Kofinanziert durch die Europäische Union

ETCS & Co. für „maximale Leistungsfähigkeit“

Eindrücke aus dem Digitalen Knoten Stuttgart

DB Netz | Gesamtprogrammleitung Knoten Stuttgart | Stuttgart | 27.09.2023

Alle Abbildungen, soweit nicht anders angegeben: Deutsche Bahn

Die landläufigen Erwartungen an ETCS (& Co.) 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-

gesteigert. Das erwarten wir auch von der flächendeckenden Einführung digitaler Stellwerke und von ETCS, dem neuen europäischen Standard bei der Leit- und Sicherungstechnik. Durch diese digitale Unterstützung könnten wir eine zusätzliche Kapazität von bis zu 20 % im Personen- und Güterverkehr erreichen.

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

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

Flow erzielen können. So könnte RBD die Zahl der täglich fahrenden Züge in einem Netz, sei es Vollbahn oder S-Bahn, um bis zu 10 % erhöhen. Im Zusammenspiel mit ETCS und Technik für den automatisierten Zugbetrieb könnten Kapazitätserhöhungen um bis zu 40 % möglich sein. Zugleich hilft es, die

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.«

Ausrisse (von links oben nach rechts unten): Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 9/2018, Der Eisenbahningenieur (EI) 5/2022, ETR 7/2021 (2x), Privatbahn Magazin 2/2019, Zevrail 1/2019, Eisenbahn-Revue International (ERI) 11/2019, ERI 7/2019, International Railway Journal 1/2021, Modern Railways 4/2018, ETR 3/2023, 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

Zufahrt Luzern: Zusätzliche Blockstellen statt ETCS Level 2

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

Zürich – München: Umsteigen wegen ETCS

Ausrisse: „Eisenbahn-Revue International“

Der Zündfunke für den Digitalen Knoten Stuttgart (DKS): Die S-Bahn-Stammstrecke als Herzstück der S-Bahn Stuttgart.

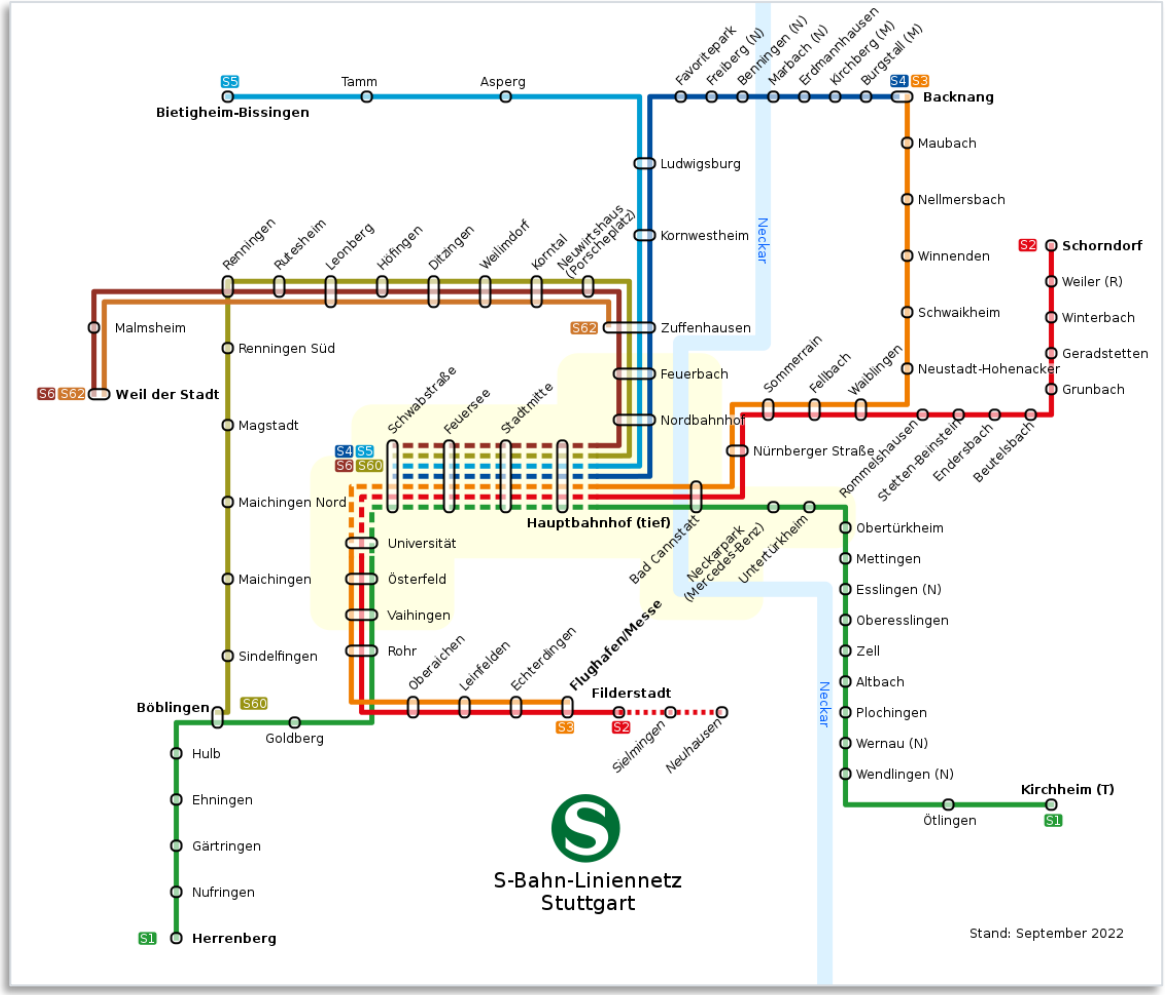
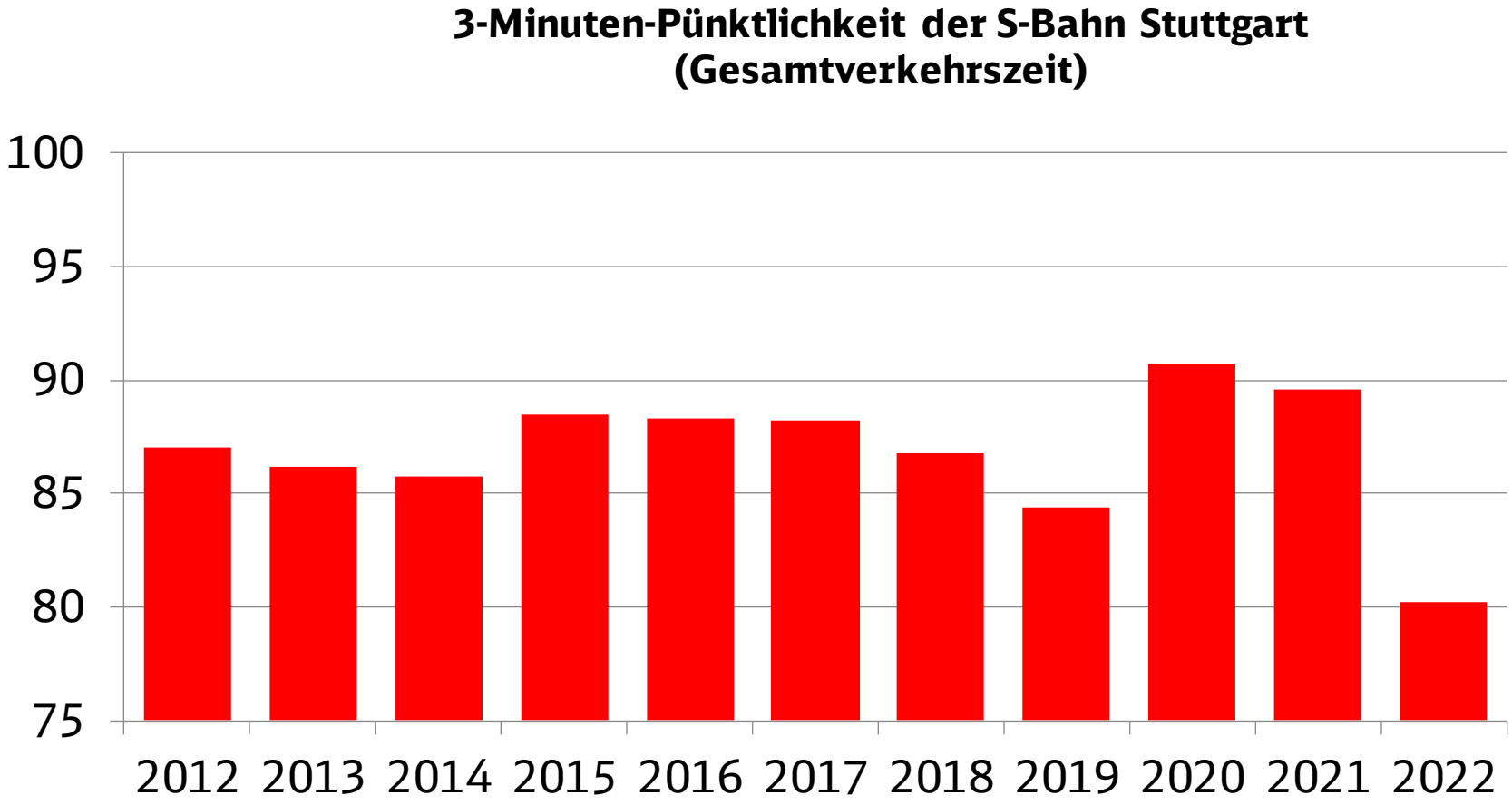


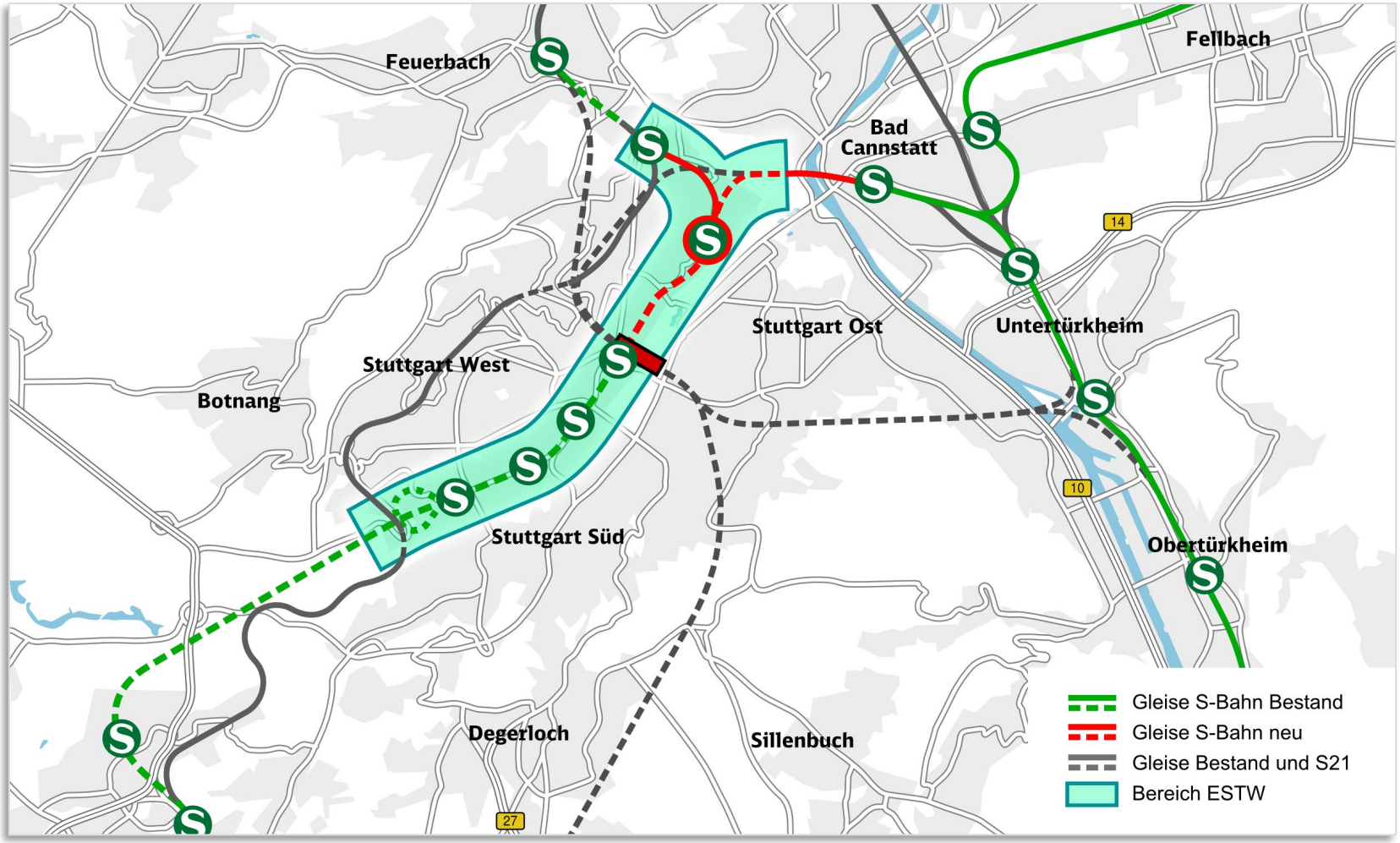
Abbildung: Wikimedia Commons, Urheber „Bigbossfarin“, CC-BY-SA-30-Lizenz

- Der Großteil des 215 km langen Streckennetzes der S-Bahn Stuttgart wird im Mischverkehr befahren.
- Die Stammstrecke ist das Herzstück des S-Bahn-Systems und wird ausschließlich von den 6 wesentlichen Linien der S-Bahn befahren.
- Zur Hauptverkehrszeit wird auf allen 6 Linien ein 15-Minuten-Takt angeboten, entsprechend einem 2,5-Minuten-Streckentakt über die Stammstrecke.
- Die Hauptverkehrszeit wurde inzwischen auf 14 Stunden des Tages ausgedehnt.
- Über die Stammstrecke fahren inzwischen 940 Züge pro Tag. Vor der Corona-Pandemie (2019) wurden 41 Millionen Fahrgäste befördert.
- Die Planhaltezeit auf den Stationen der Stammstrecke beträgt 30 Sekunden. Angesichts der wachsenden Nachfrage und inzwischen bis zu 18 Sekunden technischer Haltezeit (insbesondere Türöffnung- und -schließung) werden beispielsweise zur Rush Hour am Hauptbahnhof im Mittel um die 50 Sekunden gemessen.

Immer mehr Angebot und Nachfrage, alternde Anlagen und intensive Bautätigkeit führen zu einer rückläufigen Pünktlichkeit.

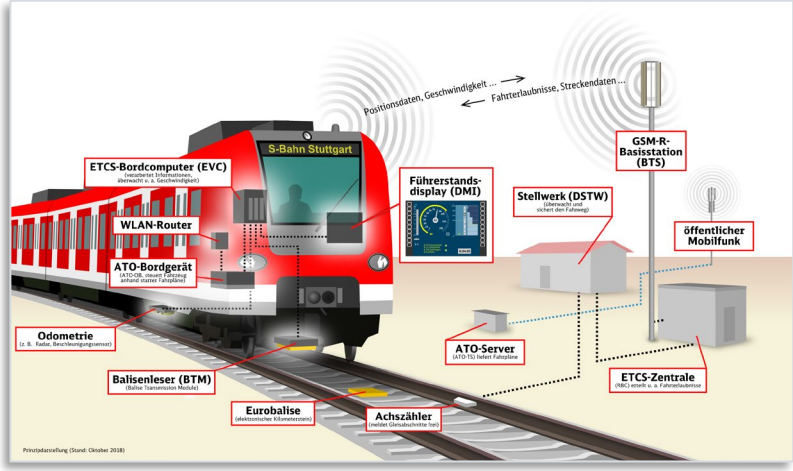


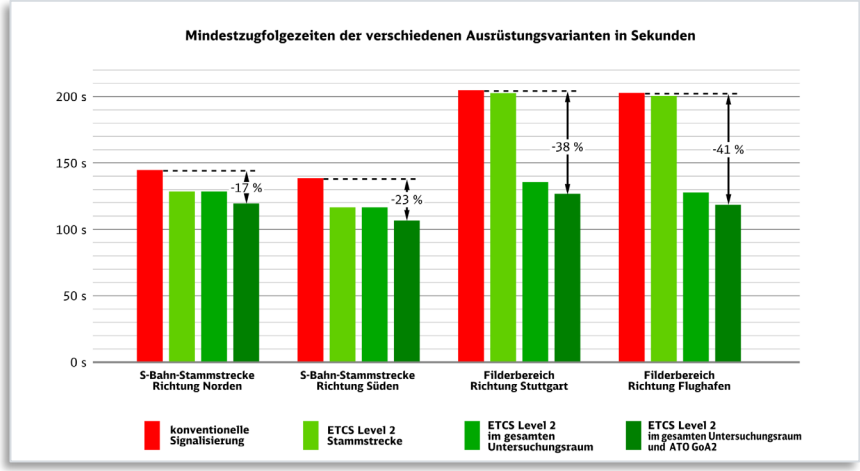
Die Leit- und Sicherungstechnik der S-Bahn-Stammstrecke war im Rahmen von Stuttgart 21 ohnehin grundlegend zu erneuern.

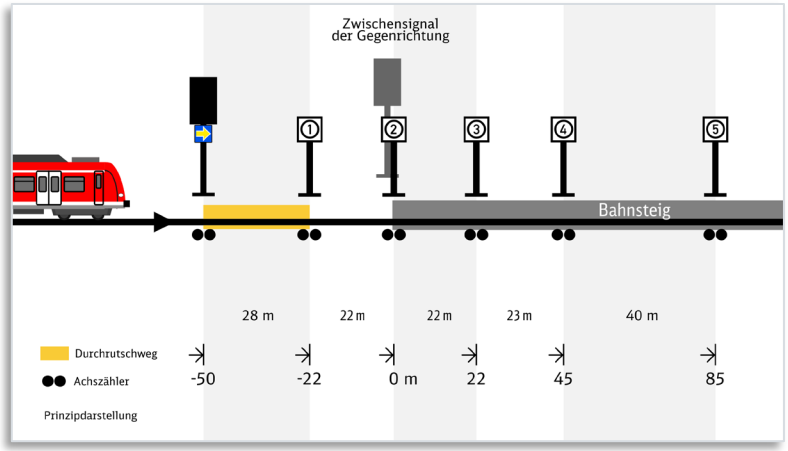


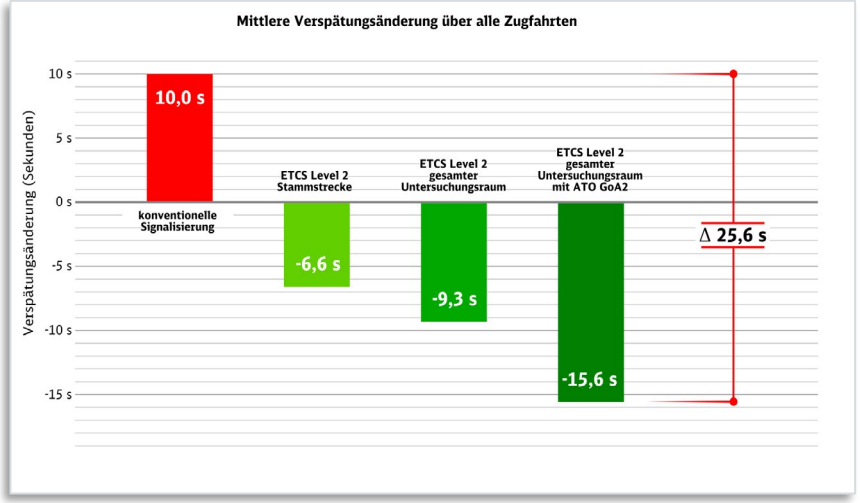
Vertiefend: Abschlussbericht der S-Bahn-ETCS-Untersuchung vom 31. Januar 2019 (https://bit.ly/2Yyaw6h).

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



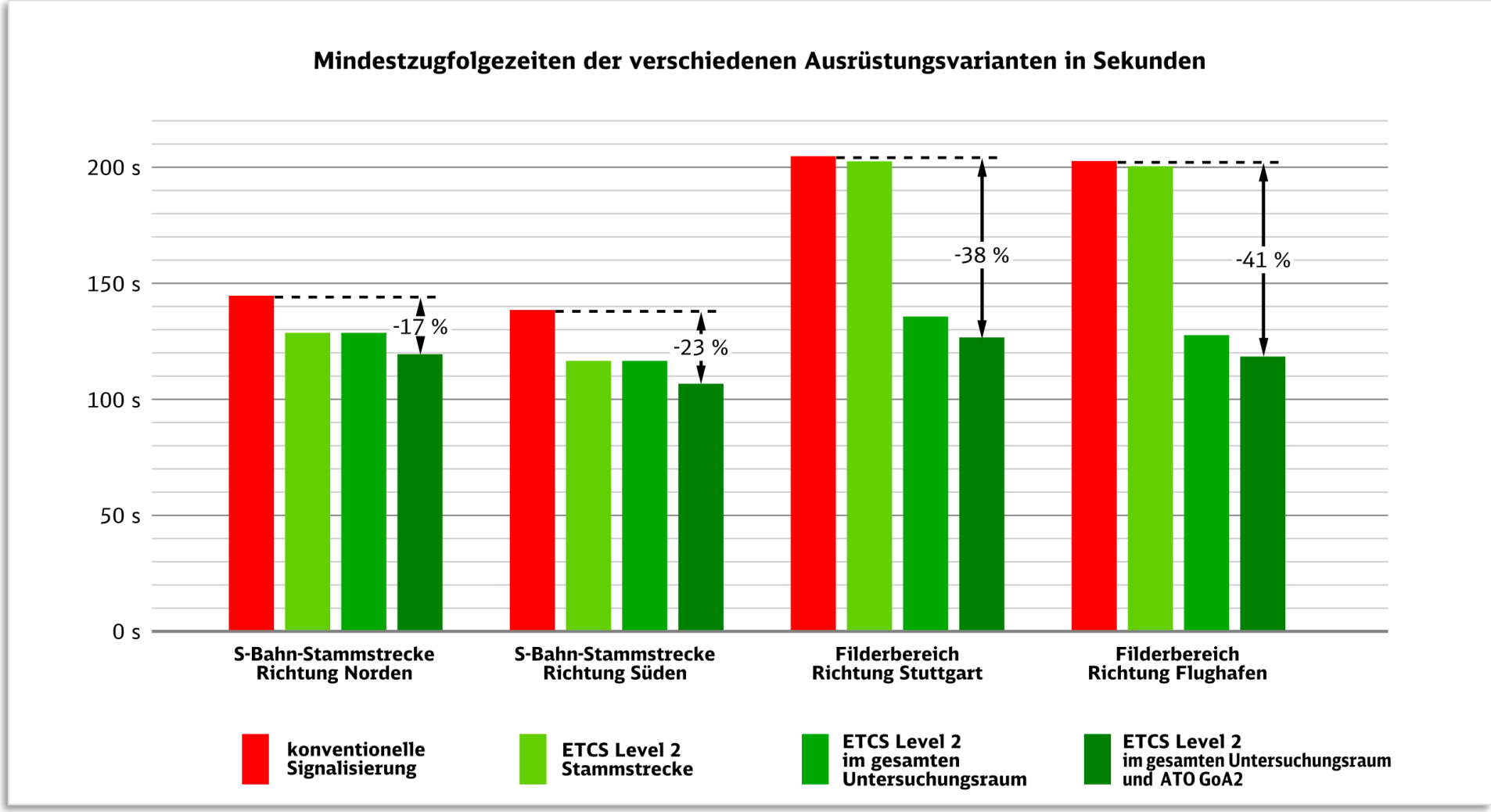






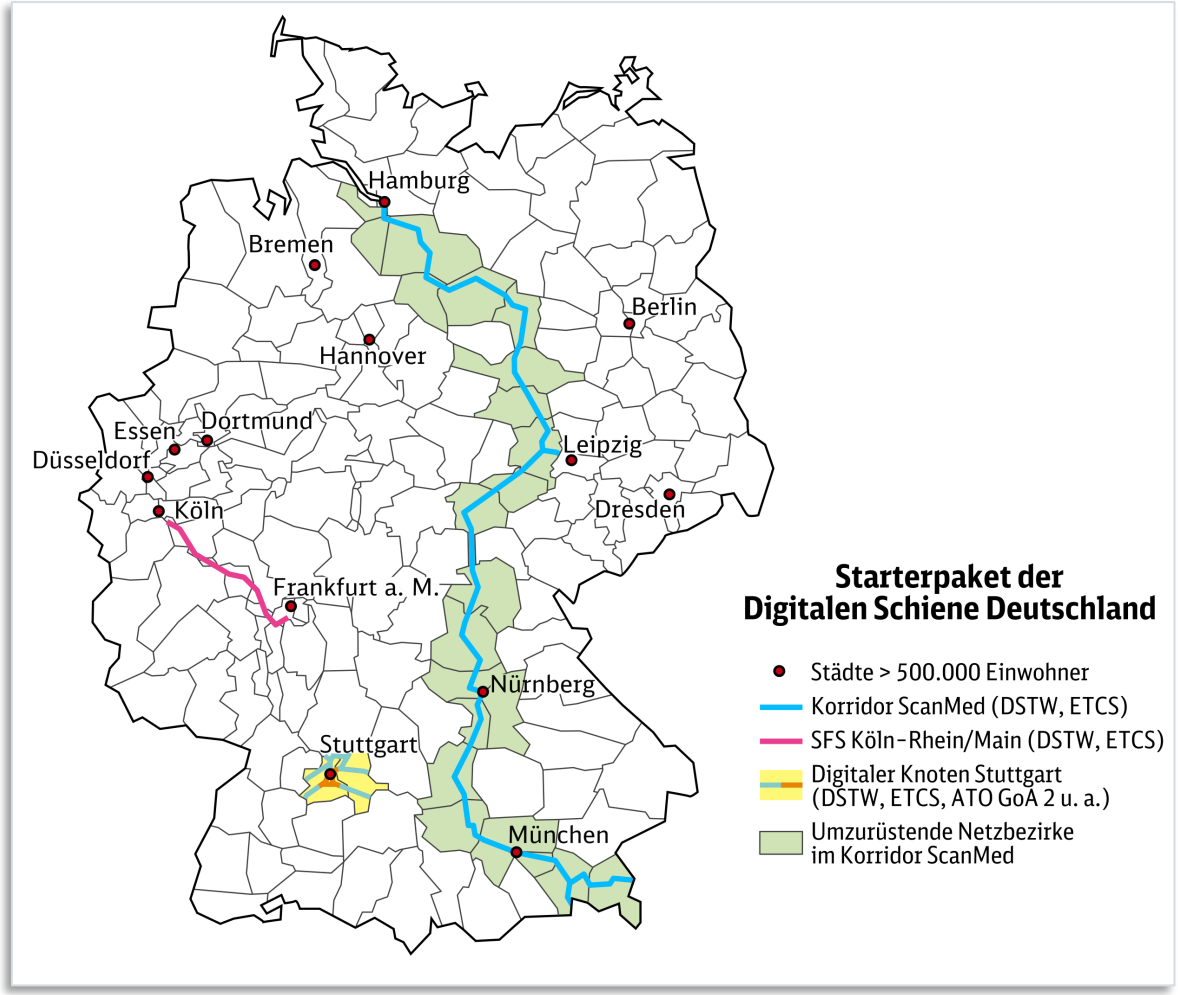
Linke Abbildung: Deckblatt des Abschlussberichts der S-Bahn-ETCS-Untersuchung vom 31. Januar 2019 (https://bit.ly/2Yyaw6h).
Ergänzend: *ETCS als Trägersystem zur Leistungssteigerung bei der S-Bahn Stuttgart.* Signal+Draht 6/2019 (https://bit.ly/2MJ4zAY).

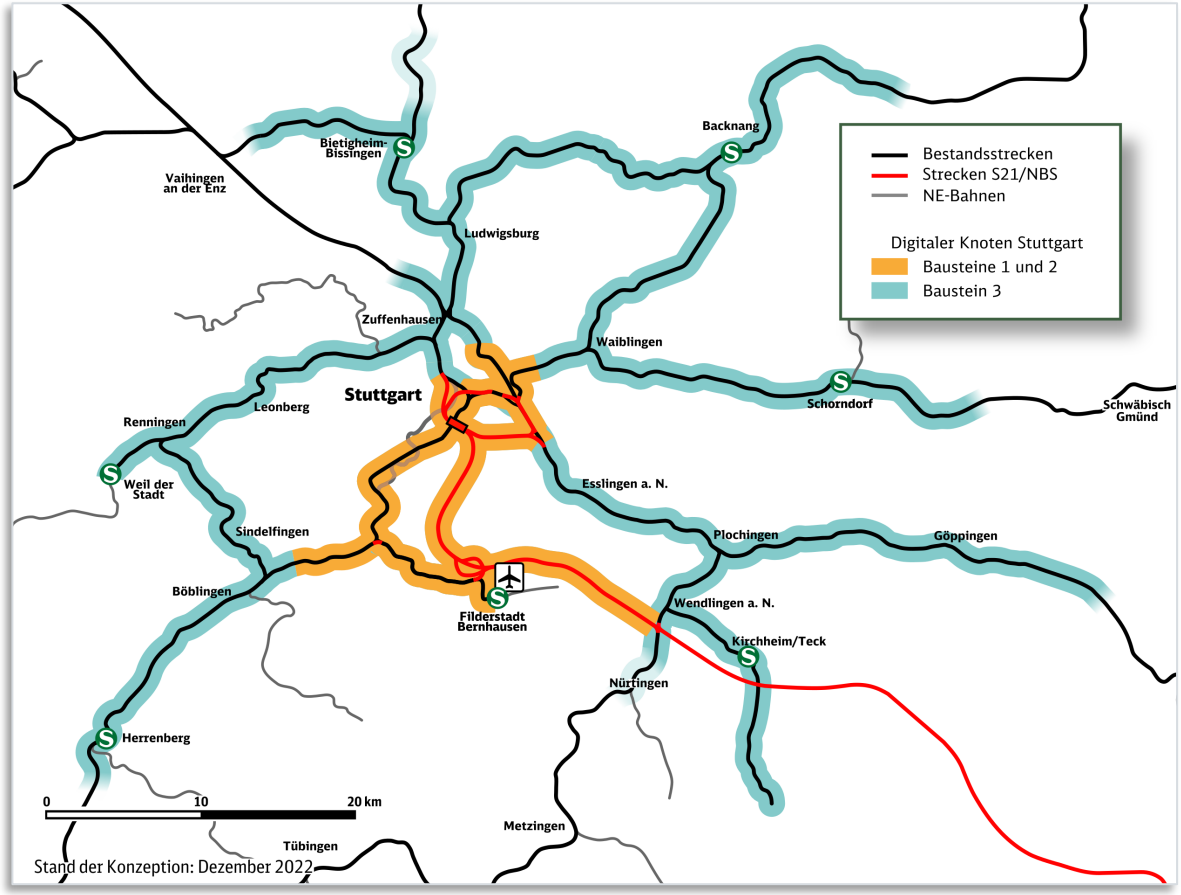
Die ETCS-Untersuchung von 2018 wies – unter konservativen Prämissen – für die Stammstrecke rund 20 % kürzere Mindestzugfolgezeiten aus.



Vertiefend: Abschlussbericht der S-Bahn-ETCS-Untersuchung vom 31. Januar 2019 (https://bit.ly/2Yyaw6h).

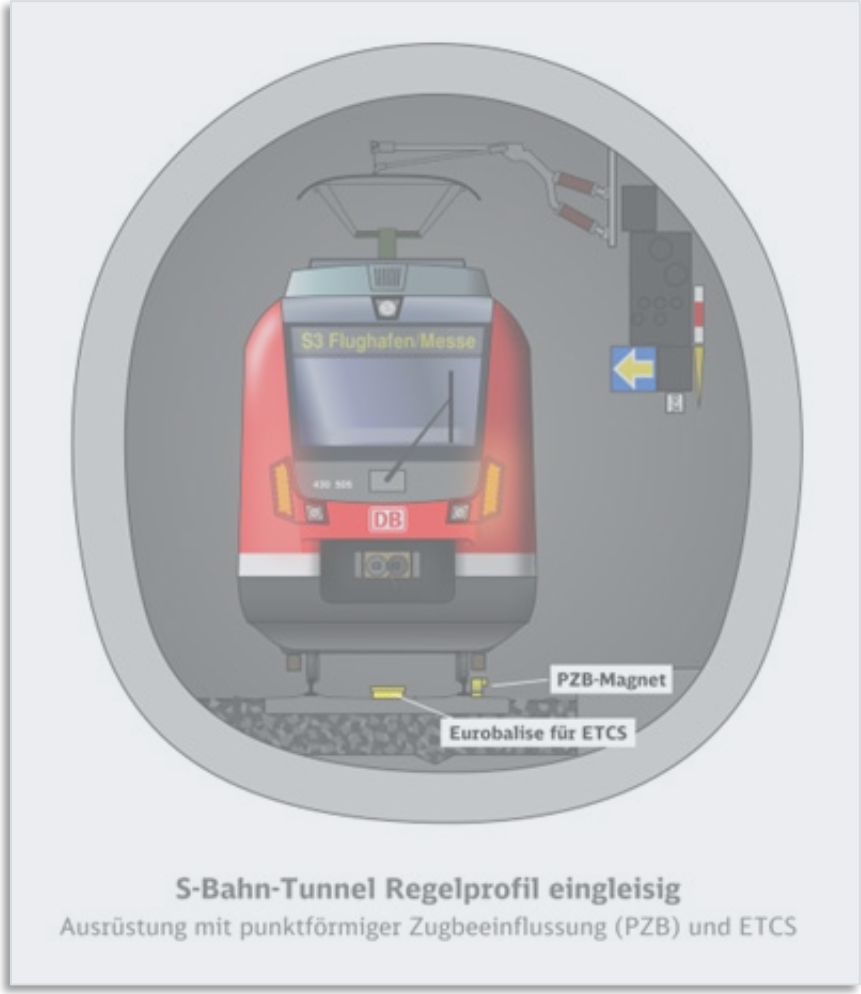
Der Digitale Knoten Stuttgart (DKS) ist ein Pilotprojekt im Starterpaket der Digitalen Schiene Deutschland (DSD) und geht weit über S21 hinaus.





Vertiefend: *Der Digitale Knoten Stuttgart wird Realität*. Der Eisenbahningenieur 1/2023 (https://bit.ly/3hiu0ZL).

Wir haben uns im DKS ganz bewusst entschieden, auf eine Doppel-ausrüstung zu verzichten – mit allen daraus folgenden Themen.



links: reine ETCS-Ausrüstung (Eurobalise und „Blechtafel“)
rechts: zusätzliche Ausrüstung mit konventionellen Lichtsignalen und zugehöriger Punktförmiger Zugbeeinflussung (PZB)
Vertiefend: *ETCS Level 2 ohne „Signale“ in einem großen Knoten.* Deine Bahn 3/2022 (https://bit.ly/3S4NBdj).

Ein Großprojekt im Großprojekt: Nachrüstung von 333 Triebzügen mit ETCS & Co. bis 2025

	Typ	Hersteller	Anzahl	Baujahre	Konfiguration	Eigentümer	Betreiber	Ausstattung
	BR 423 S-Bahn	ALSTOM	60	1999 - 2005	4-teilig	DB Regio	DB Regio	PZB
	BR 430 S-Bahn	ALSTOM	97 58 (2. Serie)	2011 - 2022	4-teilig	DB Regio	DB Regio	PZB
	Flirt 3 Regionalverkehr	STADLER	13 9 19 14 11	seit 2018 seit 2018 seit 2018 seit 2018 seit 2019	3-teilig 4-teilig 5-teilig 6-teilig "XL", 3-teilig	SFBW	Go-Ahead	PZB PZB, LZB PZB PZB, LZB PZB
	Talent 3 Regionalverkehr	ALSTOM	26 26	seit 2019 seit 2017 (Vorserie)	3-teilig 5-teilig	SFBW	SWEG	PZB PZB

Das Land Baden-Württemberg beschafft darüber hinaus 130 Doppelstock-Regionalzüge bei Alstom und 28 Ersatzfahrzeuge bei Siemens. DB Netz lässt Instandhaltungsfahrzeuge nachrüsten. Der Fernverkehr ist bereits weitgehend mit ETCS ausgerüstet.

Vertiefend: *Fahrzeugnachrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 9/2021 (https://bit.ly/3tFQWUB), *Innovationskooperation Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 9/2022 (https://bit.ly/3dxD0Z6), *Digitaler Knoten Stuttgart: Die Prototyp-Umrüstung von Fahrzeugen ist in vollem Gang*. Plakat April 2023 (https://bit.ly/40bvbug) sowie *Nachrüstung von Nebenfahrzeugen für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 6/2023 (https://bit.ly/3qURLLK) sowie *Siemens Mobility liefert 28 Mireo-Regionalzüge für Baden-Württemberg*. Presseinformation vom 10. August 2023 (https://bit.ly/3LjBHe2).

Ab 2028 soll eine grundlegend neu gefasste Fahrdienstvorschrift für den digitalen Bahnbetrieb 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 sowie *Der Digitale Knoten Stuttgart wird Realität*. Der Eisenbahningenieur 1/2023 (https://bit.ly/3hiu0ZL).

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

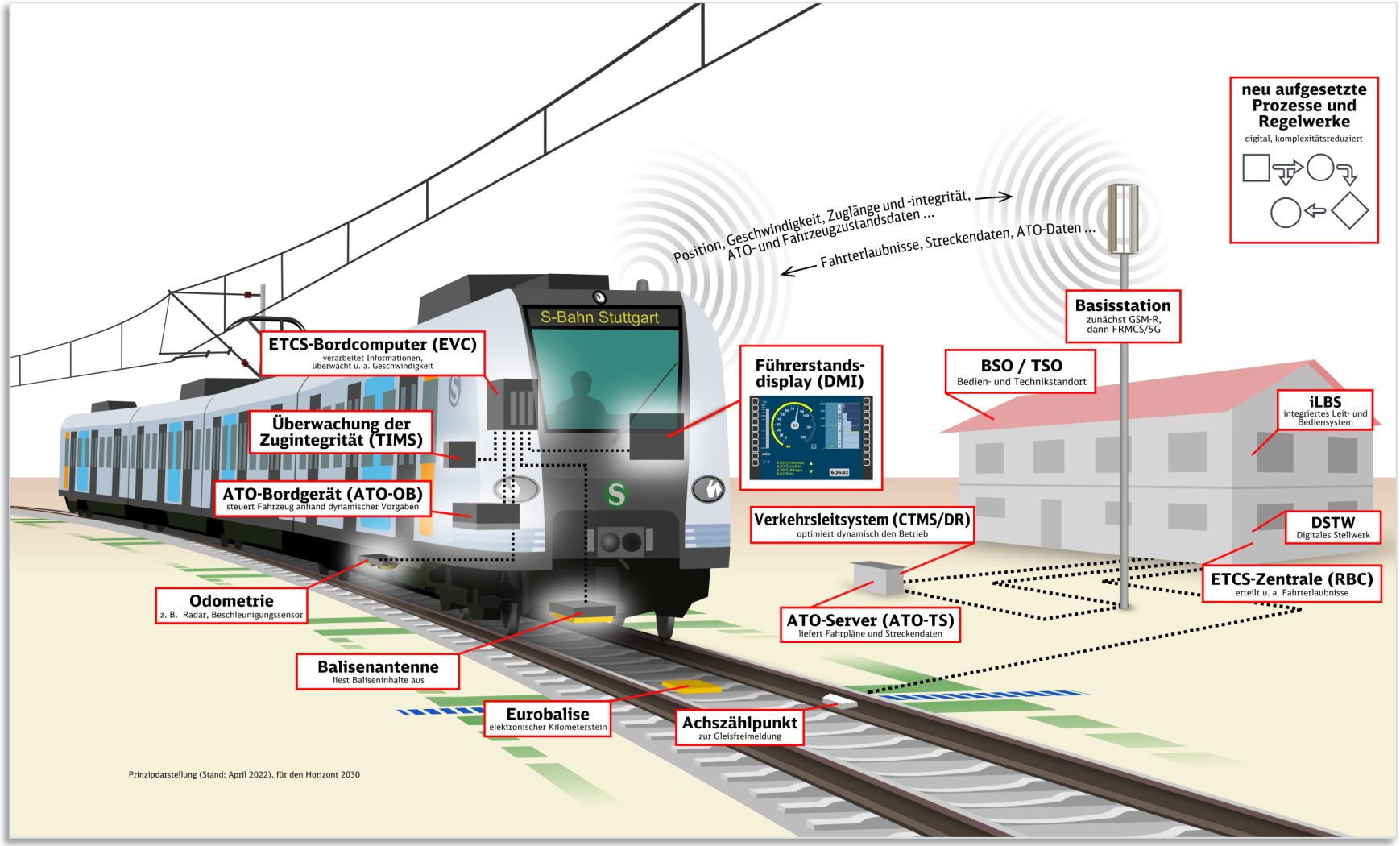
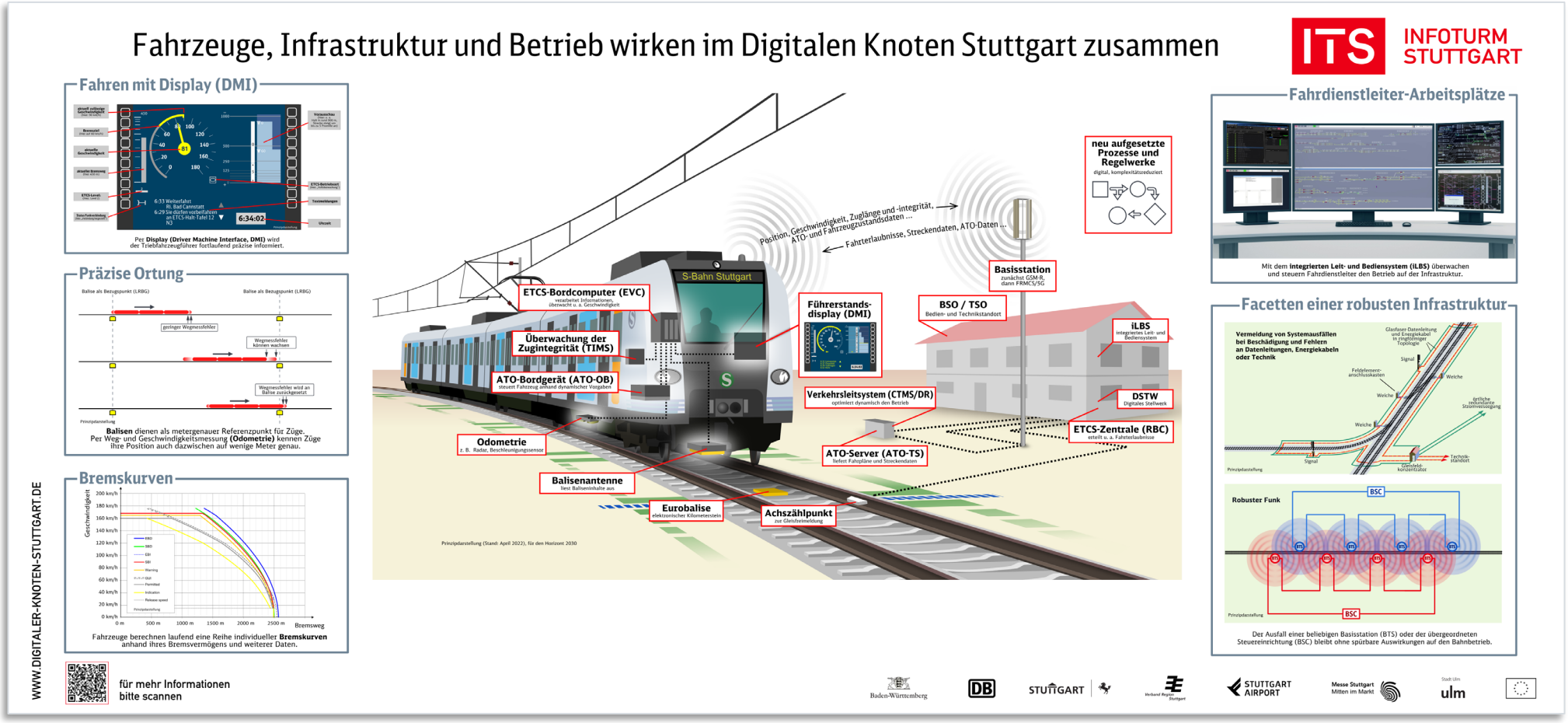


Abbildung: vereinfachte Architektur im Endzustand des DKS (mit Baustein 3, Horizont 2030)
Vertiefend: *Fahrzeugnachrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 9/2021 (https://bit.ly/3tFQWUB).

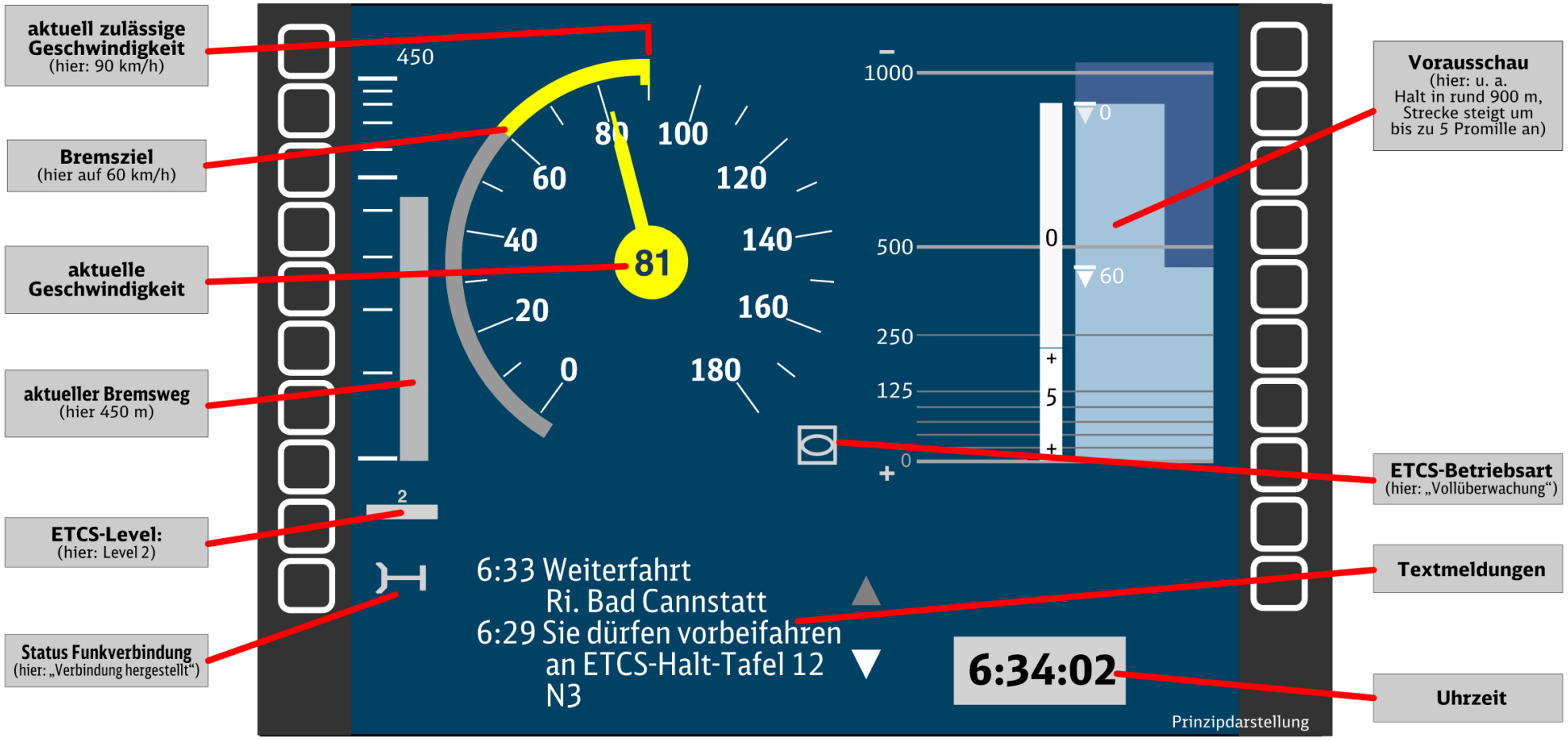
Der Digitale Knoten Stuttgart ist Fahrzeug- und Infrastruktur-Großprojekt mit einer Menge Technik für viele hundert Millionen Euro…



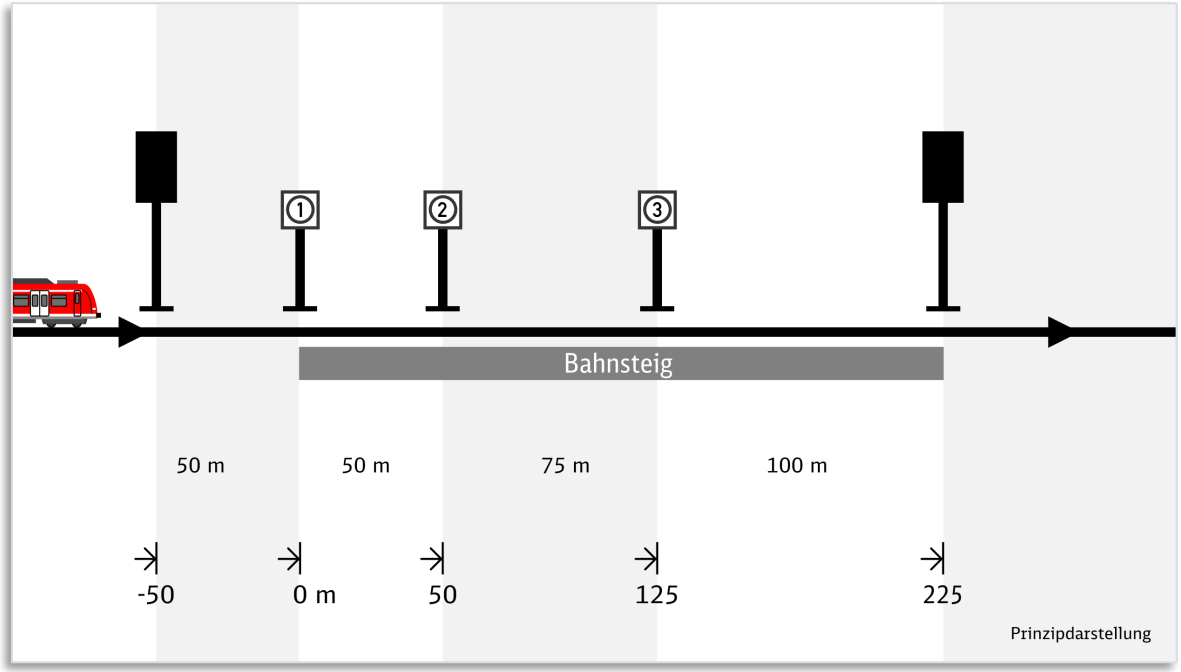
… und was bringt das alles?

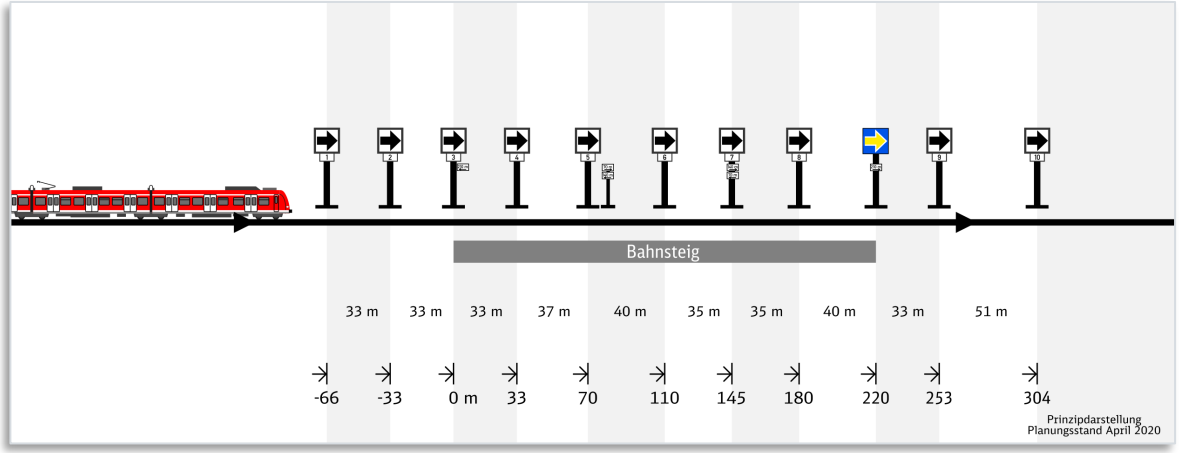
Abbildung: DKS-Übersichtsplakat, das auf den „Tagen der offenen Baustelle“ am Hauptbahnhof in Stuttgart im April 2023 gezeigt wurde.
(vertiefend: https://bsu.link/tdob-infotafeln)

Führerraumsignalisierung mit Display ersetzt die Beobachtung von Lichtsignalen entlang der Strecke.



Das typische Verständnis von „digitalen“ Kapazitätserhöhungen beschränkt sich oft auf die Blockteilung in der Infrastruktur.





Linke Abbildung: Typische Blockteilung im Bereich der S-Bahn-Stammstrecke München, mit Hochleistungsblock unter Linienförmiger Zugbeeinflussung (LZB).
Rechte 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).

Um in S-Bahn-Hochleistungsbereichen kürzestmögliche Zugfolgen zu erreichen, können für ETCS bis zu 30 m kurze Blocke geplant werden.

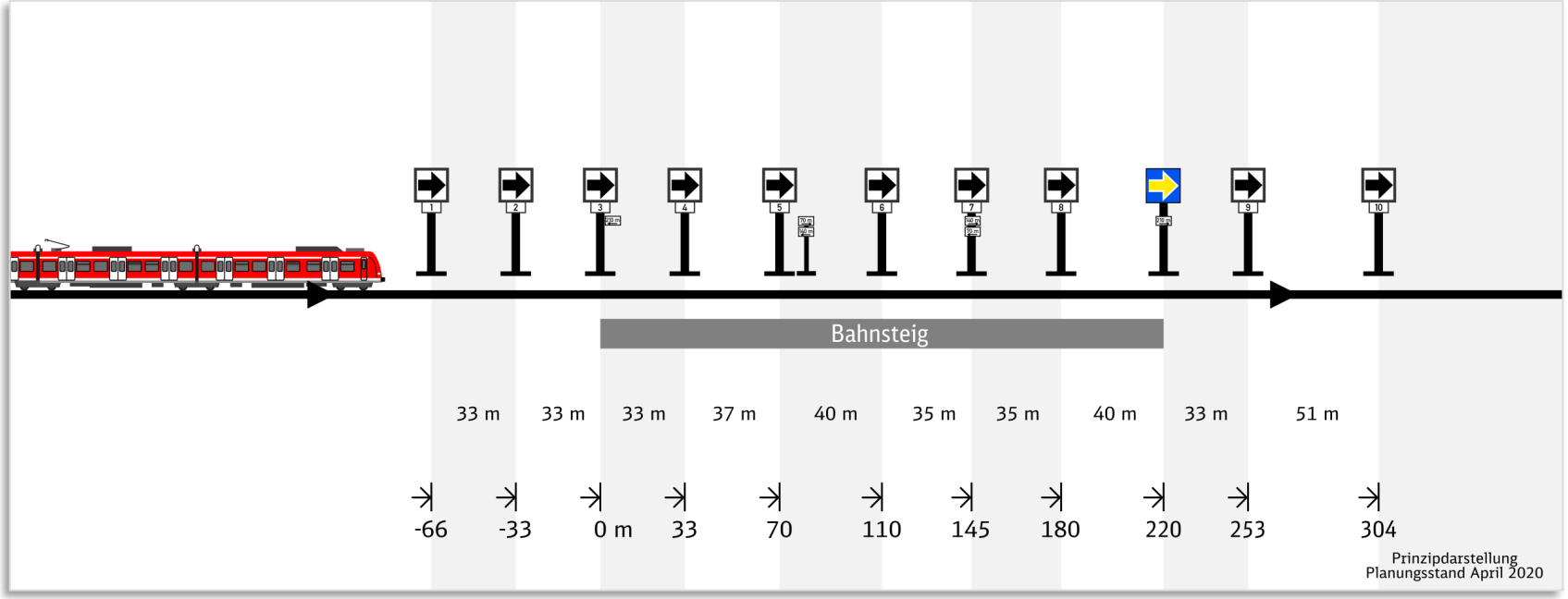
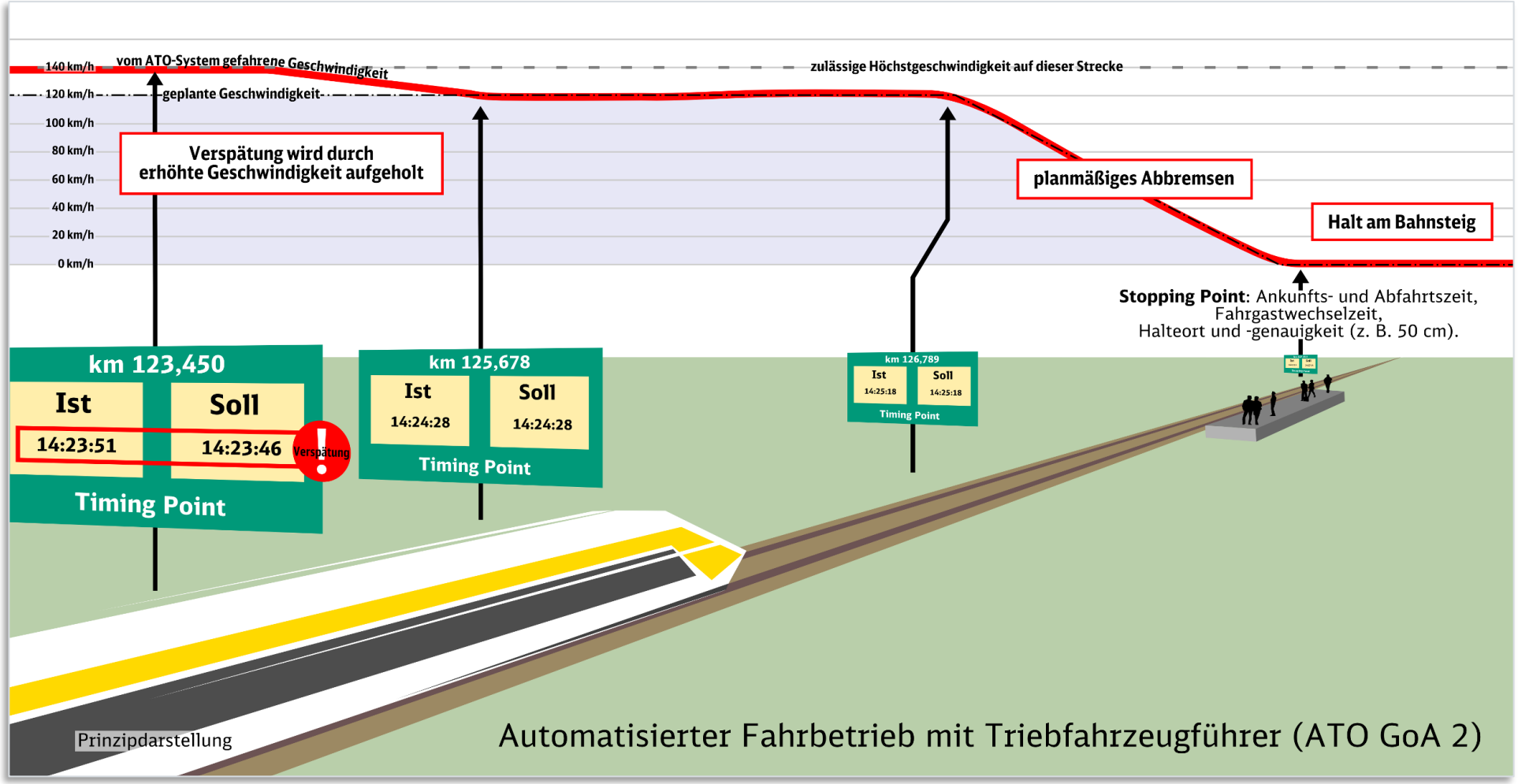


Abbildung: Prinzipdarstellung des Hochleistungsblock im Bereich der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart für eine fiktive, brettebene Station.
Vertiefend: *Optimierung der Blockteilung mit ETCS Level 2 im Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 7+8/2021 (https://bit.ly/3Ai0gQR).

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

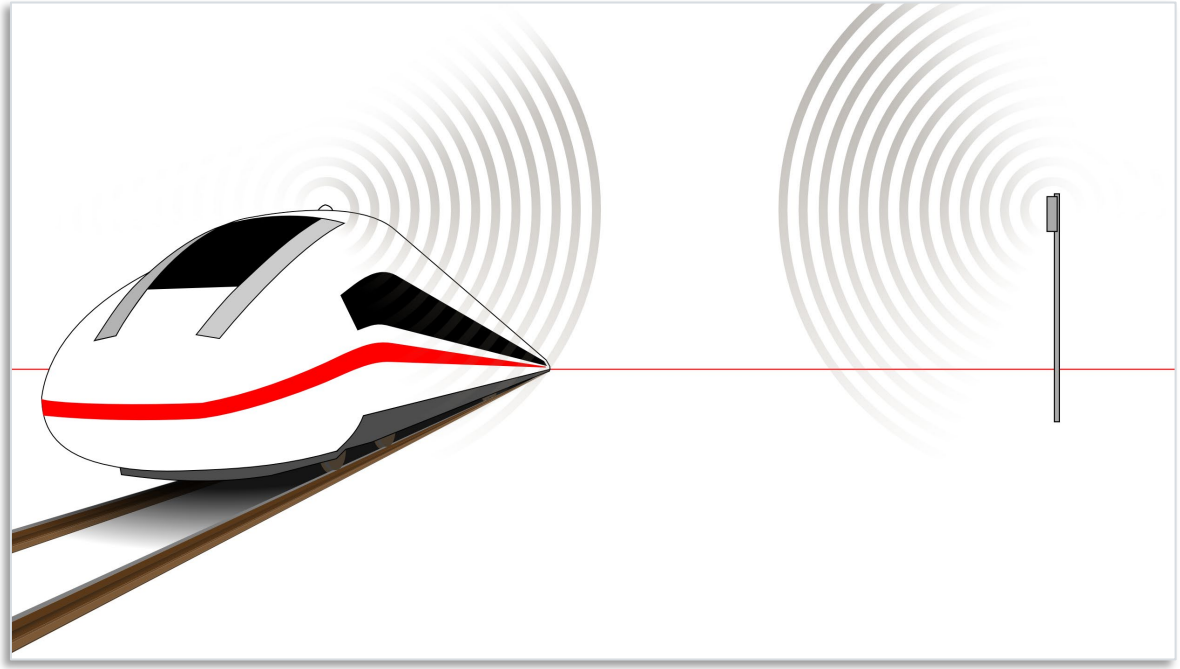
… dabei liegt der Großteil des „digitalen“ Kapazitätspotenzials <u>nicht</u> in der Blockteilung!

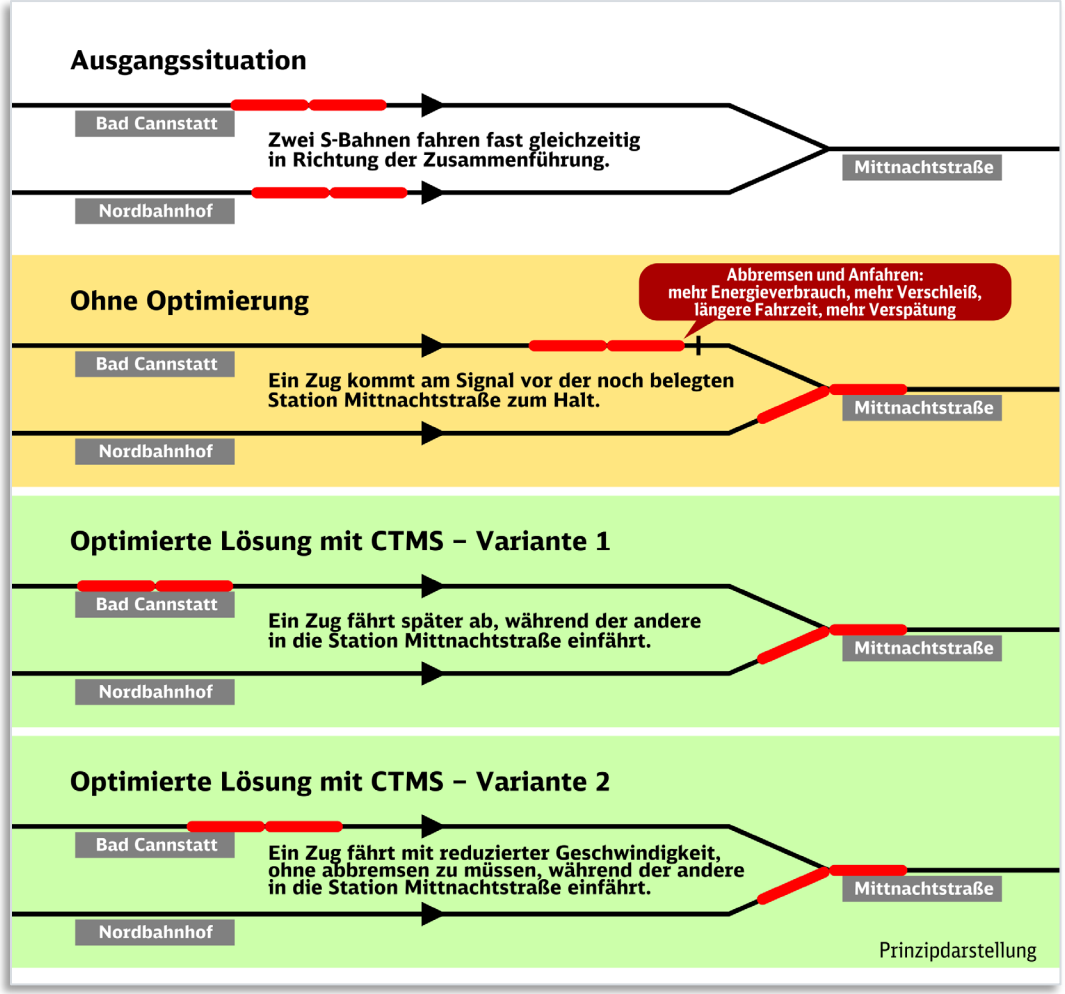
Es geht nicht nur um ETCS, sondern um weitere Techniken wie hochautomatisiertes Fahren mit Triebfahrzeugführer (ATO GoA 2).



Vertiefend: *Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart.* ZEVrail 5/2022 (https://bit.ly/3DHZI0S).

Zahlreiche Daten ebnen den Weg für viele Optimierungen, beispielsweise mit dem Verkehrsmanagementsystem CTMS.



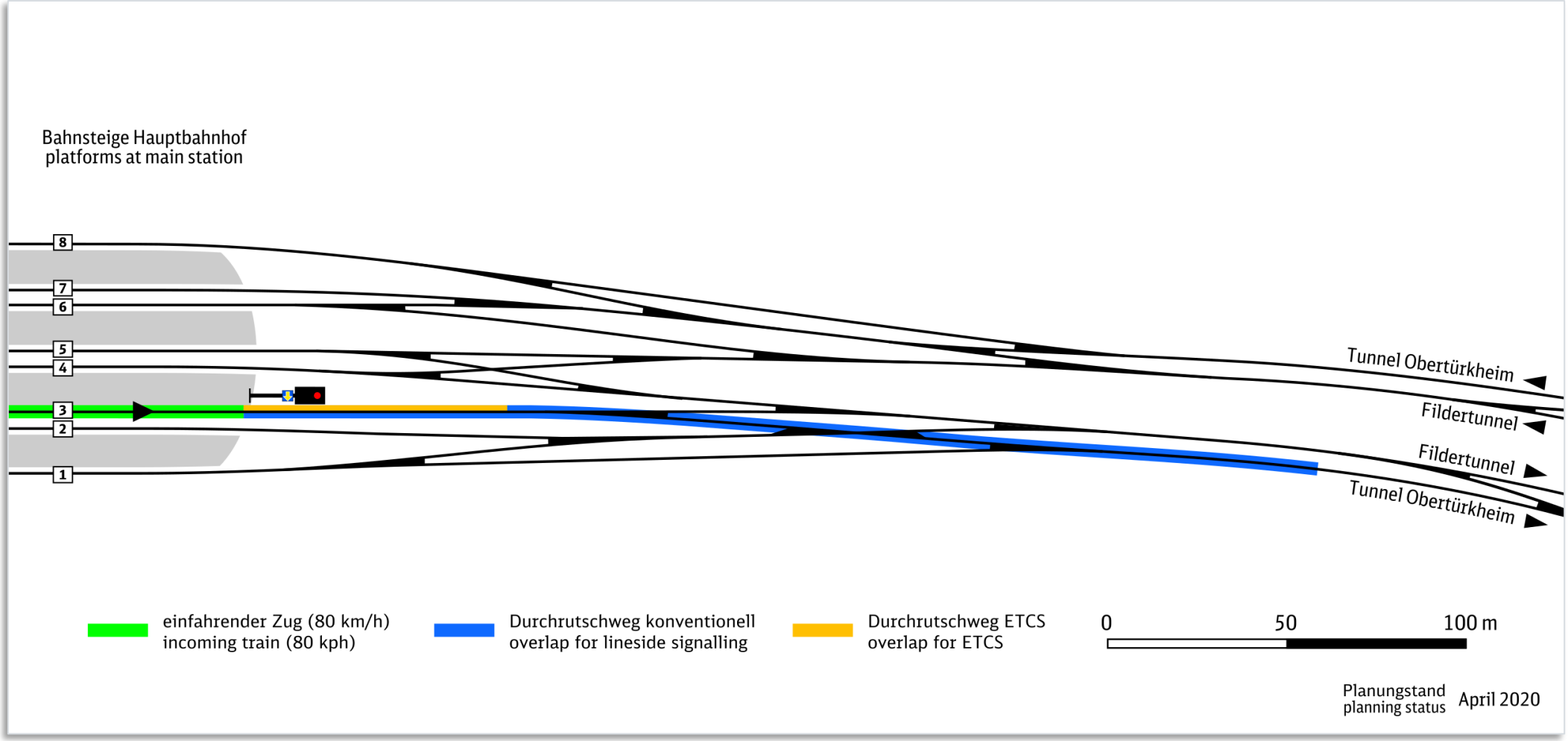


Einige Beispiele für durch den Zug übermittelte Daten:

- Position und Geschwindigkeit (ETCS)
- präzise prognostizierte Durchfahrzeiten (ATO)
- Status von Traktion, Bremse und Stromabnehmer (Fahrzeugzustandsdaten – Train Capability Report)
- diverse Diagnosedaten (z. B. Funkpegel)

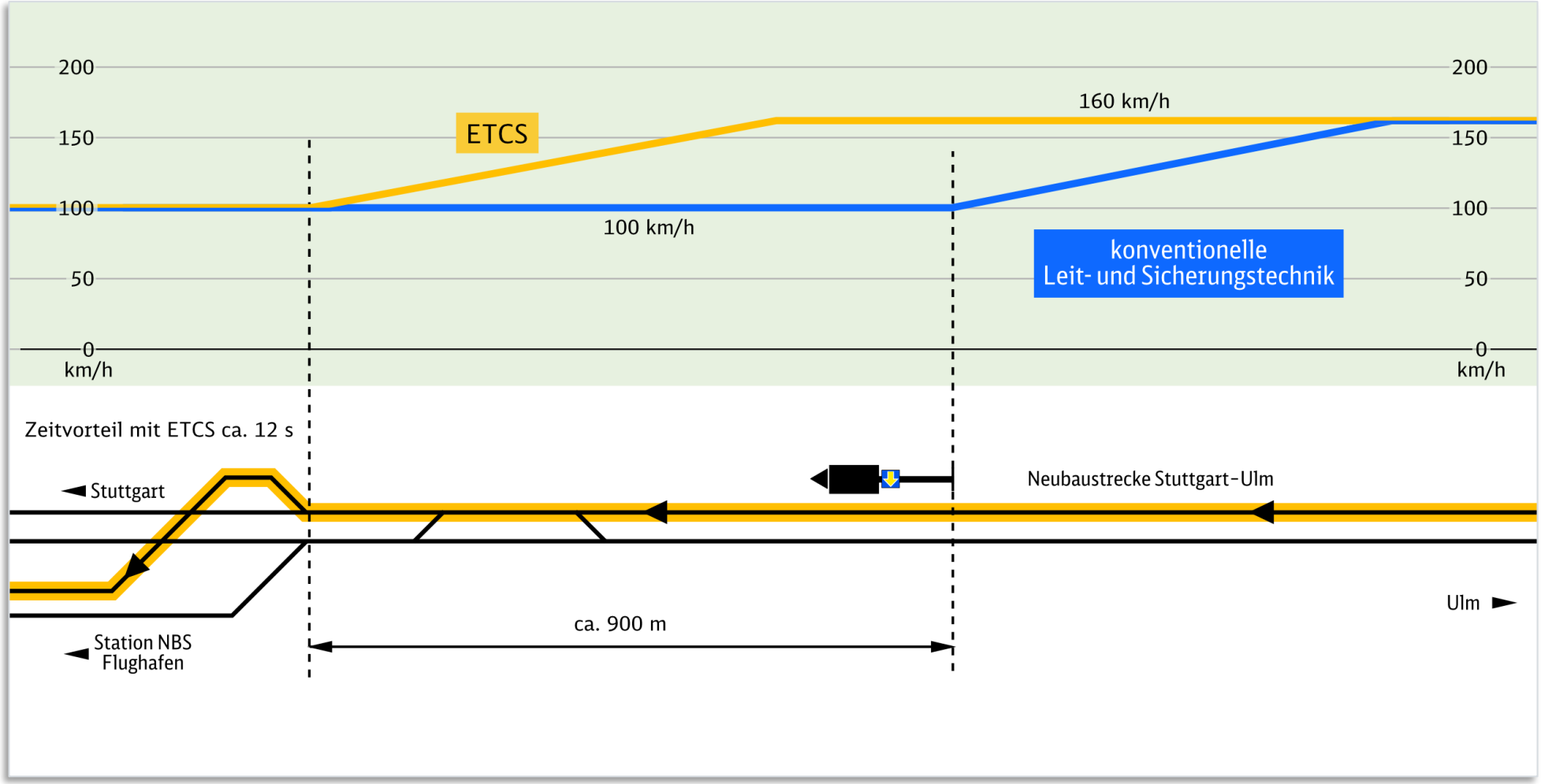
Vertiefend: *Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart*. ZEVrail 5/2022 (https://bit.ly/3DHZI0S) sowie *Innvoationskooperation Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 9/2022 (https://bit.ly/3dxD0Z6).

Aufgrund der präzisen, lückenlosen Überwachung des Zuges durch ETCS können Durchrutschwege verkürzt werden.



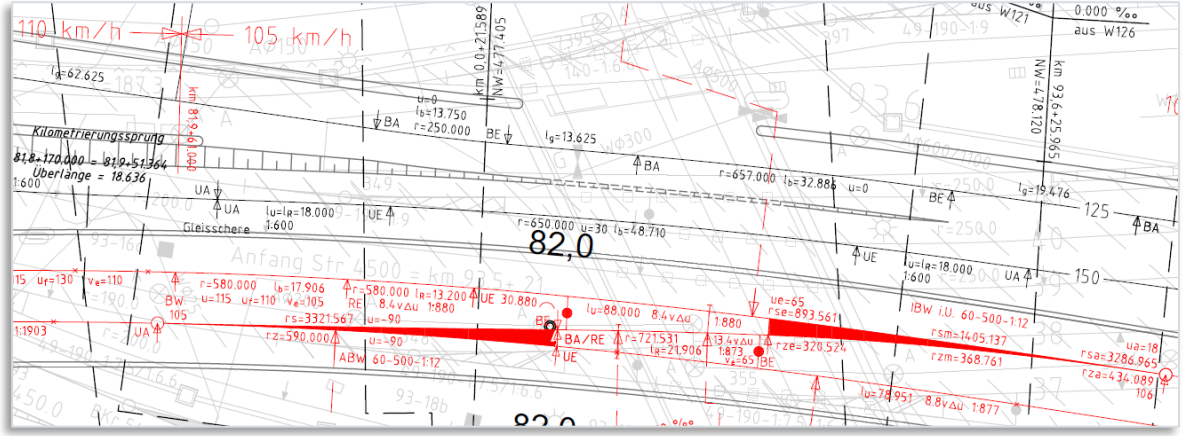
Vertiefend: *ETCS in großen Bahnhöfen am Beispiel des Stuttgarter Hauptbahnhofs*, Signal+Draht 4/2021 (https://bit.ly/3fiozoJ).

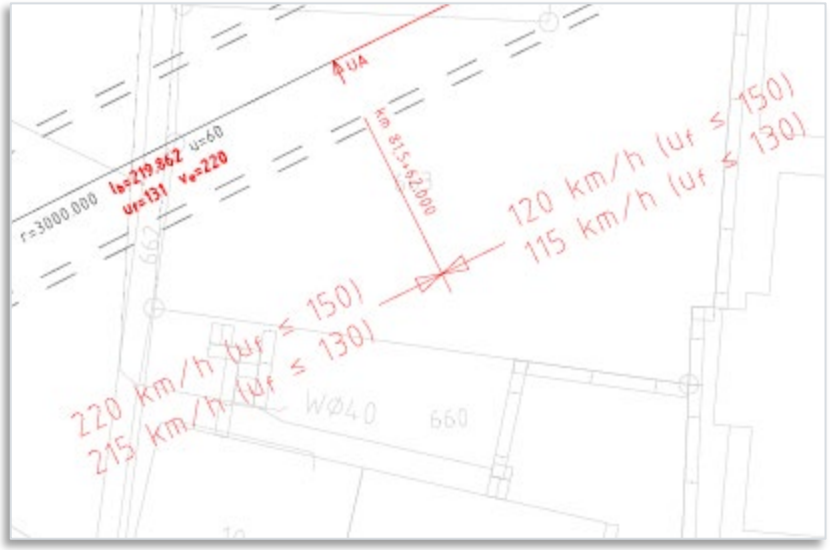
Mit ETCS können Geschwindigkeitsschwellen nicht nur metergenau (wie mit LZB), sondern auch in 5-km/h-Schritten signalisiert werden.



Prinzipdarstellung für einen Zug mit kurzer Bremsaufbauzeit, ohne weitere Bremskurveneffekte

Ohnehin geplante Arbeiten an (Lage-)Plänen bieten viele Chancen, mit ETCS (zukünftig) zusätzlichen Nutzen zu heben.

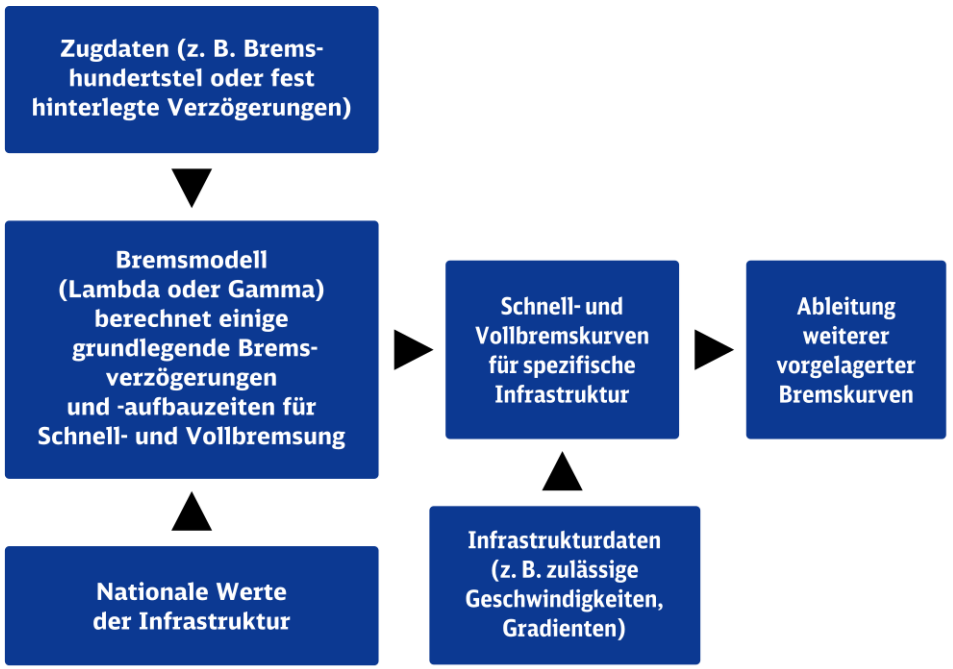


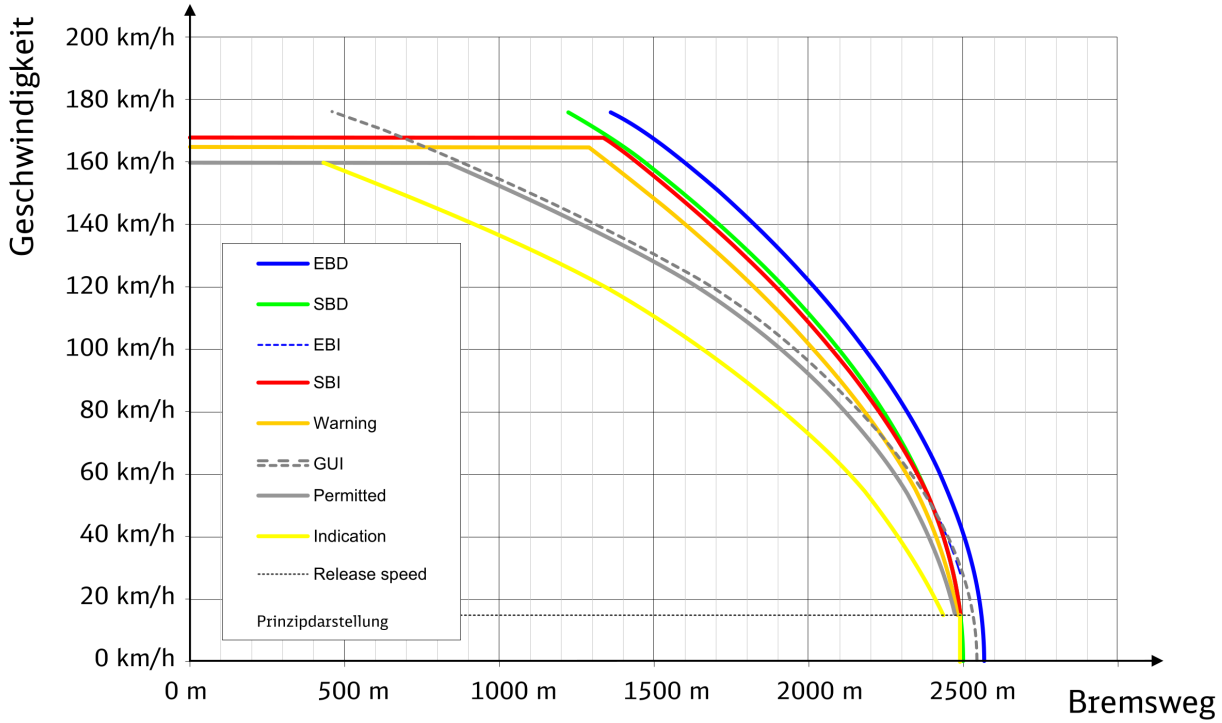


- Wenn Bestandsunterlagen wie Lagepläne ohnehin bearbeitet werden, sollten die meter- und 5-km/h-genaue Geschwindigkeitssignalisierung mit berücksichtigt werden.
- Vor ETCS-Planungen sollte die Geschwindigkeitskonzeption kritisch geprüft werden, inwieweit bisherige Geschwindigkeitseinschränkungen so nicht sinnvoll sind.
- Bei der Planung neuer Infrastruktur sollten die Möglichkeiten von ETCS von Beginn an in der Trassierung berücksichtigt werden – beispielsweise durch viele kleine statt wenige große Geschwindigkeitswechsel.
- Doppelausrüstung (ETCS/Altsystem) schränkt die Geschwindigkeitssignalisierung von ETCS zunächst ein.

Ausrisse aus Lageplänen zum Nordkopf Ulm, u. a. mit 65 km/h über Weichenverbindung. Siehe begleitende Planmappe der „Task Force Trassierung“ (www.bsu.link/task-force-trassierung)

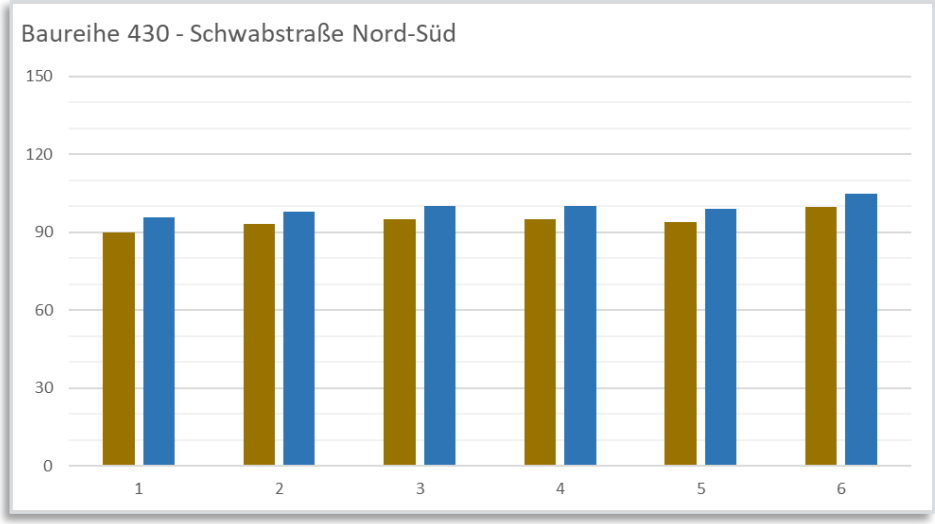
Es geht nicht nur um Infrastruktur, sondern auch um Fahrzeuge und ihre Ausrüstung – beispielsweise bei ETCS-Bremskurven.

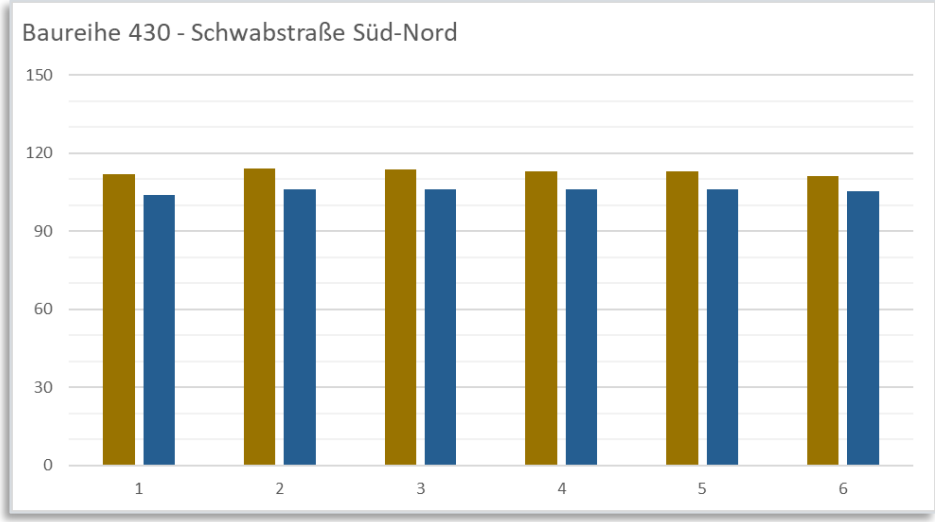




Vertiefend: https://de.wikipedia.org/wiki/ETCS-Bremskurven sowie
ETCS-Bremskurven im Spiegel der Praxis. Der Eisenbahningenieur 6/2023 (https://bit.ly/3plqlhR).

Das Gamma-Bremsmodell führt bei gut bremsenden Triebzügen im Kern des DKS zu insgesamt etwas kürzeren Fahr- und Zugfolgezeiten.





- ETCS bietet zur Bremskurvenberechnung zwei Modelle:
  - Lambda: Berechnung anhand althergebrachter Parameter wie Zuglänge, Bremshundertstel u. a.
  - Gamma: gänzlich andere Berechnung anhand von Faktoren wie Schnellbremsverzögerungen und Sicherheitsfaktoren
- Feste Kompositionen (wie Triebzüge) können grundsätzlich beide Modelle nutzen.
- Das sich im Vergleich ergebende Bild ist vielschichtig. Für die Zugfolge ist beispielsweise das Gammamodell in Steigungen eher von Vorteil, im Gefälle eher Lambda (Abbildung), Gamma eher bei längeren Zügen.
- Für den DKS wurden Optimierungen ergriffen, z. B.:
  - Lambda-Gamma-Auswahl beim Aufstarten in Abhängigkeit von der Zuglänge und Bremszustand.
  - Präzise Modellierung von Sicherheitsfaktoren und rotierender Massen (statt Standardwerten).
- Im Kern des DKS wird überwiegend das Gammamodell verwendet und führt insgesamt zu etwas kürzeren Zugfolge- und Fahrzeiten.

Belegungszeiten an Bahnsteigabschnitten der S-Bahn-Station Schwabstraße für einen Triebzug der Baureihe 430 (als rund 140 m langer Vollzug) im Vergleich. Gamma-Werte stehen in Braun, Lambda-Werte in blau.
Vertiefend: *ETCS-Bremskurven im Spiegel der Praxis*. Der Eisenbahningenieur 6/2023 (https://bit.ly/3plqlhR).

Je nach Zuglänge, Längsneigung und Geschwindigkeit kann das Lambda- oder Gamma-Modell von ETCS von Vorteil sein.

BR 430

Einfachtraktion

Neigung [‰]	Geschwindigkeit [km/h] 60	80	100	120	140
40	-1,4	-0,2	1,0	2,2	3,2
30	-0,8	0,6	2,2	3,6	4,7
20	0,0	1,8	3,6	5,3	6,7
10	1,1	3,3	5,7	7,8	9,5
0	2,7	5,6	8,6	11,3	13,4
-10	5,1	9,0	13,0	16,6	19,4
-20	9,0	14,5	20,3	25,5	29,2
-30	16,2	24,8	34,1	42,1	47,5
-40	32,2	48,6	66,9	81,7	90,2

Doppeltraktion

Neigung [‰]	Geschwindigkeit [km/h] 60	80	100	120	140
40	-3,0	-2,4	-1,7	-1,0	-0,6
30	-2,8	-2,0	-1,1	-0,4	0,1
20	-2,4	-1,5	-0,5	0,4	1,0
10	-2,0	-0,8	0,4	1,4	2,1
0	-1,3	0,0	1,5	2,8	3,7
-10	-0,5	1,3	3,2	4,8	5,9
-20	0,7	3,0	5,5	7,7	9,0
-30	2,6	5,8	9,2	12,1	13,9
-40	5,7	10,4	15,5	19,7	22,1

Dreifachtraktion

Neigung [‰]	Geschwindigkeit [km/h] 60	80	100	120	140
40	-3,2	-2,9	-2,3	-1,8	-1,5
30	-3,1	-2,6	-1,9	-1,3	-1,0
20	-3,0	-2,2	-1,4	-0,7	-0,3
10	-2,6	-1,7	-0,8	0,1	0,6
0	-2,2	-1,1	0,1	1,1	1,7
-10	-1,6	-0,2	1,3	2,5	3,3
-20	-0,7	1,0	3,0	4,6	5,5
-30	0,6	2,9	5,5	7,7	8,9
-40	2,6	5,9	9,7	12,7	14,3

BR 423

Neigung [‰]	Geschwindigkeit [km/h] 60	80	100	120	140
40	-2,2	-1,3	-0,5	0,3	0,7
30	-1,9	-0,9	0,2	1,0	1,5
20	-1,5	-0,3	1,0	2,0	2,6
10	-0,9	0,5	2,0	3,3	4,0
0	-0,2	1,5	3,5	5,1	6,0
-10	0,8	3,0	5,7	7,7	8,8
-20	2,2	5,3	8,9	11,6	13,0
-30	4,6	9,0	14,2	18,1	19,9
-40	8,8	15,7	24,1	30,0	32,5

Neigung [‰]	Geschwindigkeit [km/h] 60	80	100	120	140
40	-3,0	-2,5	-2,0	-1,5	-1,4
30	-2,9	-2,3	-1,6	-1,1	-1,0
20	-2,7	-2,0	-1,2	-0,6	-0,4
10	-2,5	-1,7	-0,7	0,0	0,3
0	-2,2	-1,2	0,0	0,9	1,2
-10	-1,8	-0,5	1,0	2,1	2,4
-20	-1,2	0,4	2,5	3,8	4,3
-30	-0,4	1,9	4,6	6,5	7,0
-40	1,0	4,2	8,2	10,8	11,5

Neigung [‰]	Geschwindigkeit [km/h] 60	80	100	120	140
40	-3,3	-2,9	-2,4	-2,1	-2,1
30	-3,2	-2,8	-2,2	-1,8	-1,8
20	-3,1	-2,6	-1,9	-1,5	-1,4
10	-3,0	-2,3	-1,5	-1,0	-0,9
0	-2,8	-2,0	-1,0	-0,4	-0,3
-10	-2,5	-1,6	-0,3	0,5	0,6
-20	-2,1	-0,9	0,7	1,7	1,8
-30	-1,5	0,0	2,2	3,5	3,7
-40	-0,6	1,5	4,5	6,4	6,5

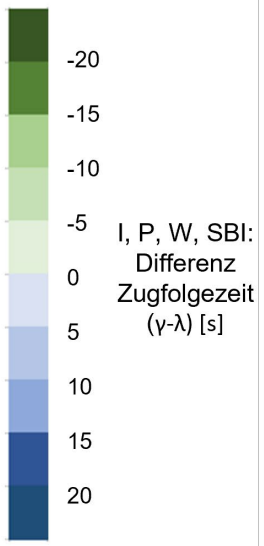
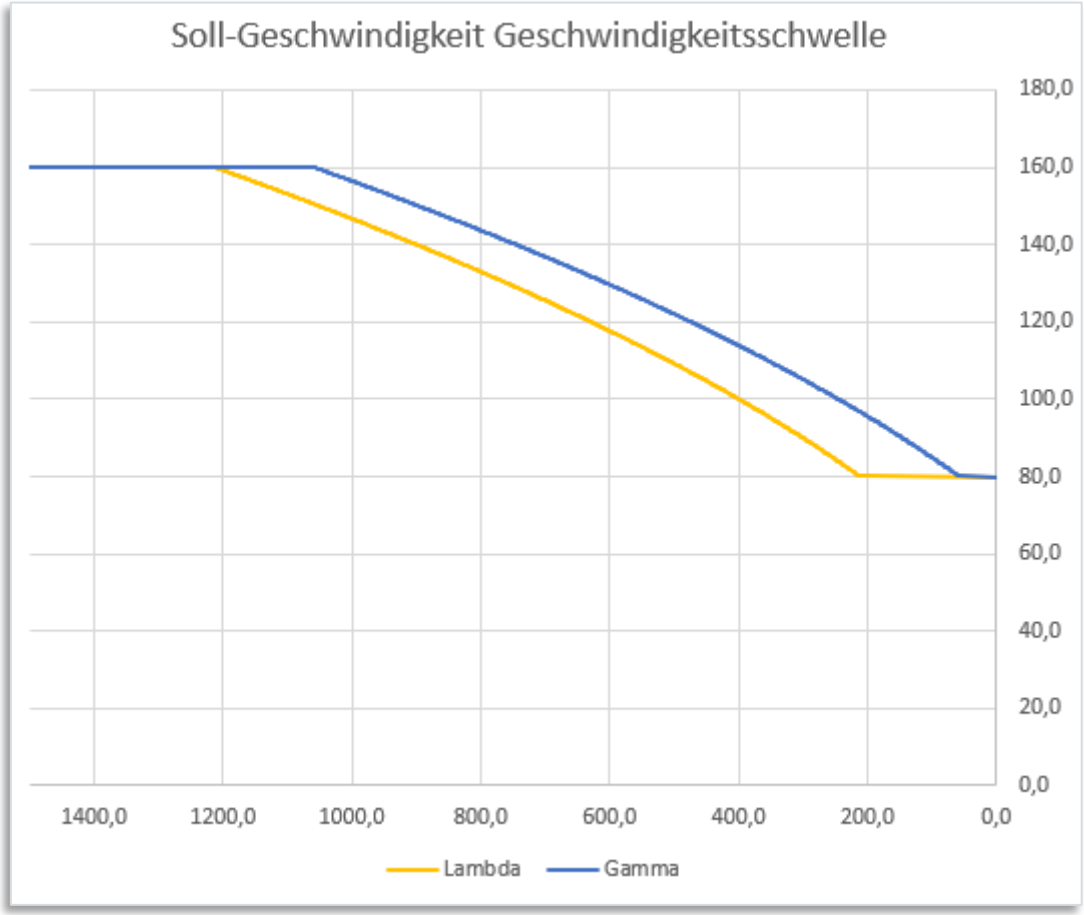
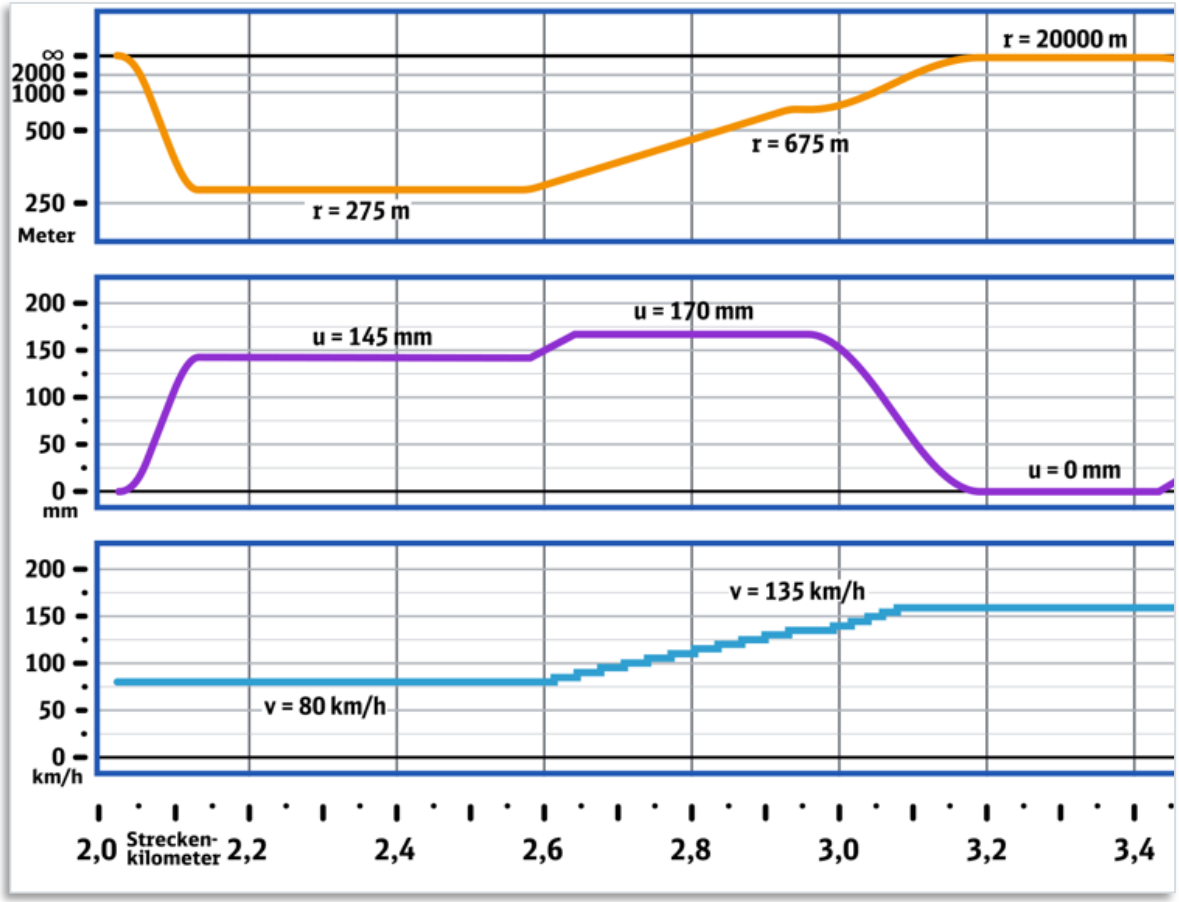


Abbildung: Unterschiede zwischen Gamma- und Lambda-Modell in Bezug auf die Zugfolgezeiten bei den S-Bahn-Baureihen 423 und 430 und konstanten Geschwindigkeiten und Neigungen. Bei grünen Werten ist das Gamma-Modell von Vorteil, bei blauen Lambda. Vertiefend: *ETCS-Bremskurven im Spiegel der Praxis*. Der Eisenbahningenieur 6/2023 ((https://bit.ly/3plqlhR).

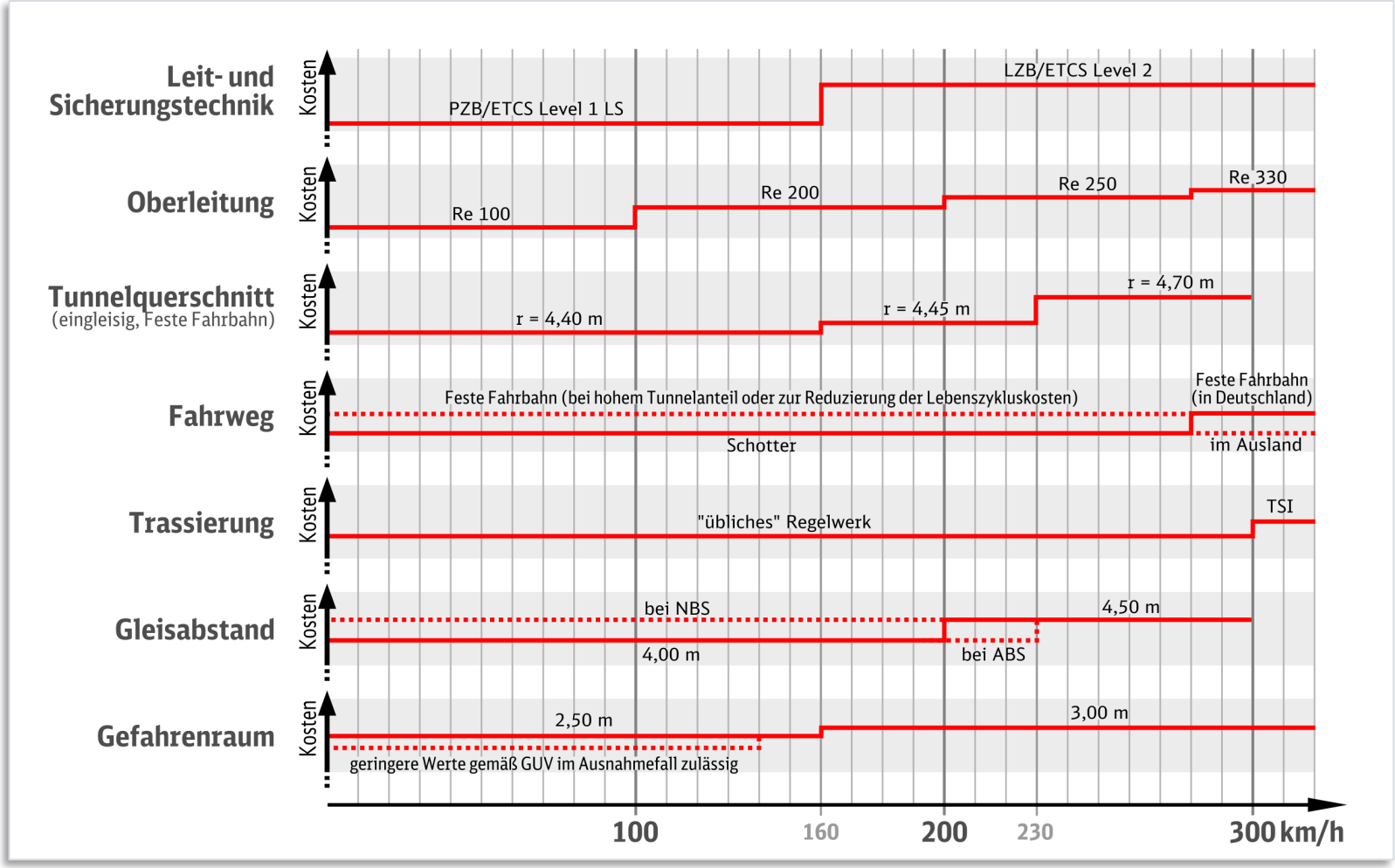
Optimierungen im Zusammenspiel von Fahrzeugen und Infrastruktur: beispielsweise ETCS-Bremskurven und –Geschwindigkeitsprofile





Links: „Frühe“ Bremsung auf eine Geschwindigkeitsschwelle mit ETCS-Bremskurven (Permitted) mit Lambda- und Gammamodell für einen 160 km/h schnellen Regionaltriebzug (15-teiliger TALENT) bei einer Bremsung auf eine Geschwindigkeitsschwelle. Rechts: Ausnutzung der meter- und 5-km/h-genauen Geschwindigkeitssignalisierung in Bögen und Übergangsbögen im geplanten Pfaffensteigtunnel.
Vertiefend: *ETCS-Bremskurven im Spiegel der Praxis*. Der Eisenbahningenieur 6/2023 (https://bit.ly/3plqlhR) sowie: *Der Pfaffensteigtunnel nimmt Kontur an*. Der Eisenbahningenieur 11/2022 (https://bit.ly/3UmnvCv).

Eine von vielen Wechselwirkungen: Mit der Einführung von ETCS Level 2 verliert auch die bisherige 160-km/h-Schwelle an Bedeutung.



Vertiefend: *www.bsu.link/task-force-trassierung*

Die noch 2018 unterstellten Systemlaufzeiten 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/2SlQvjY).

Eine Frage der Einstellung: Viele Kolleginnen und Kollegen sahen die technischen Laufzeiten als unveränderlich, beinahe gottgegeben.

Technische Laufzeiten

„Daran glaub ich nicht.“

„Die Industrie wird alles versprechen.“

„Anforderungen schränken der Wettbewerb weiter ein.“

„Viel zu komplex.“

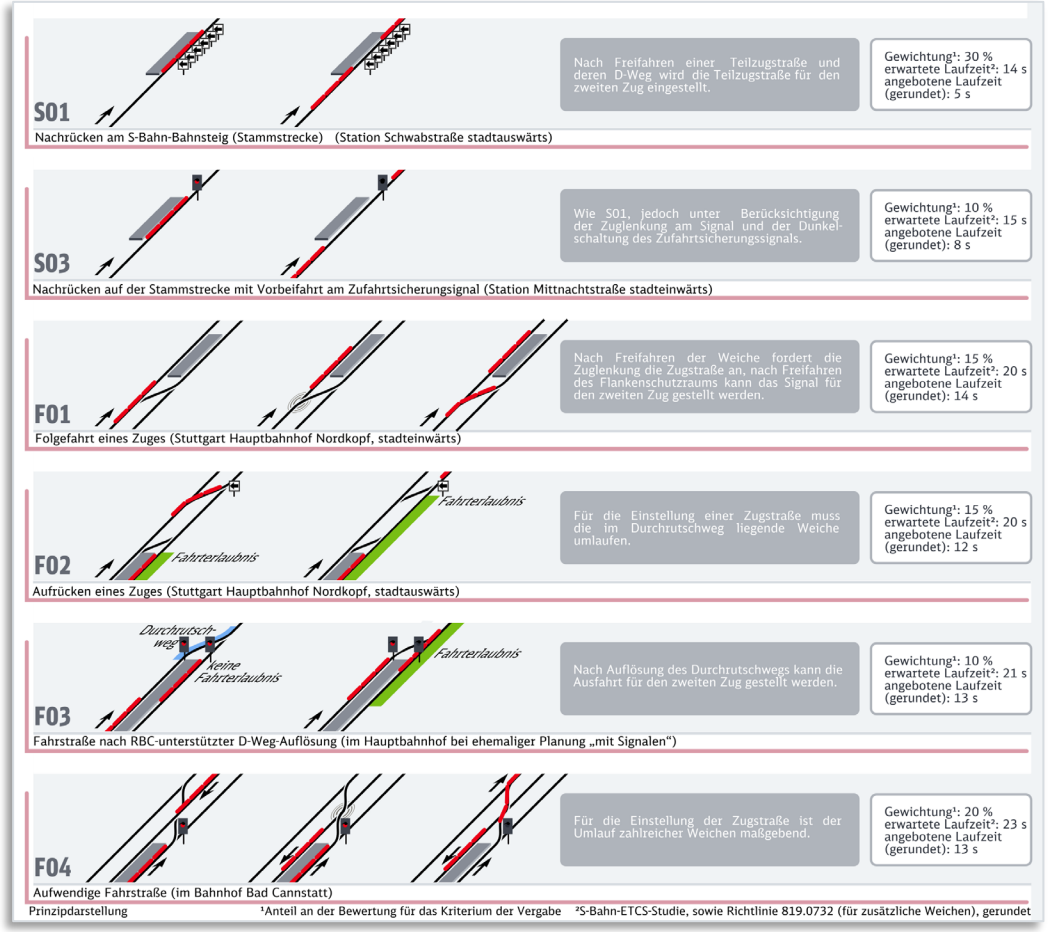
„Der Bund zahlt das nicht.“

„Die Industrie verkauft nur Schema F.“

„Die Technik ist sicherheitsrelevant. Das dauert nun mal.“

„Das ist historisch gewachsen. Niemand wird das für euch ändern.“

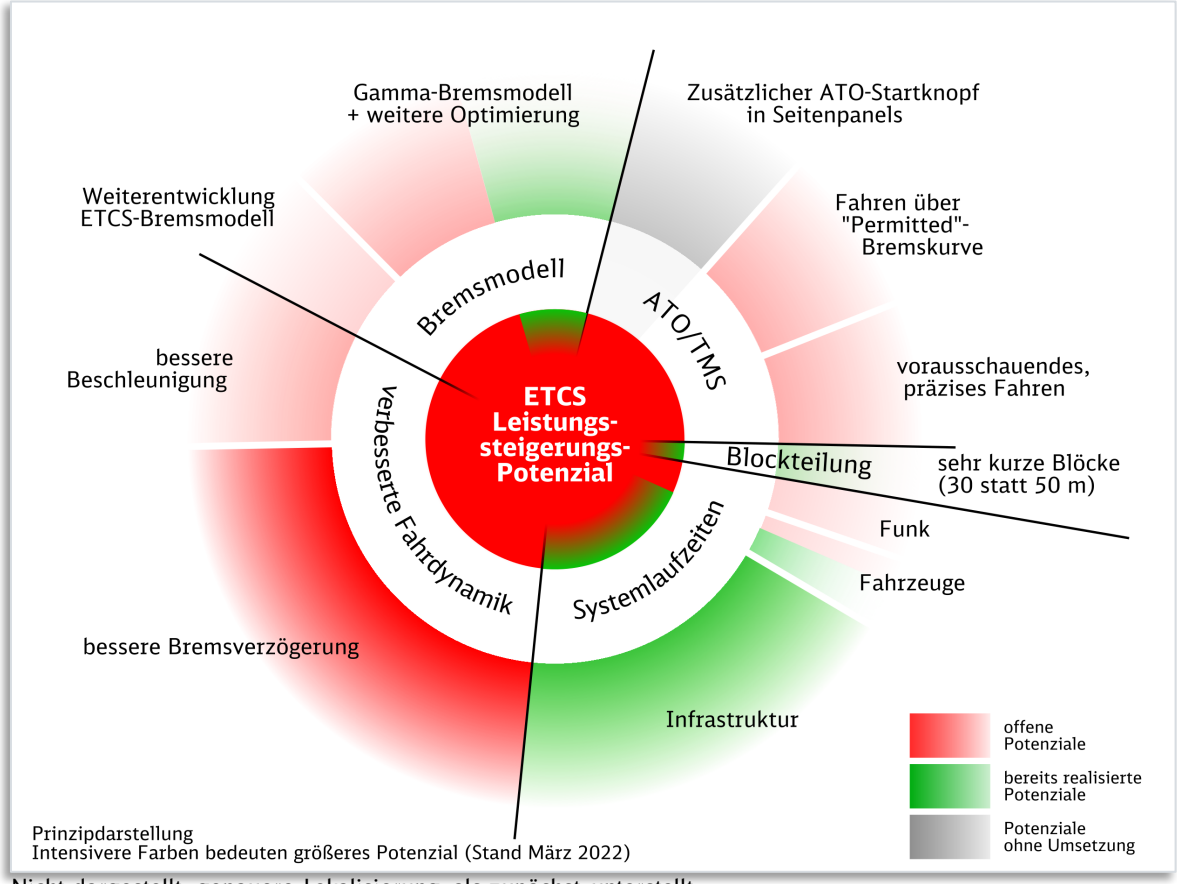
Nach einem Laufzeitwettbewerb wurden für den Kern des DKS deutlich reduzierte Infrastrukturlaufzeiten vertraglich vereinbart.



- 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, FRMCS) werden perspektivisch Ende-zu-Ende-Laufzeiten (ohne Weichen) von gerade einmal **2 Sekunden** erwartet.
- 12 Sekunden weniger entspricht beispielsweise 2 bis 4 zusätzlichen S-Bahnen pro Stunde und Richtung über die Stammstrecke.

Vertiefend: *Schnelle Leit- und Sicherungstechnik für mehr Fahrwegkapazität*. Der Eisenbahningenieur 6/2021 (https://bit.ly/2SlQvjY) sowie *Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart*. ZEVrail 5/2022 (https://bit.ly/3DHZI0S).

Kapazitätsnutzen am Beispiel der Stammstrecke: Im Zusammenwirken vieler Optimierungen werden rund 35% kürzere Zugfolgen erwartet.



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 2018 – unter konservativen Prämissen – mit ETCS und ATO GoA 2 um rund 20 Prozent kürzere Mindestzugfolgezeiten aus.
- Einschließlich gehobener Potenziale (grün in Abbildung) werden inzwischen rund 35 % kürzere Mindestzugfolgezeiten als konventionell erwartet.
- Weitere Potenziale (rot) werden noch untersucht.
- Die Frage ist nicht mehr, *ob* langfristig 36 statt heute 24 Züge pro Stunde und Richtung in der Leit- und Sicherungstechnik umgesetzt werden können,[1] sondern „nur“ noch *wie*.
- Das größte verbliebene Potenzial liegt dabei in der Fahrdynamik zukünftiger Neufahrzeuge. Würden sie beschleunigen und bremsen wie heutige (SSB-) Stadtbahnen, entspräche dies fast 20 s Zugfolgezeit.

(1) 100-s-Zugfolge einschließlich wenigstens ca. 15 s Pufferzeit, als Grundvoraussetzung, um das S-Bahn-System mit 6 Linien von einem 15- auf einen 10-Minuten-Takt zu verdichten.

Vertiefend: *Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart.* ZEVrail 5/2022 (https://bit.ly/3DHZI0S) sowie – in Kürze – *(Viel) mehr Kapazität mit ETCS (& Co.) – aber wie?* Tagungsband des Scientific Railway Signalling Symposium 2023.

Wesentliche verkehrliche Ziele: Maximale Leistungsfähigkeit für die Stammstrecke, 5/2-Minuten-Zugfolgen für Fern- und Regionalverkehr.

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

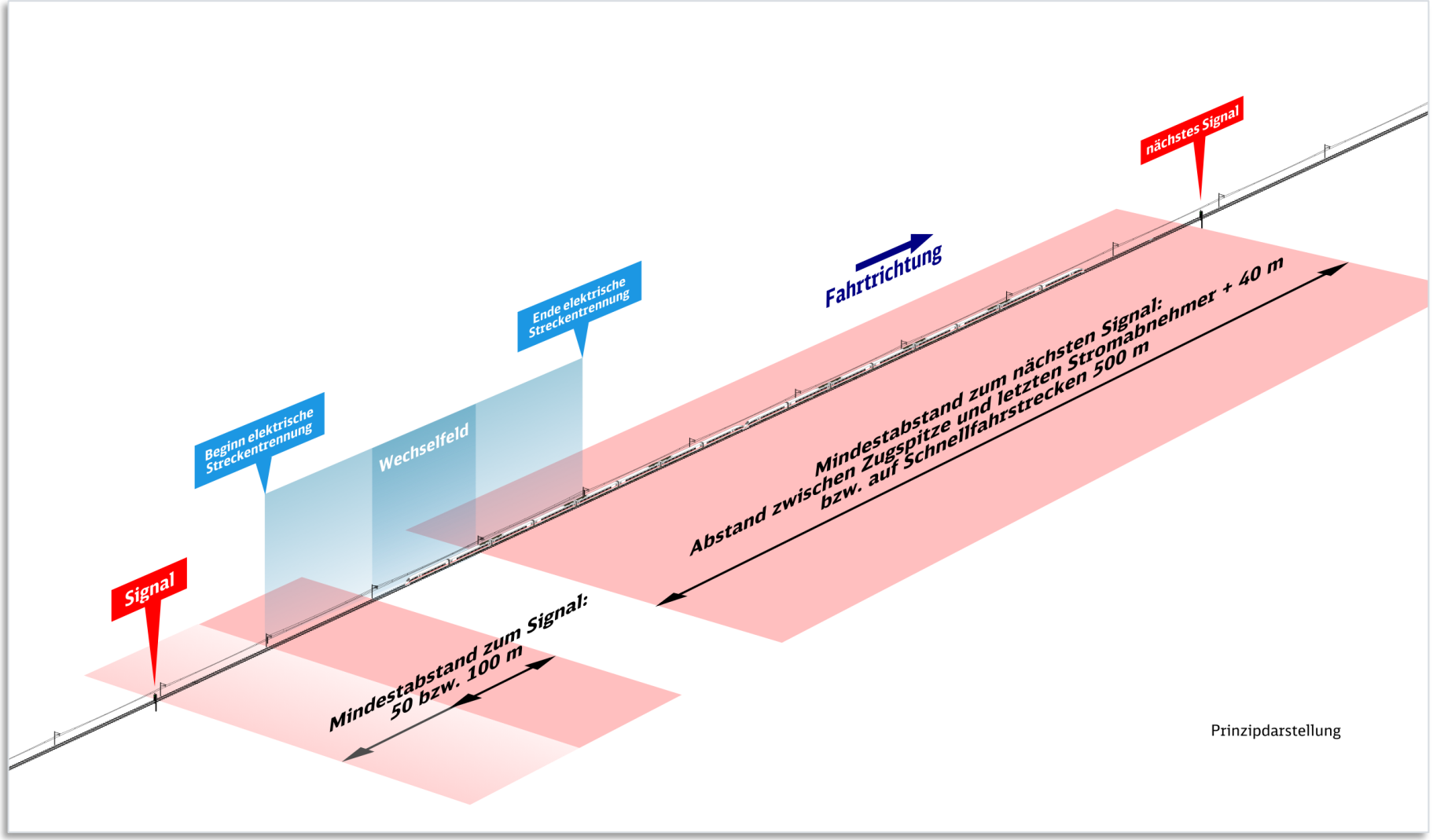
Obwohl beispielsweise halbstündliche Fernverkehrsangebote zwischen Stuttgart und Darmstadt, Heidelberg, Mainz, Nürnberg bzw. Zürich – wie auch auf vergleichbaren Relationen in anderen Bundesländern – beim Deutschland-Takt nicht vorgesehen sind, könnte der künftige Bahnknoten Stuttgart bei Bedarf derartige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

Der Pilotknoten der Digitalen Schiene Deutschland verbindet eine hochleistungsfähige Infrastruktur mit smarter 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

- Der DKS tritt an, zu zeigen, wie viel Kapazität mit „digitalen“ Mitteln im Gesamtsystem Bahn geschaffen werden kann.
- Dafür werden zahlreiche Optimierungen verfolgt: an Infrastruktur *und* Fahrzeugen, konventionell *und* digital, mit ETCS *und* weiterer „digitaler“ Technik
- Im Endausbau soll im Hauptbahnhof – unter Praxisbedingungen – auf jedem der acht Bahnsteiggleise alle fünf Minuten ein Zug fahren können (einschließlich Puffer). Im Zulauf soll im Mittel alle zwei Minuten ein Zug fahren können (technisch eine Minute).
- Für die S-Bahn-Stammstrecke werden (technische) Mindestzugfolgezeiten von unter 90 s (einschließlich 30 s Haltezeit) verfolgt. In Verbindungen mit einem Ausbau im Umland wird damit eine Verdichtung des heutigen 15-Minuten-Taktes zum 10-Minuten-Takt (6 Linien) ermöglicht.
- Für den Deutschlandtakt sind die Effekte der Digitalisierung nicht erforderlich.

Ausrisse: Statement des Konzernbevollmächtigten Thorsten Krenz vor dem S21-Ausschuss des Stuttgarter Gemeinderats am 16. Juli 2019 (https://www.bahnprojekt-stuttgart-ulm.de/presse/pressemitteilungen/newsdetail/news/1491-geplanter-deutschland-takt/)

Der Teufel steckt in unzähligen Details: beispielsweise an elektrischen Streckentrennungen von Bahnhöfen



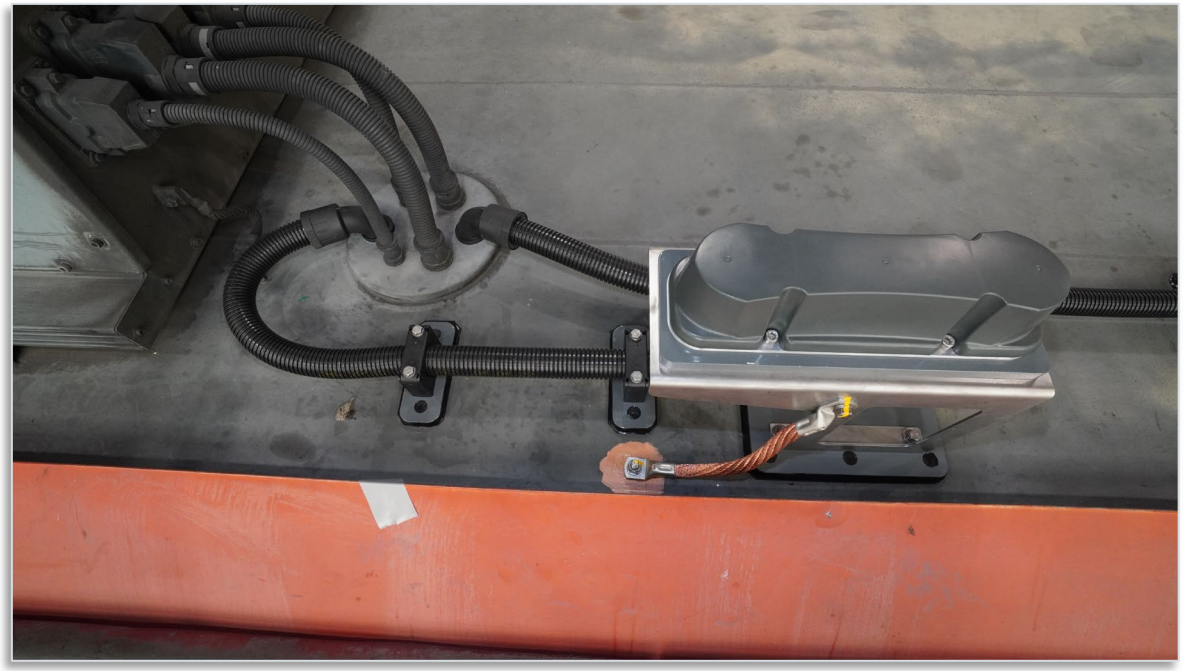
Vertiefend: *Schaltabschnittsgrenzen und Bahnübergänge schränken Kapazitätseffekt von ETCS Level 2 ein*. Signal+Draht 1+2/2023 (https://bit.ly/40AY6br) und *Optimierung der Blockteilung mit ETCS Level 2 im Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 7+8/2021 (https://bit.ly/3Ai0gQR).

Der Teufel steckt in unzähligen Details: Beispielsweise ist die Abfertigung im Fernverkehr neu zu organisieren.

- Im Fernverkehr beginnt das Zugbegleitpersonal in der Regel mit der Abfertigung, wenn das Lichtsignal am Bahnsteigende „Fahrt“ zeigt.
- Wenn es keine Lichtsignale mehr gibt, muss ein alternativer Weg gefunden werden.
- Drei mögliche Lösungen:
  1. Verständigung zwischen Triebfahrzeugführer und Zugführer.
  2. Automatische Information an den Zugführer, wenn eine ETCS-Fahrterlaubnis für die Ausfahrt anliegt, beispielsweise per App.
  3. Automatische Information an den Zugführer, wann voraussichtlich eine solche Fahrterlaubnis vorliegen wird.
- Während bei Lösung 1 ein Kapazitätsverlust droht und Lösung 2 ungefähr neutral zu heute ist, kann durch vorausschauende Abfertigung (Lösung 3) Leistungsfähigkeit gewonnen werden.

Abbildung eines Ks-Hauptsignals und eines Fahrtanzeigers:
Quelle: Wikimedia Commons, Urheber „S. Terfloth“, CC-BY-SA-20-Lizenz

„Digitale“ Leistungspotenziale zeigen sich immer wieder an gänzlich unerwarteten Stellen, z. B. durch schneller ladende Fahrpläne.

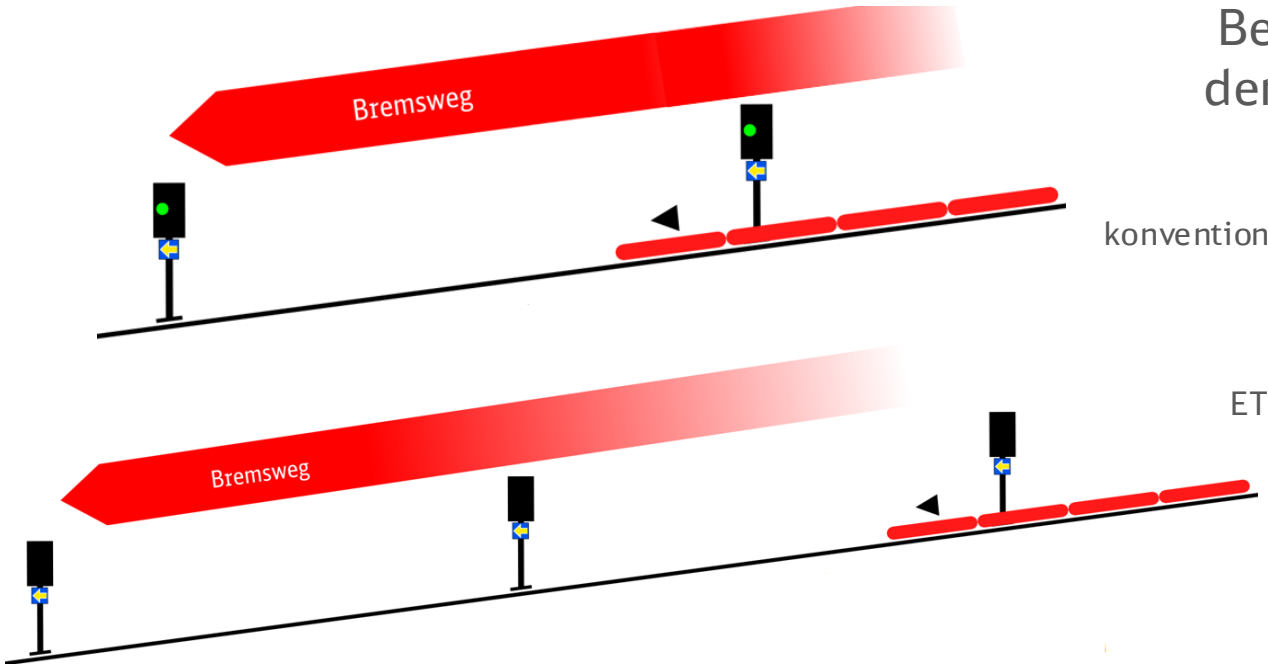


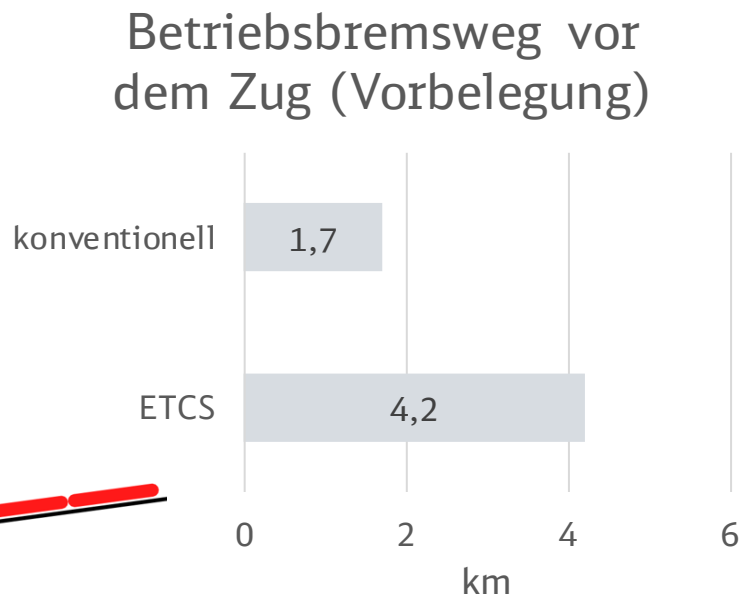
- Beim Zugnummernwechsel ist vielfach ein neuer elektronischer Buchfahrplan (EBuLa) zu laden.
- Dies benötigt mit dem heutigen, „langsamen“ GSM-R oft eine volle Minute.
- GSM-R soll bis 2035 sowieso schrittweise durch das 5G-basierte Nachfolgesystem FRMCS abgelöst werden.
- Sobald EBuLa-Fahrplandaten per FRMCS geladen werden können, sparen beginnende Züge vielfach eine Minute.
- Davon profitieren beispielsweise acht Züge pro Stunde in der Wendeschleife Schwabstraße der S-Bahn-Stammstrecke Stuttgart, wo in Folge des Zugnummernwechsels heute eine Mindestwendezeit von fünf Minuten erforderlich ist.

Abbildung: Antenne für FRMCS auf einem Triebzug der Baureihe 423.
Vertiefend: *FRMCS-Ausrüstung von 463 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 5/2023 (https://bit.ly/3C5ZetG).

Eine bloße, nicht optimierte ETCS-Fahrzeugausrüstung kann zu Kapazitätsverlusten führen, z. B. aufgrund flacher Sollbremskurven.

Ein (extremes) Beispiel eines tatsächlich im DKS erwarteten Zuges
in der Zufahrt auf Stuttgart Hauptbahnhof mit 160 km/h in 25 Promille Gefälle:





Der Zug verzehrt mit ETCS im Zulauf auf Stuttgart Hbf deutlich mehr Kapazität als mit konventioneller Technik – trotz optimierter Infrastrukturtechnik (Blockteilung, Laufzeiten).

Notwendiger Bremsweg vor dem Zug für unbehinderte Fahrt (Vorbelegung), wie er in der Fahrplankonstruktion unterstellt wird.
Konventionell: 1,2 km typischer Vorsignalabstand (ehemalige Planung im Fildertunnel) zzgl. 12 s Sichtzeit bei 160 km/h
ETCS: Vorgelagerte Indication-Bremskurve aus 160 km/h, abgeleitet aus Guidance Curve von 0,5 m/s² in 25 Promille Gefälle => Bremsverzögerung von rund 0,25 m/s².

Eine über bloßes ETCS hinausgehende, optimierte DSD-Fahrzeugausrüstung stiftet im System Bahn großen Nutzen.

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

	Wesentlicher Kapazitätseffekt	Zug 1	Zug 2
ETCS-Ausrüstung	Hochleistungsblock => schnellere Räumung	ja	ja
ATO GoA 2	präzise, straffe Steuerung (weniger Pufferzeit erforderlich)	ja	nein
verkürzte Laufzeiten sowie 5G-basierter Funk (FRMCS)	kürzere Belegung	ja	nein
Zugintegritätsüberwachung/ETCS Level 3	schnellere Räumung (kürzere Nachbelegung)	ja	nein
Fahrzeugzustandsdaten (Train Capability Report)	präzisere Steuerung (weniger Pufferzeit erforderlich)	Ja	nein
ETCS-Bremsmodell	kürzere Vorbelegung	optimiert (Gamma-Bremsmodell)	nicht optimiert (Lambda-Bremsmodell)
Relevante Bremsverzögerung und Bremskurve für Zugfolge (Kapazität)	kürzere Vorbelegung	**(>)1,0 m/s²** (mit ATO nahe EBI)	**0,5 m/s²** (Guidance Curve)

- Beide Züge erfüllen die Mindestanforderungen des Netzzugangs (ETCS).
- Bereits 2025 (mit ETCS) wird Zug 1 wesentlich weniger Kapazität als Zug 2 verzehren.
- Mit Einführung weiterer Techniken in der Infrastruktur (ATO GoA 2, FRMCS, ETCS Level 3 ...) wird Zug 1 nur etwa die Hälfte der Fahrwegkapazität von Zug 2 verbrauchen.

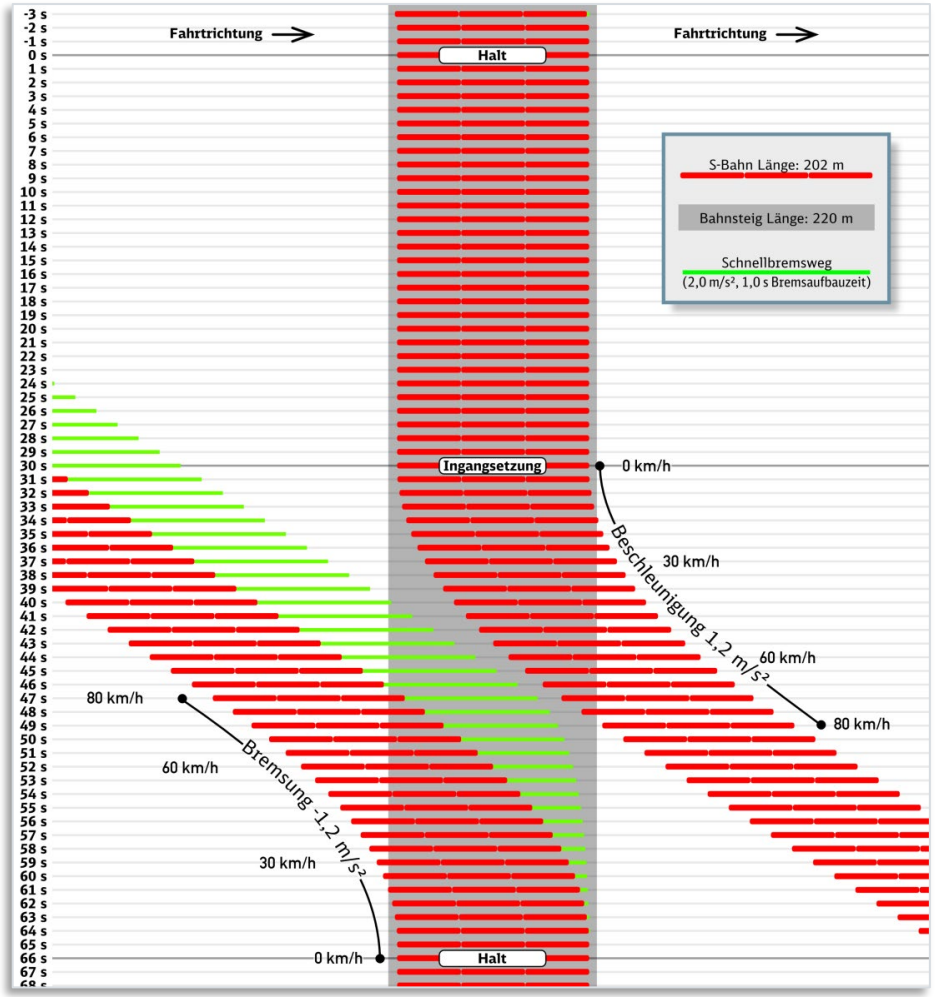
Vertiefend: *Fahrzeugnachrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 9/2021 (https://bit.ly/3tFQWUB)

Eine von vielen Wechselwirkungen: Oberleitung und Bahnenergie-versorgung mit leistungsstarken, dicht fahrenden Triebzügen.

„Auf wichtigen Strecken mit hoher Nachfrage sollen perspektivisch Doppelstockzüge mit einer Länge von 424 m und einer Kapazität von 1.520 Sitzplätzen fahren.“

Links: Ausriss des Deckblatts und Zitat aus https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/dateien/PDF/Anlagen_PMs_2023/230315_PM_Schienenknoten_Stuttgart__Zukunftspapier_Eisenbahnknoten_Stuttgart.pdf
Rechte Abbildung: Trafo eines Unterwerks (Quelle: Wikimedia Commons, Urheber „Smiley.toerist“, CC-BY-SA-40-Lizenz)

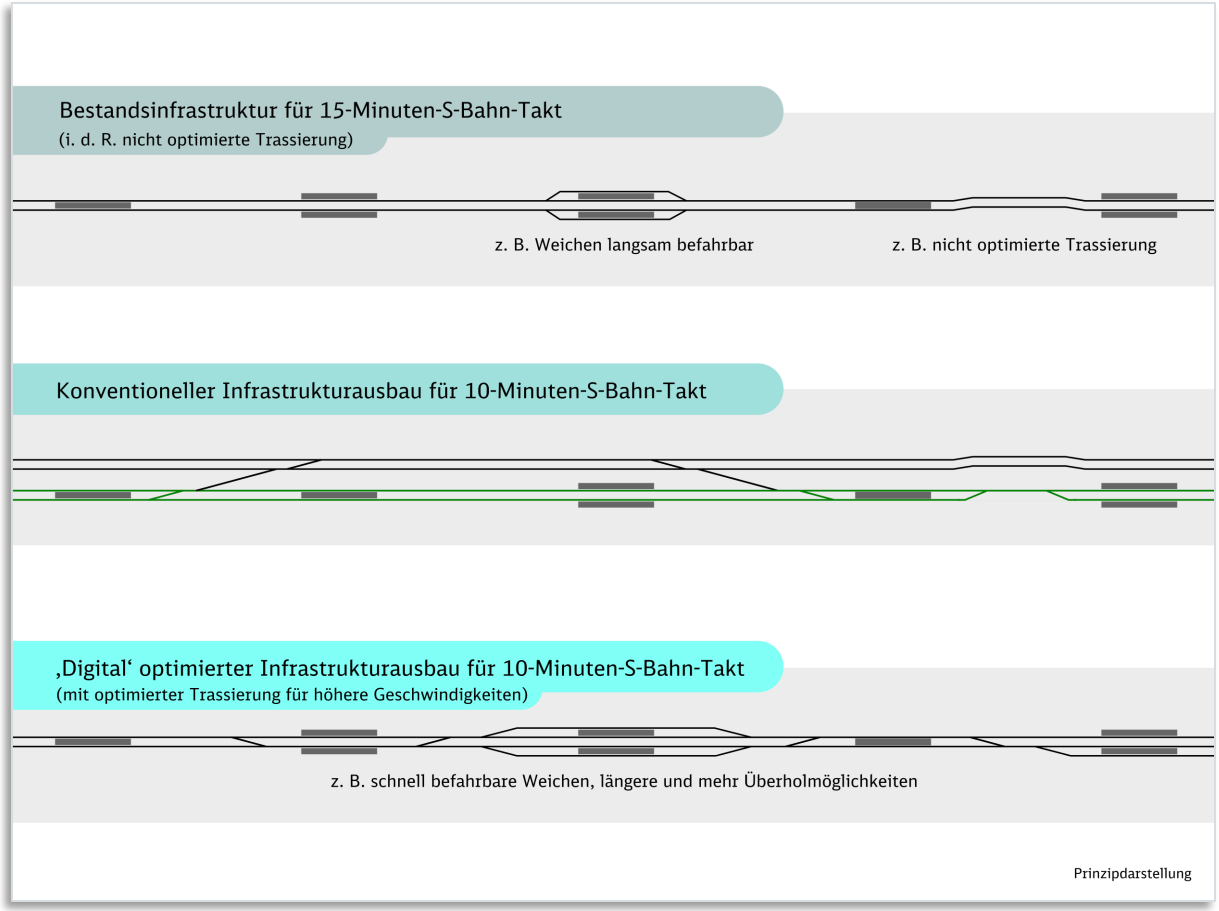
Und wie viel Kapazitätssteigerung können wir nun am Ende erwarten? Zunächst eine Näherung für eine S-Bahn-Stammstrecke.



- Mit ETCS wird eine (nahezu) beliebig feine Blockteilung ermöglicht.
- Mit ATO GoA 2 können Züge präzise Trajektorien vorausschauend bis knapp unter die Zwangsbremseinsatzkurve (EBI) geplant und gefahren werden.
- Das Verkehrsleitsystem CTMS führt anhand zahlreicher Daten (aus DSTW, ETCS sowie ATO GoA 2 mit Fahrzeugzustandsdaten) den nachfolgenden Zug präzise nach.
- In Verbindung mit fahrdynamisch optimierten Fahrzeugen, die eine ähnliche Fahrdynamik wie Stadtbahnen aufweisen, wird im vereinfachten Modell eine Zugfolgezeit von rund 66 Sekunden erreicht, einschließlich 30-sekündigen Halten am Bahnsteig.
- Um 36 Züge pro Stunde und Richtung stabil zu fahren, müssen in der Praxis unter 90 Sekunden erreicht werden.

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

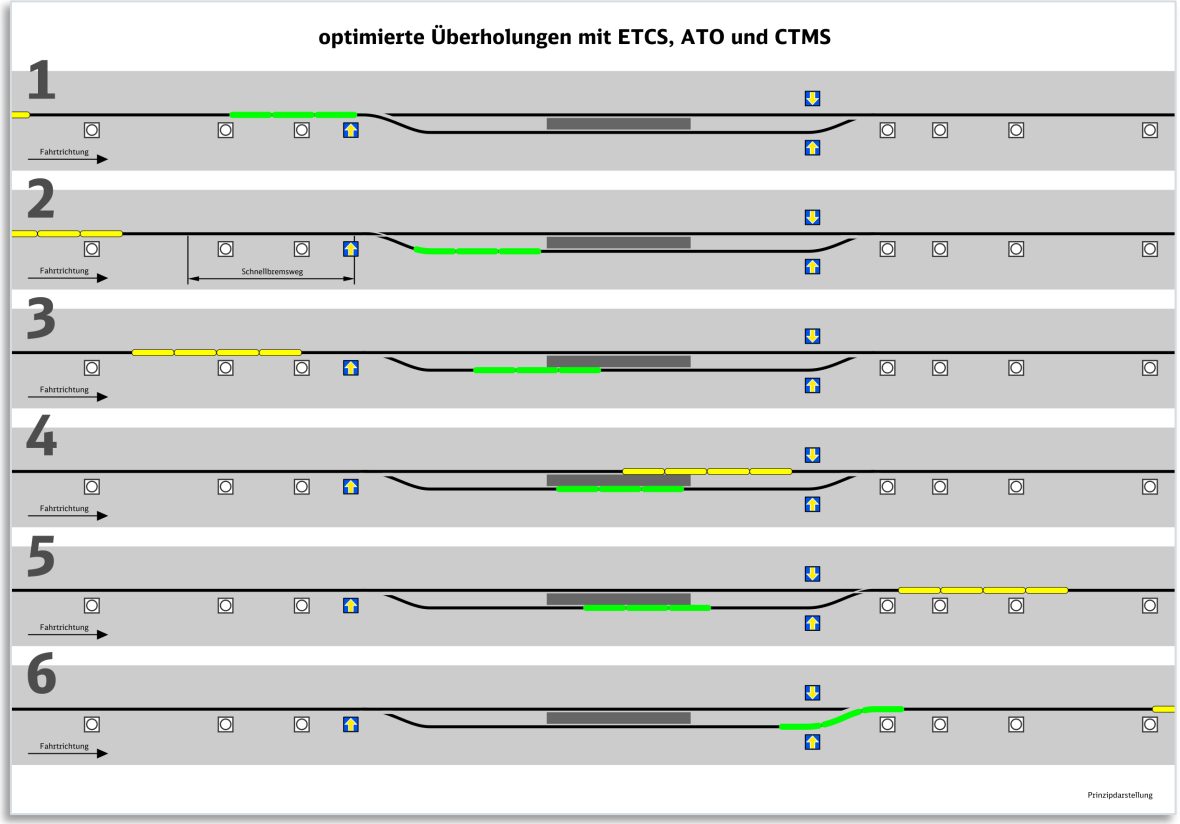
In Verbindung mit „kleinen“ (Trassierungs-)Optimierungen können erhebliche Reserven geschaffen werden – Spielmassen für CTMS.



Vertiefend: https://bsu.link/task-force-trassierung

- Mit kleinen Trassierungsoptimierungen (Überhöhungen, seitliche Verschiebungen auf bahneigenem Grund u. a.) können auf typischen Mischverkehrsstrecken im Zulauf auf den Kern des Knotens Stuttgart im Mittel etwa 20 km/h größere Geschwindigkeiten ermöglicht werden.
- Für überholende Züge, die im S-Bahn-Perimeter (ca. 20-25 km) kaum halten, somit mehrere Minuten zusätzliche Reserven geschaffen. Bei unveränderten kommerziellen Fahrzeiten entstehen somit mehrere Minuten zusätzliche Reserven – Spielmassen für CTMS.
- Zusätzliche Weichen und reaktivierte Überholgleise können weitere Spielräume schaffen.
- Im Zusammenspiel konventioneller und „digitaler“ Optimierungen liegt gewaltiges Potenzial für Kapazitätserhöhungen – auch auf hochbelasteten Mischverkehrsstrecken.
- Das alles ist nicht trivial – scheint aber immer noch sehr viel einfacher, schneller und effizienter umsetzbar als ein umfassender Neubau von Gleisen.

Ein gewaltiges Potenzial für Mischverkehrsstrecken: schlanke Überholungen und „kleine“ Infrastrukturoptimierungen



- Im Modell nachgewiesen: Überholung einer S-Bahn (grün) während der Verkehrshaltezeit durch einen 130 km/h schnellen Regionaltriebzug (gelb)
- „konventionelle“ Optimierungen u. a. mit Überholgleis mit 0,7 km Nutzlänge für 100 km/h, opt. Fahrdynamik
- Wesentliche „digitale“ Optimierungen:
  - ETCS Level 2 oS und Hochleistungsblock
  - verkürzte Systemlaufzeiten
  - vorausschauende Führung mit ATO GoA 2 und CTMS
  - optimierte Blockteilung (mit ETCS Level 2oS)
  - optimierte ETCS-Bremskurven (Gammamodell)
  - aufgelöste Restriktionen an Streckentrennungen
- In „kleinen“ Trassierungsoptimierungen (wie Überhöhungen) liegt auf hochbelasteten Mischverkehrsstrecken im S-Bahn-Netz in Stuttgart ein Potenzial von im Mittel etwa 20 km/h.
- Bei unveränderten kommerziellen Fahrzeiten könnten somit mehrere Minuten Spielmassen für CTMS für durchfahrende Züge entstehen.

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), *Optimierung von Überholvorgängen mit digitaler Leit- und Sicherungstechnik*. Bachelorarbeit Mai 2022 (https://bit.ly/3BbuPJR) sowie https://bsu.link/task-force-trassierung

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

- 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 und Knoten in Deutschland.
- (Viel) mehr Kapazität ist möglich. Dafür braucht es klare Anforderungen und eine umfassende Optimierung an Fahrzeugen *und* Infrastruktur, „digital“ *und* konventionell, ETCS (ohne „Signale“) *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.

Visualisierung des neuen Hauptbahnhofs Stuttgart (oben) und der neuen S-Bahn-Station Stuttgart Mittnachtstraße (unten): plan b, Stuttgart
Der Digitale Knoten Stuttgart wird Realität. Der Eisenbahningenieur 1/2023 (https://bit.ly/3RCeqFR).

Foto: ICE 3 vor Eurobalise für ETCS auf Fester Fahrbahn im Bahnhof Merklingen – Schwäbische Alb, 9. August 2022