], wurden die typischerweise 1,9 km langen Blockabschnitte beibehalten, jedoch an jener Schwelle und in den Bahnhofsein- und -ausfahrten bis auf 0,2 km verdichtet.

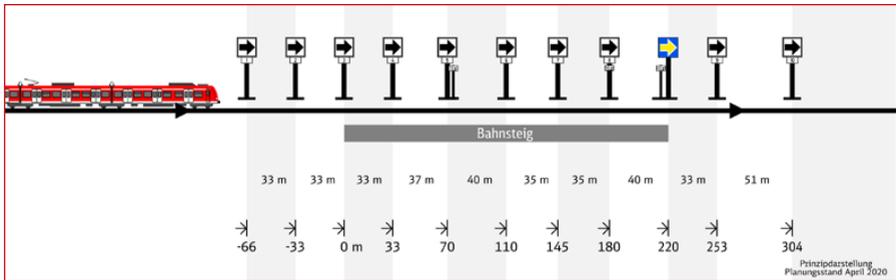


Abb. 4: Blockteilung für „maximale Leistungsfähigkeit“ für eine fiktive, brettebene Station der S-Bahn-Stammstrecke

Gegenüber der zuvor vorgesehenen Blockteilung mit weitgehend 1,9 km langen Abschnitten konnte die Folge zweier ICE-3-Tz um eine halbe Minute verkürzt werden. [23]

Beide Beispiele verdeutlichen, wie eine optimierte Blockteilung für kürzere Zugfolgezeiten gegenüber einer einfachen, starren Blockteilung mit weniger Aufwand gleichzeitig mehr Leistungsfähigkeit schaffen oder mit geringem Mehraufwand zu deutlich mehr Kapazität führen kann.

Gerade in Bahnhöfen wäre eine besonders dichte Blockteilung oftmals wünschenswert: Aufgrund meist relativer geringer Geschwindigkeiten und zusätzlicher System-

laufzeiten (für umlaufende Weichen) werden Abschnitte gleicher Länge deutlich länger belegt als auf der freien Strecke. Gleichzeitig ließe sich eine dichte Blockteilung wegen vieler, ohnehin vorhandener Achszählpunkte (z. B. an Weichen) und vieler Balisen vergleichsweise einfach herstellen.

Doch gerade in Bahnhöfen, darunter auch dem Stuttgarter Hbf [26], stößt die Blockteilung bislang an einige Grenzen:

- In den in Bahnhofsköpfen in der Regel angeordneten Schaltabschnittsgrenzen der Oberleitung (Streckentrennungen) hat der Stromabnehmer kurzzeitig Kontakt zu zwei Fahrdrähten: dem des Bahnhofs und dem der freien Strecke. Um zu vermeiden, dass ein Stromabnehmer in diesem Bereich zum Halt kommt oder sehr langsam fährt (und damit die Oberleitung beschädigt), darf typischerweise auf einer Länge von etwa einem Dreiviertelkilometer kein Signal bzw. Blockkennzeichen angeordnet werden. [27, 28]
- Zwischen nahtlos aufeinander folgenden Weichen dürfen keine Signale bzw. Blockkennzeichen angeordnet werden. Dies schränkt beispielsweise die Blockteilung in den dicht gedrängten Köpfen des besonders langsam befahrenen Abstellbahnhofs Untertürkheim erheblich ein. [23]
- An Bahnsteigen durften Blockkennzeichen bislang nur bei reinen S-Bahn-Stationen angeordnet werden. Im Hinblick auf die Nachweisführung gegen Gefährdungen, wenn ein Zug teilweise am Bahnsteig zum Stehen kommt, existiert bisher nur im Bereich der S-Bahnen ein Referenzsystem – die S-Bahn-Stammstrecke München. Abseits dessen gibt es z. B. eine größere Vielfalt von Türsteuerungs- / Abfertigungssystemen).
- Große Metallmassen (big metal masses), wie sie beispielsweise an einigen hydraulischen Weichenantrieben in Stuttgart Hbf vorkommen, können die Spielräume zur Anordnung von Balisen, wie sie auch an Signalen und Blockkennzeichen erforderlich sind, einschränken und somit Rückwirkungen auf die Blockteilung haben. Auch Befahrbarkeitsbeläge auf Weichen können entsprechende Einschränkungen auslösen.
- Daneben gibt es Sonderfälle wie beispielsweise Rettungszufahrten von Straßenfahrzeugen in Stuttgart Hbf, die bei der Signalanordnung zu berücksichtigen sind.

Abseits von Bahnhöfen liegt ein wesentliches Hemmnis für die Blockteilung an Bahnübergängen, die ebenfalls nicht durch einen am Signal bzw. Blockkennzeichen haltenden Zug verstellt werden sollen.

In Bereichen, die vorübergehend noch „doppelt“ (mit ETCS und Ks-Signalen/PZB) ausgerüstet werden, ergeben sich weitere Restriktionen, darunter:

- Gefahrpunktabstände und Durchrutschwege (s. Abschnitt 2.2) sind in der konventionellen Signalisierung länger und wirken damit auch auf ETCS zurück.
- Blockkennzeichen dürfen nicht in projektierten Durchrutschwegen bzw. Gefahrpunktabständen vorgesehen werden. Wäre beispielsweise die S-Bahn-Stammstrecke

„doppelt“ ausgerüstet worden, hätte die in Abb. 5 dargestellte Unterteilung des Abschnitts zwischen dem Licht-„Einfahrsignal“ und dem Bahnsteiganfang nicht realisiert werden können. Durch die reine Ausrüstung mit ETCS kann hingegen ein Blockkennzeichen ungefähr 30 m vor dem Bahnsteig angeordnet (Abb. 4) und somit dichter an einen am Bahnsteig haltenden Zug herangefahren werden.

- Restriktionen der konventionellen Signalisierung, wie Signalsicht und Mindestabstände, wirken auch auf ETCS zurück.
- Mindestabstände zwischen Signalen bzw. Vorsignalen und Blockkennzeichen
- Die Blockteilung im Umfeld von Bahnübergängen wird aufgrund von Wechselwirkungen erheblich erschwert. [29]

Oft enden die Diskussionen um „digitale“ Leistungssteigerungen an einer verdichteten Blockteilung. Tatsächlich geht es um ungleich mehr Facetten, die im Weiteren vorgestellt werden.

2.2 Durchrutschwege und Gefahrpunktabstände

Durchrutschwege (hinter Zwischen- und Ausfahrtsignalen) bzw. Gefahrpunktabstände (hinter Einfahr- und Blocksignalen) sind Schutzabschnitte, die für den Fall freizuhalten sind, dass ein fahrender Zug den Ziel- bzw. Gefahrpunkt an einem „Halt“ zeigenden Signal verfehlt. Im konventionellen Betrieb richten sich diese Abstände nach althergebrachten, teils tief in das 20. Jahrhundert zurückreichenden Regeln. Für schnelle Einfahrten (über 60 km/h) im Gefälle führen diese Regeln beispielsweise in Stuttgart

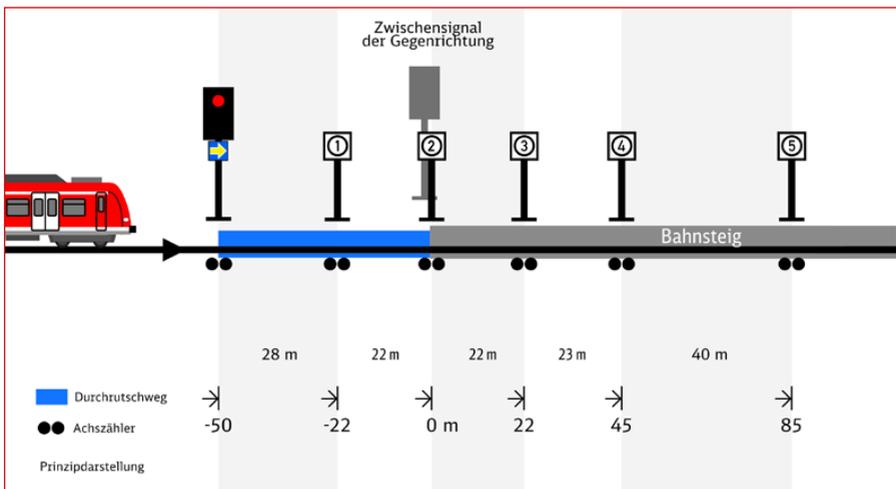


Abb. 5: Eine der frühen Überlegungen zur Optimierung der Blockteilung vor Bahnsteigen auf der S-Bahn-Stammstrecke, die sich als nicht umsetzbar erwiesen hat (2018)

Hbf vielfach zu notwendigen Durchrutschweg-Längen von bis zu 300 m, die unter Berücksichtigung der Gleisfreimeldeabschnitte in der Praxis bis zu rund 350 m lang werden. [26, 30] Im Betrieb mit ETCS Level 2 werden bei DB Netz AG hingegen Durchrutschwege nur mit Werten von 50 bis 70 m projektiert [31], in Sonderfällen wie S-Bahn-Stammstrecken werden sie auf bis zu 30 m verkürzt, in Ausnahmefällen (wie Einfahrt in teilbesetzte Gleise) können sie auch auf 0 gesetzt werden. Durch verkürzte Gefahrpunktabstände können Einfahrsignale näher an die erste Weiche herangezogen werden. Derartige Verkürzungen sind möglich, da ETCS den Zug in der Regel lückenlos und präzise überwacht und schnellere Annäherungen an Haltsignale über 15 km/h praktisch ausgeschlossen werden können. Im Übrigen werden längere Werte als 70 m durch die ETCS-Zentrale ohnehin nicht übermittelt. [32]

Die Wirkung derartiger Durchrutschwege verdeutlicht das Beispiel in Abb. 6: Konventionell sind während einer schnellen Einfahrt ins Gleis 3 rund 300 m freizuhalten (blau), wodurch vorübergehend keine Ausfahrten aus den Gleisen 1 und 2 in diese Richtung möglich sind. Mit ETCS reichen hingegen rund 50 m aus (gelb), wodurch keine weiteren Ausfahrten eingeschränkt werden.

Neben den Vorgaben des Regelwerks hängen sinnvolle Längen von Durchrutschwegen und Gefahrpunktabständen maßgeblich von den erwarteten Zügen und deren Bremskurven (s. Abschnitt 2.4) ab. Züge mit einer besonders „guten“, schnell aufbauenden Bremse kommen mit besonders kurzen Durchrutschwegen besser zurecht als solche mit einer vergleichsweise schwach verzögernden, „langsam“ aufbauenden Bremse.

2.3 Systemlaufzeiten

Bei der Konzeption und Planung des DKS rückten frühzeitig Systemlaufzeiten in den Fokus: Auf der Grundlage von Regelwerken, Praxisbeobachtungen und Herstellerbefragungen ging die S-Bahn-ETCS-Untersuchung von Ende-zu-Ende-Laufzeiten von

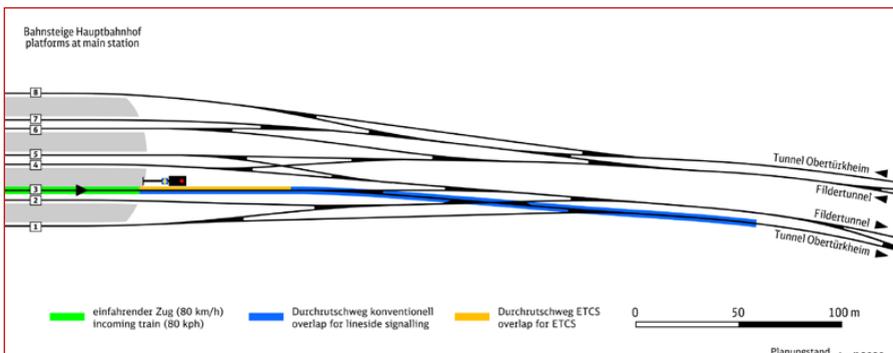


Abb. 6: Vergleichendes Beispiel eines Durchrutschwegs in Stuttgart Hbf

13,3 Sekunden aus, aufgerundet 14 Sekunden. [20, 33] 14 Sekunden Laufzeit – für Stw, ETCS und Schnittstellen, von der physischen Gleisfreimeldung bis zur verarbeiteten Fahrterlaubnis auf dem folgenden Zug – hätten beispielsweise an einem Bahnsteig der S-Bahn-Stammstrecke bedeutet: Trotz einer für kürzest mögliche Zugfolgen optimierten Blockteilung hätte der Tf des nachfolgenden Zug die Erlaubnis zur Einfahrt in einen ersten (bis zu 30 m kurzen) Block am Bahnsteiganfang erst ungefähr in dem Moment erhalten, nachdem der vorausfahrende Zug den Bahnsteigbereich komplett geräumt hätte (Abb. 7). Mit Blick auf den massiven Investitionsaufwand für S-Bahn-ETCS – beispielsweise Kosten der Fahrzeugausrüstung im dreistelligen Millionen-EUR-Bereich – schien dies untragbar.

Während viele andere Bahnen bereits Anforderungen an Systemlaufzeiten (im Sinne einer dichten Zugfolge) hatten, gibt es im Bereich der DB Netz AG bis heute keine derartigen Anforderungen. In der Praxis wird vielfach beobachtet, wie neue Stw und ETCS oft (teils erheblich) langsamer als Alntechnik sind. Vor diesem Hintergrund wurde der in [33] beschriebene Laufzeitwettbewerb konzipiert: Anhand sechs für die betriebliche Leistungsfähigkeit im Kern des Knotens besonders wesentlicher Szenarien (Abb. 8) waren Laufzeiten für Teilsysteme und -schritte zu benennen und flossen mit insgesamt 5 % in die Gesamtbewertung mit ein. Die Angaben wurden hinterfragt, durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) validiert und wurden schließlich Bestandteil der Vergabeentscheidung zugunsten von Thales im November 2020. Alle Bewerber hatten deutlich geringere Laufzeiten als noch 2019 erwartet geboten.

Ein wesentlicher Teil der Optimierungen liegt dabei in der „Black Box“ des Lieferanten, darunter verkürzte Bearbeitungszeiten innerhalb des Stw. Weitere Optimierungen

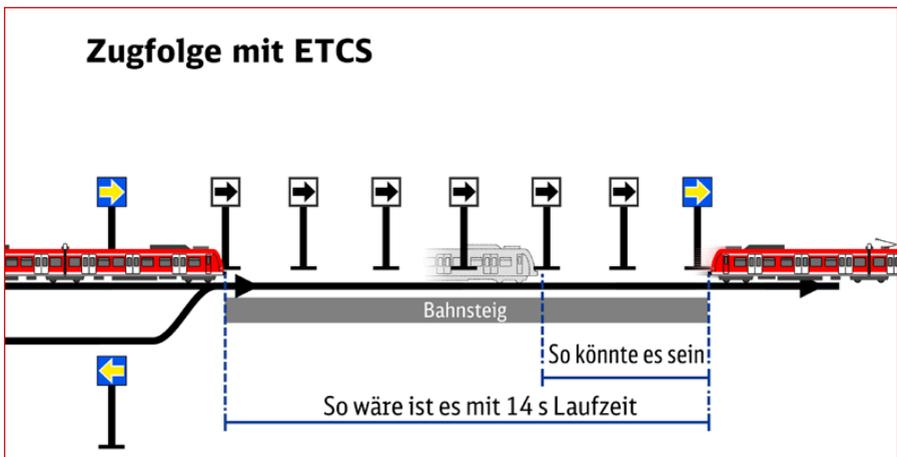


Abb. 7: Frühe konzeptionelle Überlegung zur Wirkung verkürzter Systemlaufzeiten

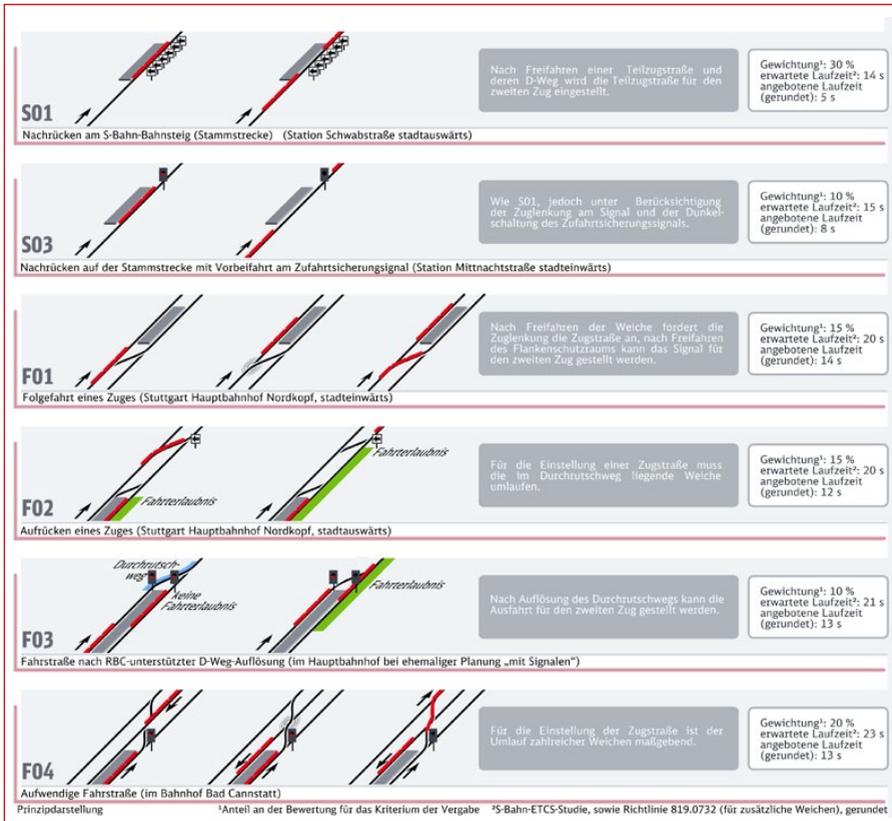


Abb. 8: Laufzeitszenarien im Rahmen des Vergabeverfahrens für den Kern der LST-Infrastruktur (2019/2020)

wurden von Auftragnehmer und Auftraggeber gemeinsam konzipiert: beispielsweise eine für den gleichzeitigen Umlauf vieler Weichen dimensionierte Stromversorgung oder eine Umgehung der Zuglenkung mittels einer Art modernem Selbststellbetrieb [34]. Im Ergebnis konnten die erwarteten Systemlaufzeiten um 5 bis 10 Sekunden verkürzt werden (Abb. 8), beispielsweise für die Zugfolge auf der S-Bahn-Stammstrecke um volle 9 Sekunden. Dank der verkürzten Zeiten können zukünftig zur „Rush Hour“ mehrere zusätzliche S-Bahnen pro Stunde und Richtung durch das Herz von Stuttgart geführt werden.

Nicht Gegenstand des Laufzeitwettbewerbs waren dabei zwei Elemente, die nicht in der Hand des Infrastrukturausrüsters liegen: Funkübertragung und die Verarbeitungszeit der ETCS-Fahrterlaubnis auf dem Fahrzeug.

Die 1,8 Sekunden zur Übertragung einer Fahrterlaubnis mit GSM-R sind konservativ modelliert. Während der Zeitbedarf für eine Übertragung bei etwa 0,8 Sekunden liegt, wird noch der seltene Fall von Verzögerungen und damit einhergehender erneuter Übertragungen (Retransmission) mitberücksichtigt. [33] Derartige Verzögerungen können in leistungskritischen Bereichen durch ein besonders hochwertiges Funkfeld und die Vermeidung von Handovern zwischen Basisstationen vermieden werden. Mit FRMCS wird dieser Wert voraussichtlich (aufgerundet) 0,1 Sekunden [35] betragen. Ein Potenzial für GSM-R liegt noch darin, die Übertragungsraten von 4800 auf 9600 bit/s zu erhöhen – einem sowohl von vielen Fahrzeugen als auch dem GSM-R-Netz und RBC in Deutschland beherrschten Wert.

Der zur Verarbeitung der Fahrterlaubnis auf dem Zug vorgesehene Wert von bislang 1,5 Sekunden liegt in der entsprechenden Mindestanforderung der ETCS-Spezifikation. [36] Der tatsächliche Wert soll zumindest bei den 463 von Alstom auszurüstenden Tz bei rund 0,5 Sekunden liegen. [6] Unter dem Strich werden im Horizont 2030 (mit neuem Funk) an den für die Leistungsfähigkeit besonders kritischen S-Bahn-Bahnsteigen Ende-zu-Ende-Systemlaufzeiten von gerade einmal 2 Sekunden erwartet.

Ein potenzieller Bremsklotz für kurze Systemlaufzeiten liegt bei Fahrterlaubnissen „über Stellwerksgrenzen hinweg“, die erst erteilt werden dürfen, „wenn der in der ETCS-Zentrale bekannte Zustand aller Weichen bis zum real Halt zeigenden“ Signal/Blockkennzeichen „der realen Situation im Stw entspricht“. Eine bis zu 10 Sekunden lange, zwischen Lieferant und DB abzustimmende Verzögerung ist an Stellwerks- oder Modulgrenzen vorzusehen. [37] Mit dieser Verzögerung bei der Erteilung einer Fahrterlaubnis soll sichergestellt werden, dass das zugrunde liegende Abbild der Stw im RBC (Stellung Weichen und Signale) dann aktuell ist, wenn es zu Verzögerungen oder zunächst nicht erkannten Ausfällen an einer der Schnittstellen zwischen RBC und mehreren beteiligten Stellwerksmodulen kommt. Die Grenzen derartiger Module werden im DKS daher in Bereiche gelegt, in denen längere Laufzeiten hingenommen werden können, wobei dem auch durch eine gezielt verkürzte Blockteilung entgegengewirkt werden kann. Längerfristig soll die Verzögerung durch eine Art Vorbelegungsmeldung von Weichen an das RBC entfallen.

Perspektivisch, wenn zur Gleisfreimeldung zumindest abschnittsweise auch Positions- und Integritätsinformationen des Zuges herangezogen werden, kommt u.a. der Offenbarungszeit der Zugtrennung auf dem Fahrzeug eine wesentliche Bedeutung zu. Diese liegt bei der Nachrüstung von 333 Tz für den DKS bei 3,5 Sekunden [15] und führt damit zumindest im infrastruktureitig durchoptimierten Bereich der S-Bahn-Stammstrecke zu einer eher etwas späteren Gleisfreimeldung. [34]

2.4 Bremskurven, Bremsen und Odometrie

Anhand diverser Fahrzeug- und Infrastrukturparameter berechnet das ETCS-Fahrzeuggerät (EVC) eine Schar von Bremskurven, die von der Vorankündigung der bevorstehenden Bremsung (Indication) bis zur Schnellbremsablaufkurve reichen. [2] (Abb. 9) Während im konventionellen Betrieb der Bremseninsatz für die Zugfolge von dem in starren Abständen angeordneten Vorsignal abhängig ist, hängt die Bremskurvenberechnung des EVC maßgeblich von der Bremsanlage des Zuges ab, beispielsweise im Hinblick auf Bremsverzögerungen und Bremsaufbauzeiten. Auf „besser“ bremsenden Zügen (wie Tz des Personenverkehrs) werden eher steilere Bremskurven (mit späteren Bremseninsatzpunkten) berechnet als auf als „schlechter“ bremsenden Züge (wie Güterzügen). [38] Darüber hinaus fließen auch einige Infrastrukturdaten (wie Längsneigungen) oder gewisse Vorgaben des Infrastrukturbetreibers (Nationale Werte) ein. Im Übrigen können Fahrzeugbetreiber eine optionale Guidance Curve (GUI) definieren, die an die Stelle der Sollkurve (Permitted) tritt und beispielsweise genutzt werden kann, damit Tf Bremskurven besser folgen können oder Verschleiß gemindert wird. [2]

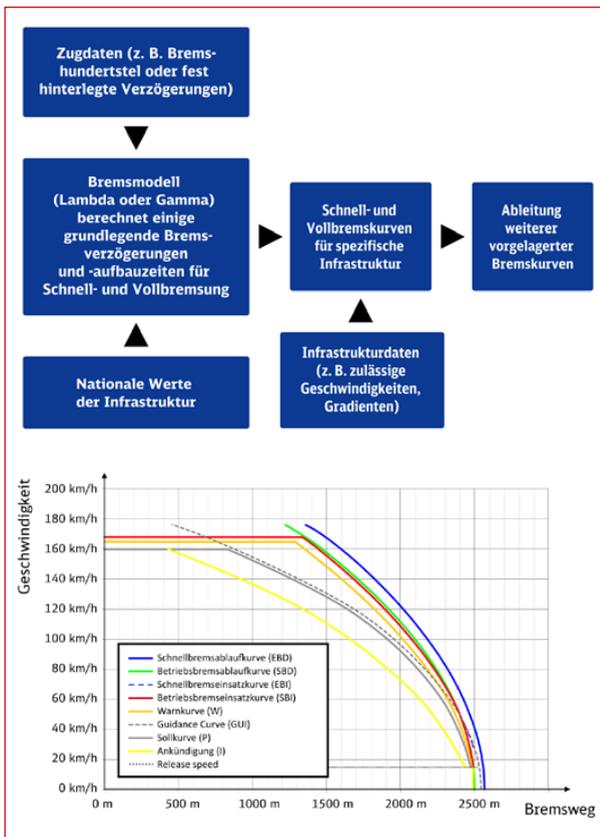


Abb. 9: Vereinfachte Darstellung der ETCS-Bremskurvenberechnung und exemplarische Bremskurvenschar

[38] Darüber hinaus fließen auch einige Infrastrukturdaten (wie Längsneigungen) oder gewisse Vorgaben des Infrastrukturbetreibers (Nationale Werte) ein. Im Übrigen können Fahrzeugbetreiber eine optionale Guidance Curve (GUI) definieren, die an die Stelle der Sollkurve (Permitted) tritt und beispielsweise genutzt werden kann, damit Tf Bremskurven besser folgen können oder Verschleiß gemindert wird. [2]

In der inzwischen gängigen Baseline 3 bietet ETCS zwei Modelle zur Bremskurvenberechnung [2]:

- Das für fast alle Züge (bis 200 km/h) anwendbare Conversion Model (auch Lambda-Modell)

berechnet Bremskurven anhand althergebrachter Parameter wie Bremshundertsstel, Zuglänge, Zugart und Bremsstellung.

- Das alternative und insbesondere für feste Kompositionen (wie Tz) anwendbare Gamma-Modell verwendet einen völlig anderen Modellierungsansatz, in dem Bremsaufbauzeiten, gestufte Bremsverzögerungen und darauf einwirkende Faktoren, die die Verfügbarkeit des Bremssystems abbilden, eine Rolle spielen.

Je nach Randbedingungen und Blickwinkel kann entweder das Lambda- oder das Gammamodell vorteilhaft sein. Bei den für den Kern des DKS aus- und nachgerüsteten Tz wird zumeist das Gammamodell verwendet, wobei insbesondere kurze Zugkonfigurationen das Lambda-Modell nutzen. [2] Eine automatische Auswahl des Bremsmodells nach der Zugdateneingabe (im Hintergrund und abhängig von den Parametern) ist eine der für den DKS konzipierten Optimierungen der Fahrzeugausrüstung. Daneben werden in der ETCS-Spezifikation nur optional bereitzustellende Parameter befüllt und weitere Parameter besonders genau bereitgestellt, um steilere Bremskurven zu erzeugen. [2]

Eine Reihe von Potenzialen verbleibt im Rahmen wie auch in Weiterentwicklungen der ETCS-Spezifikation. Dazu zählen beispielsweise veränderte Sicherheitsfaktoren oder auch eine bessere Modellierung von Bremsungen in wechselnden Längsneigungen, wie sie beispielsweise vielfach auf der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart vorkommen. Bei Neufahrzeugen bestehen darüber hinaus besondere Spielräume, sowohl für eine „bessere“ Bremse als auch gezielte Optimierungen (der Verfügbarkeit) für günstigere ETCS-Bremskurven. [2]

In besseren Bremsen zukünftiger Neufahrzeuge liegt im Übrigen das größte verbliebene Potenzial für noch kürzere Zugfolgezeiten auf der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart: Würden derartige Züge beschleunigen und bremsen wie Stadtbahnen der Stuttgarter Straßenbahnen (SSB), und würden sie mit hoher Schnellbremsverzögerung vorausschauend geführt [38], wären Verkürzungen von bis zu rund 20 Sekunden möglich. [49] Offen ist dabei u. a., welche Betriebsbremsverzögerungen für Fahrgäste akzeptabel sind und welche Bedeutung demgegenüber der Ruck hat.

Noch auf dem Prüfstand stehen Guidance Curves für verschiedene Triebzugreihen im DKS. Damit Tf den sich aus der Bremskurvenberechnung ergebenden Bremskurven in der Praxis folgen können und gleichzeitig allzu flache (die Zugfolgezeit verlängernde) Bremskurven vermieden werden, werden GUI mit einigen Verzögerungsstufen gebildet. Zum Ausgleich mannigfaltiger Effekte in Längsneigungen werden auch gesonderte Korrekturfaktoren (K_{n+} , K_{n-}) genutzt. Im Zusammenhang mit ETCS-Bremskurven steht auch die Ortung [6]: Je genauer die fahrzeugseitige Odometrie arbeitet und je genauer die zur Ortung herangezogenen Balisengruppen eingemessen und in der ETCS-Zentrale projiziert sind, umso geringer ist der Wegmessfehler „vor“ dem Fahrzeug, und umso später setzten ETCS-Bremskurven ein (Abb. 10). Aufgrund der in Hochleistungsbereichen

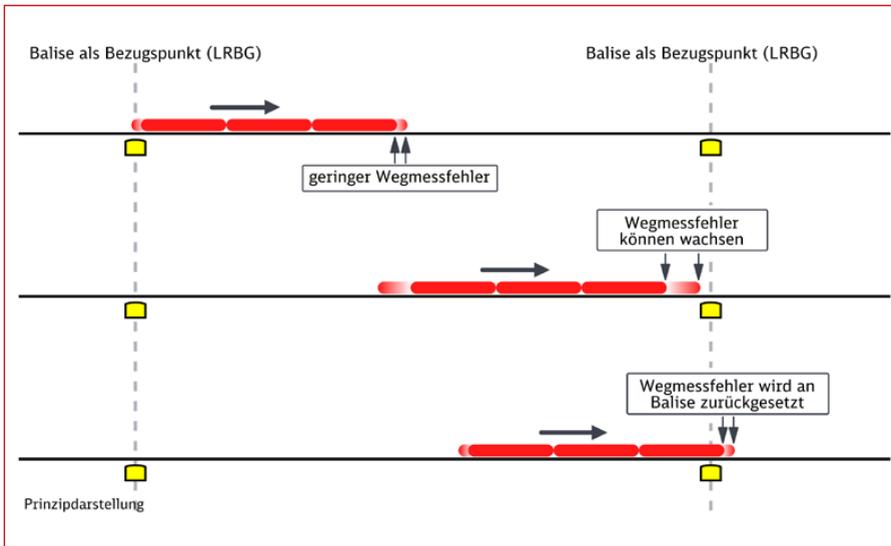


Abb. 10: An geeigneten Balisengruppen (LRBG) wird der Wegmessfehler der ETCS-Fahrzeugausrüstung zurückgesetzt und wächst anschließend bis zur nächsten LRBG an.

ohnehin vorherrschenden Balisendichte (bis hin zu „Balisentepichen“ [21]), deren Projektierung auf 2 m genau ist [34], sowie der im Regelbetrieb besonders genau arbeitenden Odometrie vieler Züge [6] wird im Kern des DKS eine in der Regel auf wenige Meter genaue Ortung erwartet. Während die S-Bahn-ETCS-Untersuchung von 2019 noch pauschal von einem Ortungsfehler „nach vorne“ von 55 m ausging, werden inzwischen um die 5 m erwartet.

2.5 Hochautomatisiertes Fahren (ATO GoA 2)

Bei der leistungsoptimierten Konzeption des DKS rückte frühzeitig hochautomatisiertes Fahren in den Fokus – Automatic Train Operation (ATO) im Automatisierungsgrad (Grade of Automation) 2. Das bedeutet, der Tf ist an Bord, das Fahrzeug fährt jedoch anhand von Vorgaben der Infrastruktur (Abb. 11). ATO GoA 2 über ETCS hielt mit der TSI ZZS 2023 Einzug in die ETCS-Spezifikation und kommt bereits in ersten Projekten wie der Digitalen S-Bahn Hamburg [39] oder Thameslink zum Einsatz. Im Gegensatz zu ETCS gilt es fahrzeug- wie infrastrukturseitig als vergleichsweise einfaches, da nicht sicherheitsrelevantes System, da es sich stets im sicheren Rahmen von ETCS bewegt.

ATO GoA 2 ist dabei in einiger Hinsicht ein wesentliches Element für Leistungsoptimierungen: Es ermöglicht, Züge präzise zu führen – wenn nötig in straffer Fahrweise oder, wenn möglich, energieoptimal. Dabei fließen Daten in beide Richtungen: Das Triebfahr-

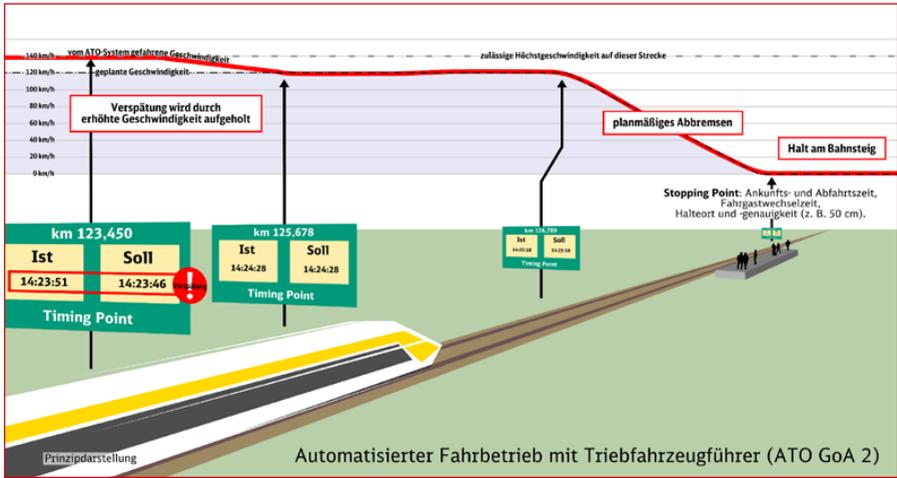


Abb. 11: Im ATO-GoA-2-Betrieb werden Züge über Vorgaben wie Timing und Stopping Points geführt.

zeug berechnet vorausschauend, ob es die Vorgaben der ATO-Streckenzentrale (ATO-TS) erreichen kann und meldet unter anderem Prognosen dazu zurück. Bei der Aus- und Nachrüstung von rund 500 Tz für den DKS dient die ATO-Kommunikation zusätzlich als „Briefträger“ für rund 35 Arten von Fahrzeugzustandsdaten (TCR), beispielsweise zum Status von Traktion, Bremse und Türen, zu gehobenen Stromabnehmern, Auslastung oder Außentemperaturen. [15]

Die Funktion von ATO GoA 2 geht damit weit über die bislang bekannte Automatische Fahr- und Bremssteuerung (AFB) hinaus [6], die einfach möglichst die zulässige Geschwindigkeit unter Berücksichtigung von Bremskurven fährt. In Verbindung mit CTMS (s. Abschnitt 2.6) ist sie ein wesentliches Element, um da wo nötig möglichst dicht und gleichzeitig ohne unnötige Betriebshalte zu fahren (Grüne-Welle-Prinzip). ATO bewegt sich dabei in einem Zielkonflikt zwischen möglichst pünktlicher, straffer Fahrweise und dem Wunsch, Energie zu sparen. [40]

2.6 CTMS

Ein weiteres wesentliches Element der Leistungsoptimierung im DKS liegt im Kapazitäts- und Verkehrsmanagementsystem „Capacity & Traffic Management System“ (CTMS), das im Rahmen der DSD entwickelt wird. [17] Anhand zahlreicher Daten (u. a. aus DSTW, ETCS, ATO/TCR) wird es den Betrieb laufend und vorausschauend optimieren und dabei auf das Stw sowie auf viele Züge (wie ATO) steuernd zugreifen. Abb. 12 verdeutlicht das Prinzip an einem einfachen Beispiel.

Die sich anhand ohnehin umfassend bereitstehender Daten mit CTMS bietenden Möglichkeiten sind kaum überschaubar: So liegt eine weitere, niedrig hängende Frucht der Kapazitätsoptimierung in vorausschauend umlaufenden Weichen, wie in Abb. 13

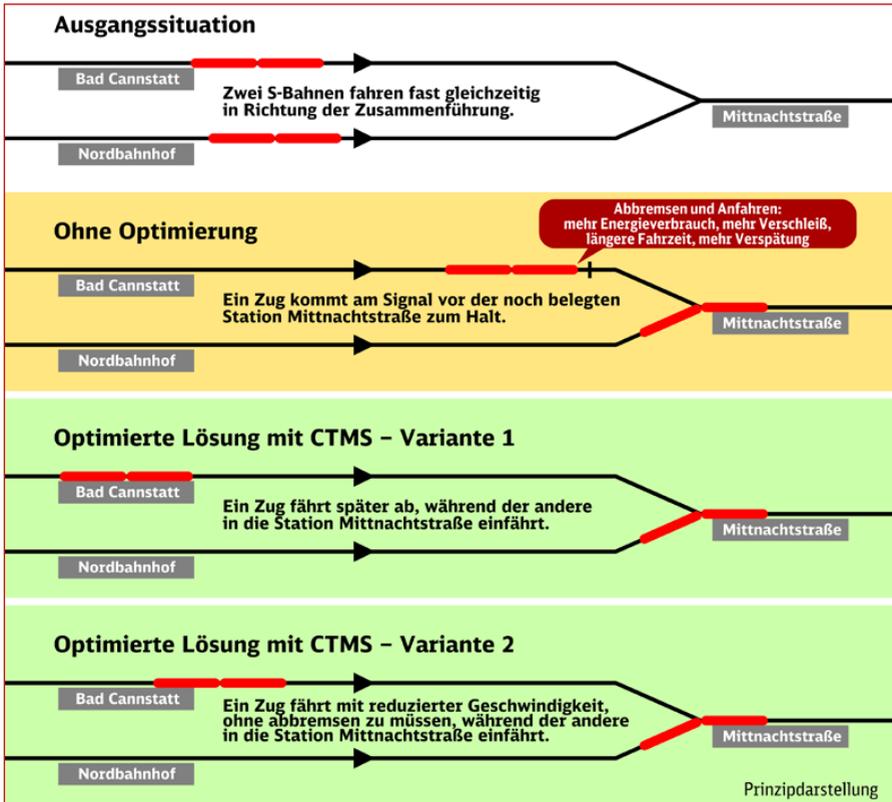


Abb. 12: Vorausschauende Optimierung am Beispiel einer Einfädelung

exemplarisch illustriert: Die heutige Zuglenkung arbeitet nicht vorausschauend, sondern stellt beispielsweise Fahrstraßen erst ein, wenn der gesamte Abschnitt frei von Zügen ist. Würden hingegen Weichen vorausschauend umlaufen, sobald diese nicht mehr belegt sind und umlaufen dürfen, würde dies eine um einige Sekunden verkürzte Zugfolge ermöglichen. Noch größer ist der Effekt beispielsweise, wenn im Fernverkehr (FV) vorausschauend abgefertigt wird, das Zugbegleitpersonal zur Abfertigung aufgefordert wird, wenn beispielsweise die Ausfahrt in absehbar einer Dreiviertelminute stehen wird.

Eine kaum bekannte, aber zentrale Rolle kann CTMS zukünftig bei der Auflösung vieler der in Abschnitt 2.1 dargestellten Restriktionen der Blockteilung einnehmen, indem bei-

spielsweise die (ohnehin bekannte) Zuglänge, die Lage gehobener Stromabnehmer oder auch die Bewegung des vorausfahrenden Zuges bei der Fahrstraßenbildung bzw. der Erteilung von Fahrterlaubnissen mit berücksichtigt wird. [41]

Weit über diese einfachen Beispiele hinaus liegt in der laufenden Optimierung ganzer Bereiche, wie Knoten, ein großes Potenzial. So sollen auf den Kern des Knotens zulaufende Züge frühzeitig optimiert werden, beispielsweise gezielt etwas beschleunigt oder verlangsamt, um passgenau zur richtigen Zeit am richtigen Ort mit der richtigen Geschwindigkeit zu sein, um beispielsweise „wie auf einer Perlenschnur“ in die S-Bahn-Stammstrecke oder die Weichenbereiche des Stuttgarter Hbf eingefädelt zu werden. Ein großer Nutzen wird auch bei Großstörungen erwartet, in denen CTMS voraussichtlich eine Vielzahl von Zugfahrten mit Künstlicher Intelligenz nahezu in Echtzeit optimieren wird.

3 Wechselwirkungen

Die Spielräume für Leistungssteigerungen mittels „digitaler“ Technik reichen erheblich über die LST im engeren Sinne hinaus. Im Wechselspiel mit weiteren Gewerken wie auch in Betriebsprozessen liegen weitere wesentliche Ansatzpunkte.

3.1 Wechselwirkungen mit weiteren Gewerken

Über die bereits in Abschnitt 2 dargestellten Effekte offenbarten sich im DKS inzwischen etliche weitere Wechselwirkungen mit weiteren Gewerken.

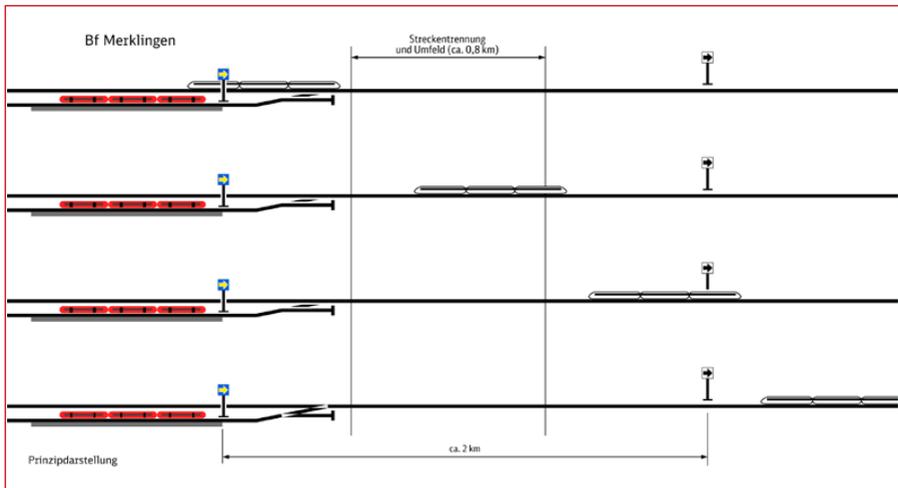


Abb. 13: Die heutige Zuglenkung arbeitet nicht vorausschauend. Beispielsweise läuft die Ausfahrzugstraße erst ein, wenn der Abschnitt bis zum Folgesignal frei ist, obwohl Weichen bereits vorauslaufend gestellt werden könnten.

In besonderem Fokus steht dabei die Trassierung, bei der die Möglichkeiten von ETCS mitberücksichtigt werden sollten. So können kürzere Durchrutschwege auch zu kürzeren Entwicklungslängen in Bahnhöfen führen – besonders an Kreuzungsbahnhöfen auf eingleisigen Strecken. Weitere wesentliche Chancen liegen in der mit ETCS möglichen meter- und 5-km/h-genauen Geschwindigkeitssignalisierung, die es vielfach erlaubt, länger schneller zu fahren. [42] Wird eine neue Infrastruktur entworfen, sollte ETCS von Beginn an mitgedacht werden, um diese Möglichkeiten zu nutzen: beispielsweise, indem die Trassierung eines längeren Bogens derart feinoptimiert wird, um geschickt mehrere Geschwindigkeitswechsel im (Übergangs-)Bogen anzuordnen, um möglichst zügig zu beschleunigen. [43]

Es lohnt sich dabei auch, die Entwurfsgeschwindigkeiten auf den Prüfstand zu stellen, wie das Beispiel des Tunnels Feuerbach (Abb. 14) besonders eindrücklich zeigt: Der im Wesentlichen für 120 km/h entworfene Tunnel wird auf einer Länge von 2,5 km nun für bis zu 160 km/h ertüchtigt, indem mit geringem Mehraufwand ein verkürzter Stützpunkt- abstand in der Oberleitungsanlage (Deckenstromschiene) umgesetzt wird. Während konventionell diese Geschwindigkeiten nicht umfassend signalisiert werden dürften (30-Sekunden-Regel), zeigt sich, wie insbesondere leistungsstarke, mit ATO straff geführte Regional-Tz bei Verspätungen hier bis zu rund 10 Sekunden aufholen können. Damit entsteht nicht zuletzt eine Spielmasse, um Züge passgenau durch das für die Kapazität mit entscheidende Gleisvorfeld des Hbf zu führen.

Auch die Fahrleitung samt der Bahnenergieversorgung wird zukünftig auf den Prüfstand zu stellen sein: Auf der einen Seite liegen Oberstrombegrenzungen, im Umland von Stuttgart zumeist starr bei 600 A – womit viele spurtstarke Fern- und Regional-Tz vielfach nicht mit voller Leistung beschleunigen können. Auf der anderen Seite werden selbst Hochleistungsüberleitungen im Kern des Knotens an ihre Grenzen kommen, wenn

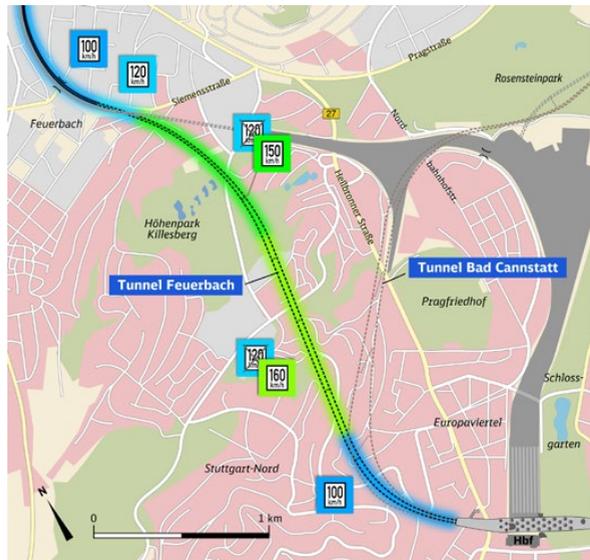


Abb. 14: Ausnutzung der Trassierung am Beispiel des Tunnels Feuerbach

langfristig bis zu 424 m lange Doppelstock-Tz mit bis zu 200 km/h eingesetzt werden sollen, [44] die gleichzeitig mit Zugfolgezeiten von um die 60 Sekunden fahren können [2]. Es drängt sich auf, die mit ETCS, ATO, TCR und CTMS zur Verfügung stehenden Daten und die damit einher gehenden Möglichkeiten zur präzisen Regelung und Steuerung beim Schopf zu packen, um Zügen teils mehr Energie bereitzustellen und gleichzeitig Lastspitzen zu vermeiden. Damit gehen auch große Chancen für die elektrische Betriebsführung einher: beispielsweise, indem anführende und elektrisch bremsende Züge, soweit sinnvoll möglich, synchronisiert werden.

Durch die geplante Einführung neuer Stw und ETCS Level 2 verliert auch die bisherige 160-km/h-Schwelle ein Stück weit an Bedeutung. Gerade wenn die Linienführung und weitere Gewerke wie die Oberleitung auch höhere Geschwindigkeiten zulassen, liegt es nahe, diese in den Blick zu nehmen. [45]

3.2 Betriebsverfahren, Regelwerke

Auch Betriebsverfahren und betriebliche Regelwerke (wie die Fahrdienstvorschrift) haben erheblichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit. Per se bietet ETCS einige Ansatzpunkte und Möglichkeiten. So kann bei einem Fahrtrichtungswechsel in der Regel auf eine gültige Position zurückgegriffen und unmittelbar in ETCS-Vollüberwachung aufgestartet werden, einschließlich der damit nutzbaren Möglichkeiten wie beispielsweise Hochleistungsblock für kurze Zugfolgen. Beschleunigt werden soll auch die Einfahrt in teilbesetzte Gleise: mit zunächst 40 statt 20 km/h, wie bislang in Westdeutschland (Bereich der ehemaligen Deutschen Bundesbahn) üblich.

Ein wesentlicher Hebel liegt dabei darin, Rangierfahrten durch Zugfahrten (unter ETCS-Vollüberwachung) zu ersetzen, um schneller, dichter (und gleichzeitig sicherer) zu fahren. So soll zukünftig in der Betriebsart „On Sight“ (OS) gestärkt werden [46], womit der Halt vor dem Zugdeckungs- bzw. Zwischensignal und das anschließende Warten bis zum Ablauf der Kennlicht- bzw. Durchrutschweg-Auflöseverzögerungszeit entfällt. Auch sollen Bereitstellungsfahrten, beispielsweise aus der S-Bahn-Abstellgruppe in Stuttgart-Vaihingen, an den Bahnsteig zukünftig als Zugfahrt erfolgen: Entfall des ETCS-Startverfahrens am Bahnsteig, punktuell höhere Geschwindigkeiten, Hochleistungsblock und dergleichen Möglichkeiten.

Ein anderes Beispiel liegt im Abfertigungsverfahren für den FV: Durch Entfall von Licht-Ausfahrtsignalen und Fahrtanzeigern muss ein alternativer Weg gefunden werden, die Zustimmung des Fahrdienstleiters zur Abfahrt an das Zugpersonal zu übermitteln. Die einfachste Lösung hierzu wäre, den Tf anzuweisen, den Zugführer per Funk über die auf seiner Führerraumanzeige (DMI) anliegende Fahrterlaubnis zu informieren. Dies wäre zeitaufwendiger und weniger zuverlässig als die heutige Lösung. Stattdessen wird zunächst eine Lösung verfolgt, bei der die anliegende Fahrterlaubnis an eine App des

Zugpersonals automatisiert übermittelt wird. Perspektivisch wird daran gearbeitet, mit CTMS eine vorausschauende Abfertigung zu ermöglichen, um beispielsweise eine Dreiviertelminute vor der erwarteten Fahrterlaubnis für die Ausfahrt zielgerichtet mit der Abfertigung beginnen zu können.

Mitunter zeigen sich Leistungspotenziale auch an gänzlich unerwarteten Stellen: So benötigen die bis zu zwölf stündlich planmäßig in der S-Bahn-Wendeschleife Schwabstraße wendenden Tz einen neuen Fahrplan, dessen Übertragung mit GSM-R heute eine volle Minute in Anspruch nimmt. Durch ein neues Funksystem, wie es mit FRMCS ohnehin vorgesehen ist, kann dieser Zeitbedarf gegen 0 verkürzt und somit eine volle Minute Reserve geschaffen werden. [47]

Auch die Bemessung von Pufferzeiten – heute in der Regel wenigstens eine Minute zwischen zwei Fahrplantrassen – wird angesichts perspektivisch nur noch eine Minute langer Mindestzugfolgezeiten und der Möglichkeiten einer besonders präzisen, vorausschauenden Führung (mittels ATO und CTMS) auf den Prüfstand zu stellen sein.

Eine Herausforderung liegt nicht zuletzt auch in der Komplexität der Planung, wie besonders das in Abschnitt 2.1 vorgestellte Beispiel der Blockoptimierung besonders deutlich zeigt: Per se kann es durchaus gelingen, eine optimierte Blockteilung zu schaffen, die mit weniger Ausrüstungsaufwand zu kürzeren Zugfolgezeiten als eine Standardblockteilung (z.B. alle 500 m) führt. Gleichwohl Regelwerke und Leitfäden eine Handreichung für derartige Optimierungen sein können, stoßen selbst gut qualifizierte, engagierte Planende an Grenzen des Überschau- und Machbaren. Eine zunehmende Automatisierung der Planung (und deren Optimierung) scheint insofern alternativlos. [42]

4 Einordnung und Sachstand

Die Erwartungen und die Ziele zu betrieblich-verkehrlichen Effekten in der Region Stuttgart sind erheblich. Während die bislang viel diskutierten Leistungsanforderungen an die Infrastruktur von S21 auch ohne vollumfassende digitale Optimierung erfüllt werden, setzt inzwischen auch das Land Baden-Württemberg auf die durch weitere „digitale“ Verbesserungen erreichbaren Effekte. So sieht das offensive Ausbaukonzept „Eisenbahnknoten Stuttgart 2040“ rund 60 Züge pro Spitzenstunde im Hbf sowie je 30 Züge pro Stunde und Richtung über die Stammstrecke vor. [44] Der Verband Region Stuttgart, als Aufgabenträger der S-Bahn, peilt langfristig eine Verdichtung des heutigen 15-Minuten-Takts zum 10-Minuten-Takt an. [48]

Auf der Stammstrecke, als „Keimzelle“ des DKS, gelten inzwischen um rund 35 % kürzere Mindestzugfolgezeiten im Vergleich zu konventioneller LST (Ks-Signale und PZB) als gesichert erreichbar. Hierzu wirken Effekte der Blockteilung, verkürzter Systemlaufzeiten, ATO GoA 2, optimierte ETCS-Bremskurven sowie eine auf etwa 5 m

genaue Ortung zusammen. Zahlreiche weitere Potenziale sind noch offen. Die Chancen, mit sukzessiver weiterer Optimierung langfristig 36 statt 24 Züge pro Stunde und Richtung zu fahren – eine Grundvoraussetzung für eine Verdichtung der sechs Linien im Umland vom 15- zum 10-Minuten-Takt – stehen zumindest aus Sicht der LST gut. [49]

Es liegt in der Natur des Pilotprojekts, dass es gilt, Erfahrungen zu sammeln, mögliche Kinderkrankheiten zu beseitigen und weitere Optimierungen zu verfolgen. Mit der im September 2025 geplanten Inbetriebnahme im Kernbereich der Stammstrecke sollen zwischen den Stationen Mitnachtstraße und Schwabstraße zunächst weiterhin planmäßig 24 Züge pro Stunde und Richtung fahren. Im südlichen Anschluss daran, zwischen Schwabstraße und Vaihingen, sind 16 statt zwölf Züge pro Stunde und Richtung geplant (mit nur noch acht statt zwölf Zügen pro Stunde über die Wendeschleife Schwabstraße).

Abseits der artrein und homogen von S-Bahnen befahrenen Stammstrecke ist das Bild sehr viel unübersichtlicher und vielschichtiger. Die infolge der „digitalen“ Optimierung erreichbaren Effekte hängen hier in hohem Maße von dem Betriebsprogramm ab, also beispielsweise Zugfolgen, Rollmaterial, Haltezeiten und Gleisbelegungen. Vergleiche zu konventioneller LST werden nicht zuletzt dadurch erschwert, dass einige Züge (wie ein Großteil des FV) auch im Rahmen von S21 (ohne das Projekt DKS) mit ETCS gefahren wären.

Im Rahmen einer Diskussion über den Deutschlandtakt im Knoten Stuttgart hat die DB 2019 die mit dem DKS verbundenen Ziele für die viel diskutierte S21-Infrastruktur im Kern des Knotens auf den Punkt gebracht: Nach Vollendung des DKS soll auf jedem der acht Bahnsteiggleise – unter Praxisbedingungen – alle fünf Minuten ein Zug fahren können, auf jedem der zu- und ablaufenden Streckengleise mittlere Zugfolgezeiten von zwei Minuten ermöglicht werden. [50] Das entspräche fast 100 Zügen pro Stunde im Hbf – fast dreimal so viele Züge wie zur heutigen Spitzenstunde, mehr als 50 % über den Zielen des progressivsten vorliegenden Konzepts, „Eisenbahnknoten Stuttgart 2040“.

Für einen solchen Hochleistungsbetrieb sind drei Minuten mittlere Haltezeit (im Regionalverkehr eher etwas geringer, im FV eher größer), eine Wiederbelegung (Ingangsetzung Zug 1 – Halt Zug 2) binnen einer Minute sowie einer Minute Pufferzeit die Grundlage.

Die Messlatte wurde bewusst so hoch gelegt, um nicht allzu einfach übersprungen werden zu können. Um die Ziele zu erreichen, muss ein Großteil der Potenziale umgesetzt werden: beispielsweise die bisherigen Restriktionen der Blockteilung aufgelöst, Bremskurven weiter optimiert und vorausschauend (mit ATO und CTMS) gefahren werden.

Während die Umsetzung im Kern des Knotens in vollem Gang ist, haben auch die Konzeption und Planung für das Umland (Baustein 3) an Fahrt aufgenommen. Der Baustein 3 beinhaltet einige neue Techniken wie CTMS, FRMCS und eine Pilotierung des zugzentrischen Sicherungssystems „Advanced Protection System“ (APS) [51]. Daneben rücken auch weitere, bislang wenig beleuchtete Themen wie Bahnübergänge, Übergänge zu nichtbundeseigenen Eisenbahnen oder Güterzüge in den Fokus der Leistungsoptimierung.

5. Wesentliche Erfahrungen

Die bisherigen Erkenntnisse der Leistungsoptimierung im DKS zeigen, wie mit „digitalen“ und begleitenden „konventionellen“ Mitteln tatsächlich wesentlich mehr Zugfahrten ermöglicht werden könnt(en). Zu den wesentlichen Stoßrichtungen, die sich dabei bislang herauskristallisiert haben, zählt der Verzicht auf eine Doppelausrüstung, ein enger Blick auf das Gesamtsystem sowie eine möglichst vorausschauende sowie vereinfachte Planung und Umsetzung.

5.1 Verzicht auf Doppelausrüstung der Infrastruktur

Die landläufig zu hörende Forderung, es brauche eine „Rückfallebene“ für die ETCS-Infrastruktur, erweist sich bei näherem Hinsehen als kontraproduktiv: Nicht nur ist eine solche Doppelausrüstung deutlich aufwendiger zu planen, zu bauen und zu betreiben, sondern sie wirkt auch als Hemmschuh für die Leistungsmaximierung. Bei näherem Hinsehen ist ihr Nutzen im Störfall gering. [52] Betriebserfahrungen auf der im Dezember 2022 in Betrieb genommenen Schnellfahrstrecke Wendlingen–Ulm unterstreichen diese Einschätzung: Eine etwaige Rückfallebene wäre dort aus verschiedenen Gründen praktisch ohne Nutzen bei den lediglich ganz vereinzelt beobachteten ETCS-Störungen geblieben. [53] In dem vorübergehend im DKS „doppelt“ ausgerüsteten Bereich Bad Cannstatt/Untertürkheim führte die Doppelausrüstung hingegen unter anderem zu einem verdreifachten Verkabelungsaufwand. [54] Im DKS wird eine Vielzahl von fahrzeug- und infrastrukturseitigen Optimierungen verfolgt, um ein möglichst robustes Gesamtsystem mit ETCS als einzigem Zugbeeinflussungssystem zu schaffen. [6, 55]

5.2 Gesamtsystem-Ansatz

Die bisherigen Erfahrungen im DKS unterstreichen überdeutlich, dass es nicht reicht, die Infrastruktur in sich zu optimieren, sondern insbesondere auch die Fahrzeugausrüstung begleitend mitzugestalten, wie zwei weitere Schlaglichter zeigen:

Ohne eine passgenaue, optimierte Fahrzeugausrüstung wäre ein Großteil der gehobenen Potenziale, die der rund 35-prozentigen Verkürzung der Mindestzug-

folgezeiten auf der S-Bahn-Stammstrecke zugrunde liegen (s. Abschnitt 4), nicht erreichbar: ATO GoA 2, Bremskurven, Odometrie und Fahrzeuglaufzeiten hängen wesentlich von der Fahrzeugausrüstung ab. Selbst die besonders kurzen Blöcke setzen eine besonders schnelle Fahrzeugausrüstung voraus. [56] Einzig die reinen LST-Infrastruktur-Laufzeiten (Stw, ETCS-Zentrale) sind ohne gesonderte Optimierung der Fahrzeuge erreichbar.

Eine bloße, einfache ETCS-Ausrüstung kann im Vergleich zum konventionellen Betrieb kontraproduktiv sein, wie Beispiele real erwarteter Züge verdeutlichen: In Extremfällen führen beispielsweise flache Guidance Curves dazu, dass sich Zugfolgezeiten gegenüber dem konventionellen Betrieb erheblich verlängern. Nach Inbetriebnahme weiterer Techniken in der Infrastruktur (wie ATO GoA 2, CTMS, FRMCS) können zwei in Länge und Fahrdynamik ähnliche Züge im Kapazitätsverbrauch ungefähr um den Faktor zwei auseinandergehen. [57] Die im DKS bislang gewonnenen Erfahrungen unterstreichen, wie wichtig es ist, die flächenhafte Ausrüstung von Fahrzeugen zu gestalten und beispielsweise Anreize für entsprechende Optimierungen an Fahrzeugen zu setzen, deren Nutzen sich weit überwiegend oder ausschließlich in der Infrastruktur manifestiert. Bei der Aus- und Nachrüstung von

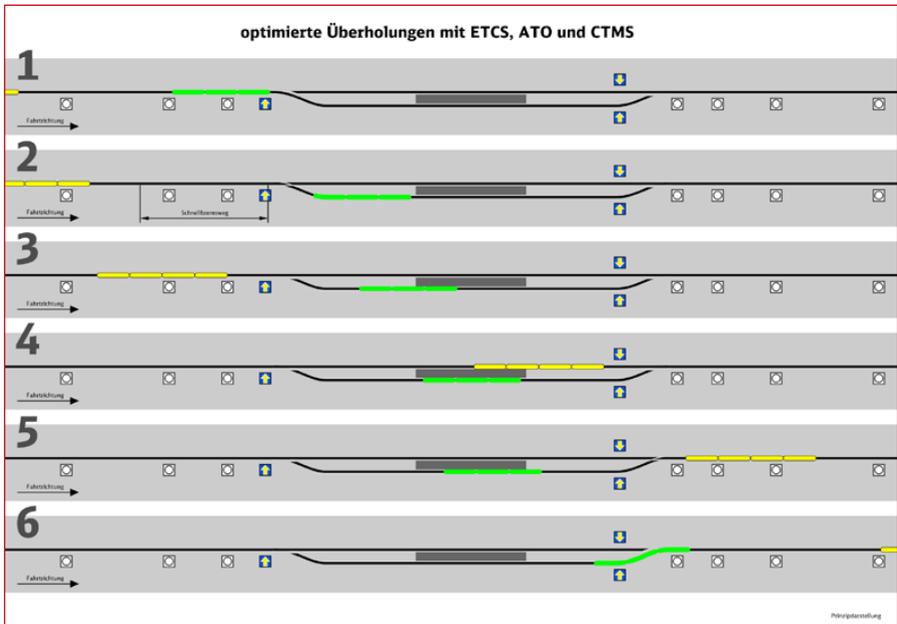


Abb. 15: Schlanke Überholung einer S-Bahn (grün) während der Verkehrshaltezeit durch einen Regionalzug (in gelb)

Tz für den DKS machen sämtliche (Leistungs-)Optimierungen nur etwa 10 % der Kosten der Serienumrüstung aus. [58]

Wohin eine Vielzahl „digitaler“ Optimierungen an Fahrzeugen und Infrastruktur in Verbindung mit einer moderat optimierten Infrastrukturausrüstung führen kann, verdeutlicht das in Abb. 15 dargestellte und in [59] umfassend unterlegte Beispiel: Während des ohnehin nötigen rund 30-sekündigen Haltes wird eine S-Bahn (in grün) im Modell von einem 130 km/h schnellen Regionalverkehrszug überholt. Damit dies gelingen kann, wird u. a. ein rund 700 m langes und mit 100 km/h befahrbares Überholgleis unterstellt. Im Rahmen des DKS wird momentan untersucht, inwieweit derartige Überholungen den Weg ebnen könnten, auf stark ausgelasteten Mischverkehrsstrecken wesentlich mehr Züge als heute zu fahren, wenn zusätzlich vergleichsweise kleine Potenziale in der Trassierung gehoben werden, um bei unveränderten kommerziellen Fahrzeiten erhebliche Spielmasse für CTMS zu schaffen.

5.3 Vorausschauende Optimierung und Vereinfachungen

Während bei der Fahrzeugausrüstung der tiefgreifende Eingriff für ETCS unbedingt genutzt werden sollte, um weitere (leistungssteigernde) Optimierungen wie ATO GoA 2, TMS und TCR möglichst „in einem Guss“ zu integrieren, gilt dies in ähnlicher Weise auch für die Infrastruktur: Wie in [48] dargelegt, machen sämtliche Optimierungen für ein möglichst robustes, hochleistungsfähiges System im Kern des Knotens nur etwa 10 % der Kosten aus.

Mit Blick auf ohnehin knappe Planungs- und Umsetzungsressourcen scheint es insbesondere zur Blockteilung unabdingbar, zukünftige Entwicklungsschritte so gut es geht vorauszudenken. Abb. 16 verdeutlicht, wie sich eine Blockteilung für „maximale Leistungsfähigkeit“ in Folge absehbarer Optimierungsschritte immer wieder recht grundlegend verändert, wenn gewisse Entwicklungsschritte nicht vorweg gedacht werden. So werden die Mindestzugfolgezeiten zunächst noch von den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Restriktionen im Bahnhof sowie an Bahnübergängen bestimmt, die zunächst durch den Entfall der Doppelausrüstung reduziert werden und mit CTMS perspektivisch entfallen. Insofern sollte insbesondere die Blockteilung auf der freien Strecke so gut wie möglich vorgedacht und über das zunächst (mit Restriktionen) sinnvolle Maß verdichtet werden.

Am Horizont bereits erkennbar ist dabei das im Rahmen der DSD vorangetriebene APS, das mit geeigneten Zügen (mit Zugintegritätsüberwachung) auch „Moving Block“ ermöglicht und eine erheblich vereinfachte LST-Infrastrukturausrüstung erwarten lässt. [51] Auf dem Weg dorthin sind zahlreiche Ansätze erkennbar, Planungs- und Ausrüstungsaufwand zu mindern, beispielsweise durch

eine zunehmend teilautomatisierte Planung [42], aber auch die Wegoptimierung beispielsweise von Achszählpunkten (durch verbesserte Haltfallbewertung) [59] oder Balisenteppichen (u. a. durch Fahrzeugausrüstung mit „Cold Movement Detection“) [34].

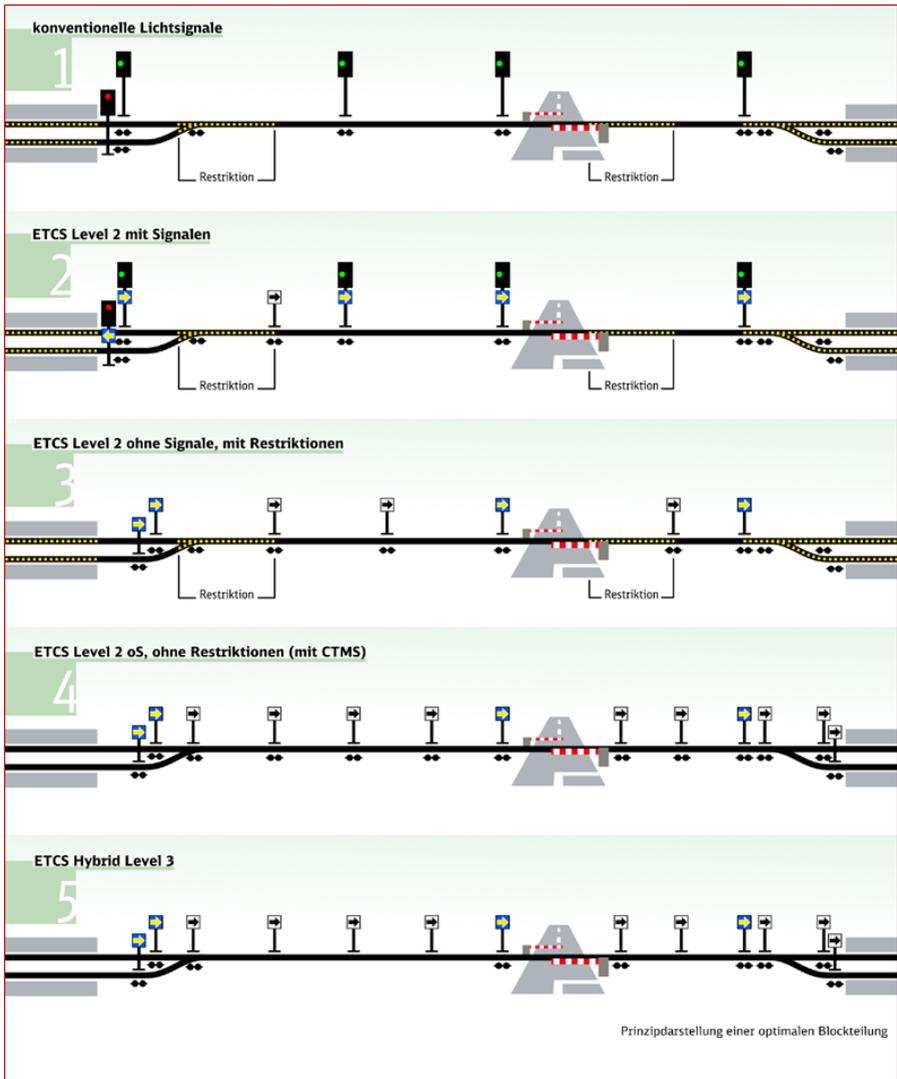


Abb. 16: Blockteilung für „maximale Leistungsfähigkeit“ entlang technischer Evolutionsstufen

Die bislang im DKS gesammelten Erfahrungen zeigen, dass es durchaus gelingen könnte, ein Eisenbahnsystem zu schaffen, in dem mit weniger Planungs- und Realisierungsaufwand wesentlich mehr Züge als heute gefahren werden können.



Das Projekt wird kofinanziert von der Europäischen Union.

Quellen

- [1] Vogel, T.: An einer klugen Digitalisierung führt kein Weg vorbei, DER EISENBAHNINGENIEUR 2/2023
- [2] Förster, J.; Kümmling, M.; Olesch, M.; Reinhart, P.; Vandoorne, K.; Vogel, T.: ETCS-Bremskurven im Spiegel der Praxis, DER EISENBAHNINGENIEUR 6/2023 (<https://bit.ly/3plqlhR>)
- [3] Goers, H.; Reinhart, P.; Weiß, R.: ETCS als Träger für Leistungs- und Qualitätssteigerungen. 9. Januar 2019 (<https://bit.ly/3nHFB7h>)
- [4] Fiack, A.; Weller, F.; Heimes, M.; Laux, T.: Digitale Schiene Deutschland – Zukunftstechnologien für das Bahnsystem, Eisenbahn Ingenieur Kompendium 2024
- [5] Beyer, M.; Blateau, V.; Bitzer, F.; Dietrich, F.; Lammerskitten, C.; Lück, B.; Richter, R.; Rudolph, C.; Vogel, T.: Der Digitale Knoten Stuttgart wird Realität, DER EISENBAHNINGENIEUR 1/2023 (<https://bit.ly/3RCeqFR>)
- [6] Dietrich, F.; Erdmann, J.; Jost, M.; Raichle, F.; Sane, N.; Vogel, T.; Wagner, P.: Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart, ZEVrail 5/2022 (<https://bit.ly/3DHZIOS>)
- [7] Dietrich, F.; Meyer, M.; Neuhäuser, R.; Rohr, F.; Vogel, F.; Wenkel, W.: Fahrzeugnachrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 9/2021 (<https://bit.ly/3TFQWUB>)
- [8] Druckenbrod, C.; Glass, T.; Klust, M.: Neue Doppelstocktriebzüge für den Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 2/2023
- [9] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung der Ausrüstung von Schienenfahrzeugen mit Komponenten des Europäischen Zugsicherungssystems ERTMS (European Rail Traffic Management System) und des automatisierten Bahnbetriebs (ATO) im Rahmen der infrastrukturseitigen Einführung von ERTMS im „Digitalen Knoten Stuttgart“, Bundesanzeiger, BAnz AT 05.02.2021 B2 (<https://bit.ly/3hX5CJx>)
- [10] Siemens Mobility: Siemens Mobility liefert 28 Mireo-Regionalzüge für Baden-Württemberg, Presseinformation vom 10. August 2023 (<https://bit.ly/3LjBHe2>).
- [11] Cyril, G.; Klemens, U.; Pantano, S.; Schneider, D.; Trupp, A.; Waldinger, M.: Nachrüstung von Nebenzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 6/2023 (<https://bit.ly/3qURLLK>)
- [12] Bergmann, J.: Digitaler Knoten Stuttgart: Erklärung der DB Netz AG zu Inhalt und Zielen, 21. April 2020 (<https://bit.ly/3ESxJ7g>)
- [13] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Vereinbarung zur Finanzierung von Planungs- und Baukosten für ETCS/DSTW-Ausrüstung des Starterpakets DSD (Pilotprojekt Digitaler Knoten Stuttgart), Finanzierungsvereinbarung F 08 Q 0770 (<https://bit.ly/46EpKYu>)
- [14] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Vereinbarung zur Finanzierung von Planungskosten für ETCS/DSTW/ATO/DLST-Ausrüstung des Starterpakets DSD (Pilotprojekt Digitaler Knoten Stuttgart, Baustein 3), Finanzierungsvereinbarung F 21 Q 0774 (<https://bit.ly/48HUGmb>)
- [15] Flöter, C.; Raichle, F.; Höhne, T.; Köstlbacher, J.; Sane, N.; Sauer, M.; Schlichting, J.; Wagner, P.: Innovationskooperation Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 9/2022 (<https://bit.ly/3dxDOZ6>)
- [16] Bleicher, I.; Grimm, L.; Wiedenroth, A.: Das Projekt DiB gestaltet das Bediensystem der Zukunft, SIGNAL+DRAHT 11/2020
- [17] Küpper, M.: Das Capacity & Traffic Management System für die Digitale Schiene, DER EISENBAHNINGENIEUR 10/2023
- [18] Altmann, S.; Cichos, M.; Kopitzki, M.; Pacht, J.: Ein neues Betriebsverfahren für den digitalen Bahnbetrieb,

- DER EISENBAHNINGENIEUR 8/2023
- [19] Beyer, M.; Jurtz, S.; Langhof, M.; Reinhart, P.; Vogel, T.: ETCS als Trägersystem zur Leistungssteigerung bei der S-Bahn Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 6/2019 (<https://bit.ly/2MJ4zAY>)
- [20] Ingenieurgemeinschaft Machbarkeitsstudie ETCS S-Bahn Stuttgart: Untersuchung zur Einführung von ETCS im Kernnetz der S-Bahn Stuttgart, Ergebnisbericht vom 31. Januar 2019 (<https://bit.ly/2Yyaw6h>)
- [21] Achilles A.; Behrooz, A.; Beyer, M.; Lehmann, F.; Lies, R.; Schleede, M.; Trenschele, D.; Wanstrath, S.: Die Digitalisierung der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart (Teil 1), SIGNAL+DRAHT 9/2023 (<https://bit.ly/46AzFOF>)
- [22] Bopp, S.; Drescher, O.; Frieß, B.; Rothenstein, D.: Digitaler Knoten Stuttgart: Ein Pilotprojekt der Digitalen Schiene Deutschland. In: Die Zukunft der Mobilität: Digitale Schiene Deutschland, Trackmedia-Verlag, Leverkusen 2023. ISBN 978-3-96245-260-5
- [23] Denißen, J.; Flieger, M.; Kümmling, M.; Küpper, M.; Wanstrath, S.: Optimierung der Blockteilung mit ETCS Level 2 im Digitalen Knoten Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 7+8/2021 (<https://bit.ly/3Ai0gQR>)
- [24] Kümmling, M.: Mehr Leistungsfähigkeit mit Digitaler LST – aber wie? Vortrag an der TU Dresden vom 17. Dezember 2020 (<https://bit.ly/46a9bny>), S. 19 ff
- [25] Deeg, P.; Dörfel, A.; Kreher, K.; Pintar, G.; Reinhart, P.; Ruiz, J.: Trassierungsfeinschliff: Vorausschauende Planung zählt sich aus, DER EISENBAHNINGENIEUR 12/2021 (<http://www.bsu.link/task-force-trassierung>)
- [26] Bojic, M.; El-Hajj-Sleiman, H.; Flieger, M.; Lies, R.; Osburg, J.; Retzmann, M.; Vogel, T.: ETCS in großen Bahnhöfen am Beispiel des Stuttgarter Hauptbahnhofs, SIGNAL+DRAHT 4/2021 (<https://bit.ly/3fiozoJ>)
- [27] Bucht, N.; Ehret, B.: Streckentrennungen und die Digitale Schiene, Elektrische Bahnen 9/2021
- [28] Hernández, L.; Hardel, S.: Schaltabschnittsgrenzen und Bahnübergänge schränken Kapazitätseffekt von ETCS Level 2 ein, SIGNAL+DRAHT 1+2/2023 (<https://bit.ly/40AY6br>)
- [29] Fassing, J.; Helwig, M.; Müller, P.; Keil, T.; Rosenbohm, M.; Wolf, F.; Welsch, P.: Generalisierung der Riedbahn: eine Zwischenbilanz, DER EISENBAHNINGENIEUR 7/2023 (<https://bit.ly/3Z5ws7u>)
- [30] Ril 819.0202 Signale für Zug- und Rangierfahrten; Hauptsignale, Version 4.0, gültig ab 01.10.2012
- [31] DB Netz AG: Richtlinie 819.0518 | LST-Anlagen planen – ETCS Level 2 ohne konventionelle Signalisierung (L2oS), Version 1.0, Gültig ab 01.01.2023
- [32] Zur Vermeidung von Bremskurvensprüngen bei Ersatzsignal. Siehe DB Netz: Lastenheft ETCS - Betrieblich-technische Systemfunktionen für ETCS SRS Baseline 3 – Anforderungen BTSF3.000.1416 und 1615
- [33] Behrens, M.; Caspar, M.; Distler, A.; Fries, N.; Hardel, S.; Kreßner, J.; Lau, K.; Pensold, R.: Schnelle Leit- und Sicherungstechnik für mehr Fahrwegkapazität, DER EISENBAHNINGENIEUR 6/2021 (<https://bit.ly/2SiQvjY>)
- [34] Die Digitalisierung der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart (Teil 2), SIGNAL+DRAHT 12/2023
- [35] Chavalier, D.; Flöter, C.; Gonzalez-Isabel, J.; Kampschulte, B.; Raichle, F.; Fritzsche, R.; Sane, N.; Wagner, P.: FRMCS-Ausrüstung von 463 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 5/2023 (<https://bit.ly/3C5ZetG>)
- [36] ETCS-Spezifikation, SUBSET-041, Version 3.2.0, Abschnitt 5.2.1.4
- [37] DB Netz AG: Lastenheft BTSF3, Anforderung 3.000.2629
- [38] Kümmling, M.; Wanstrath, S.: Maximierung der Fahrwegkapazität mit Digitaler Leit- und Sicherungstechnik, Eisenbahntechnische Rundschau 7+8/2021 (<https://bit.ly/3eY0aPT>)
- [39] Schröder, J.; Gonçalves Alpoim, C.; Dickgießer, B.; Talg, M.: Digitale S-Bahn Hamburg – Erstmalige Streckenausrüstung von ATO over ETCS in Deutschland, DER EISENBAHNINGENIEUR 10/2021 (<https://bit.ly/3PMkaN2>)
- [40] Weymann, F.; Hennig, E.: Energiesparender Betrieb unter Aufrechterhaltung des Pünktlichkeitsniveaus, SIGNAL+DRAHT 3/2023, <https://bit.ly/49kXgFx>
- [41] Hierzu erscheint ein Artikel in EI 1/2024.
- [42] Berger, F.; Behrens, M.; Falk, M.; Klaus, C.; Nehmsch, H.; Ketszem, R.; Mayerle, T.; Rupp, F.: Beschleunigung der LST-Planung im Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2023
- [43] Berner, T.; Frye, C.; Henzler, L.; Reinhart, P.; Schäfer, D.; Wolf, F.: Der Pfaffensteigtunnel nimmt Kontur an, DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2022 (<https://bit.ly/3UmvvCv>)
- [44] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg: Vorschlag eines Ausbaukonzeptes für den Eisenbahnknoten Stuttgart 2040 (...) (<https://bit.ly/3EZAnhl>, abgerufen am 9.10.23)
- [45] Enzmann, A.; Falk, M.; Kreher, K.; Lay, E.; Reinhart, P.; Wolf, F.: Trassierungsfeinschliff: Millimeterarbeit mit großem Nutzen, DER EISENBAHNINGENIEUR 4/2021 (<http://www.bsu.link/task-force-trassierung>)
- [46] Barth, P.; Behrens, M.; Kümmling, M.; Mehnert, S.; Nenne, T.; Pieper, W.; Retzmann, M.; Trinckauf, J.: Innovationskooperation zur LST-Infrastruktur im Digitalen Knoten Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 7+8/2022 (<https://bit.ly/3PR8NRF>)
- [47] Chavalier, D.; Flöter, C.; Gonzalez-Isabel, J.; Kampschulte, B.; Raichle, F.; Fritzsche, R.; Sane, N.; Wagner, P.: FRMCS-Ausrüstung von 463 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 5/2023 (<https://bit.ly/3C5ZetG>)

- [48] Bitzer, F.; Blateau, V.; Lammerskitten, C.; Lück, B.; Neuhäuser, N.; Vogel, T.; Wurmthaler, J.: Quo vadis Digitale Leit- und Sicherungstechnik? DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2021 (<https://bit.ly/3Hv72X6>)
- [49] Reinhart, P.: Viel mehr Kapazität mit ETCS (& Co.) – aber wie? Tagungsband des Scientific Railway Signalling Symposiums 2023 (<https://bit.ly/3u44wW7>)
- [50] Deutsche Bahn: Stuttgart 21 ist wesentliche Voraussetzung für den geplanten Deutschland-Takt. Statement des Konzernbevollmächtigten Thorsten Krenz vor dem S21-Ausschuss des Stuttgarter Gemeinderats, 16. Juli 2019 (<https://bit.ly/43NSwVL>)
- [51] Skowron, F.; Treydel, R.: Blöcke waren gestern – Chancen einer zugzentrischen LST, DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2022 (<https://bit.ly/3UXNYaH>)
- [52] Drescher, O.: ETCS Level 2 ohne „Signale“ in einem großen Knoten, Deine Bahn 3/2022 (<https://bit.ly/3O4n5i1>)
- [53] Barth, P.; Eftekhari, M.; El-Hajj-Sleimann, H.; Hoffmann, M. T.; Kümmling, M.; Retzmann, M.; Rohr, F.: ETCS auf der Schnellfahrstrecke Wendlingen – Ulm, SIGNAL+DRAHT 7+8/2023 (<https://bit.ly/3EjQMbo>)
- [54] Böhm, M.; Paltian, A.; Schleede, M.; Voigt, B.; Winckler, M.: Erfahrungen mit der Gleisfeldvernetzung im Digitalen Knoten Stuttgart (Teil 1), SIGNAL+DRAHT 4/2023 (<https://bit.ly/41Mkqgb>)
- [55] Behrens, M.; Eschbach, A.; Kampschulte, B.; Paltian, A.; Schöppach, M.; Wiedenroth, A.: Robuste Leit- und Sicherungstechnik im Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2022 (<https://bit.ly/3hiu0ZL>)
- [56] DB Netz AG: Lastenheft BTSF3, Anforderung 3.000.4420
- [57] Vogel, T.; Reinhart, P.: Kleiner Aufwand, große Wirkung: Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart. Vortrag auf dem 22. SIGNAL+DRAHT-Kongress (<https://bit.ly/3F9Smht>), PDF-Seite 16 f.
- [58] Dietrich, F.; Molterer, L.; Philippsen, F.; Reinhart, P.; Schunke-Mau, C.; Vogel, T.; Wester-Ebbinghaus, H.: Förderung der DSD-Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 4/2023 (<https://bit.ly/3N24h5o>)
- [59] Bolay, R.: Haltfallbewertung unter ETCS. Diplomarbeit TU Dresden 2023 (<https://bit.ly/3NanwsZ>)



Sven Wanstrath
Projektleitung DKS für die DB Netz AG (kommissarisch)
DB Netz AG, Stuttgart
sven.wanstrath@deutschebahn.com



Michael Kümmling
Regelwerke & Technologie
DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH,
Stuttgart
michael.kuemmling@deutschebahn.com