



Kofinanziert durch die
Europäische Union



Chancen und Knackpunkte der „Digitalisierung“

eine Zwischenbilanz aus dem
Digitalen Knoten Stuttgart

Deutsche Bahn AG | IDXSU | Dresden | 03.11.2022

Dieser Foliensatz wird auf tu-dresden.de und digitaler-knoten-stuttgart.de veröffentlicht.
Alle Abbildungen, soweit nicht anders angegeben: Deutsche Bahn

Die landläufigen Erwartungen an ETCS sind (immer noch) gewaltig...



von Verkehrsträgern. Der größte Fortschrittsschub für die Bahn kommt mit dem European Train Control System, kurz: ETCS. Mit dieser Technik können wir die Bahn digital überwachen, effizienter steuern und enger takten. Damit wächst die Kapazität um 20 Prozent, ohne dass auch nur ein einziges neues Gleis gebaut werden muss. *Wir wollen das System des-*

Welche Rolle spielt denn die Digitalisierung?

Die Digitalisierung ist für die Schiene essentieller und strategischer Hebel. Intelligente Technologien können die Kapazität im Netz erhöhen, z.B. durch ERTMS/ETCS Level 3. Damit kann man, unter Einbeziehung der Verkehrsknoten, wie Bahnhöfe und Terminals, bis zu 30% mehr Kapazität generieren. *Im Schienengüterverkehr wird*

ETCS in Deutschland – Die Chance für mehr Verkehr auf der Schiene?!

Welche Rolle spielt die Digitalisierung in Ihren Vorstellungen?

Das ist für mich der eigentliche große Hebel! Wir planen mit der Digitalen Schiene Deutschland – DSD – eine Revolution im Netz. Durch den Einsatz von ETCS können wir bis zu 20 Prozent zusätzliche Kapazität aus dem Netz holen. Das ist aber nur der erste Schritt. Wenn wir ETCS Level 3 einsetzen, kommen nochmals 15 Prozent Kapazität hinzu. Wir verbauen also praktisch keinen Meter neuer Schiene und bringen trotzdem 35 Prozent mehr Verkehr im Schienennetz unter. Weiterer

Deutschland: ETCS und Digitale Stellwerke als Heilsbringer

30 Prozent mehr Kapazität praktisch ohne Aufwand?

DIGITAL RAILWAY
NETWORK RAIL'S WUNDERWAFFE

Optimising peak time traffic management through the network-wide deployment of ETCS across Europe could increase network capacity by 25-30% without investment in track infrastructure. "That is exactly the kind of practical innovation that we should be working on," Davenne says.

bau der Schieneninfrastruktur, insbesondere zur Beseitigung von Netzengpässen. Nur durch eine zügige Umsetzung von ETCS/NeuPro können wir zudem die notwendige Kapazitätssteigerung auf dem Bestandsnetz anbieten. «

Aussrisse (von links oben nach rechts unten): Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 9/2018, ETR 7/2021, Privatbahn Magazin 2/2019, Zevraïl 1/2019, Eisenbahn-Revue International (ERI) 11/2019, ERI 7/2019, International Railway Journal 1/2021, Modern Railways 4/2018, EI 1/2018

... viele Praxiserfahrungen hingegen (weiterhin) durchaus ernüchternd.



Weniger Kapazität mit ETCS

Kurzzeitiger Ausfall von GSM-R und ETCS Level 2 in der Schweiz

**Peinliche ETCS-Störung in
Nordschweden**

**Sicherheitsrelevanter Vorfall mit ETCS L2 auf der Strecke
Lausanne – Villeneuve**

Zürich – München: Umsteigen wegen ETCS

IC-2-Testfahrten in der Schweiz abgebrochen

ETCS-Probleme beim Italien-Verkehr im Sommer

ETCS-Einführung in Dänemark dauert länger und kostet mehr

Fremdverursachte ETCS-Störungen

Wie ETCS Level 2 die Kapazität verringert

ETCS-Probleme bei SBB Cargo

**Doch keine schrittweise
LZB-Abschaltung Berlin – Leipzig**

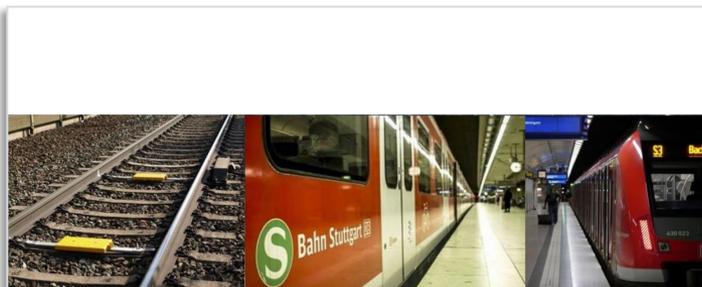
ETCS L2 mit Mängeln

Probleme mit den Eurobalisen

Niederländische Güterbahnen sagen ETCS-Programm den Kampf an

Aussisse: „Eisenbahn-Revue International“

Die S-Bahn-ETCS-Untersuchung war 2018 der Zündfunke für den Digitalen Knoten Stuttgart (DKS).



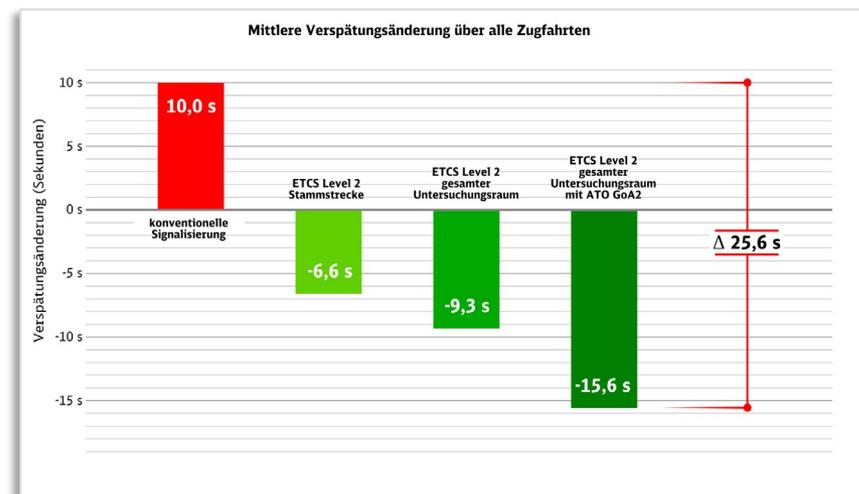
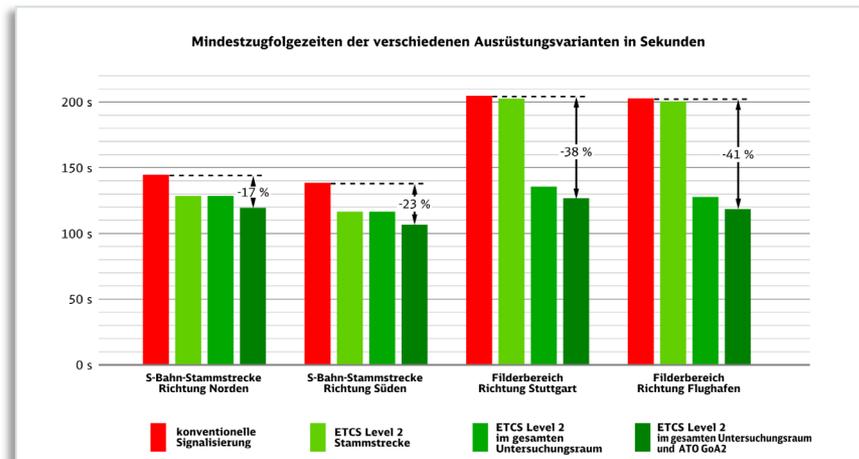
Untersuchung zur Einführung von ETCS im Kernnetz der S-Bahn Stuttgart Abschlussbericht

Version 2.0 vom 31.01.2019

Vorgangs-Nr.: 17FE127440

Ingenieurgemeinschaft:

- WSP Infrastructure Engineering GmbH
- NEXTRAIL GmbH
- quattron management consulting GmbH
- VIA Consulting & Development GmbH
- Railistics GmbH



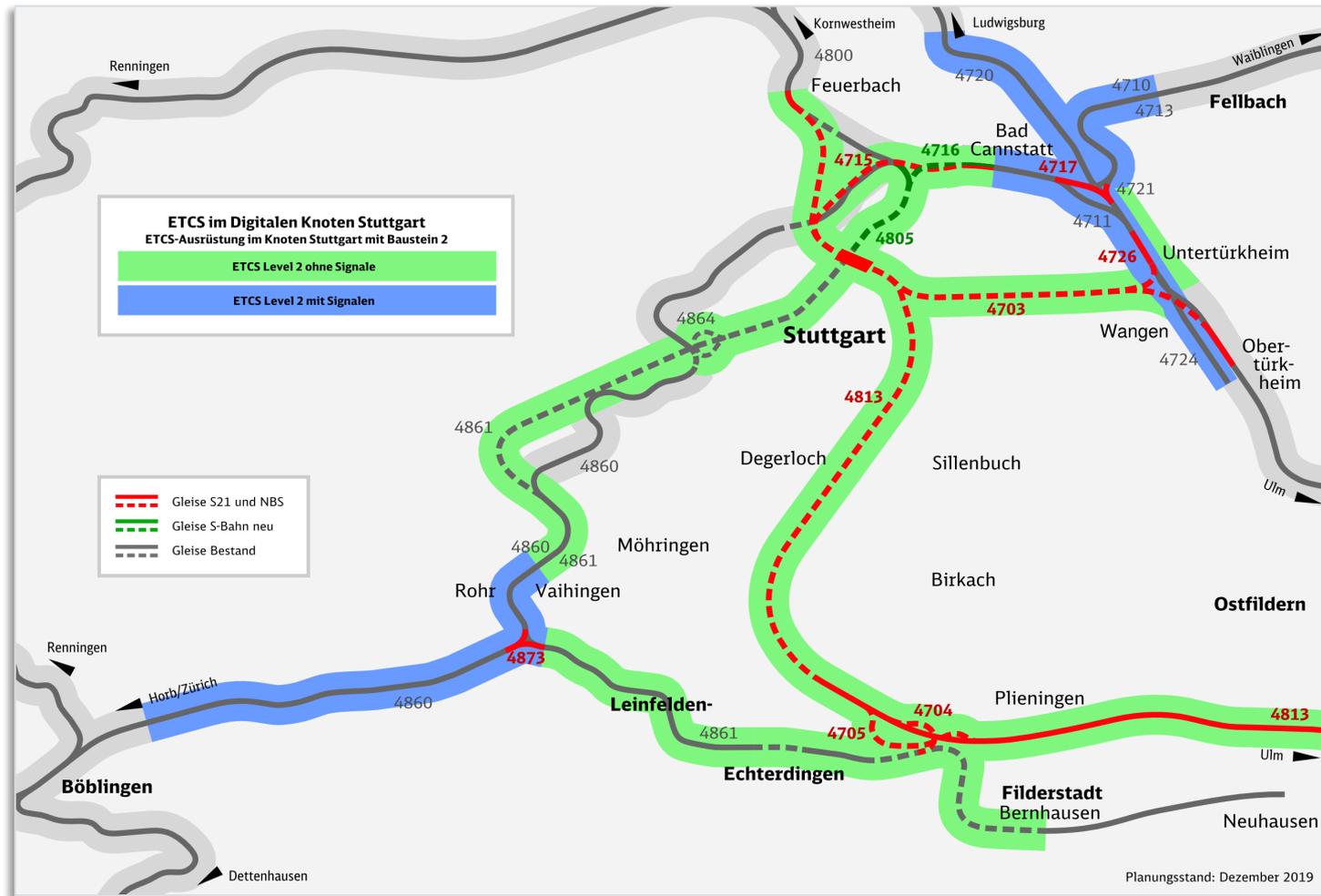
Linke Abbildung: Deckblatt des Abschlussberichts der S-Bahn-ETCS-Untersuchung vom 31. Januar 2019 (<https://bit.ly/2Yyaw6h>).

Wir haben uns im DKS ganz bewusst entschieden, auf eine Doppelausrüstung zu verzichten.



Vertiefend: *ETCS Level 2 ohne „Signale“ in einem großen Knoten*. Deine Bahn 3/2022 (<https://bit.ly/3S4NBdj>).

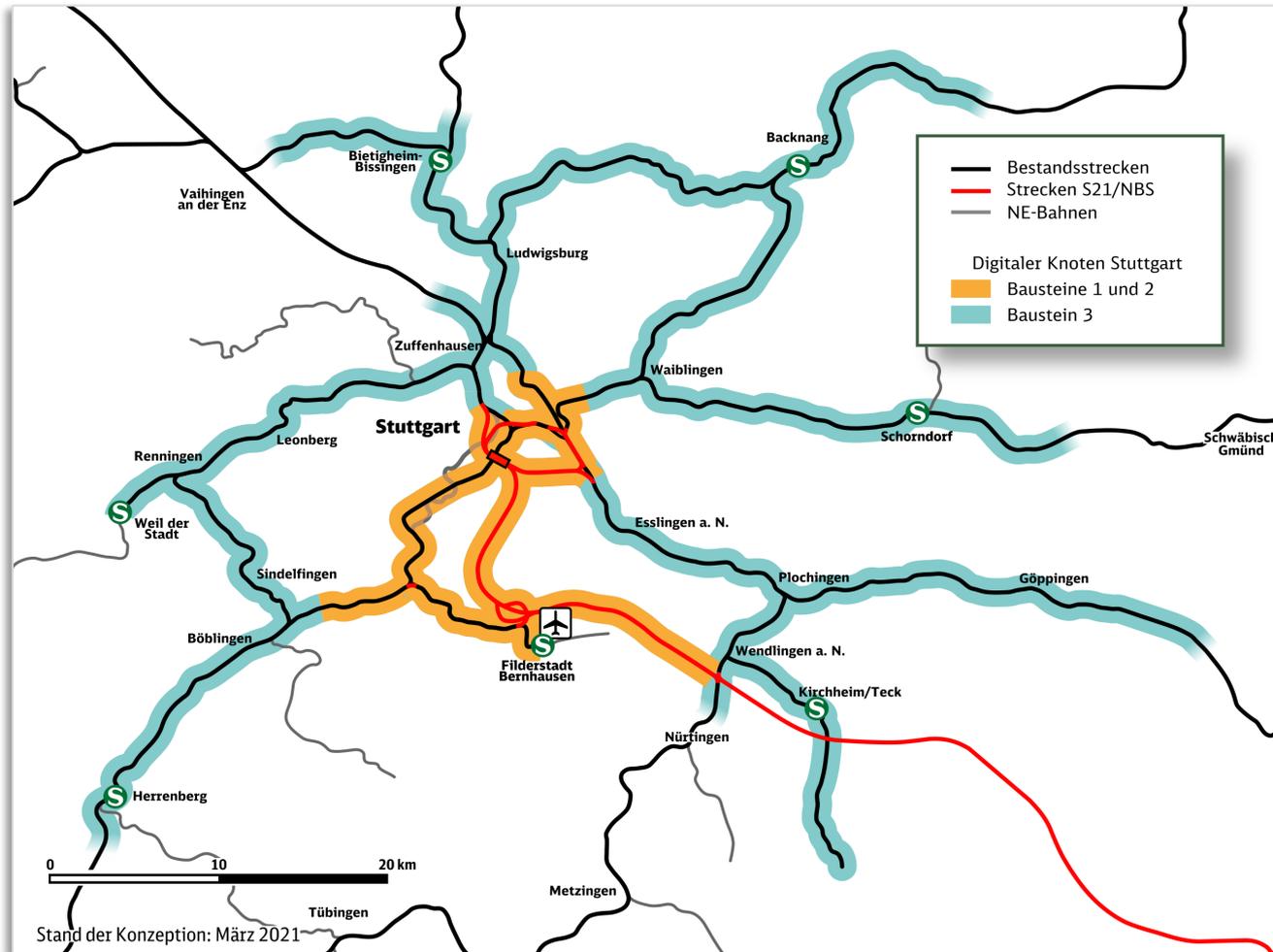
2025 wird der Kern des DKS mit ETCS Level 2 „ohne Signale“ (oS) in Betrieb genommen ...



Vertiefend: Auf dem Weg zum Digitalen Knoten Stuttgart: ein Überblick. Der Eisenbahningenieur 4/2020 (<https://bit.ly/3pyuXfg>).



... bis 2030 folgt schrittweise die übrige Region – insgesamt rund 500 Netzkilometer.



Vertiefend: *Quo vadis Digitale Leit- und Sicherungstechnik?* Der Eisenbahningenieur 11/2021 (<https://bit.ly/3tFQWUB>).

Ein Großprojekt im Großprojekt: Nachrüstung von 333 Triebzügen, im Wesentlichen in 2024.



- Die Fahrzeuge werden vorlaufend zur Infrastruktur ausgerüstet, um eine Doppelausrüstung zu vermeiden.
- In einer ersten Stufe wird bis 2025 insbesondere die Hardware eingebaut und ETCS sowie ATO GoA 2 in Betrieb gesetzt.
- Die First-of-Class-Ausrüstung dazu läuft im Wesentlichen bis Ende 2023, die Serienrüstung im Wesentlichen in 2024 an fünf Standorten (Abbildung).
- In einer zweiten Stufe (2025 bis 2027) wird u. a. FRMCS in Betrieb genommen.
- Rund 90 Prozent der Kosten der Serienrüstung entfallen auf eine Mindestrüstung mit ETCS, weitere 10 Prozent u. a. für sämtliche Optimierungen (z. B. ETCS Level 3, FRMCS, Bremskurven).

Vertiefend: *Fahrzeugnachrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 9/2021 (<https://bit.ly/3tFQWUB>) sowie *Innovationskooperation Fahrzeugrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 9/2022 (<https://bit.ly/3dxD0Z6>).

Die Nachrüstung von ETCS (& Co.) ist mit massiven Eingriffen in das Fahrzeug verbunden.

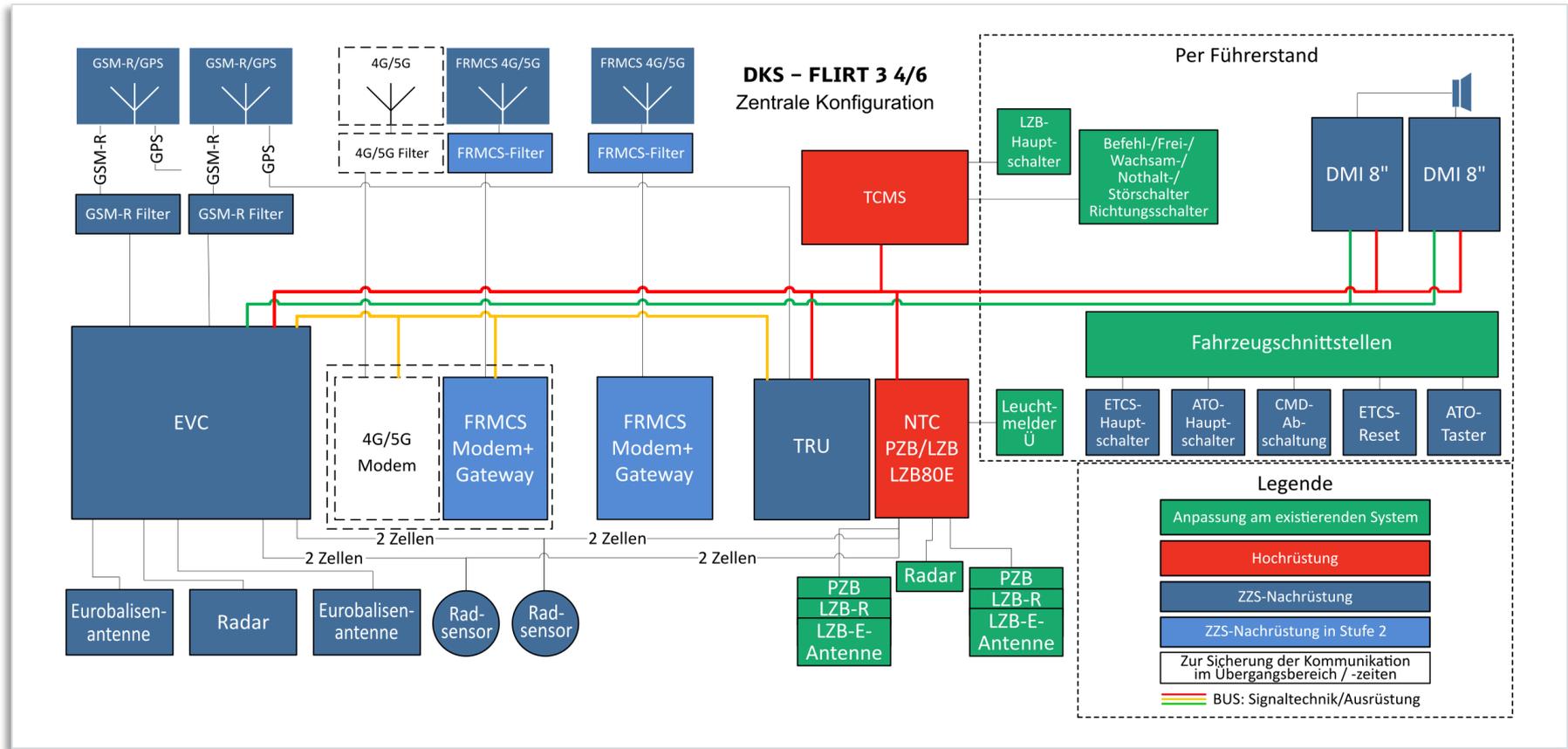


Abbildung: vereinfachte (!) Systemarchitektur auf FLIRT-Triebzügen mit zweistufiger Nachrüstung von ETCS & Co. (blau), Anpassungen und Hochrüstungen
Vertiefend: Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart. ZEVrail 5/2022 (<https://bit.ly/3DHZIOS>).

130 neue Regionaltriebzüge des Landes werden effizient „ab Werk“ mit ETCS & Co. ausgerüstet.



„Digitale“ Eckpunkte der 200 km/h schnellen, spurtstarken Triebzüge:

- ETCS Baseline 3 (SRS 3.6.0) u. a. mit
 - optimiertem Gamma-Bremsmodell und Bremsystem-Anforderung
 - schneller Zugdateneingabe
 - verkürzten technischen Laufzeiten
 - Cold Movement Detection
 - Online Key Management
- ATO GoA 2, u. a. mit Übermittlung von Ist-Adhäsionsdaten
- ETCS Level 3 / TIMS / sichere Zuglänge
- Upgrade auf TSI ZZS 2022 (einschließlich FRMCS) beauftragt
- Fahrzeugzustandsdaten (TCR)
- standardisierte Schnittstellen (OCORA)

Die Ausrüstung „ab Werk“ ist weniger als halb so aufwendig wie die Nachrüstung.

Abbildungen aus <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2022/5/zukunftsfaehige-mobilitaet-mit-130-neuen-doppelstock-regionalzuegen>

Vertiefend: *Innovationskooperation Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 9/2022 (<https://bit.ly/3dxD0Z6>) sowie kommender Artikel im „Eisenbahningenieur“ 1/2023.

Die Fahrdienstvorschrift für den digitalen Bahnbetrieb soll im DKS pilotiert werden.



„Klassische“ Fahrdienstvorschrift (Richtlinie 408)

Handlungs- & funktionsorientierter Aufbau

Alle Handlungen, die zu einem Unfall führen können, werden ausgeschlossen.

Aufteilung der Regelungen in Abläufe und detaillierte Beschreibung.

Regelwerk für den Betrieb im historisch gewachsenen Gesamtnetz

Berücksichtigung unzähliger technischer Ausrüstungsstände.

Klassische analoge Darstellungsform

Papiergebundene Ausgabe oder abrufbar via PDF.

Fahrdienstvorschrift für den digitalen Bahnbetrieb (Richtlinie 400)

Schutzziel- & prozessorientierter Aufbau

Durch Einhaltung der vorgegebenen Schutzziele werden Unfälle ausgeschlossen.

Regelungen werden prozessorientiert zusammengefasst und prozessual dargestellt.

Regelwerk für den Betrieb bei standardisierten Rahmenbedingungen

Anwendung bei identischen Rahmenbedingungen und daher Einführung parallel zum Rollout des Digitalen Bahnbetriebs.

Neue digitale Darstellungsform

Herausgabe erfolgt über eine digitale Anwendung.

Vertiefend: *Der Weg zu einer neuen Fahrdienstvorschrift für den digitalen Bahnbetrieb*. Deine Bahn 10/2021.

Zusammenspiel von Betrieb, Fahrzeugen und Infrastruktur im DKS (Horizont 2030)

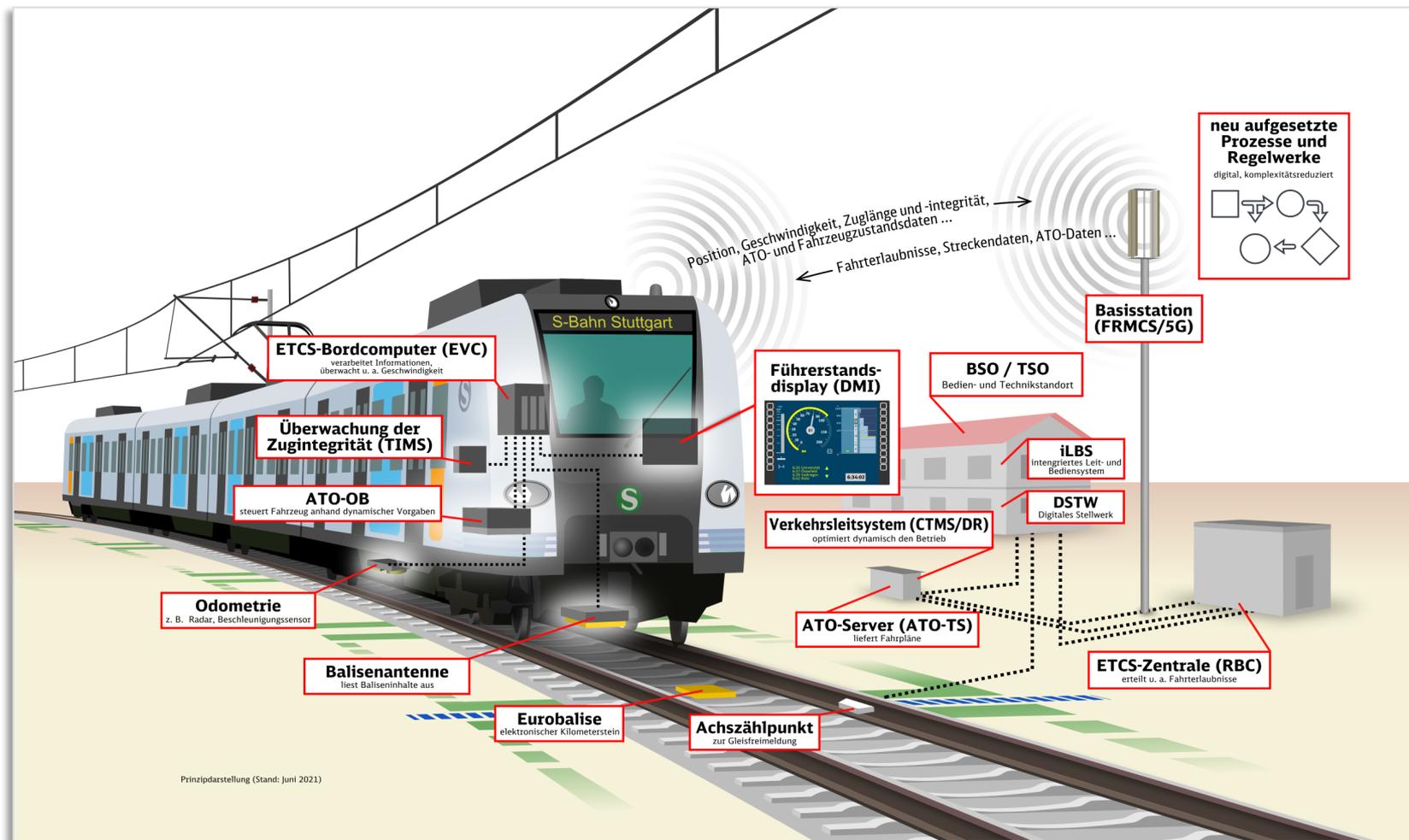
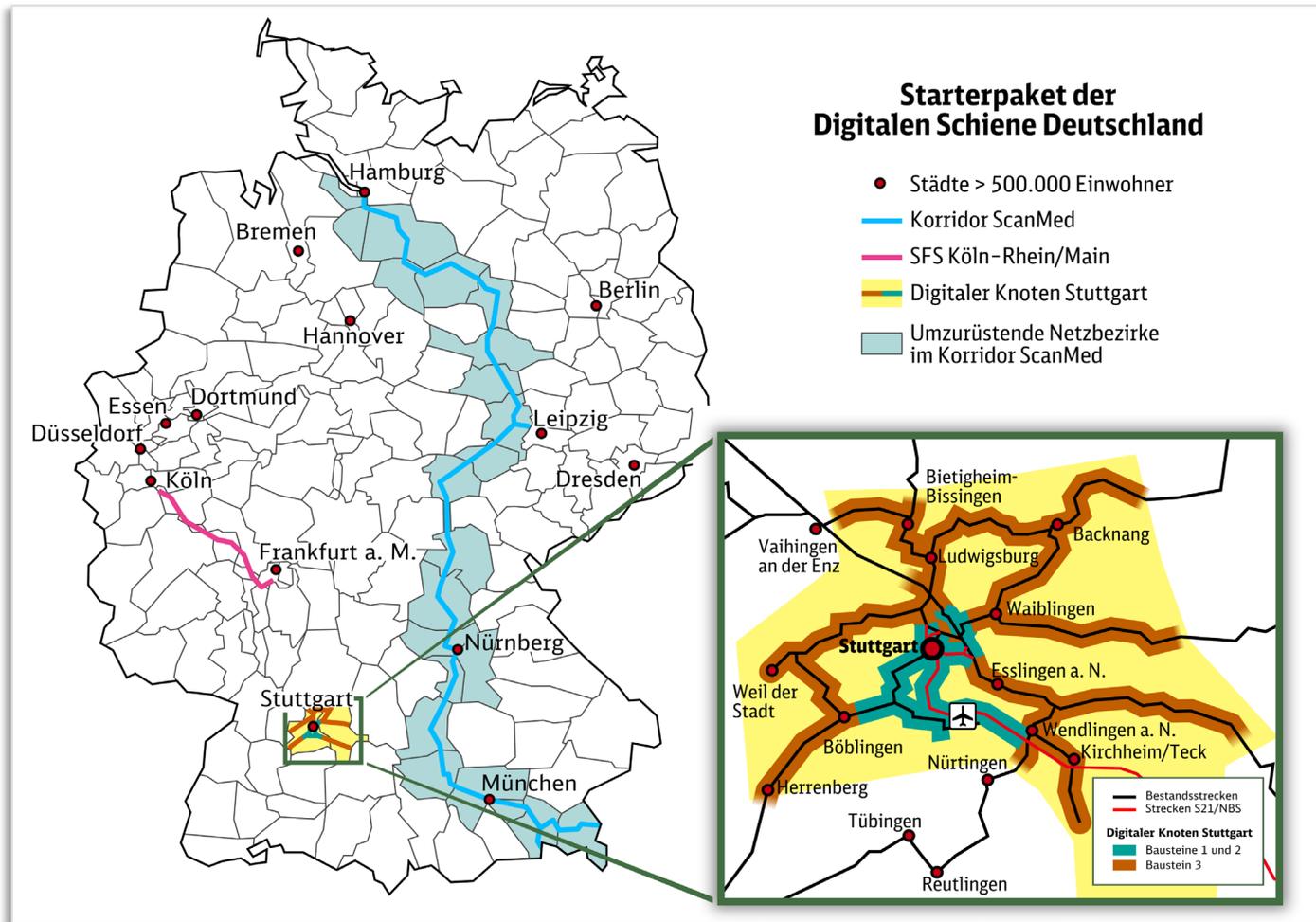


Abbildung: vereinfachte Architektur im Endzustand des DKS (mit Baustein 3, Horizont 2030)
 Vertiefend: *Fahrzeugnachsstellung für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 9/2021 (<https://bit.ly/3tFQWUB>).

Der Digitale Knoten Stuttgart ist Teil des Starterpakets der Digitalen Schiene Deutschland.



Die Umsetzung des Digitalen Knotens Stuttgart nimmt weiter an Fahrt auf.



Im Deckenbereich montierter ETCS-Fahrzeugrechner (EVC)



Probeweise auf Fester Fahrbahn eingebaute Balise

- Im November 2020 wurde der Kern der Infrastruktur an Thales vergeben.
- Im Juni 2021 wurde die ETCS/ATO-Nachrüstung von 333 Regional- und S-Bahn-Triebzügen an Alstom beauftragt. Integrationstests an ersten ausgerüsteten First-of-Class-Fahrzeugen laufen.
- Stellwerke, ETCS und weiteren Techniken werden schrittweise, von Ende 2023 bis 2030, in Betrieb genommen.
- Parallel zur Umsetzung wurden in Innovationskooperationen einzelne Anteile zur Anwendungsreife geführt, beispielsweise neue Fahrstraßentypen oder FRMCS-Fahrzeugausrüstung.
- Die nötigen Mittel für die Infrastruktur sind im Bundeshaushalt hinterlegt. Im Rahmen eines Pilotprojekts fördert der Bund auch die Fahrzeugausrüstung anteilig. Die EU unterstützt beides.
- Offen ist Förderung der Fahrzeugausrüstung für den Baustein 3 sowie die Finanzierung einiger grundlegender netzweiter Funktionen und Techniken.

Facetten einer robusten Infrastruktur: voll redundantes GSM-R – erstmals in Deutschland

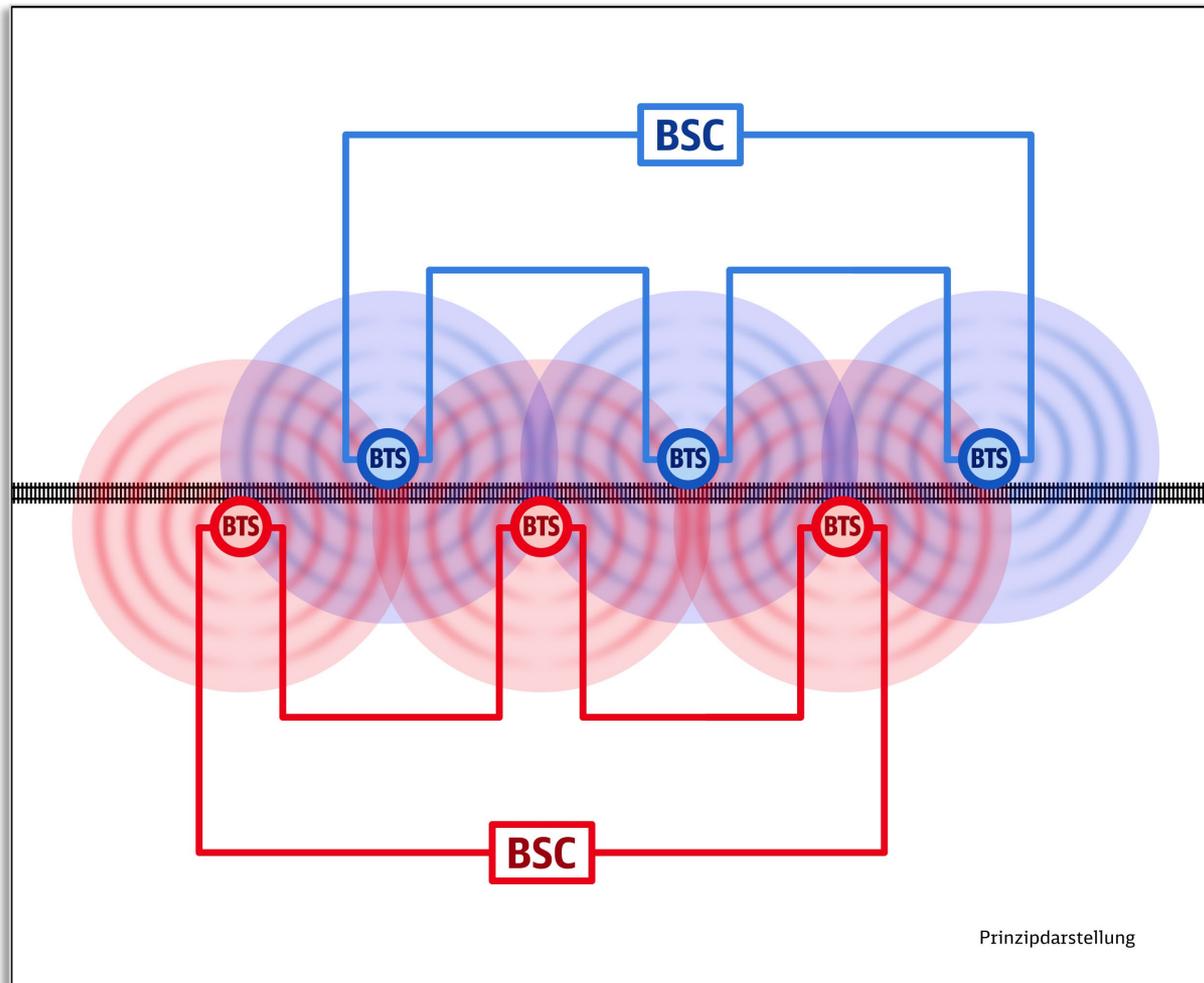
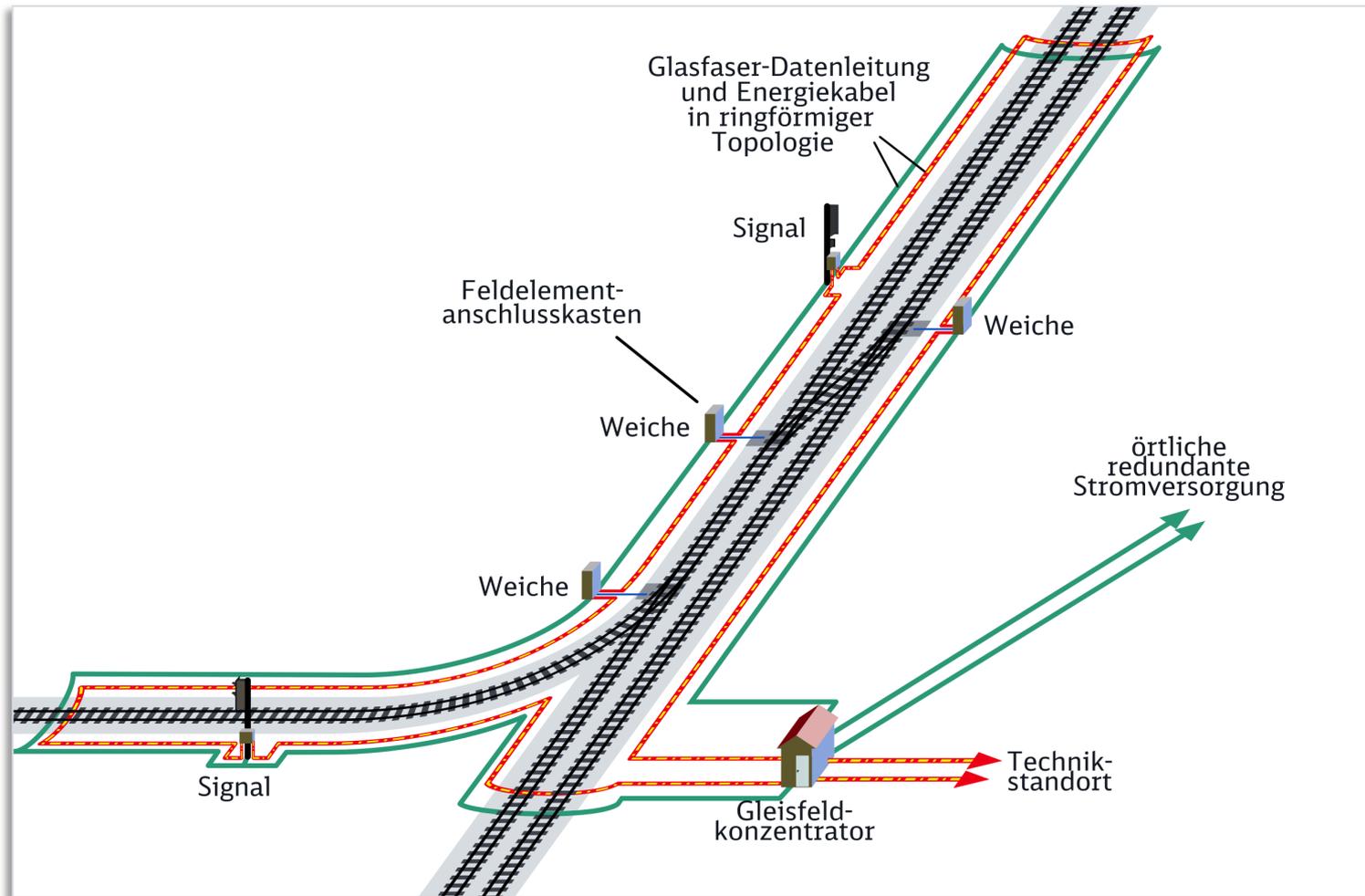


Abbildung: Alternierende Anbindung von in verdichteten Abständen aufgestellten GSM-R-Basisstationen (BTS) an die übergeordneten „Vermittlungsstellen“ (BSC).
Vertiefend: *Robuste LST-Infrastruktur im Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 11/2022.

Facetten einer robusten Infrastruktur: Gleisfeldvernetzung in Ringen



Prinzipdarstellung mit „Signalen“

Vertiefend: *Robuste LST-Infrastruktur im Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 11/2022.

Angesichts knapper Ressourcen und hoher Ziele sind Lösungen „aus einem Guss“ unabdingbar.



Einige wesentliche Erfahrungen aus der Projektumsetzung:

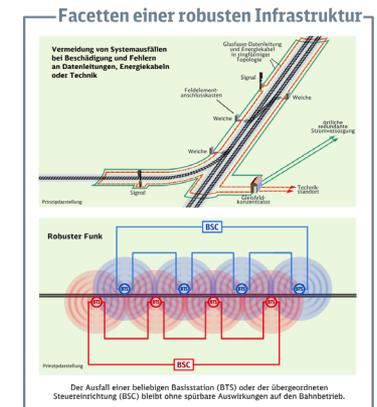
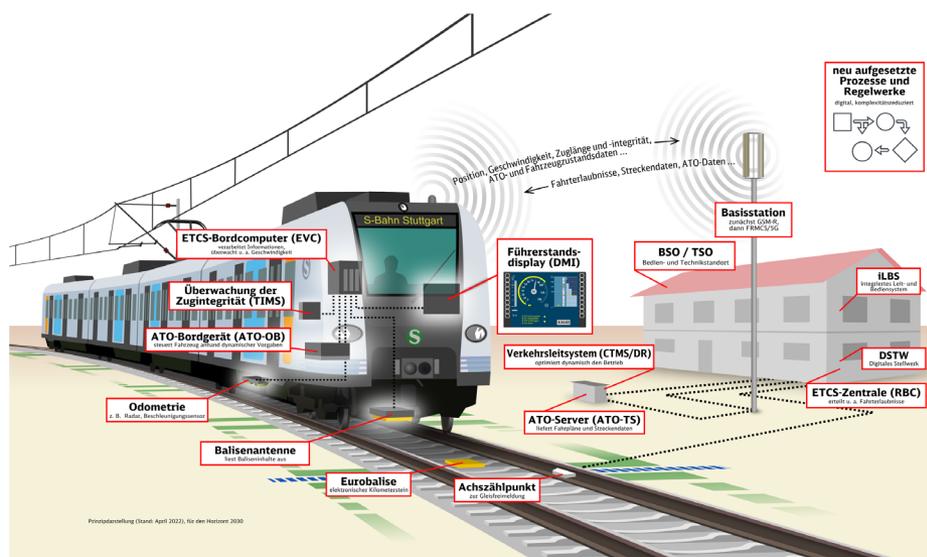
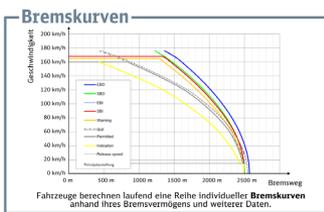
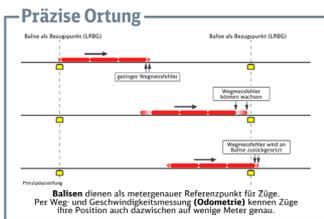
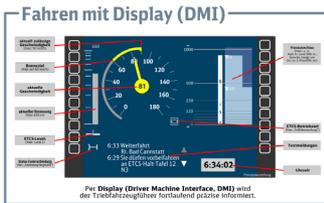
- Wir müssen unbedingt effizienter werden, wo immer möglich automatisieren, verschlanken. Es ist unabdingbar, auf eine Doppelausrüstung der Infrastruktur zu verzichten und die Fahrzeugausrüstung klug zu gestalten.
- Vorausschauend gestaltete Fahrzeug- und Infrastruktur-Lösungen kosten im Pilotprojekt DKS bislang nur etwa zehn Prozent mehr als solche, die nur aktuelle Mindestanforderungen erfüllen. Dazu gehören u. a. ATO GoA 2, Zugintegritätsüberwachung/Level 3, optimierte Blockteilung und Bremskurven sowie voll redundantes GSM-R im Kern.
- Daneben entstehen Kosten für zentrale Systeme wie CTMS.
- Die im DKS beobachteten geringfügigen Mehraufwendungen werden zukünftig voraussichtlich weiter sinken, beispielsweise durch den industriellen Fahrzeug-Retrofit und zahlreiche Fahrzeug-Strecke-Wechselwirkungen wie Hybrid Level 3.
- Nachträgliche grundlegende Änderungen sind um ein Vielfaches aufwendiger, als wenn eine optimierte Lösung frühzeitig kommuniziert und diskutiert, „aus einem Guss“ geplant, im Wettbewerb vergeben und „am Stück“ umgesetzt wird.
- Es ist unbedingt wichtig, Entwicklungen vorzudenken und Lösungen zu suchen. Dazu gibt es viele Gestaltungsspielräume: z. B. frühzeitige und offene Kommunikation mit klaren Zielen, wettbewerbliche Anreize, Abschichten, Innovationskooperationen...

Vertiefend: *Quo vadis Digitale Leit- und Sicherheitstechnik?* Der Eisenbahningenieur 11/2021 (<https://bit.ly/3tFQWUB>) sowie *Fahrzeugnachsrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 9/2021 (<https://bit.ly/3tFQWUB>)

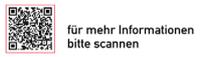
Ein Fahrzeug-und-Infrastruktur-Großprojekt, eine Menge Technik für viele hundert Millionen Euro...



Fahrzeuge, Infrastruktur und Betrieb wirken im Digitalen Knoten Stuttgart zusammen



WWW.DIGITALER-KNOTEN-STUTTART.DE



... und was bringt das alles?

Abbildung: DKS-Übersichtsplakat, das auf den „Tagen der offenen Baustelle“ am Hauptbahnhof in Stuttgart im April 2022 gezeigt wurde. (vertiefend: <https://bsu.link/tdob-infotafeln>)

Typisches Verständnis von Kapazitätserhöhungen: dichte Blockteilung, wie von der LZB bekannt

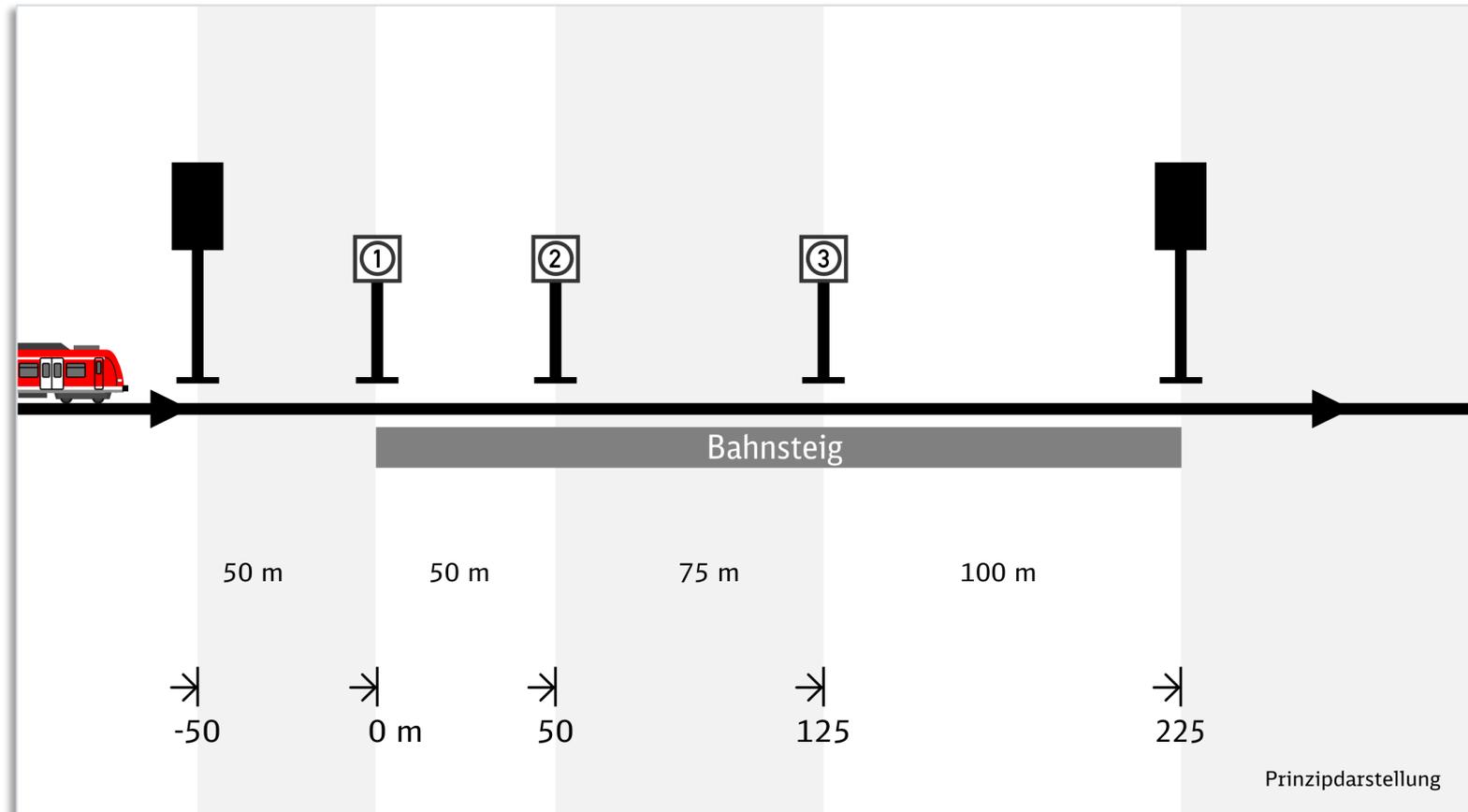


Abbildung: Typische Blockteilung im Bereich der S-Bahn-Stammstrecke München, mit LZB-Hochleistungsblock.

Mit ETCS können bis zu 30 m kurze „Blöcke“ gebildet werden.

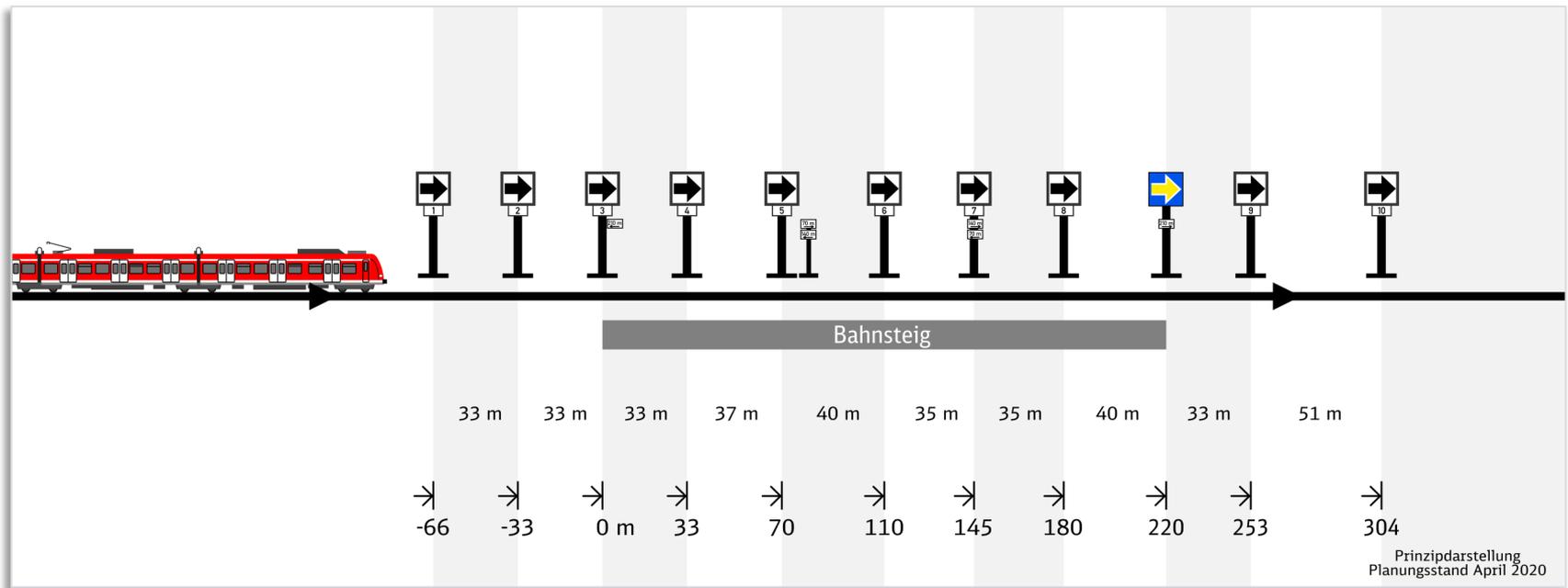


Abbildung: Prinzipdarstellung des Hochleistungsblock im Bereich der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart für eine fiktive, brettebene Station.
Vertiefend: *Optimierung der Blockteilung mit ETCS Level 2 im Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 7+8/2021 (<https://bit.ly/3Ai0gQR>).

**Und an dieser Stelle hören wir (DB)
bei „digitalen“ Leistungssteigerungen
meist auf zu denken...**

**... dabei liegt der Großteil des
„digitalen“ Kapazitätspotenzials
nicht in der Blockteilung!**

Wir sehen im DKS mehr als 50 Kapazitäts- und Qualitätspotenziale.

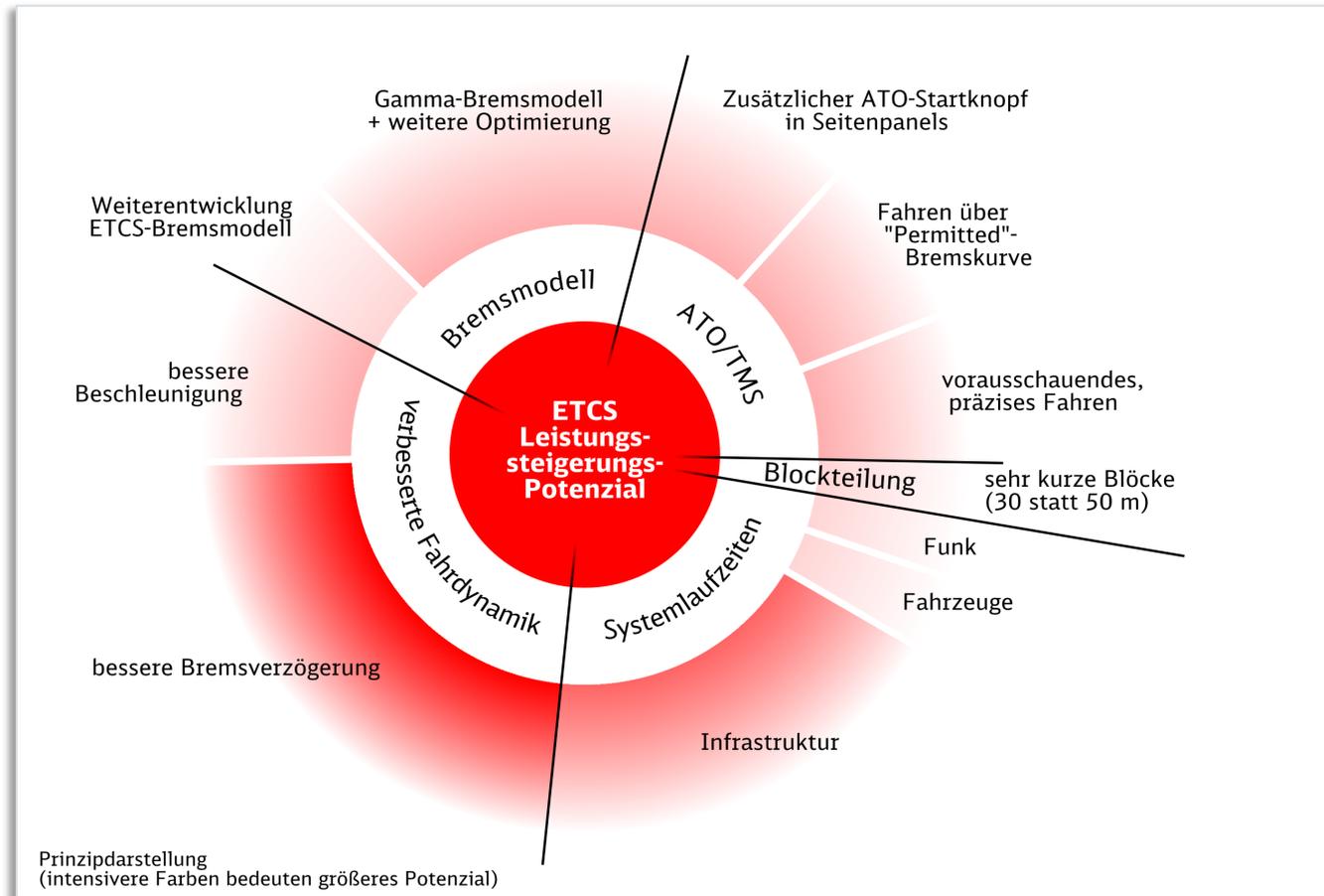


Abbildung: Darstellung der in der S-Bahn-ETCS-Untersuchung (2018/2019) erkannten Potenziale für kürzere Zugfolgezeiten. (nicht alle Potenziale sind dargestellt, insbesondere außerhalb der S-Bahn)

Mit ETCS & Co. stehen Zug und Infrastruktur im ständigen Austausch, z. B. Position Reports.



Vertiefend: *Fahrzeugnachsrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 9/2021 (<https://bit.ly/3tFQWUB>) sowie https://de.wikipedia.org/wiki/Position_Report. Nicht dargestellt zahlreiche weitere Daten über ATO, darunter TCR - siehe *Innovationskooperation Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart*, Signal+Draht 9/2022 (<https://bit.ly/3dxD0Z6>).

TMS-Geschwindigkeitsempfehlungen per ETCS-Textmeldung (Lötschberg-Basistunnel, seit 2007)

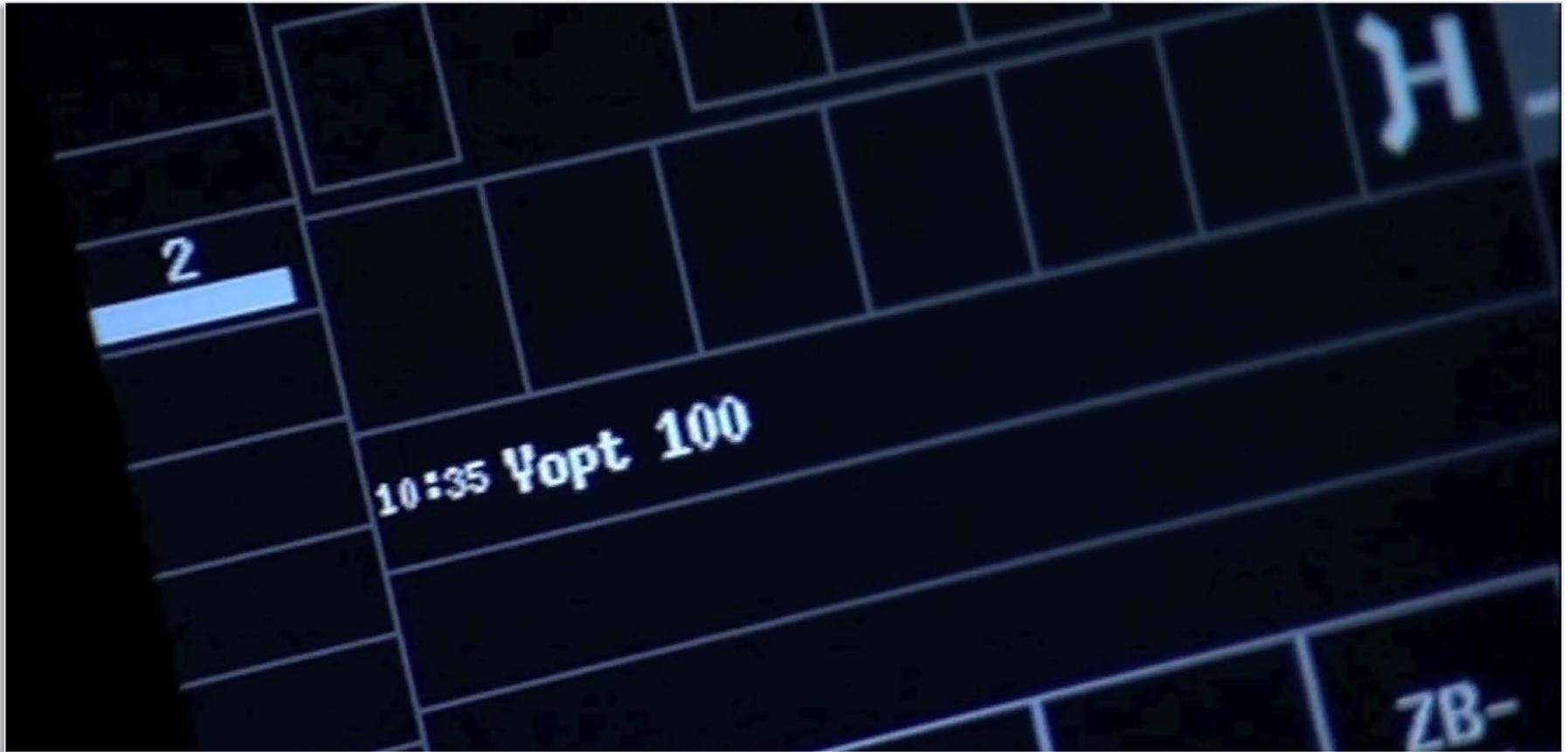
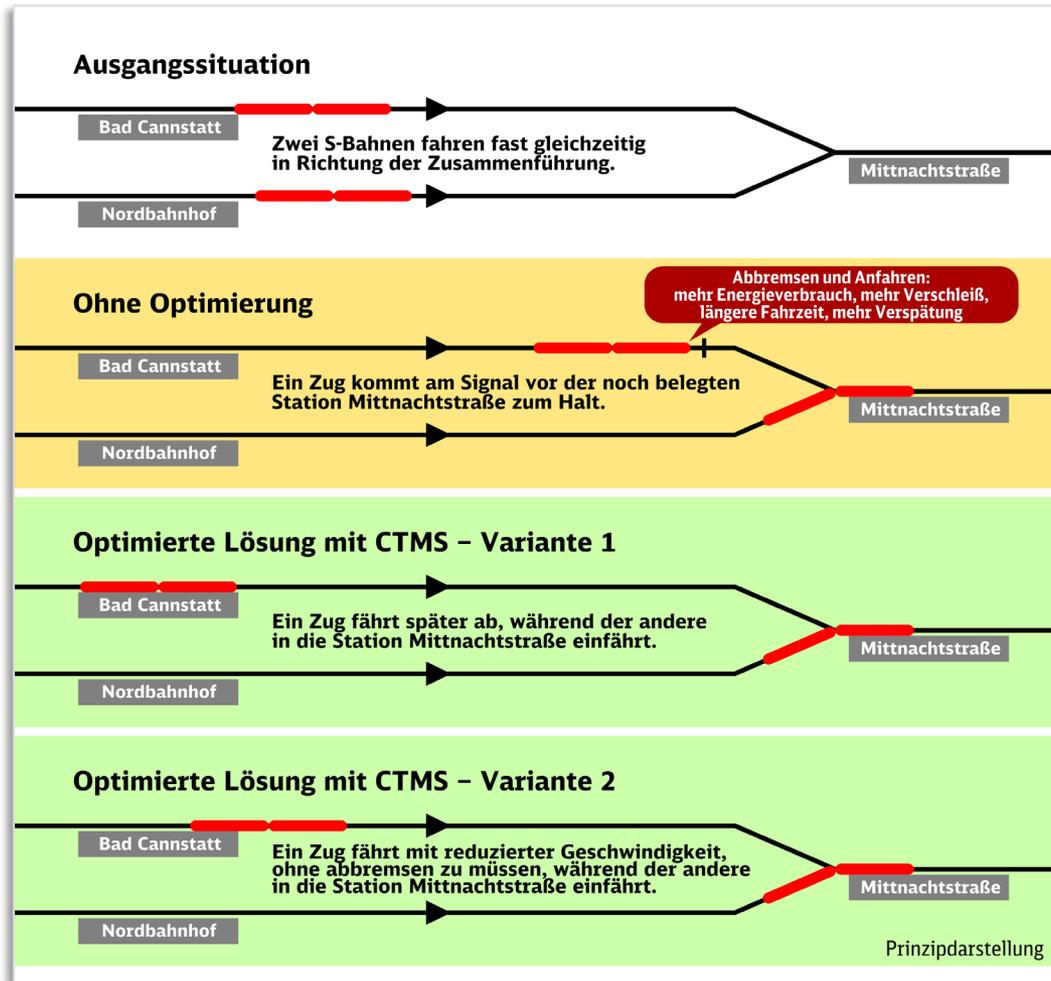


Abbildung: Geschwindigkeitsempfehlung für einen Güterzug per Textmeldung in der Führerraumanzeige (DMI), aus einem Bericht des SRF-Magazins „Einstein“ von 2010 (<https://bit.ly/3S2dI4t>)
TMS: „Traffic Management System“

Vorausschauende Führung von Zügen mit dem Capacity & Traffic Management System (CTMS)



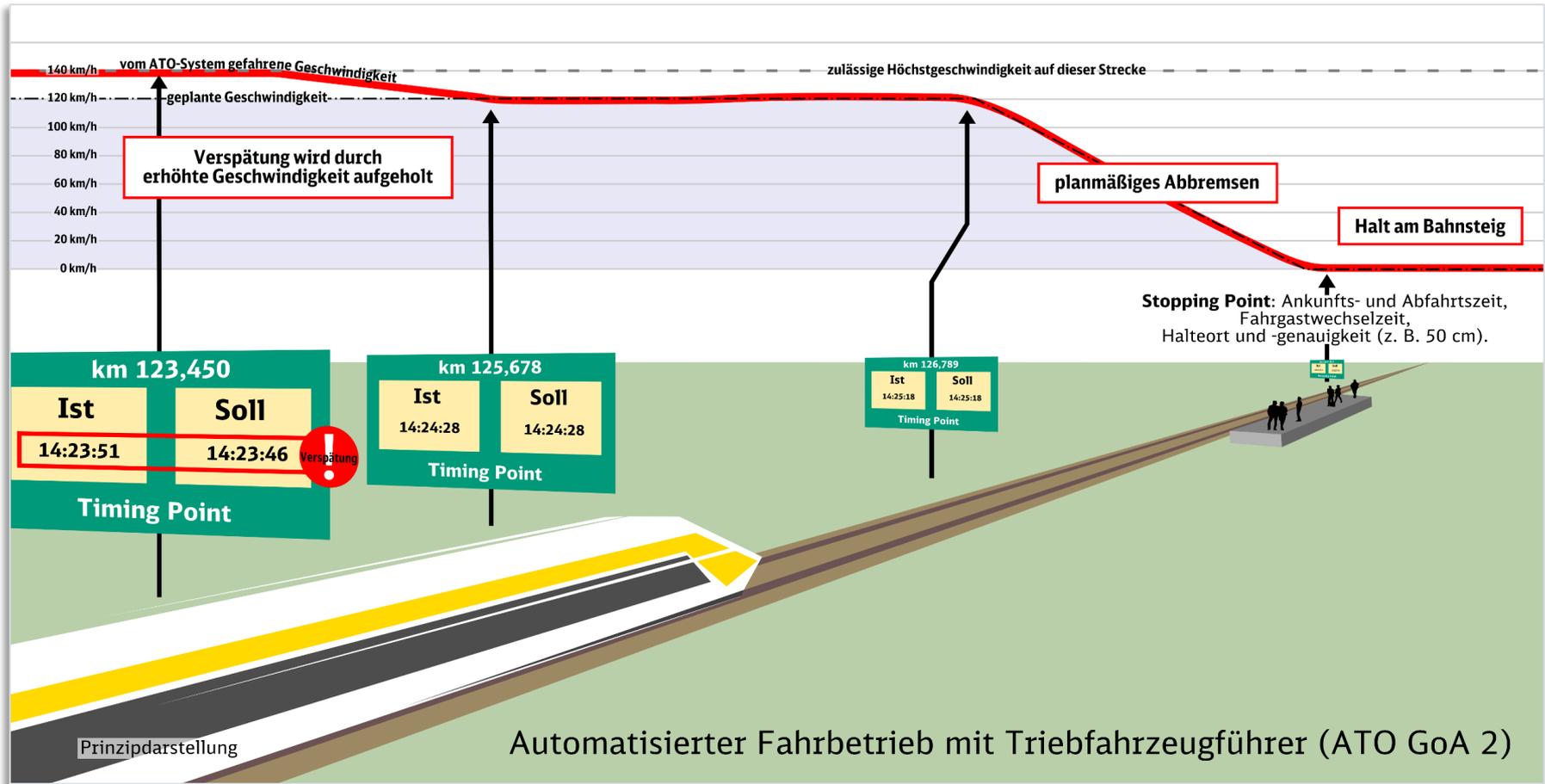
Automatisierter Fahrbetrieb (ATO): Wir haben uns im DKS bewusst für GoA 2 entschieden.



	Nicht automatisierter Fahrbetrieb (GoA 1)	Hochautomatisiertes Fahren (GoA 2)	Fahrerloser Fahrbetrieb (GoA 3)	Unbegleiteter Fahrbetrieb (GoA 4)
				
Störungsmanagement	Personal	Personal	Personal	System
Tür-Schließung und Abfahrtsauftrag	Personal	Personal	System	System
Zug in Bewegung setzen	Personal	System	System	System
Zug fahren und anhalten	Personal/System	System	System	System
	Der Zug wird manuell gefahren. Mindestens Abfahrt und Halt werden durch einen Lokführer durchgeführt. Die Einhaltung der Geschwindigkeit wird vom System überwacht.	Der Zug fährt automatisch. Der Lokführer ist immer noch im Führerstand, um den Abfahrtsauftrag zu geben und das Schließen der Türen und den Fahrweg zu beobachten.	Ein Zugbegleiter ist anwesend, der das Schließen der Türen überwacht, in Notfällen eingreifen kann und den Zug führen könnte. Er sitzt jedoch nicht zwangsläufig vorne.	Der Zug fährt gänzlich unbegleitet, alle Funktionen sind automatisiert. Das Kontrollsystem übernimmt alle Fahrt- und Überwachungs-funktionen.

Abbildungen (v. l. n. r.) aus Wikimedia Commons unter CC-BY-SA-Lizenz: Sese_Ingolstadt, Alex Nevin-Tylee, DTD (gemeinfrei!), Freddy2001

ATO GoA 2 als einfache, präzise „Fernsteuerung“

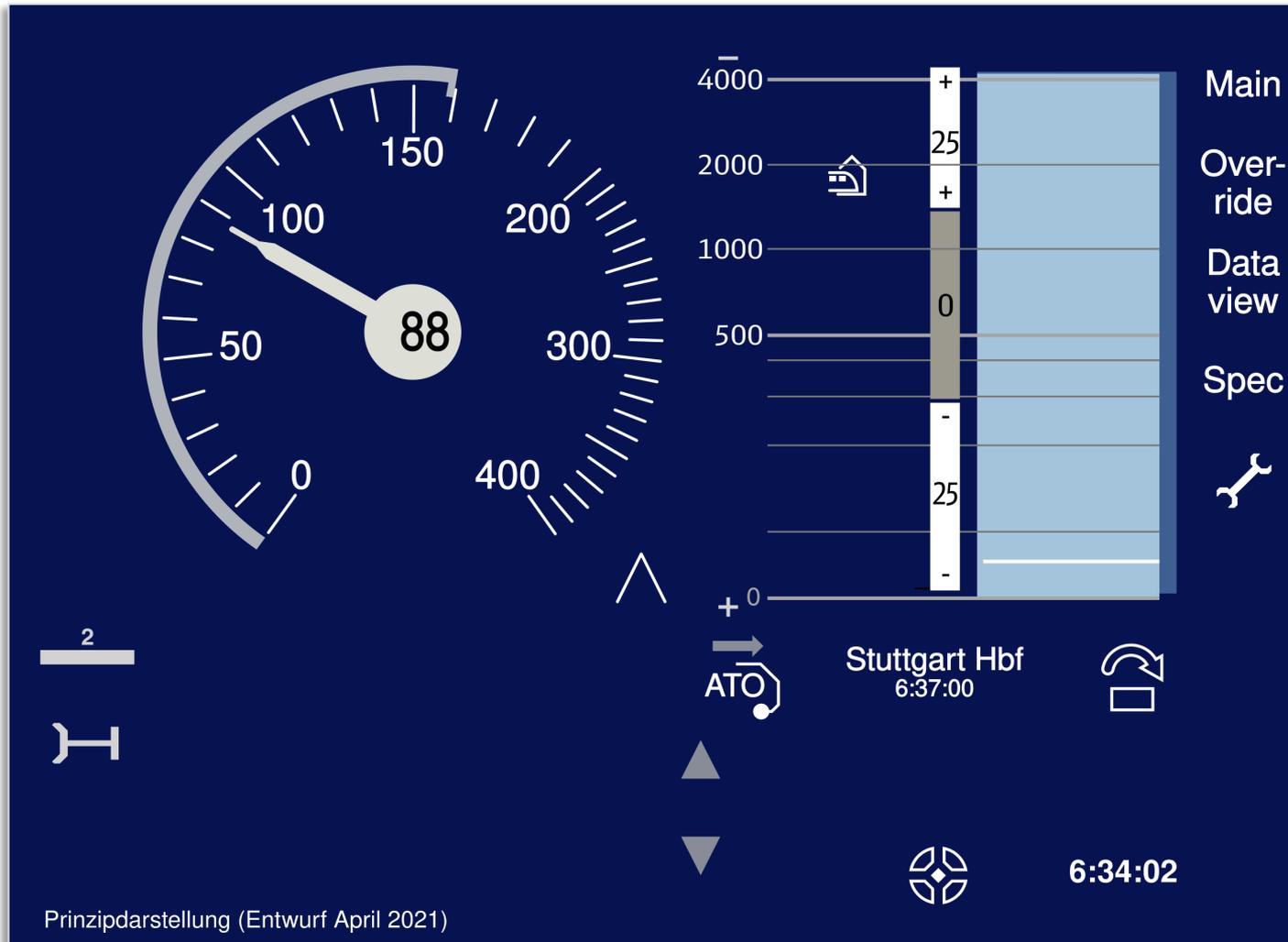


Vertiefend: Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart. ZEVrail 5/2022 (<https://bit.ly/3DHZIOS>).

„Look & Feel“ im ATO-Betrieb: Das ATO-Bordgerät steuert den Zug. Nächster Halt in 3 Minuten.



Grafik nicht perfekt



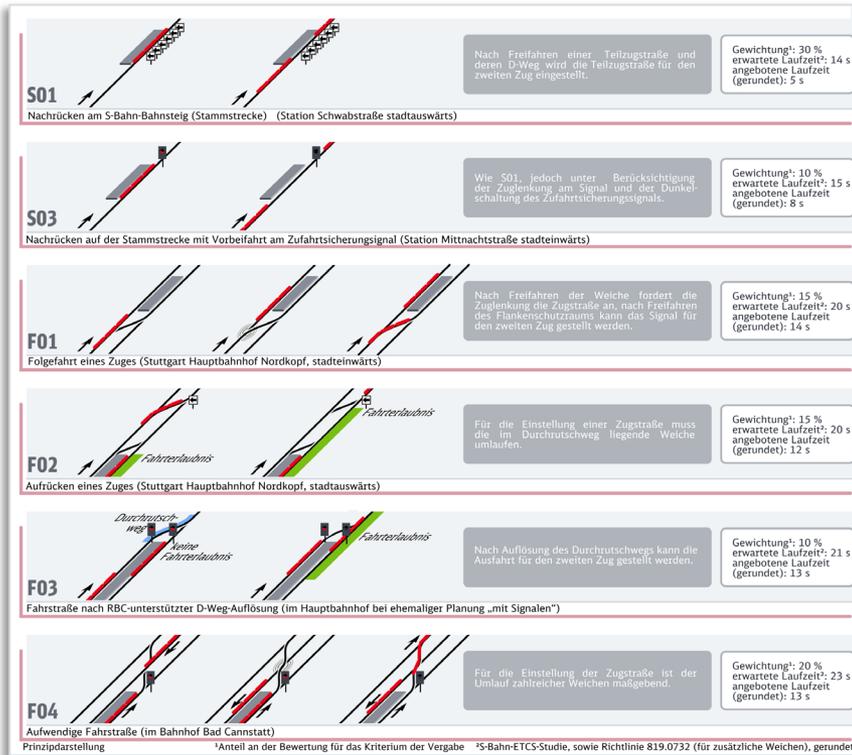
Die in der S-Bahn-ETCS-Untersuchung unterstellten Laufzeiten konnten uns nicht zufriedenstellen.



	Zeitanteil	Zeit (s)
Infrastruktur	Fahrstraßenauflösung	3,0
	Fahrstraßenbildung (ohne Weiche, mit Zuglenkung)	6,0
	Übertragung Stellwerk => ETCS-Zentrale (RBC)	0,5
	Verarbeitung in der ETCS-Zentrale	0,5
(Luft-)Schnittstelle	Übertragung der Fahrterlaubnis per Funk (GSM-R)	0,8
	Laufzeitverzögerung an weiteren Schnittstellen	1,0
Fahrzeug	Verarbeitung im ETCS-Fahrzeuggerät	1,5
Summe (gerundet)		14

Tabelle: In der S-Bahn-ETCS-Untersuchung von 2018 unterstellte technische Laufzeiten (Szenario ohne Weichen).
 Vertiefend: *Schnelle Leit- und Sicherungstechnik für mehr Fahrwegkapazität*. Der Eisenbahningenieur 6/2021 (<https://bit.ly/2SIQvjY>).

Nach einem Laufzeitwettbewerb wurden deutlich reduzierte Infra-Laufzeiten vertraglich vereinbart.



- Für sechs kapazitätskritische Szenarien (Abb.) zugesagte und nachzuweisende Laufzeiten waren, neben dem Preis und weiteren Kriterien, zuschlagsrelevant.
- Gegenüber dem Ergebnis der S-Bahn-ETCS-Untersuchung konnten die Laufzeiten um 5 bis 10 Sekunden verkürzt werden.
- Auf den maßgebenden Abschnitten der S-Bahn-Stammstrecke (Teilzugstraßen ohne Weichen) wurde die Infrastrukturlaufzeit (Stellwerk + RBC) von 11 auf 2 Sekunden reduziert.
- Die Umsetzung dieser Laufzeiten ist unter Praxisbedingungen (Last) nachzuweisen.
- In Verbindung mit weiteren Optimierungen (schnelle Fahrzeuggeräte, 5G-basierter Bahnbetriebsfunk FRMCS) werden perspektivisch Ende-zu-Ende-Laufzeiten (ohne Weichen) von gerade einmal **2 Sekunden** erwartet.

Vertiefend: *Schnelle Leit- und Sicherungstechnik für mehr Fahrwegkapazität*. Der Eisenbahningenieur 6/2021 (<https://bit.ly/2SIQvjY>) sowie *Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart*. ZEVrail 5/2022 (<https://bit.ly/3DHZIOS>).

In der Modellierung von ETCS-Bremskurven liegen viele Spielräume für mehr (oder weniger) Kapazität.



Arbeitsstand

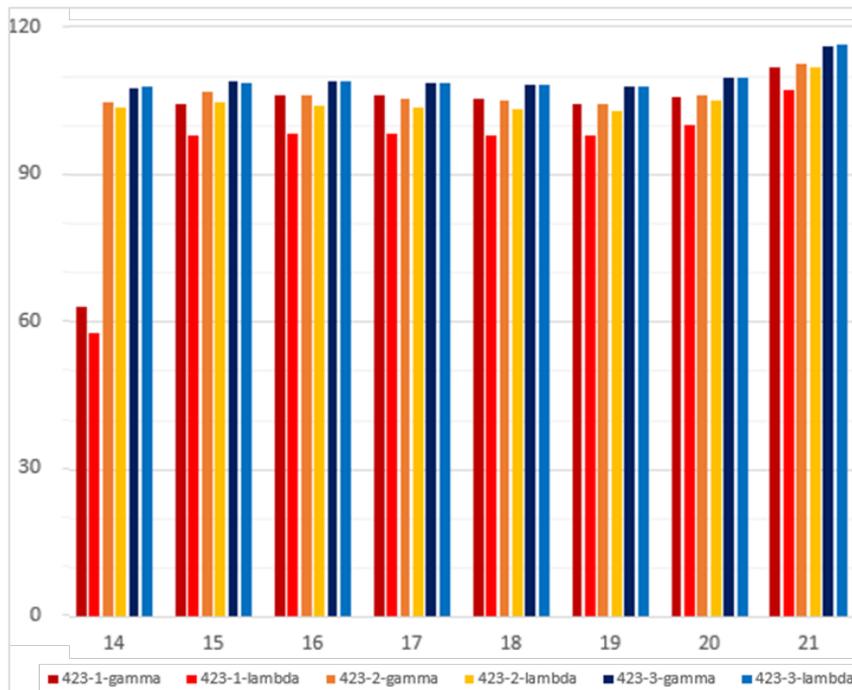
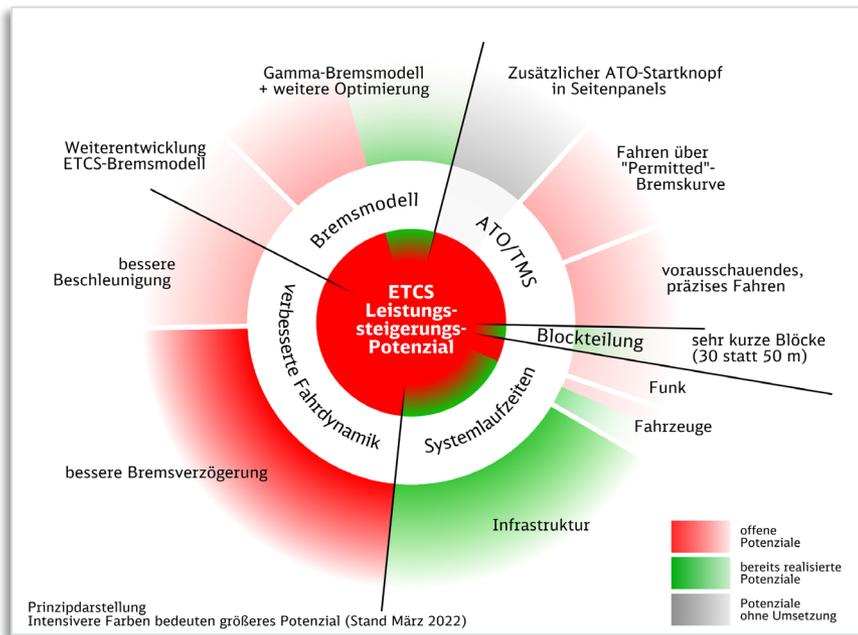


Abbildung: Mindestzugfolgezeiten (in s) je Zugfolgeabschnitt an einer Station der S-Bahn-Stammstrecke für die Zugfolge gleichartiger Züge (Einfach-, Doppel- und Dreifachtraktion der Baureihe 423). Mit optimierter Blockteilung und optimierten Laufzeiten, ohne ATO GoA 2 (d. h. Indication als maßgebende Bremskurve) und ohne weitere Optimierungen. Im Beispiel ist bei Einfach- und Doppeltraktion eher Lambda in Bezug auf die Mindestzugfolgezeit vorteilhaft, eher Gamma hingegen bei Dreifachtraktion.

- ETCS (Baseline 3) kennt zwei Bremsmodelle (Lambda und Gamma).
- Das Gamma-Bremsmodell kann – je nach Zugkonfiguration, Geschwindigkeit und Längsneigung – zu kürzeren oder längeren Zugfolgezeiten führen (Abb.).
- Es gibt einige Optimierungsansätze innerhalb der bestehenden Modelle: beispielsweise Unterscheidungen nach Zuglänge (Gamma/Lambda-Wahl beim Aufstarten, Gamma-Modellparameter).
- Bei neuen Triebzügen sollte ETCS bei der Auslegung des Bremssystems mit berücksichtigt werden (Verfügbarkeit für Gamma, ggf. Bremsverzögerungen).
- ETCS-Bremskurven können durchaus steiler als konventionell (PZB) sein.
- Einzelne Potenziale verbleiben in der ETCS-Spezifikation.

Vertiefend: *Maximierung der Fahrwegkapazität mit Digitaler Leit- und Sicherungstechnik*. Eisenbahntechnische Rundschau 7+8/2021 (<https://bit.ly/2SIQvjY>) sowie <https://de.wikipedia.org/wiki/ETCS-Bremskurven>. Vertiefender Artikel folgt im *Eisenbahningenieur* 1/2023.

Auf der Stammstrecke sind rund 35% kürzere Zugfolgen erreicht – klare Perspektive für (>)50%.



Nicht dargestellt: genauere Lokalisierung als zunächst unterstellt (rund 5 statt modellierten 55 m Ortungsfehler) sowie reine Qualitätspotenziale (z. B. Geschwindigkeitserhöhungen für verspätete Züge).

- Die S-Bahn-ETCS-Untersuchung wies rund 20 % kürzere Zugfolgen für die S-Bahn-Stammstrecke aus – mit ETCS und ATO, unter konservativen Prämissen.
- Mit weiteren Optimierungen, darunter optimierte Gamma-Bremsmodelle, stehen wir inzwischen bei rund 35 %.
- Damit werden mittlere Mindestzugfolgezeiten (mit Langzügen) von rund 100 Sekunden erreicht.
- Zahlreiche weitere Potenziale verbleiben und werden weiter verfolgt.
- Die Frage ist nicht mehr, *ob* wir die langfristig gewünschte 100-Sekunden-Zugfolge (im Fahrplan, m. Puffer) in der Leit- und Sicherungstechnik umsetzen können, sondern „nur“ noch *wie*.
- Als „Joker“ verbleibt die Fahrdynamik zukünftiger Neufahrzeuge.

Vertiefend: Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart. ZEVrail 5/2022 (<https://bit.ly/3DHZIOS>).

Unser Leistungsziel für Fern- und Regionalverkehr im Kern: ein Zug alle 5 bzw. 2 Minuten.



Stuttgart 21 ist wesentliche Voraussetzung für den geplanten Deutschland-Takt

Stuttgart, 16. Juli 2019

Zur Diskussion über die Zukunftsfähigkeit des Bahnprojekts Stuttgart-Ulm nimmt die Deutsche Bahn wie folgt Stellung:

Fahrplan zur Inbetriebnahme von Stuttgart 21 sieht vielfach kürzere Umsteigezeiten vor als der aktuelle Entwurf des Deutschland-Taktes

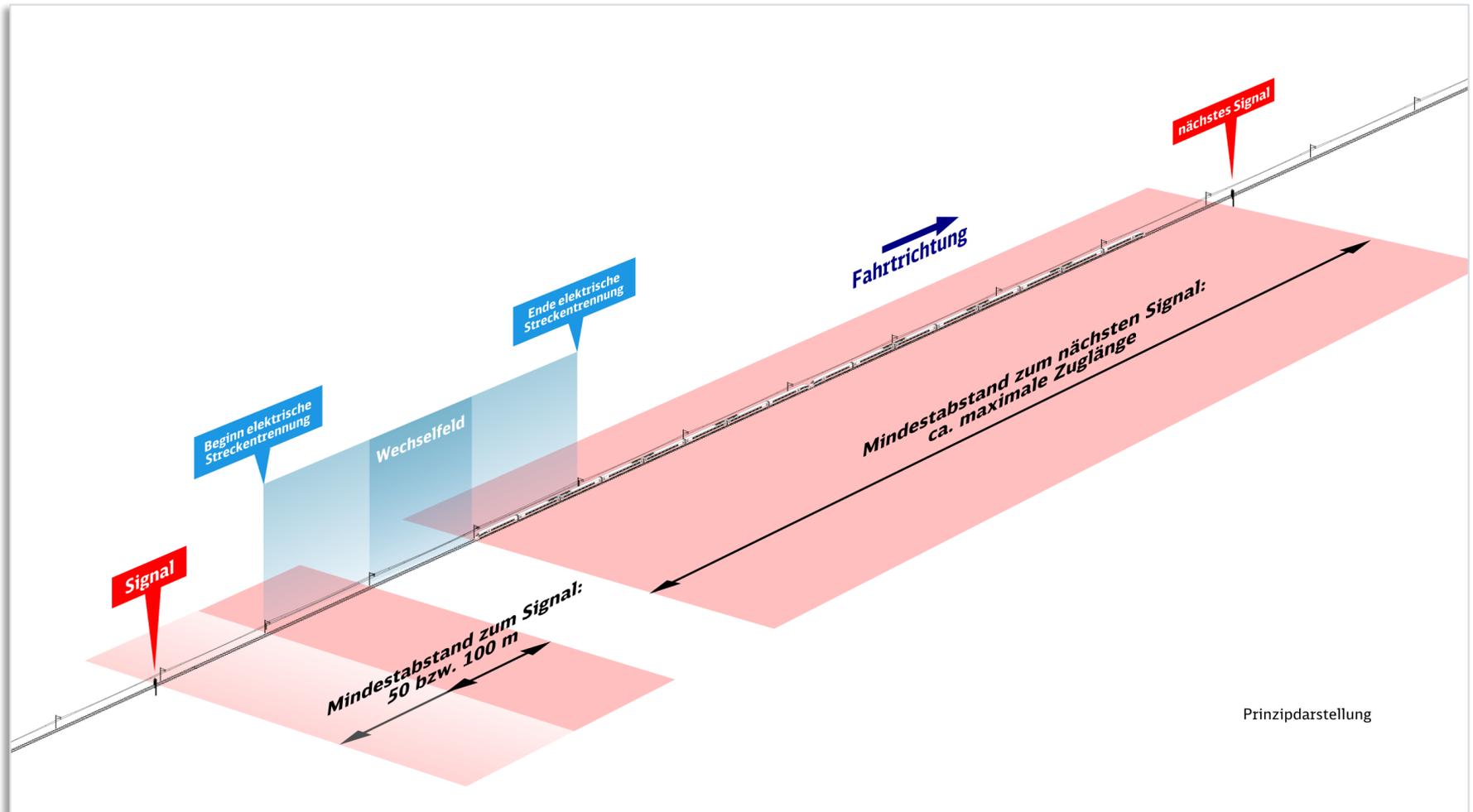
Obwohl beispielsweise halbstündliche Fernverkehrsangebote zwischen Stuttgart und Darmstadt, Heselberg, Mainz, Nürnberg bzw. Zürich – wie auch auf vergleichbaren Relationen in anderen Bundesländern – beim Deutschland-Takt nicht vorgesehen sind, könnte der künftige Bahnknoten Stuttgart bei Bedarf derartige Verkehre ohne Weiteres ebenso aufnehmen wie zusätzliche Regionalverkehre.

Der Pilotknoten der Digitalen Schiene Deutschland verbindet eine hochleistungsfähige Infrastruktur mit smarterer Technik: Auf jedem der acht Bahnsteiggleise kann ohne Weiteres alle fünf Minuten ein Zug fahren, auf jedem der acht daran anschließenden Streckengleise im Schnitt alle zwei Minuten. *Im S-Bahn-ähnlichen*

- Für den Kern des Knotens verfolgen wir für den Hochleistungsbetrieb für 2030 zwei Leistungsziele:
 - Im Hauptbahnhof alle fünf Minuten ein Zug je Bahnsteiggleis (unter Praxisbedingungen).
 - Auf jedem der anschließenden Streckengleise im Mittel alle zwei Minuten ein Zug.
- Das entspricht ungefähr einer Verdreifachung der Spitzenstundenlast und geht weiter über den absehbaren verkehrlichen Bedarf hinaus.
- Die Mindestzugfolgezeit im Zulauf liegt zumeist bei einer Minute (zzgl. Puffer und Reserven).

Aussrisse: Statement des Konzernbevollmächtigten Thorsten Krenz vor dem S21-Ausschuss des Stuttgarter Gemeinderats am 16. Juli 2019 (<http://www.bahnprojekt-stuttgart-uhl.de/presse/pressemitteilungen/newsdetail/news/1491-geplanter-deutschland-takt/newsParameter/detail/News/datum/20190716/>)

Der Teufel steckt in vielen Details: beispielsweise elektrische Streckentrennungen von Bahnhöfen

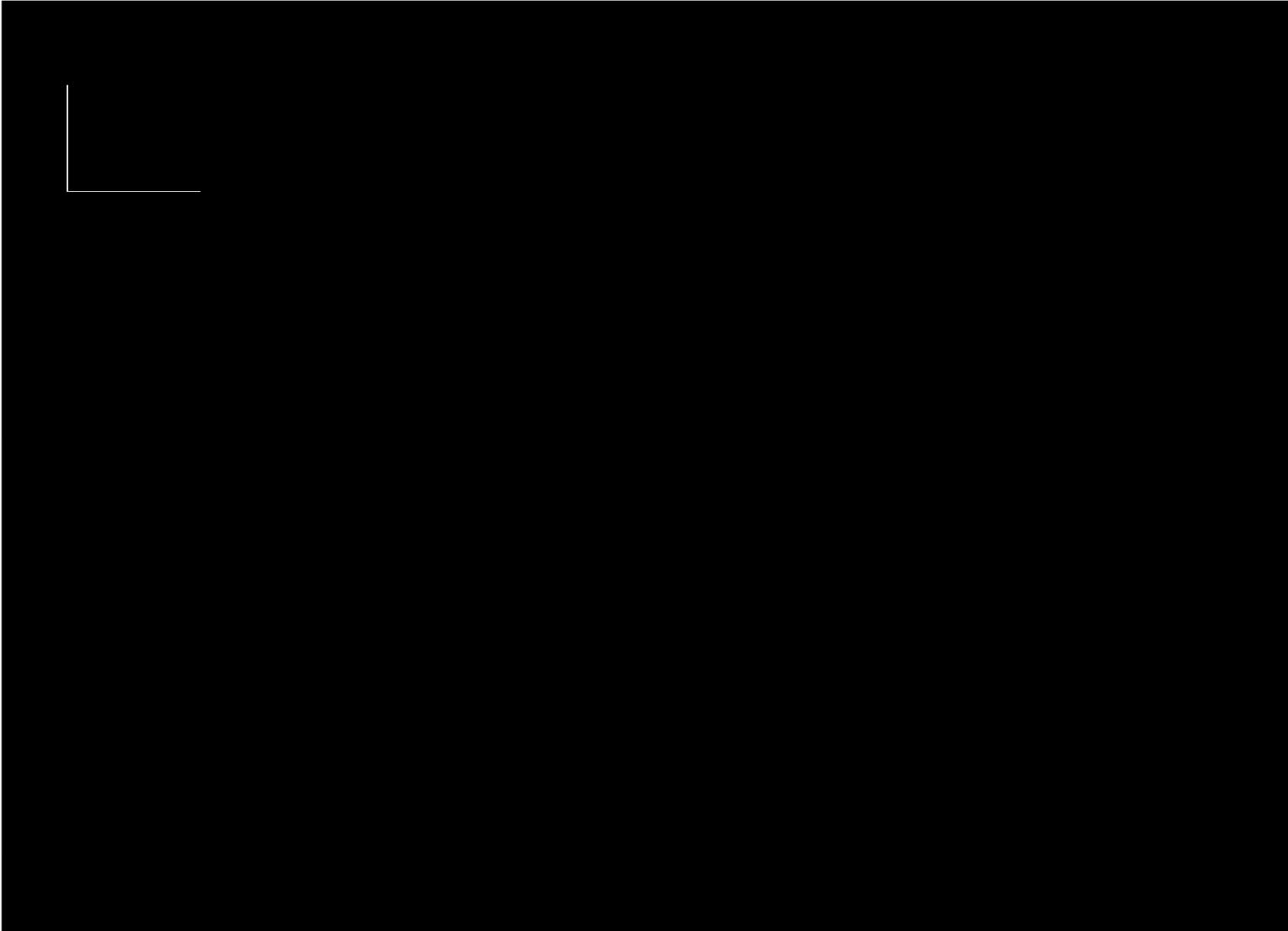


Vertiefend: *Optimierung der Blockteilung mit ETCS Level 2 im Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 7+8/2021 (<https://bit.ly/3Ai0gQR>) sowie *Streckentrennungen und die Digitale Schiene*. Elektrische Bahnen 9/2021.

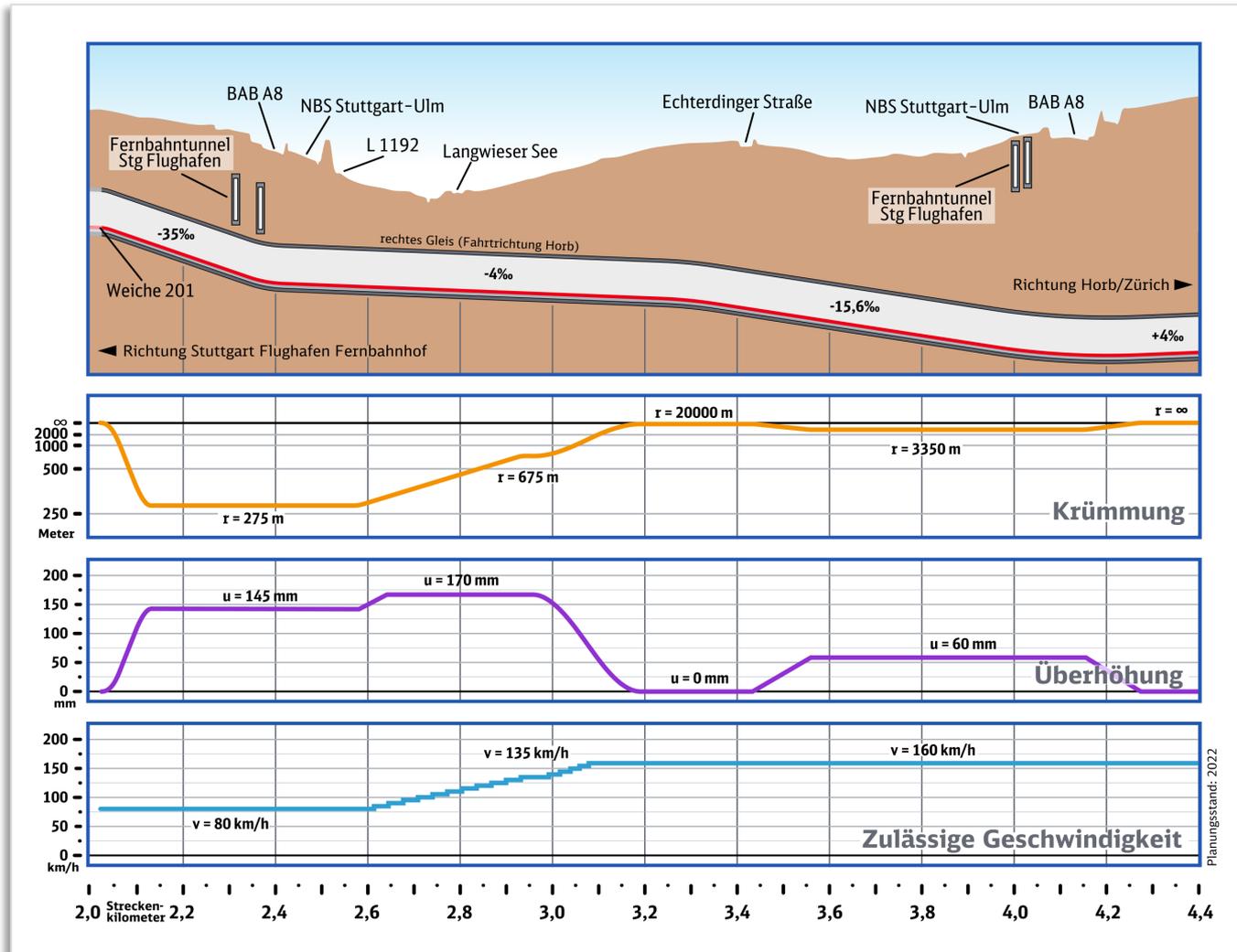
Glaubwürdigkeit, Nachprüfbarkeit & Transparenz: Warum sind z. B. Bremskurven bislang „geheim“?



Arbeitsstand



Chancen von ETCS & Co. im System Bahn, am Beispiel der Trassierung des Pfaffensteigtunnels



Vertiefend: *Der Pfaffensteigtunnel nimmt Kontur an.* Der Eisenbahningenieur 11/2022.

Im System gedacht zeigen sich viele Chancen: beispielsweise, „Balisenteppiche“ zu entschlacken

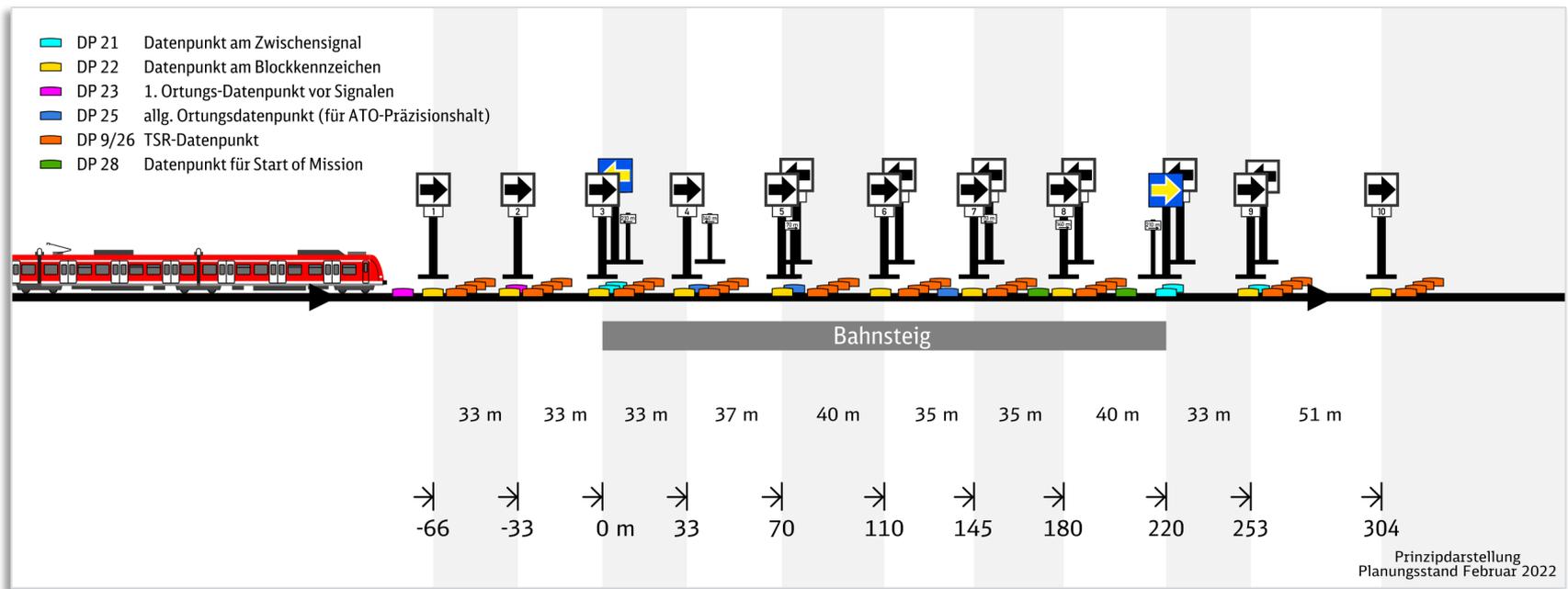


Abbildung: Veraltete Prinzipdarstellung des Anfang 2022 vorliegenden Arbeitsstandes des Balisenteppichs für eine typische Station der S-Bahn-Stammstrecke. Inzwischen sind Vereinfachungen geplant, mit denen der Hochleistungsblock überhaupt erst umsetzbar wird. Weitreichende Potenziale verbleiben darüber hinaus.

Wir müssen mehr denn je im System denken, beispielsweise Infrastruktur und Fahrzeuge.



Am Beispiel zweier realer Züge ähnlicher Länge und Fahrdynamik (Erfahrungen im DKS):

	Zug 1	Zug 2
ETCS-Ausrüstung	Ja	Ja
ATO GoA 2	Ja	Nein
optimierte Laufzeiten, FRMCS	Ja	Nein
Zugintegrität/Level 3	Ja	Nein
Fahrzeugzustandsdaten (Train Capability)	Ja	Nein
optimierte ETCS-Bremskurven	Ja	Nein
Relevante Bremsverzögerung und Bremskurve für Zugfolge (Fahrwegkapazität)	(>)1,0 m/s ² (nahe EBI)	0,5 m/s ² (Guidance Curve)

- Perspektivisch wird Zug 1 nur etwa die Hälfte der Fahrwegkapazität von Zug 2 verzehren.
- Der Aufwand der ETCS-Nachrüstung liegt bei mehreren hunderttausend Euro pro Triebzug, der Mehraufwand für sämtliche weiteren Optimierungen (z. B. ATO GoA 2, Bremskurven) dagegen bei nur ungefähr 10 %.
- Ein Retrofit mehr als doppelt so aufwendig wie eine Ausrüstung „ab Werk“.
- Um den Nutzen im System Bahn zu maximieren, braucht klare Ausrüstungsziele, Vorgaben, eine zielgerichtete Förderung und Anreize (z. B. Trassenpreis und -allokation).

Und wie viel Kapazitätssteigerung können wir nun am Ende erwarten? Eine Näherung.

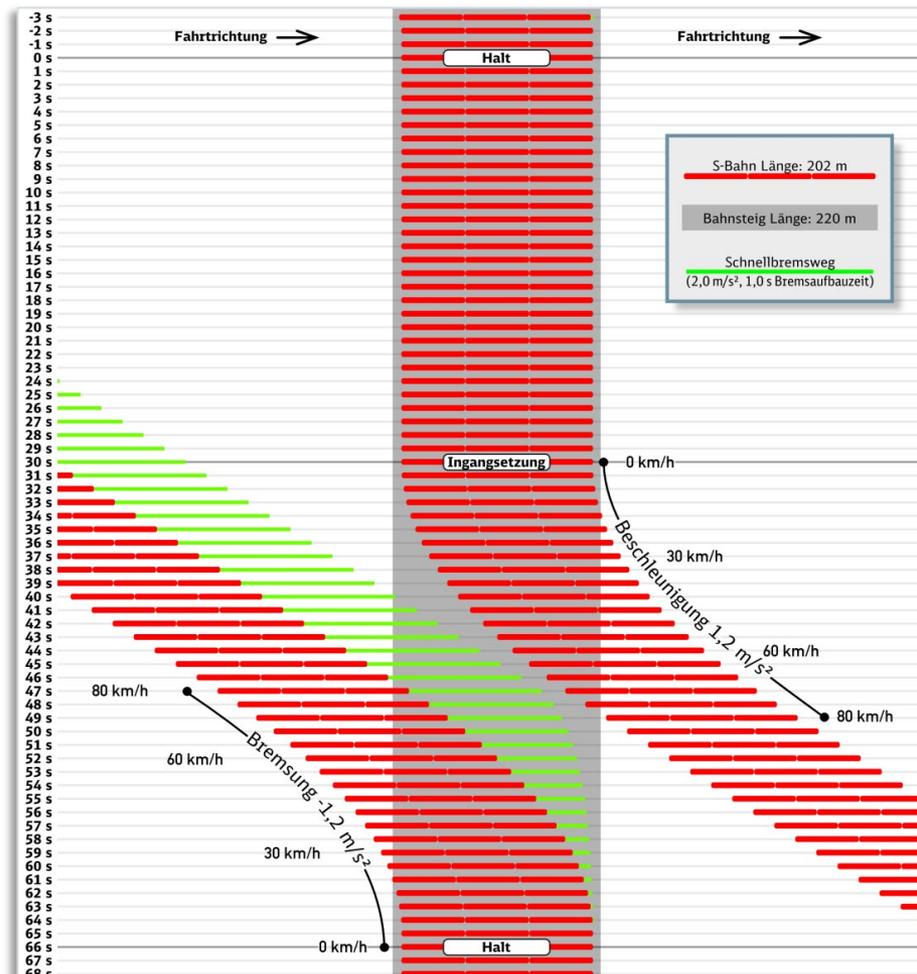


Abbildung: **Prinzipdarstellung** einer S-Bahn-Zugfolge mit fahrdynamisch optimierten (SSB-Stadtbahnen entlehnten) Neufahrzeugen mit präziser Nachführung in einem idealisierten System, ohne Berücksichtigung von technischen Laufzeiten, Längsneigungen, Blockteilung u. a.

Mit Optimierungen können Züge im Umland während eines Verkehrshaltes überholt werden.

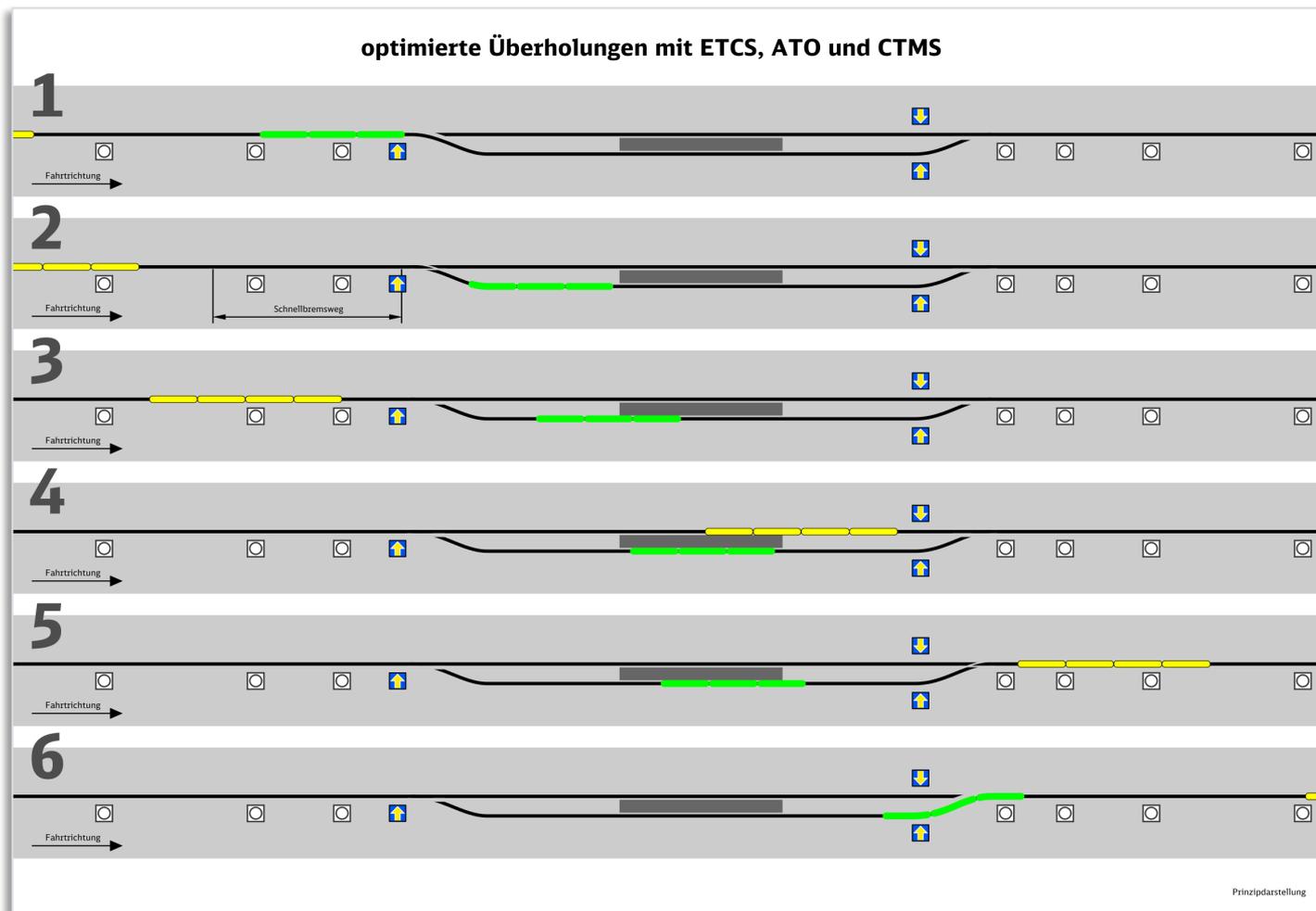
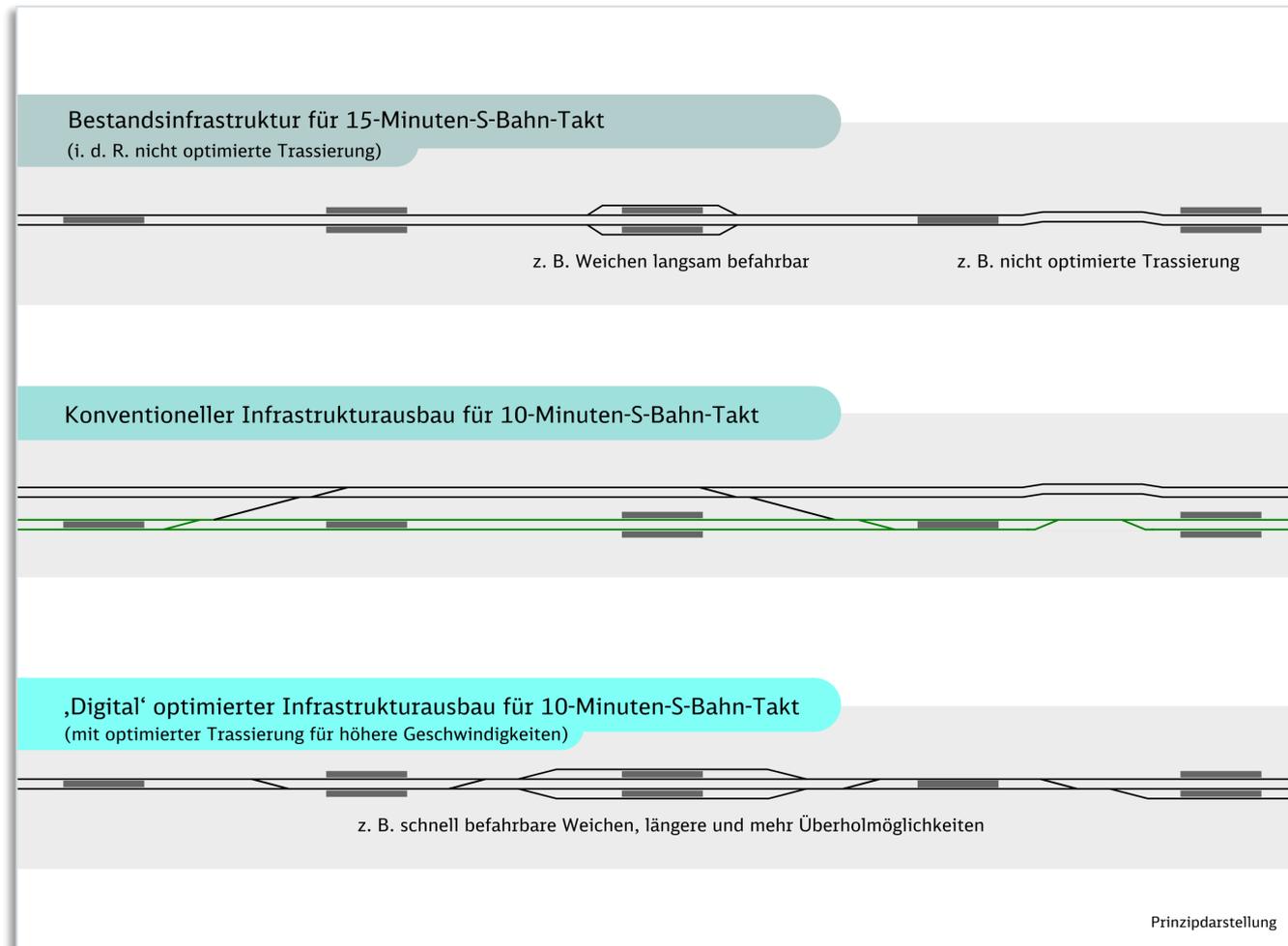


Abbildung: Überholung einer S-Bahn durch einen 130 km/h schnellen Regionalverkehrszug während eines ca. 30-sekündigen Halts. Vertiefend: *Maximierung der Fahrwegkapazität mit Digitaler Leit- und Sicherungstechnik*. Eisenbahntechnische Rundschau 7+8/2021 (<https://bit.ly/2SIQvjY>) sowie *Optimierung von Überholvorgängen mit digitaler Leit- und Sicherungstechnik*. Bachelorarbeit Mai 2022 (<https://bit.ly/3BbuPJR>).

Schlanker Infrastrukturausbau mit ETCS, ATO und CTMS für einen 10-Minuten-S-Bahn-Takt im Umland.



Vertiefend: *Maximierung der Fahrwegkapazität mit Digitaler Leit- und Sicherungstechnik*. Eisenbahntechnische Rundschau 7+8/2021 (<https://bit.ly/2SIQvjY>) sowie *Optimierung von Überholvorgängen mit digitaler Leit- und Sicherungstechnik*. Bachelorarbeit Mai 2022 (<https://bit.ly/3BbuPJR>).

Um die Digitalisierung der Eisenbahnen zum Erfolg zu führen, müssen wir sie klug gestalten.



Visualisierung des neuen Hauptbahnhofs Stuttgart (oben) und der neuen S-Bahn-Station Stuttgart Mitnachtstraße (unten): plan b, Stuttgart

- Die bloße Einführung neuer Stellwerke und ETCS führt vielfach nicht zu mehr, sondern mitunter sogar zu *weniger* Fahrwegkapazität.
- Unser Eindruck aus dem DKS: Es liegen massive Kapazitätspotenziale brach, auch in hochbelasteten Achsen (z. B. Rheintal) und Knoten (z. B. Frankfurt).
- (Viel) mehr Kapazität ist möglich. Dafür braucht es klare Anforderungen und eine umfassende Optimierung an Fahrzeugen *und* Infrastruktur, „digital“ *und* konventionell, ETCS *und* weitere Technik.
- Eine durchoptimierte „digitale“ Fahrzeug- und Infrastrukturausrüstung kostet im DKS nur etwa 10 % mehr.
- Um diesen Optimierungen den Weg zu bereiten, müssen wir die Digitalisierung klug gestalten.



Fragen?

Vertiefend:

www.digitaler-knoten-stuttgart.de