



Kofinanziert durch die  
Europäische Union

# Licht und Schatten

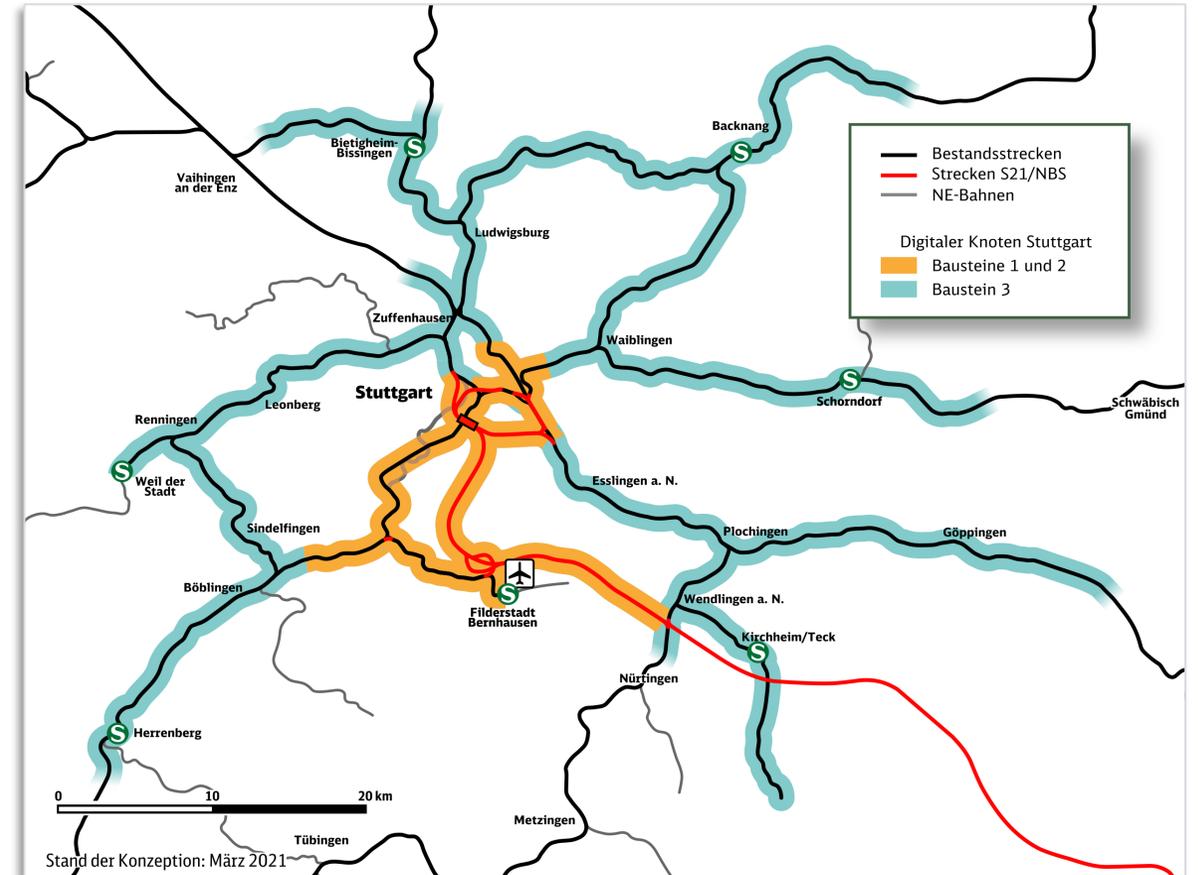
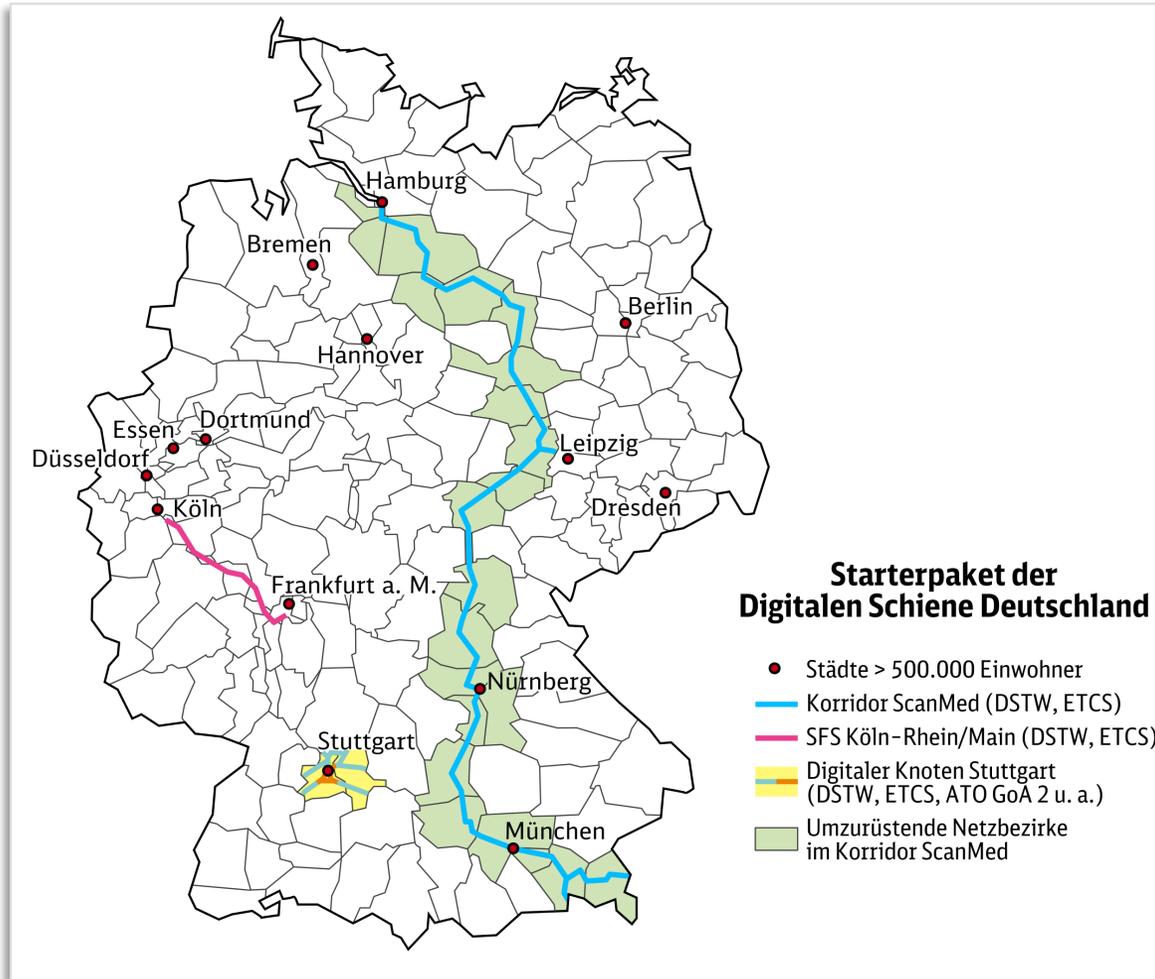
Eindrücke aus dem Digitalen Knoten Stuttgart

---

DB Netz | I.NDKXS | Dresden | 15.06.2023

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

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



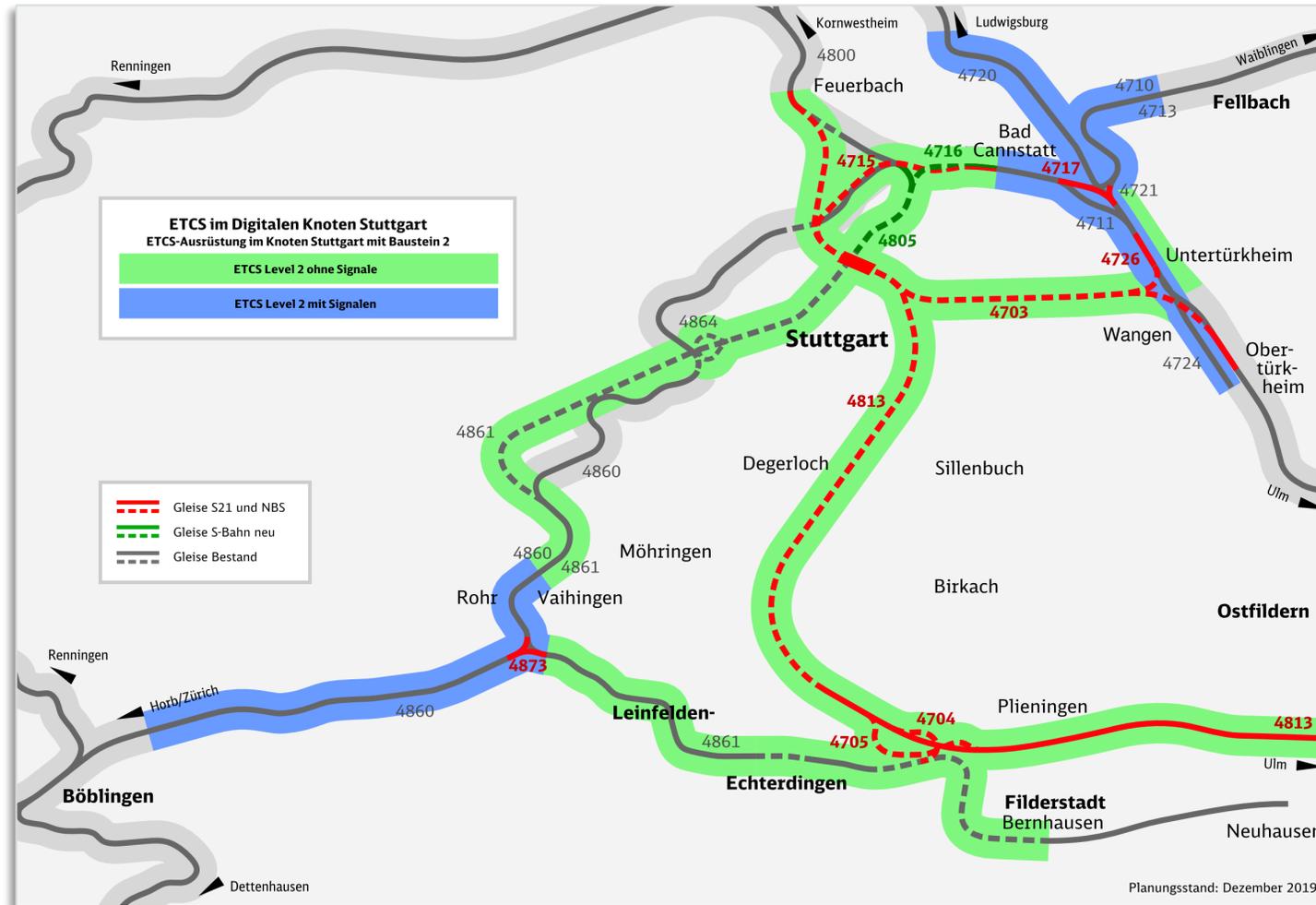
Vertiefend: *Der Digitale Knoten Stuttgart wird Realität*. Der Eisenbahningenieur 1/2023 (<https://bit.ly/3hiuOZL>).

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



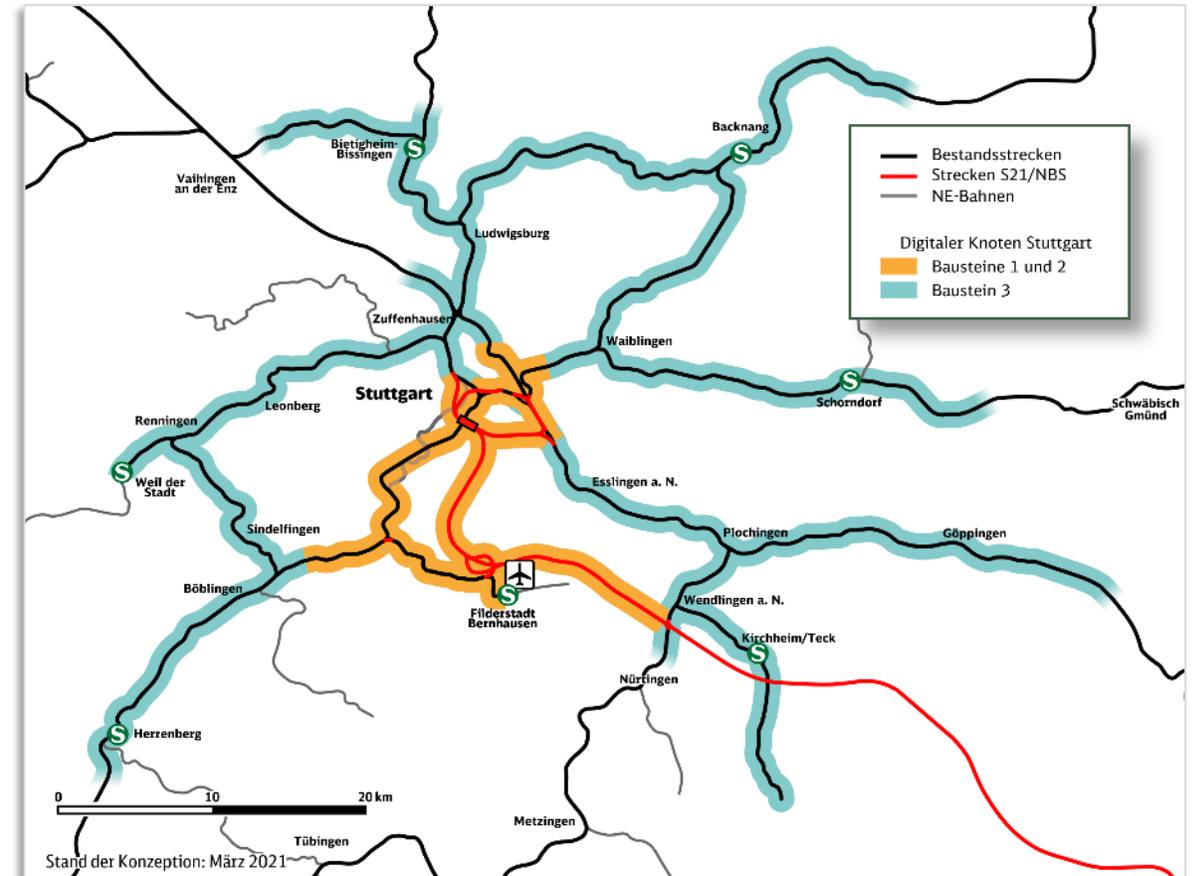
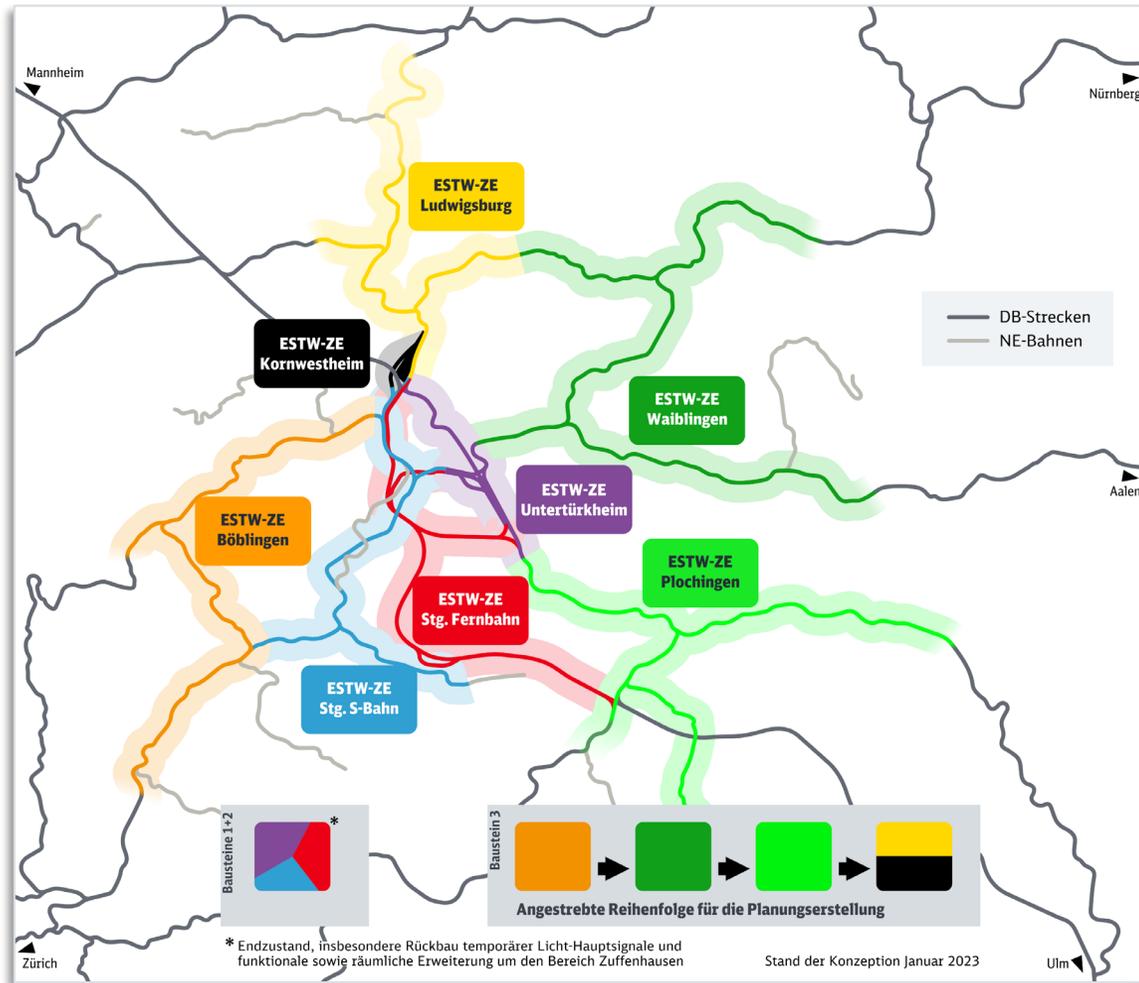
links: reine ETCS-Ausrüstung (Eurobalise und „Blechtefel“)  
rechts: zusätzliche Ausrüstung mit konventionellen Lichtsignalen und zugehöriger Punktförmiger Zugbeeinflussung (PZB)  
Vertiefend: *ETCS Level 2 ohne „Signale“ in einem großen Knoten*. Deine Bahn 3/2022 (<https://bit.ly/3S4NBdj>).

# 2025 wird der Kern des DKS mit ETCS Level 2 „ohne Signale“ (oS) in Betrieb genommen – mit voraussichtlich rund 1.700 Zügen pro Tag.

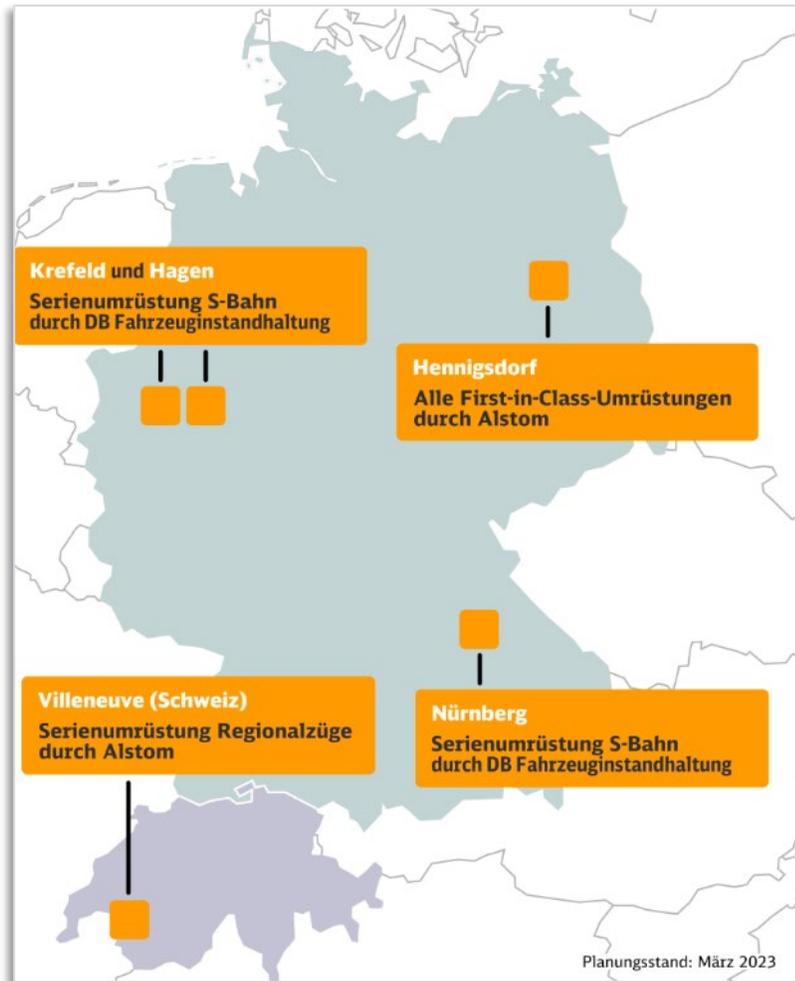


Vertiefend: Auf dem Weg zum Digitalen Knoten Stuttgart: ein Überblick. Der Eisenbahningenieur 4/2020 (<https://bit.ly/3pyuXfg>).

# Im Endausbau (mit Baustein 3, Horizont 2030) wird der DKS 8 Stellwerks-Zentraleinheiten für rund 500 Netzkilometer umfassen.



# 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 (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. DB Netz lässt ferner 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/3dxDQZ6>), *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.

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

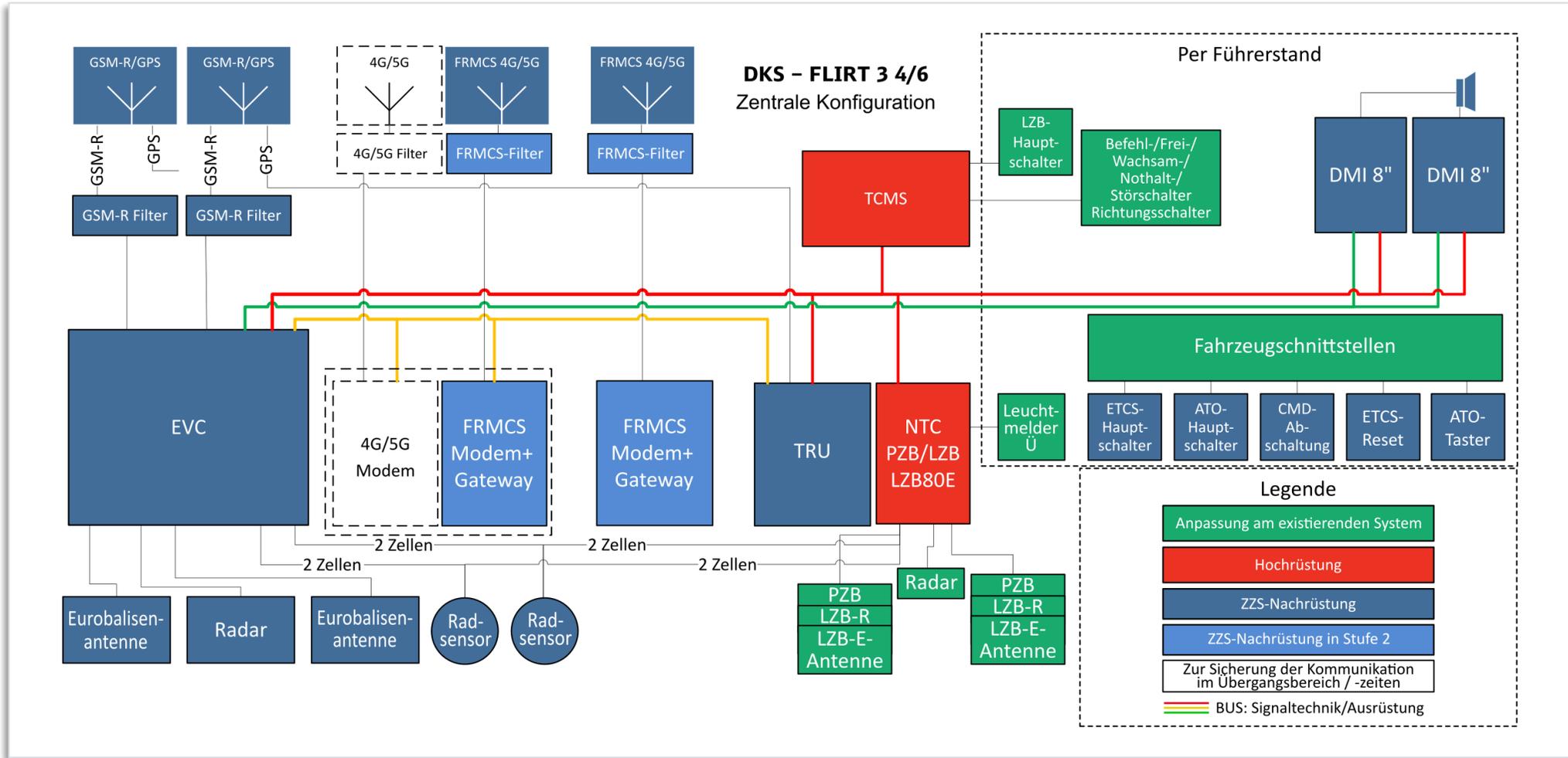
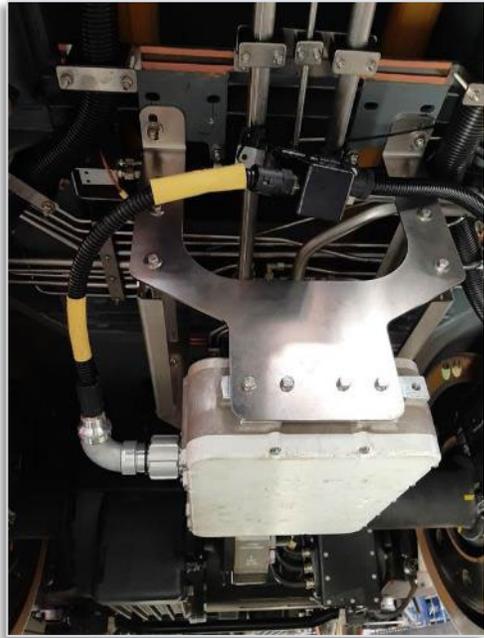


Abbildung: vereinfachte (!) Systemarchitektur auf FLIRT-Triebzügen mit zweistufiger Nachrüstung von ETCS & Co. (blau), Anpassungen und Hochrüstungen  
Vertiefend: Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart. ZEVrail 5/2022 (<https://bit.ly/3DHZIOS>).

# Die DSD-Fahrzeugausrüstung für den Kern des DKS geht weit über eine einfache ETCS-L2-Ausrüstung hinaus, kostet aber nur wenig mehr.



Eckpunkte der DSD-Fahrzeugausrüstung:

- Zweistufige ETCS-Ausrüstung:
  - Zunächst gemäß Baseline 3 (SRS 3.6.0) für 2025
  - Hochrüstung gemäß TSI ZZS 2023 (Baseline 4) ab frühestens 2025 ist mit bestellt.
- hochautomatisiertes Fahren mit Triebfahrzeugführer (ATO GoA 2)
- ETCS Level 3 mit Zugintegritätsüberwachung (TIMS)
- GSM-R-Nachfolgesystem (FRMCS)
- Fahrzeugzustandsdaten (TCR) für das Kapazitäts- und Verkehrsmanagementsystem CTMS
- Standardisierte Schnittstellen (OCORA)
- Diverse Optimierungen, z. B. an Bremskurven, GSM-R, schnelle Zugdateneingabe...

Die über einfaches ETCS hinausgehende Optimierungen machen nur etwa 10 % der Serienkosten aus.

Eindrücke aus der Nachrüstung der Baureihe 423: unterflur eingebaute Balisenantenne, im Deckenbereichen kompakt eingebauter ETCS-/ATO-Fahrzeugrechner (EVC), FRMCS-Antenne auf dem Dach  
Vertiefend: Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart. ZE/rail 5/2022 (<https://bit.ly/3DHZ10S>) sowie FRMCS-Ausrüstung von 463 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart. Signal+ Draht 5/2023 (<https://bit.ly/3C5ZetG>).

# Eindrücke aus der laufenden First-of-Class-/Prototyp-Umrüstung von inzwischen 18 S-Bahn- und Regionaltriebzügen.



Balisenantenne unter einer S-Bahn der Baureihe 430



Wegimpulsgeber unter einer S-Bahn der Baureihe 430



Dopplerradar unter einer S-Bahn der Baureihe 430



Antenne für 4G/5G auf dem Dach eines FLIRT 3



ein ETCS-/ATO-Fahrergerät (EVC) in der Baureihe 423



Verkabelungsarbeiten im FLIRT 3



neue Displays und ATO-Taster in einer S-Bahn der Baureihe 423

Auszüge aus einem Plakat zu den „Tagen der offenen Baustelle“ 2023 (<https://bsu.link/tdob-infotafeln>)

Abbildungen: Alstom

DB Netz | Dresden | 15.06.2023

# 130 neue Regionaltriebzüge des Landes erhalten ihre Fahrzeugausrüstung effizient „ab Werk“.



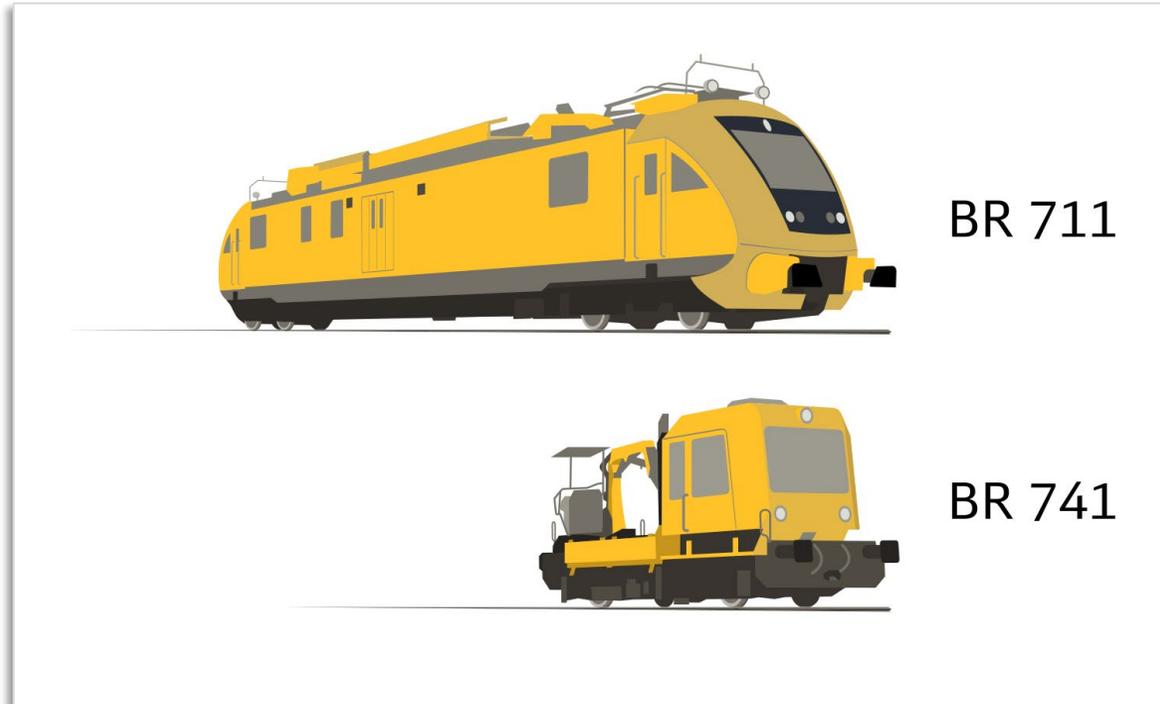
„Digitale“ Eckpunkte der 106 m, 200 km/h schnellen, spurt- und leistungsstarken (5,8 MW am Rad!) Triebzüge:

- ETCS Baseline 3 (SRS 3.6.0) u. a. mit
  - optimiertem Gamma-Bremsmodell und Bremsystem-Anforderung
  - schneller Zugdateneingabe
  - verkürzten technischen Laufzeiten
  - besonders präziser Odometrie
  - Cold Movement Detection
- ATO GoA 2, u. a. mit Übermittlung von Ist-Adhäsionsdaten
- ETCS Level 3 / TIMS / sichere Zuglänge
- Upgrade auf TSI ZZS 2023 (einschließlich Baseline 4, mit FRMCS) ist mit beauftragt
- Fahrzeugzustandsdaten (TCR)
- standardisierte Schnittstellen (OCORA)

Die Ausrüstung „ab Werk“ ist weniger als halb so aufwendig wie die Nachrüstung. Das Land wird daher auf Nachrüstungen soweit wie möglich verzichten.

Abbildungen aus <https://www.alstom.com/de/press-releases-news/2022/5/zukunftsfaehige-mobilitaet-mit-130-neuen-doppelstock-regionalzueegen>  
Vertiefend: *Innovationskooperation Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 9/2022 (<https://bit.ly/3dxD0Z6>)

# Der DKS ist auch Zündfunke für die Nachrüstung von bis zu 127 Fahrzeugen aus 14 Baureihen der Netzinstandhaltung.



Linke Abbildung: Ansichten der ersten beiden umzurüstenden Baureihen.

Rechte Abbildung: Während der ersten First-of-Class-Umrüstung neu eingebautes Führerpult (auf einem Gleisarbeitsfahrzeugs [GAF] der Baureihe 741) (Abbildung: Stadler/GBM)

Vertiefend: *Nachrüstung von Nebenfahrzeugen für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 6/2023.

# 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.

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

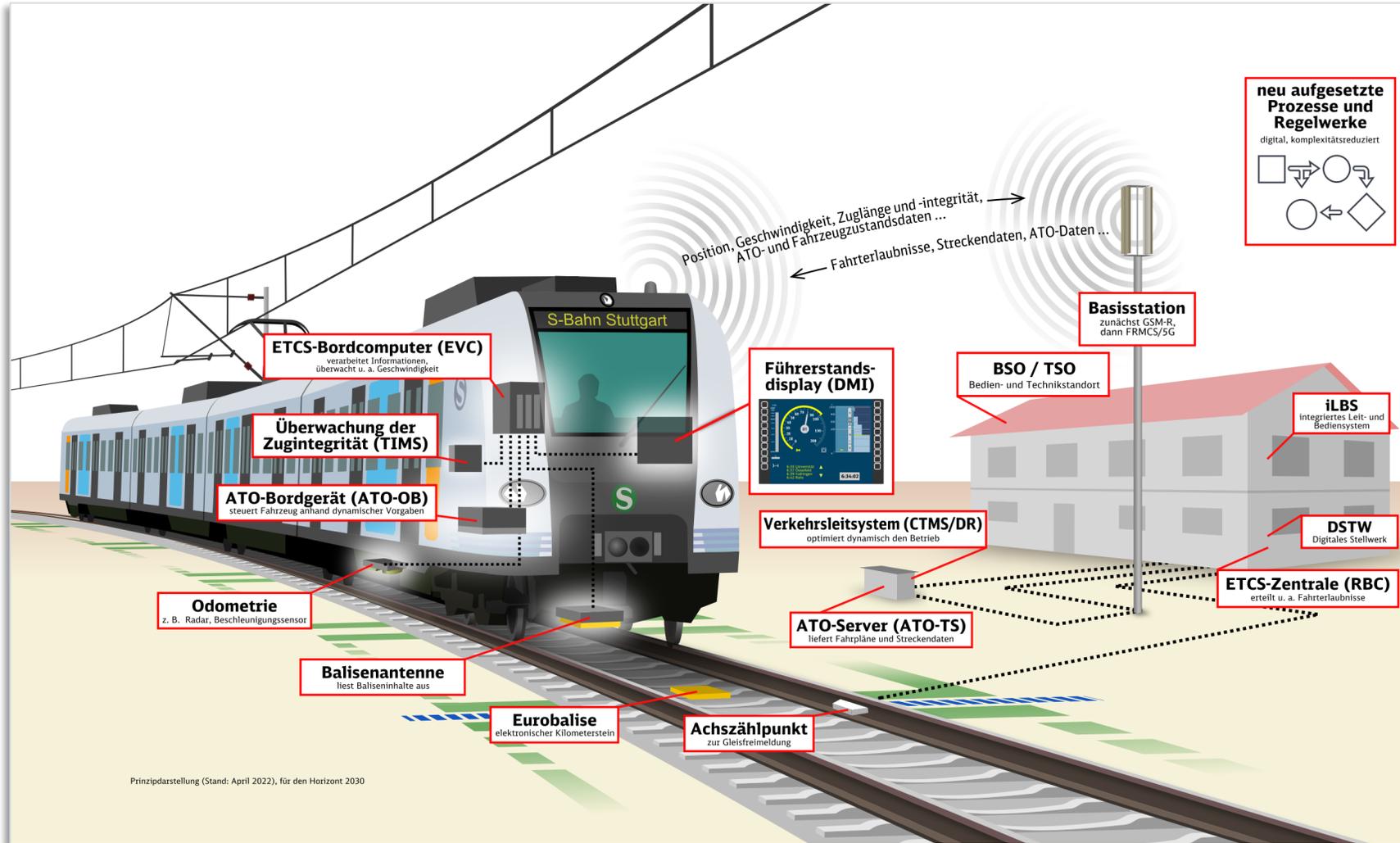


Abbildung: vereinfachte Architektur im Endzustand des DKS (mit Baustein 3, Horizont 2030)  
 Vertiefend: *Fahrzeugnachrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 9/2021 (<https://bit.ly/3tFQWUB>).

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



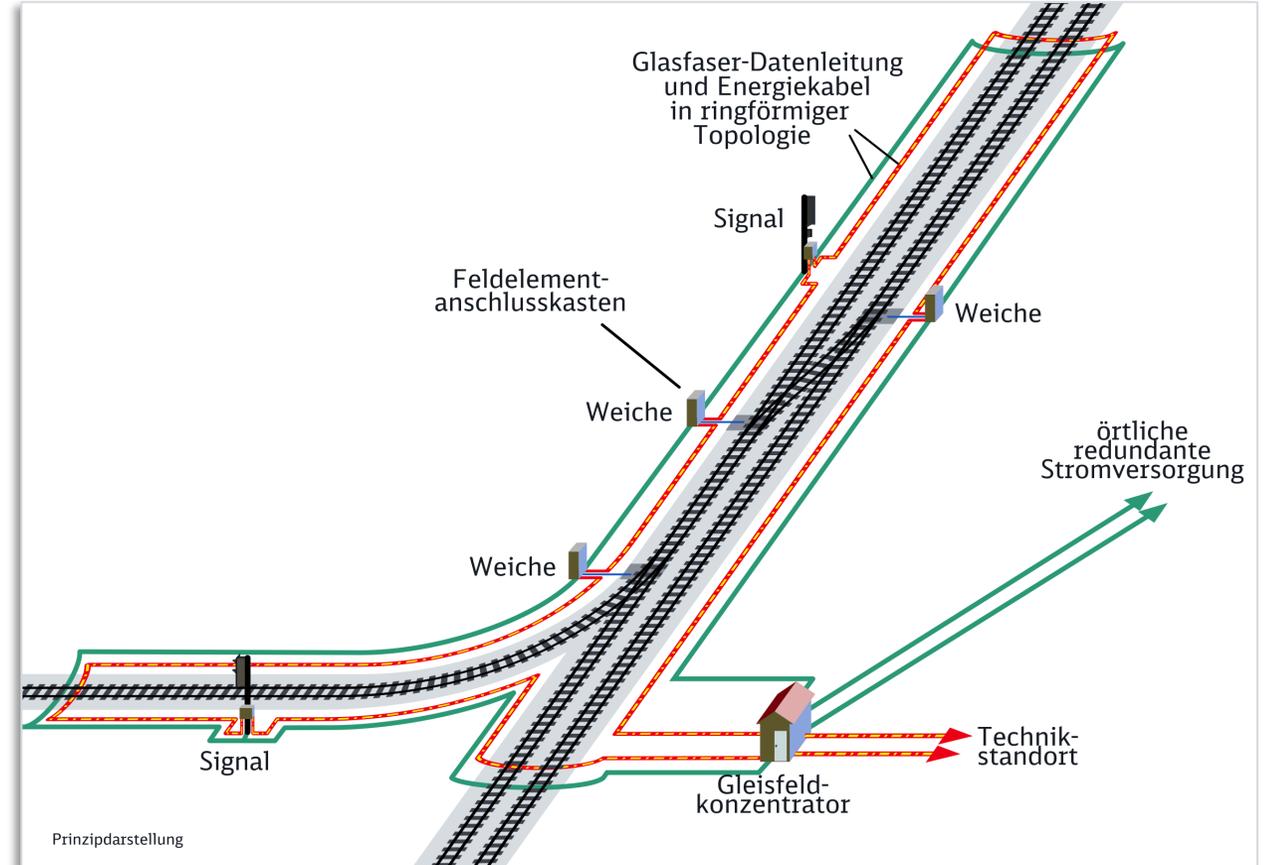
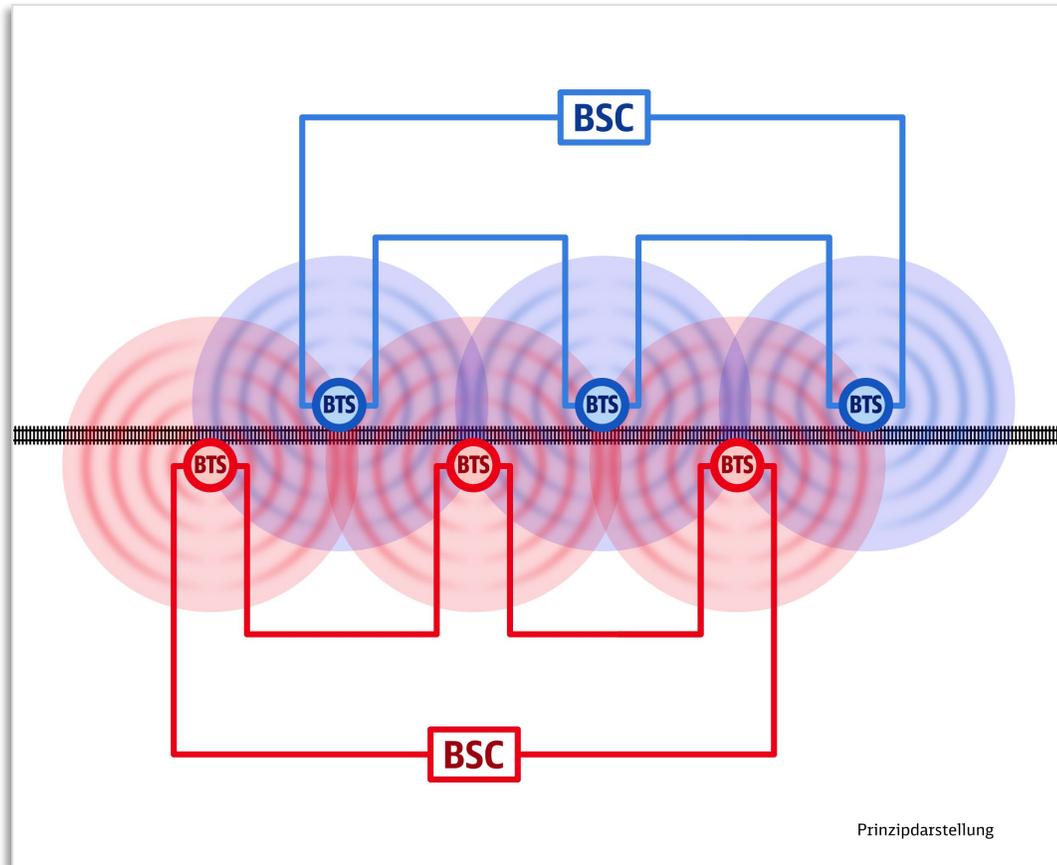
Im Deckenbereich montierter ETCS-Fahrzeugrechner (EVC)



Modulgebäude eines Gleisfeldkonzentrators (GFK)

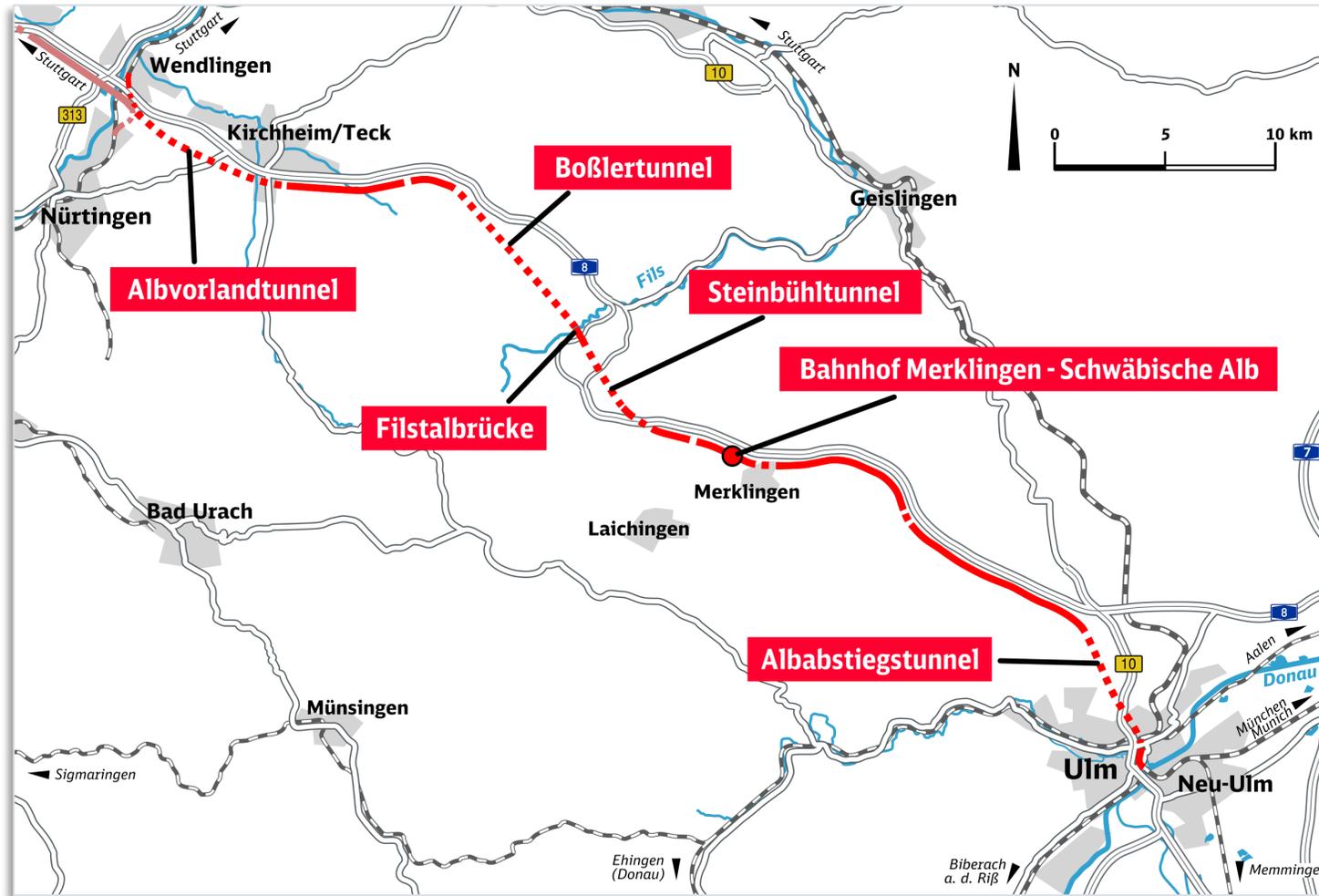
- Im November 2020 wurde der Kern der Infrastruktur an Thales vergeben. Der Aufbau im Feld ist im Gang.
- Im Juni 2021 wurde die ETCS/ATO-Nachrüstung von 333 Regional- und S-Bahn-Triebzügen an Alstom beauftragt. Testfahrten mit ersten ausgerüsteten First-of-Class-Fahrzeugen laufen, die Serienausrüstung wird vorbereitet. Ferner wurden 130 neue Doppelstock-Regionaltriebzüge an Alstom beauftragt.
- Stellwerke, ETCS und weitere Techniken werden schrittweise, von Anfang 2024 bis 2030, kommerziell in Betrieb genommen.
- Parallel zur Umsetzung wurden in Innovationskooperationen einzelne Anteile zur Anwendungsreife geführt, beispielsweise neue Fahrstraßentypen oder FRMCS-Fahrzeugausrüstung.
- Die Mittel für die Infrastruktur sind im Bundeshaushalt in weiten Teilen hinterlegt. Im Rahmen eines Modellvorhabens fördert der Bund auch die Fahrzeugausrüstung anteilig. Die EU unterstützt beides.
- Weitgehend offen ist Förderung der Fahrzeugausrüstung sowie die bauliche Umsetzung für den Baustein 3 sowie die Finanzierung einiger grundlegender netzweiter Funktionen und Techniken.

# Zwei wesentliche von dutzenden Facetten einer robusten Infrastruktur: voll redundantes GSM-R, DSTW-Gleisfeldvernetzung in Ringen



Linke 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 (<https://bit.ly/3hiu0ZL>).

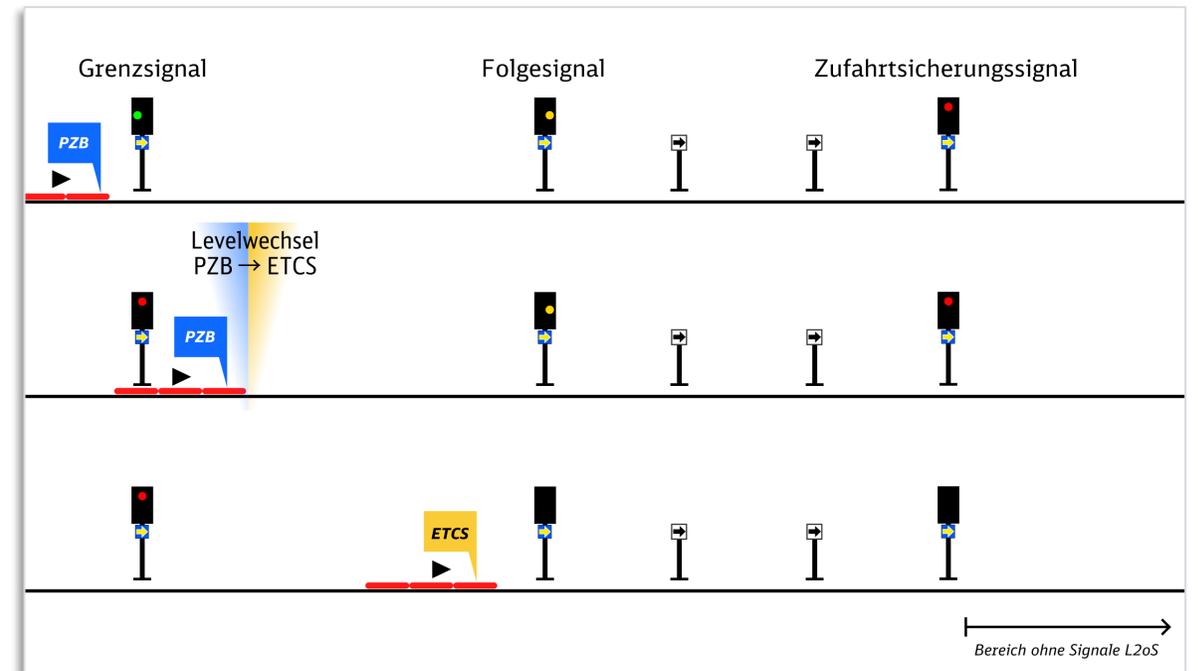
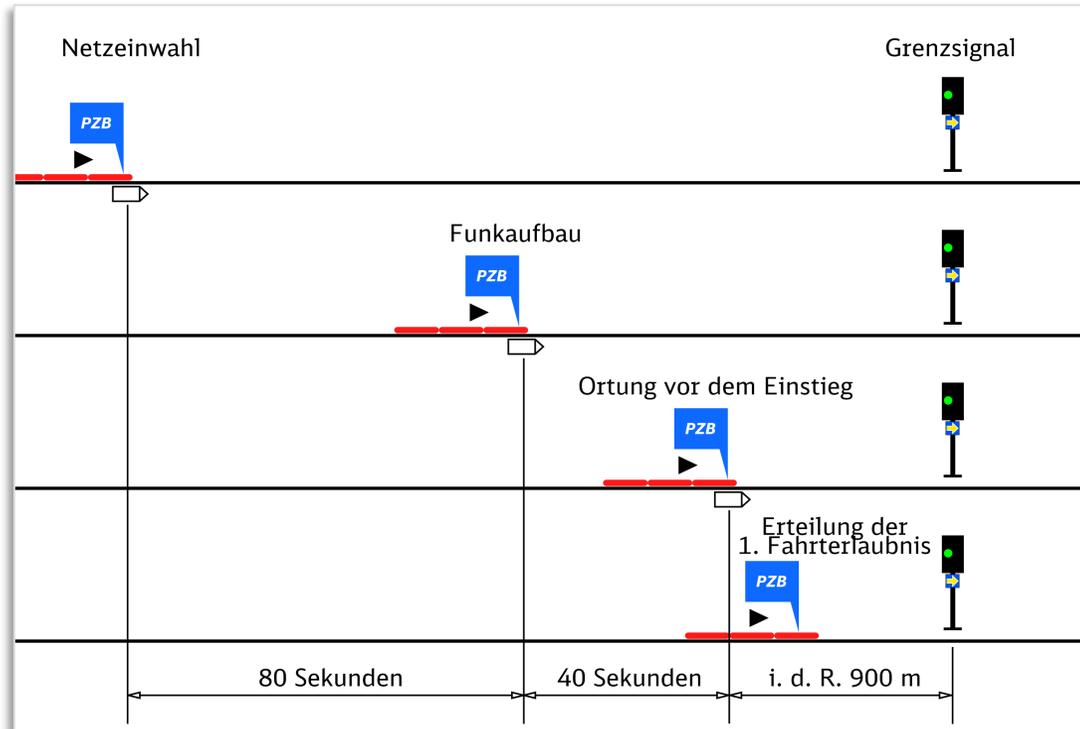
# Weit mehr als 10.000 Züge fahren bislang über die mit ETCS Level 2 „ohne Signale“ ausgerüstete Schnellfahrstrecke Wendlingen–Ulm.



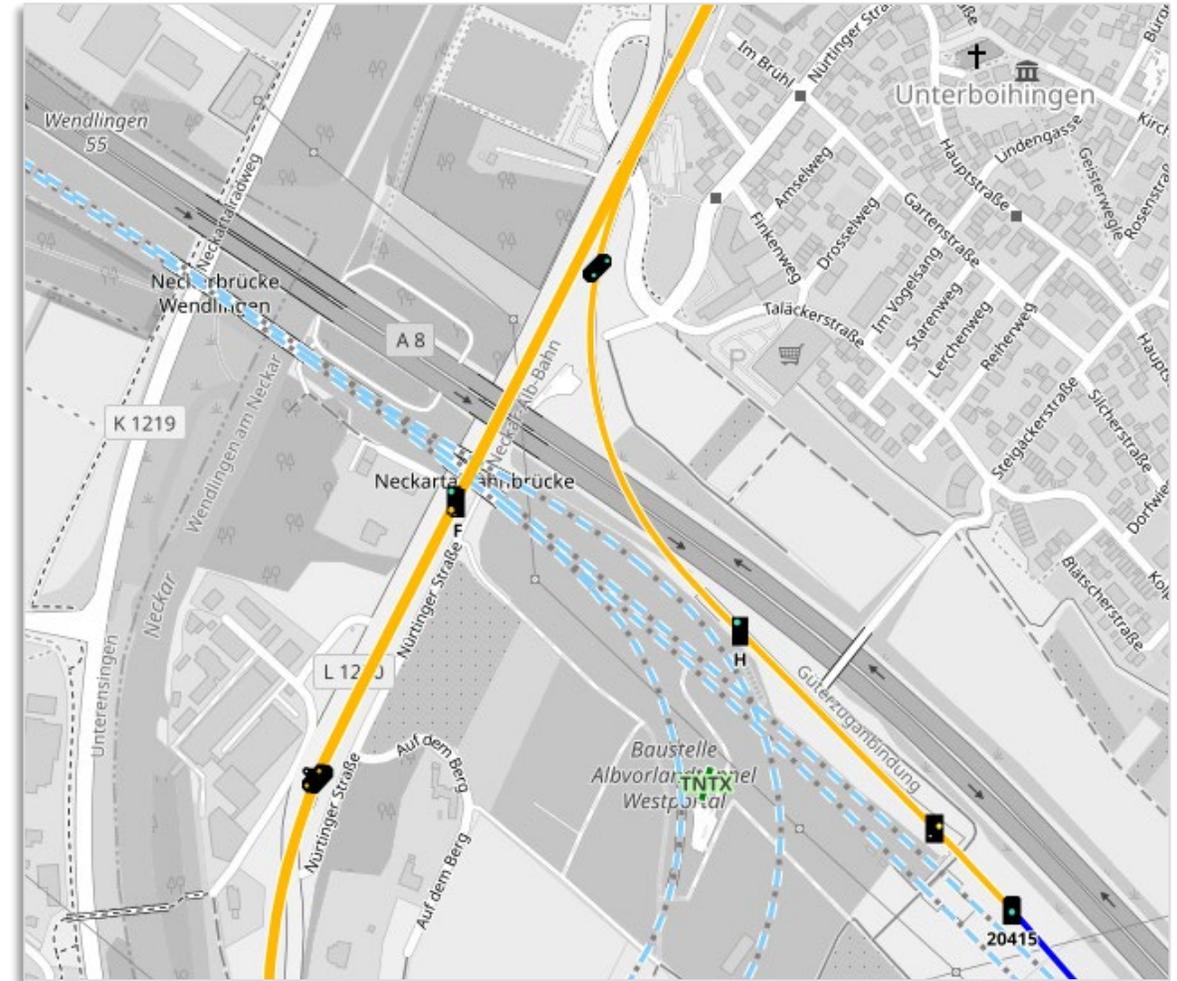
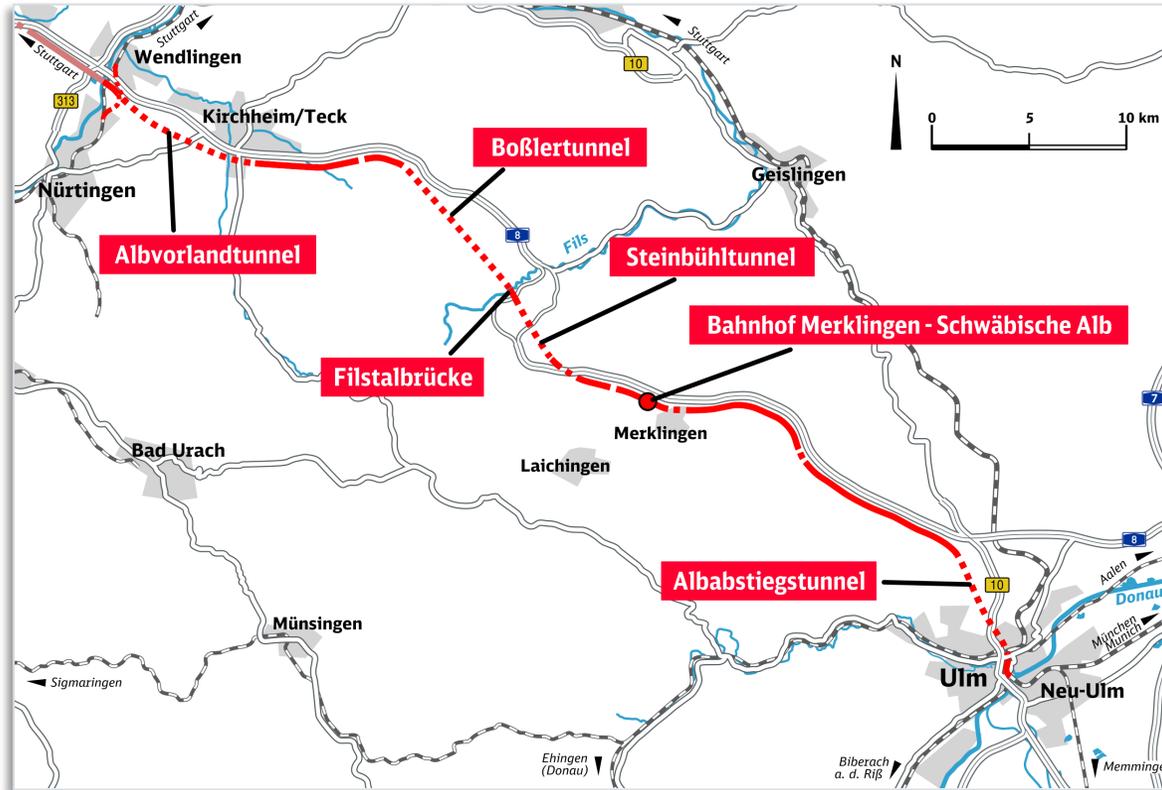
Vertiefend: ETCS auf der Schnellfahrstrecke Wendlingen–Ulm. Signal+ Draht 7+8/2023.

# Zur Erinnerung: Ablauf des Einstiegs in ETCS Level 2

## - Die Fahrterlaubnis wird bereits vor dem Einstieg erteilt.



# Ein Kette von Effekten führte zu inzwischen vier Warmstarts des hochverfügbaren RBC der Schnellfahrstrecke Wendlingen–Ulm.

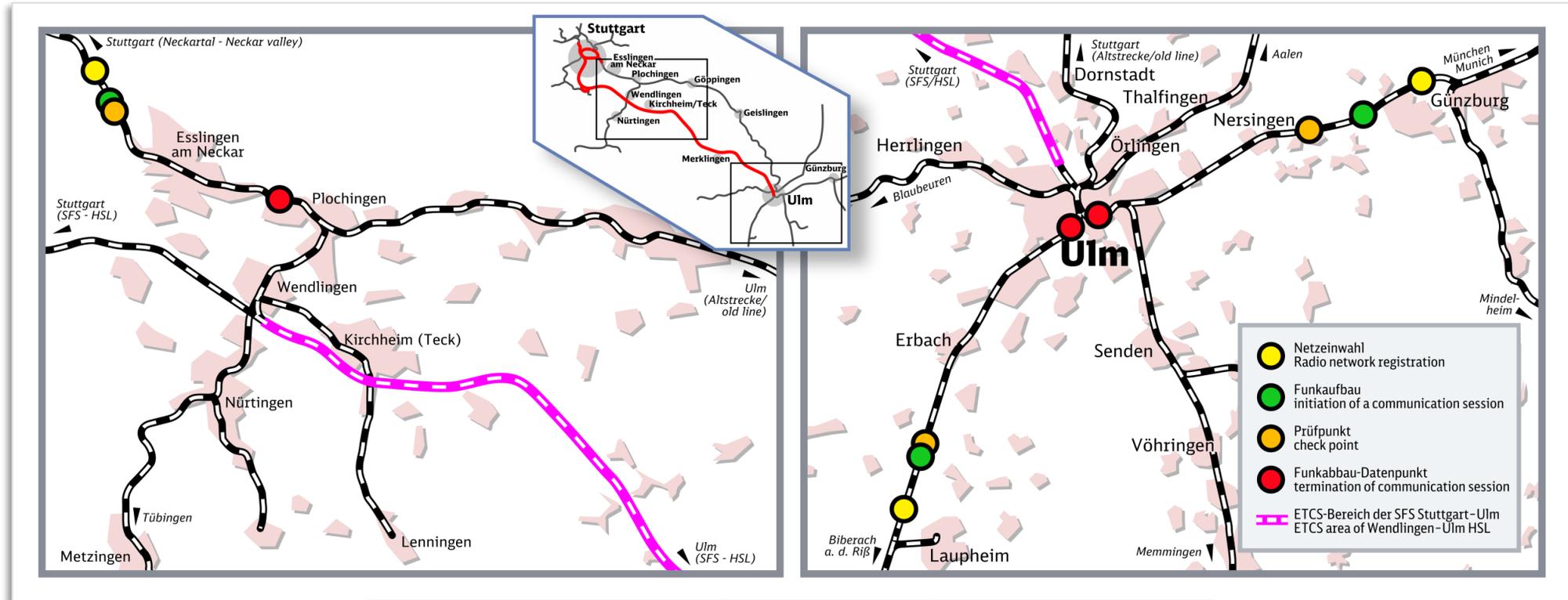


Linke Abbildung: Übersichtskarte der SFS Wendlingen–Ulm.

Rechte Abbildung: provisorisches Streckenende mit Güterzügenbindung und Grenzsignal (20415) -OpenRailwayMap, Kartendaten © OpenStreetMap-Mitwirkende

Vertiefend: ETCS auf der Schnellfahrstrecke Wendlingen–Ulm. Signal+Draht 7+8/2023.

# Mit dem betrieblichen Verfahren „Dispositive Zufahrtsicherung“ wurden bislang keine gestörten Züge vor Einfahrt auf die SFS erkannt.



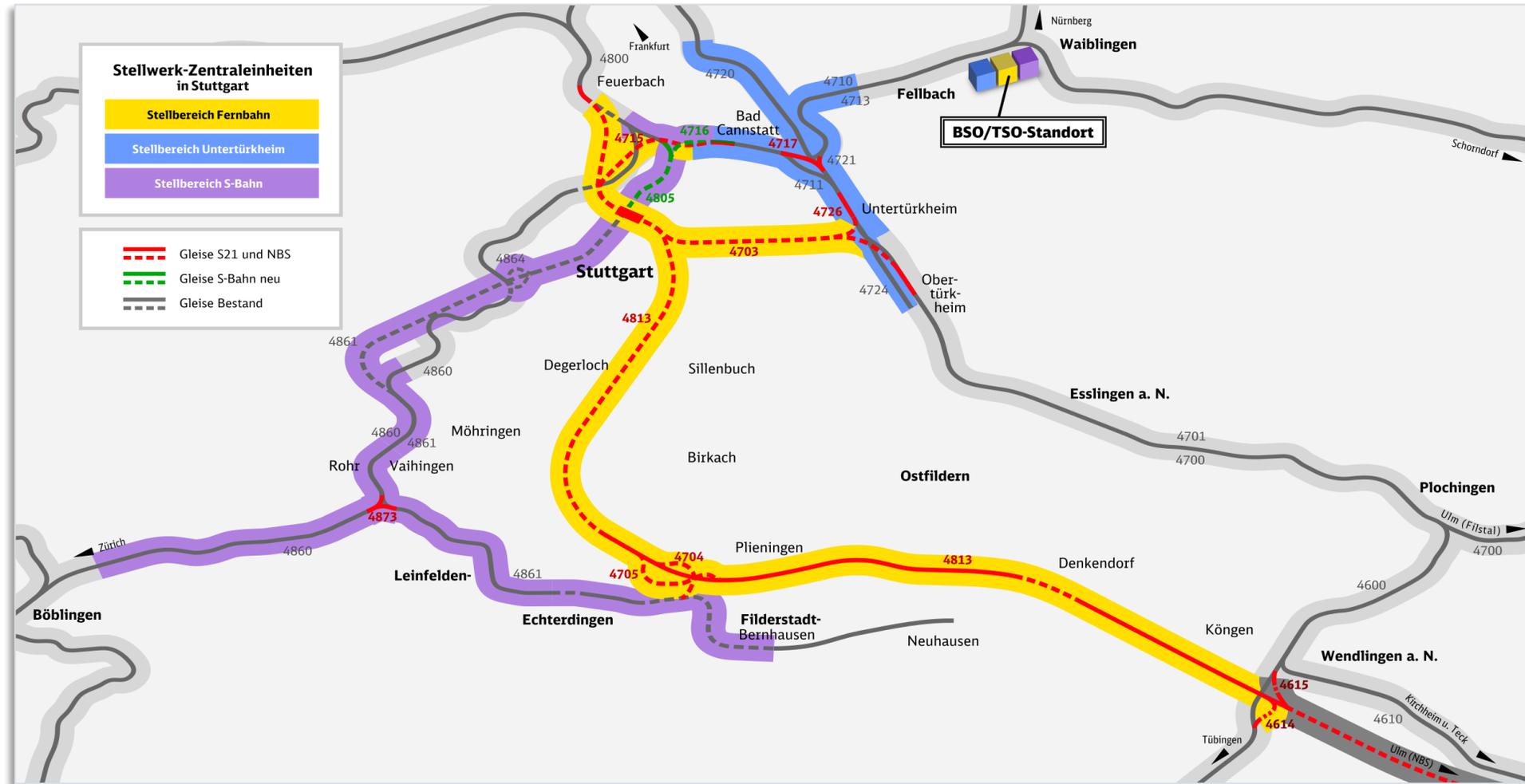
6	Stg-Obertürkheim	Esig 8,66 Ferngleise und S-Bahngleise	Testweise ETCS Funkaufbau prüfen	gilt nur für Z nach Strecke 6 (Wendlingen- Ulm)	11.12. 22	Wurde keine vorübergehende ETCS- Funkverbindung zwischen Obertürkheim und Altbach aufgebaut, unverzüglich FdI Plochingen ██████ verständigen
---	------------------	--	---	---	--------------	---

Obere Abbildung: Wesentliche Punkte der Dispositiven Zufahrtsicherung der SFS Wendlingen – Ulm

Untere Abbildung: EBUa-Auszug für das Verfahren „Dispositive Zufahrtsicherung“

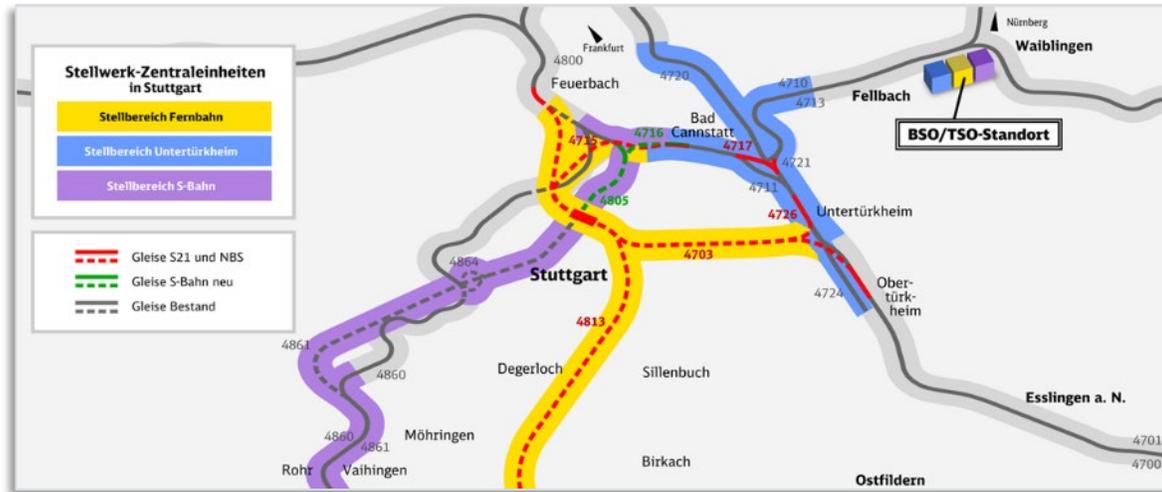
Vertiefend: ETCS auf der Schnellfahrstrecke Wendlingen – Ulm. Signal+ Draht 7+8/2023.

# Im DKS entsteht erstmals in Deutschland ein Digitales Stellwerk in einem großen Knoten.



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

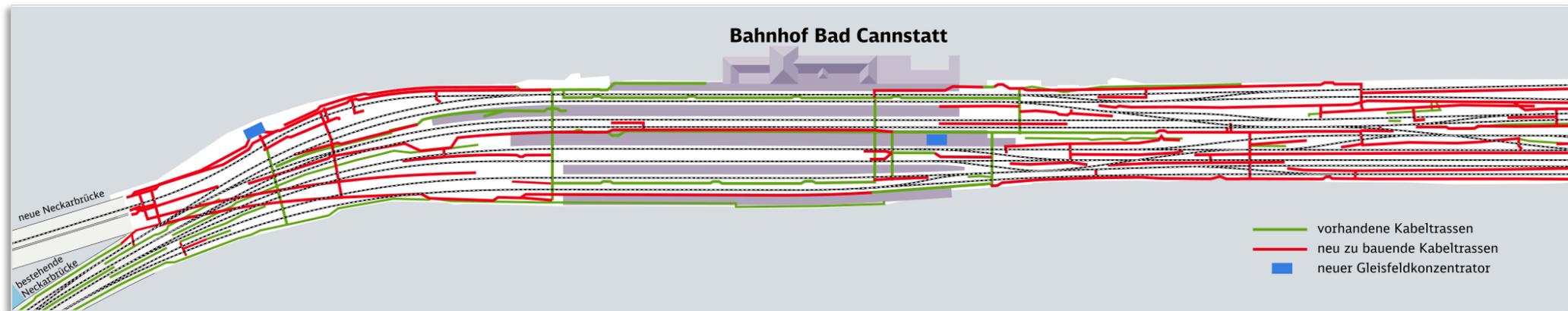
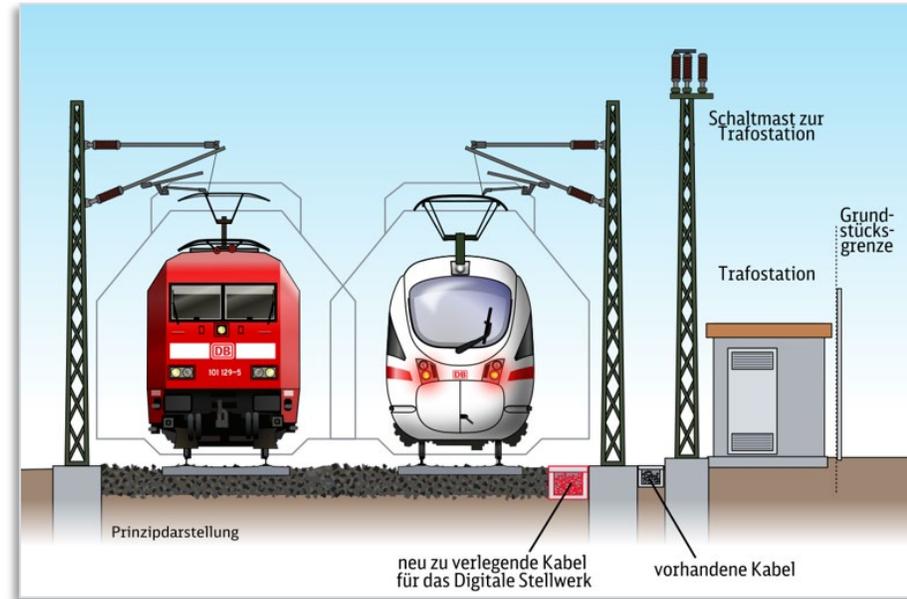
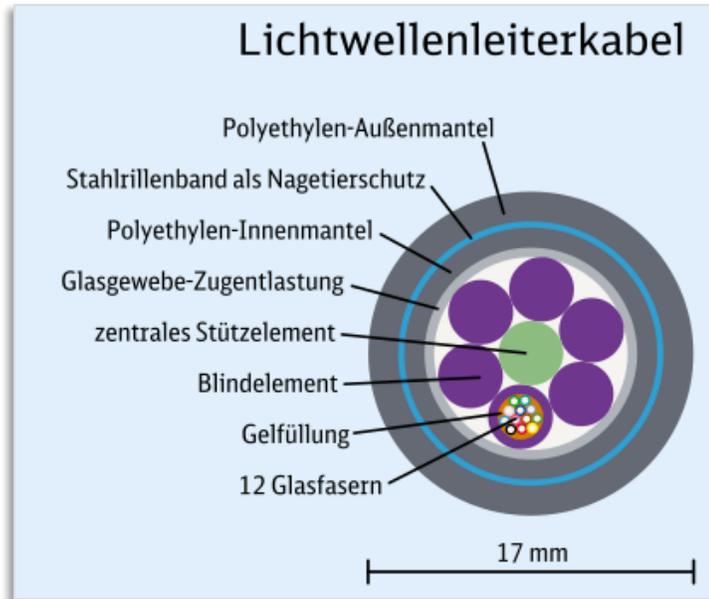
# Das Digitale Stellwerk (DSTW) ist besonders robust, führt jedoch bei Doppelausrüstung (ETCS & „Signale“) zu einem enormen Kabelaufwand.



- Der von größere Bahnhöfen geprägten Stellbereich Untertürkheim (blau in oberer Abbildung) wird vorübergehend noch weitgehend „mit Signalen“ ausgerüstet (untere Abbildung in blau). Er soll Anfang 2024 in Betrieb gehen.
- Die vorübergehende Ausrüstung der Infrastruktur führt in diesem Bereich ungefähr zu einer Verdreifachung des Verkabelungsaufwands gegenüber einem System mit L2oS.
- Alle zwischenzeitlich ergriffenen Optimierungen reichten letztlich nicht aus, um den Inbetriebnahmetermine Anfang 2024 zu halten. Daher wurden nun kurzfristige empfindliche Sperrungen, zwischen Ende April und Ende Juli, notwendig.
- Neben weiteren Optimierungen unterstreichen die Erfahrungen die dringende Empfehlung, auf eine Doppelausrüstung zu verzichten.

Vertieft: *Der Digitale Knoten Stuttgart wird Realität*. Der Eisenbahningenieur 1/2023 (<https://bit.ly/3RCeqFR>) sowie *Erfahrungen mit der Gleisfeldvernetzung im Digitalen Knoten Stuttgart (Teil 1)*. Signal+Draht 4/2023 (<https://bit.ly/41Mlkgb>).

# Facetten der Gleisfeldvernetzung: Glasfasern in Kabel, Kabelführung unter beengten Verhältnissen, Kabelführung in einem Bahnhof



Auszüge aus einem Plakat zu den „Tagen der offenen Baustelle“ 2023 (<https://bsu.link/tdob-infotafeln>)  
Vertiefend: *Erfahrungen mit der Gleisfeldvernetzung im Digitalen Knoten Stuttgart (Teil 1)*. Signal+Draht 4/2023 (<https://bit.ly/41Mlkgb>).

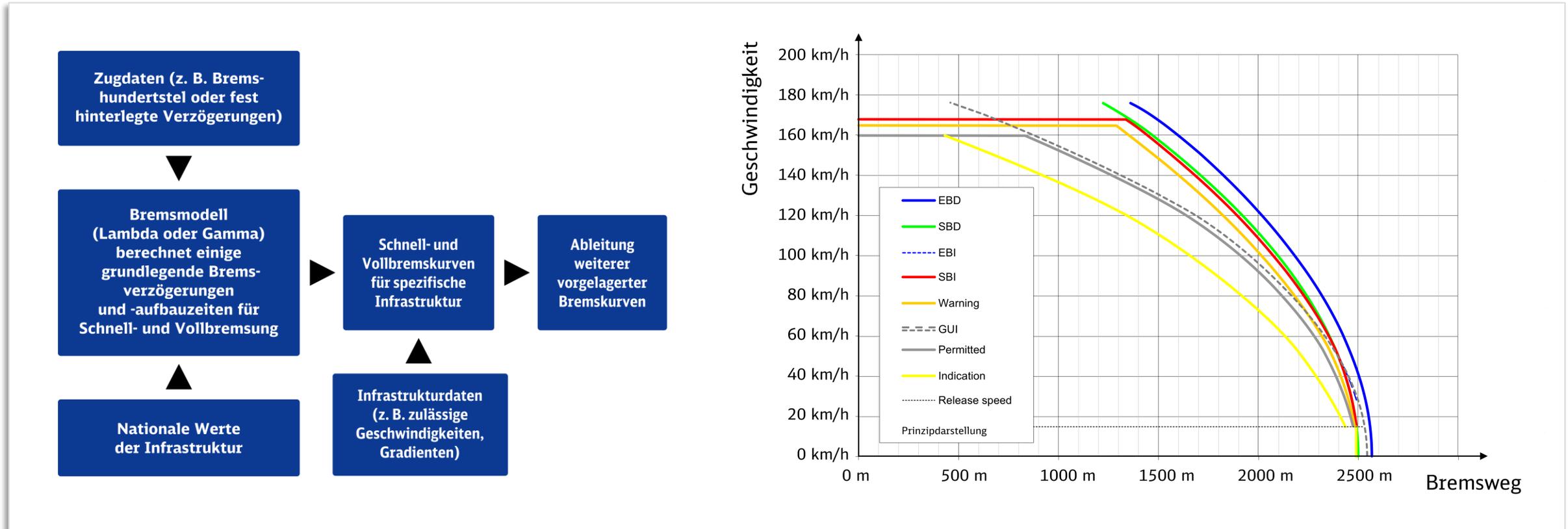
# Der Teufel steckt in unzähligen Details: Beispielsweise ist die Abfertigung im Fernverkehr neu zu organisieren.



- 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.

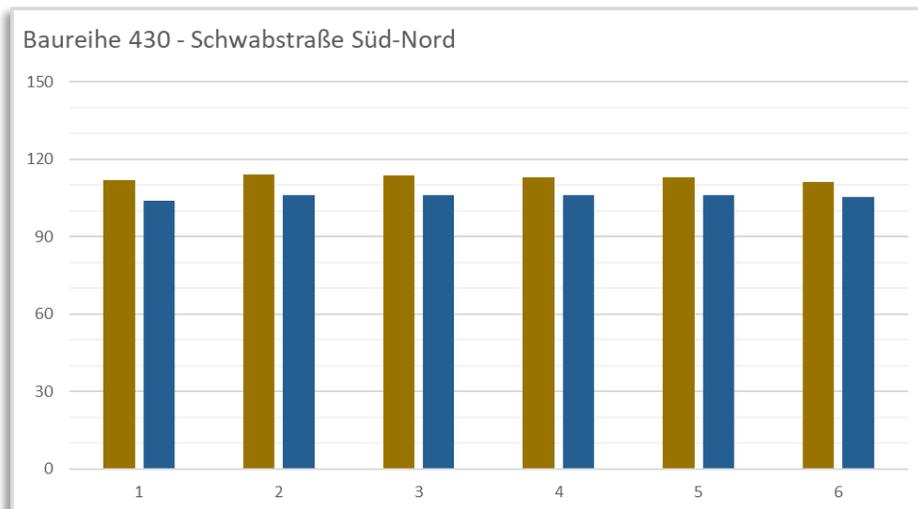
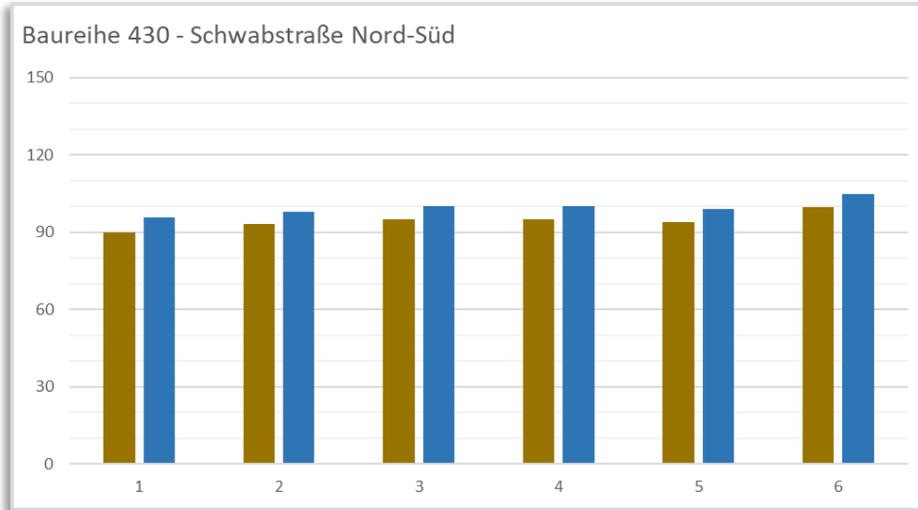
Abbildung eines Ks-Hauptsignals und eines Fahrtanzeigers:  
Quelle: Wikimedia Commons, Urheber „S. Terfloth“, CC-BY-SA-20-Lizenz

# 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.

# Das Gamma-Bremssmodell 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, Bremsleistung 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.

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

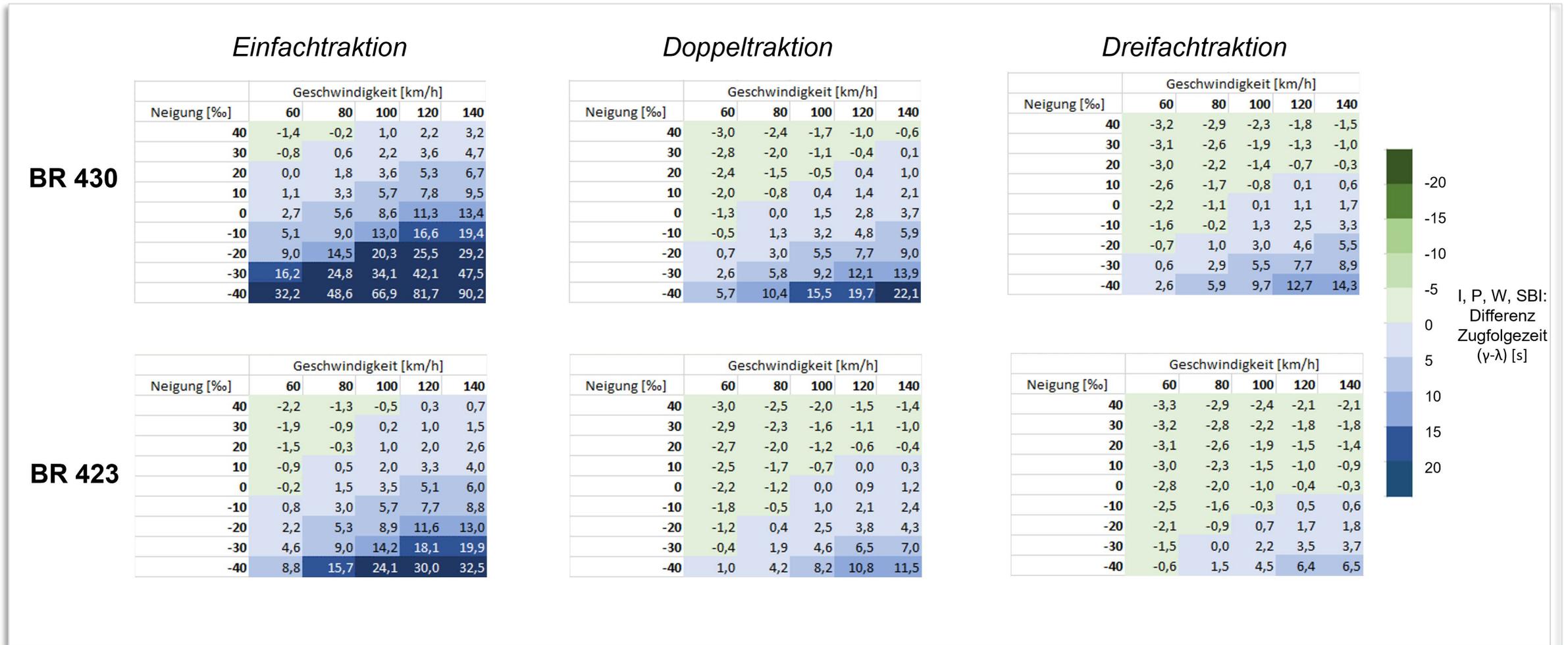
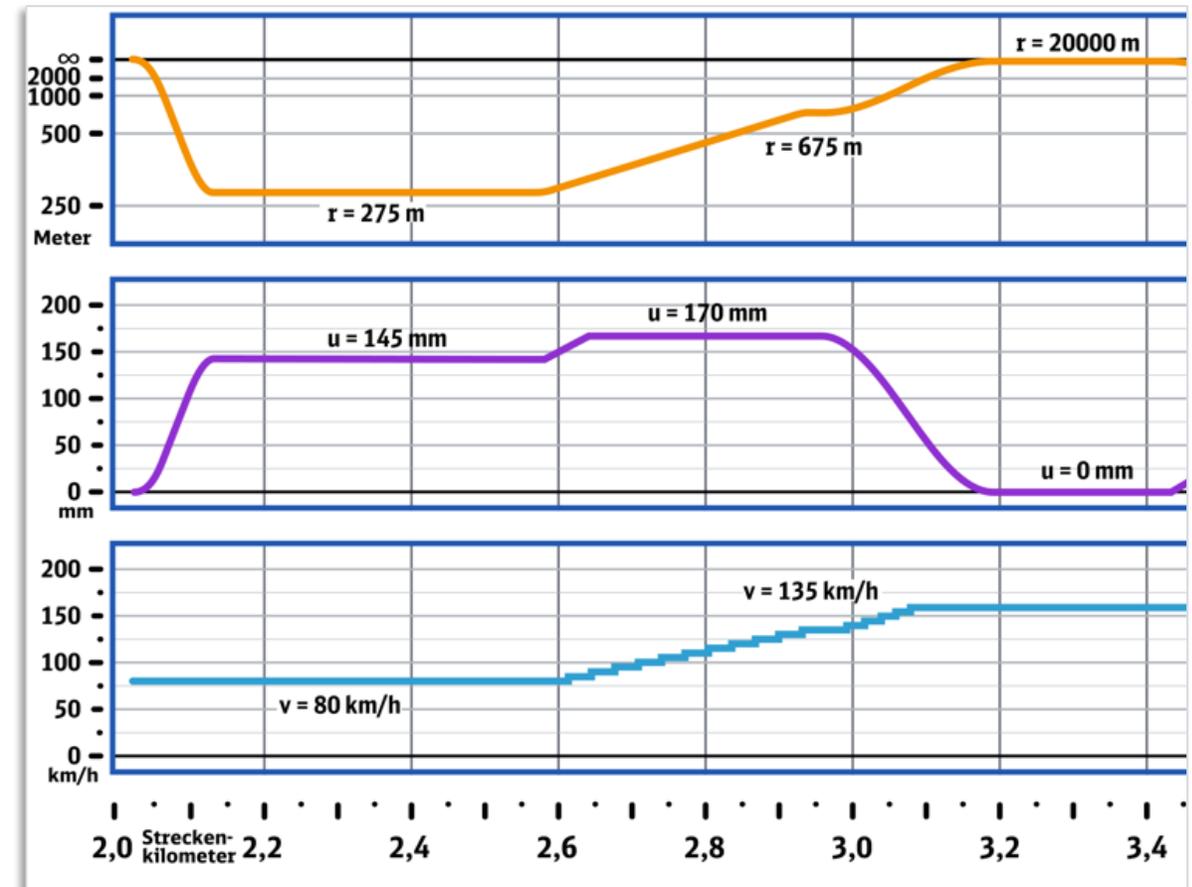
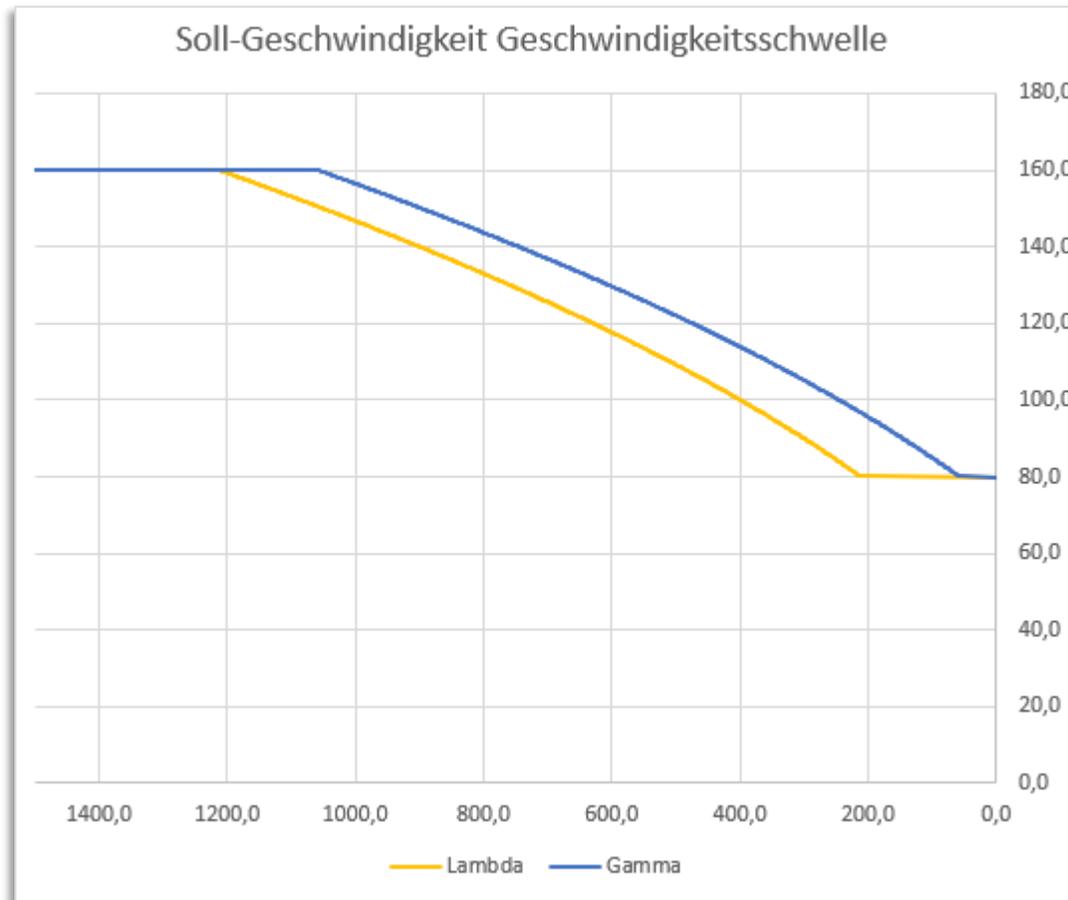


Abbildung: Unterschiede zwischen Gamma- und Lambda-Modell in Bezug auf die Zugfolgezeiten bei den S-Bahn-Baureihen 423 und 430 und konstanten Geschwindigkeiten und Neigungen. Bei grünen Werten ist das Gamma-Modell von Vorteil, bei blauen Lambda. Vertiefend: *ETCS-Bremskurven im Spiegel der Praxis*. Der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

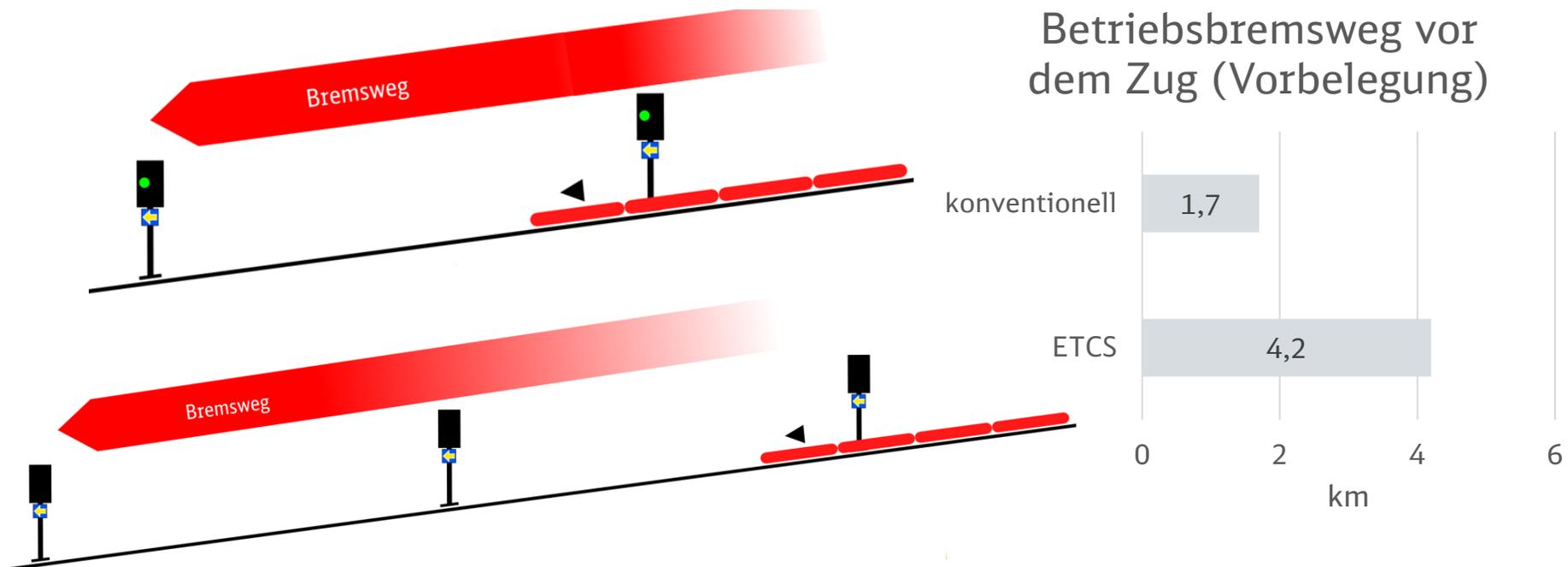
# Optimierungen im Zusammenspiel von Fahrzeugen und Infrastruktur: beispielsweise ETCS-Bremskurven und -Geschwindigkeitsprofile



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 sowie *Der Pfaffensteigtunnel nimmt Kontur an*. Der Eisenbahningenieur 11/2022 (<https://bit.ly/3UmnvCy>).

# Allerdings kann eine bloße, nicht optimierte ETCS-Fahrzeugausrüstung 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:



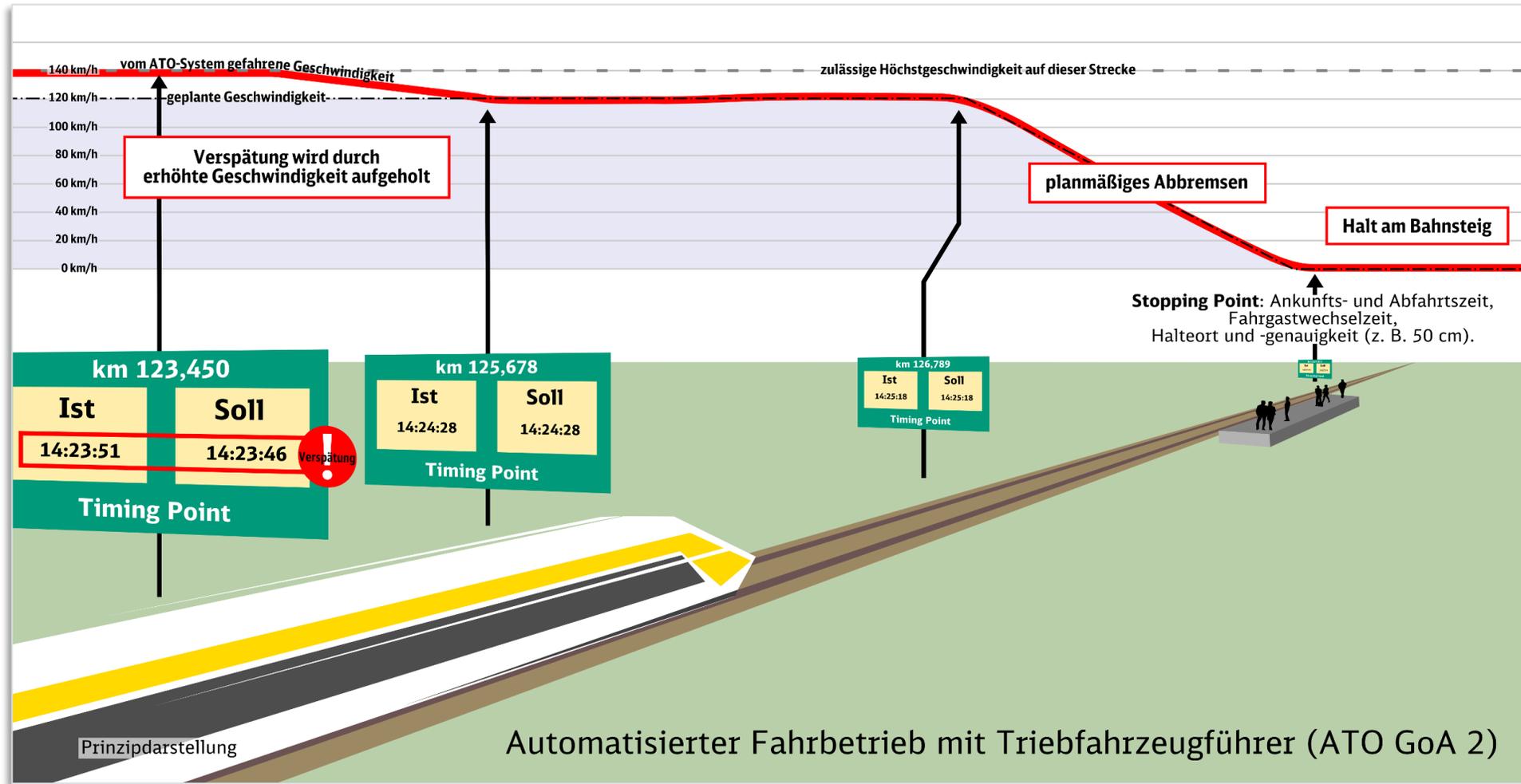
Der Zug verzehrt mit ETCS im Zulauf auf Stuttgart Hbf deutlich mehr Kapazität als mit konventioneller Technik – trotz optimierter Infrastrukturtechnik (Blockteilung, Laufzeiten).

Notwendiger Bremsweg vor dem Zug für unbehinderte Fahrt (Vorbelegung), wie er in der Fahrplankonstruktion unterstellt wird.

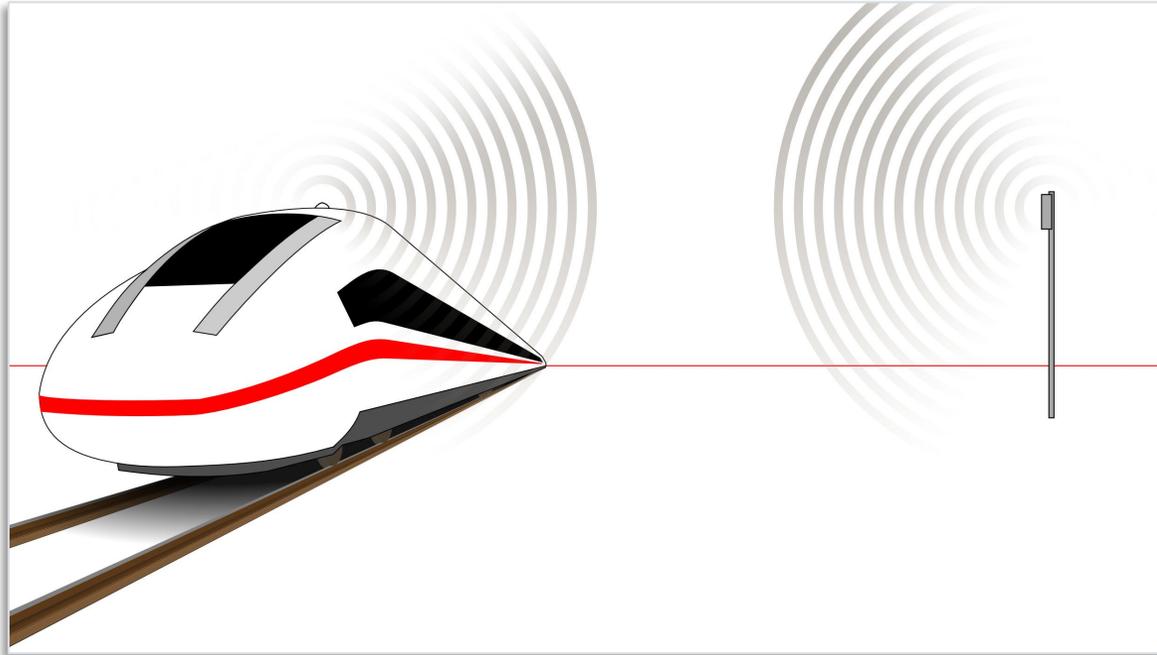
Konventionell: 1,2 km typischer Vorsignalabstand (ehemalige Planung im Fildertunnel) zzgl. 12 s Sichtzeit bei 160 km/h

ETCS: Vorgelagerte Indication-Bremskurve aus 160 km/h, abgeleitet aus Guidance Curve von 0,5 m/s<sup>2</sup> in 25 Promille Gefälle => Bremsverzögerung von rund 0,25 m/s<sup>2</sup>.

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



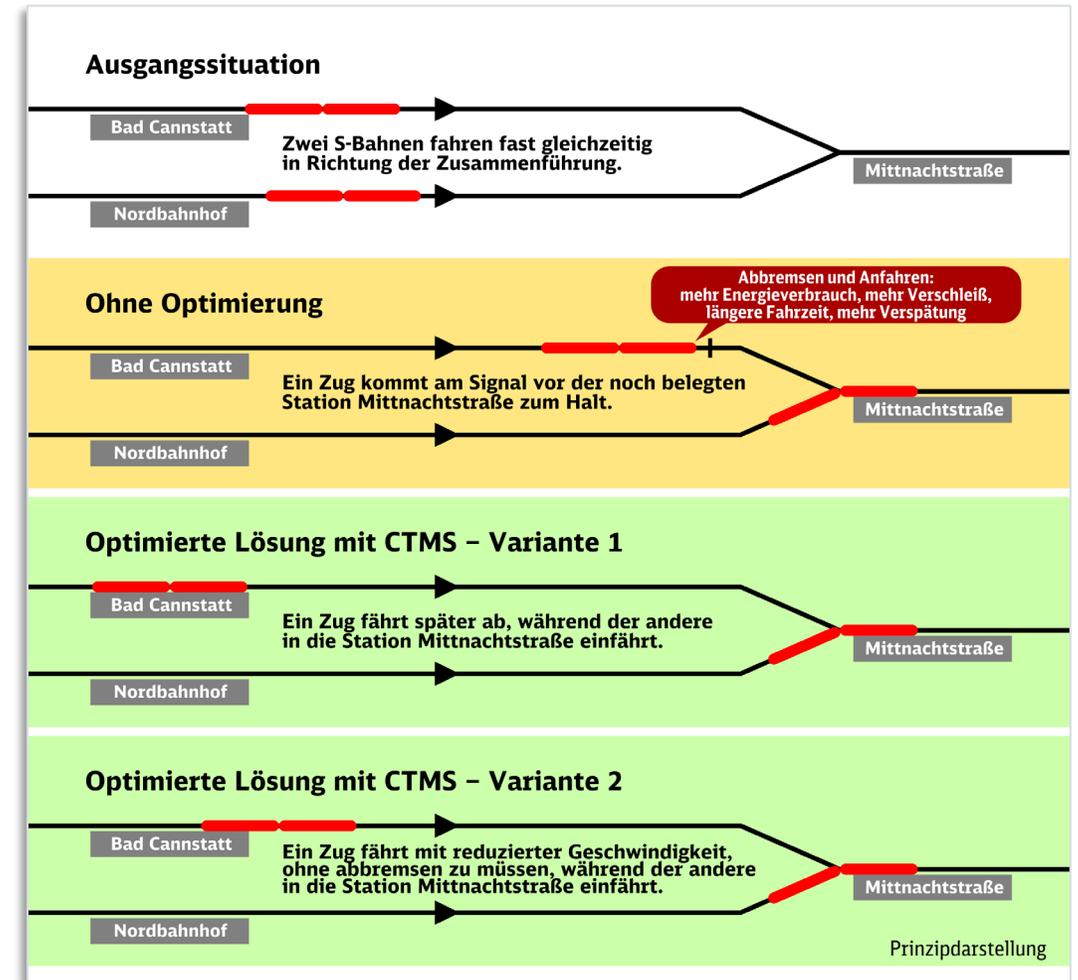
# Zahlreiche Daten ebnen den Weg für viele Optimierungen, beispielsweise mit dem Verkehrsmanagementsystem CTMS.



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/3DHZ10S>) sowie *Innovationskooperation Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart*, Signal+Draht 9/2022 (<https://bit.ly/3dxD0Z6>).



# 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-Bremssmodell	kürzere Vorbelegung	optimiert (Gamma-Bremssmodell)	nicht optimiert (Lambda-Bremssmodell)
Relevante Bremsverzögerung und Bremskurve für Zugfolge (Kapazität)	kürzere Vorbelegung	<b>(&gt;)1,0 m/s<sup>2</sup></b> (mit ATO nahe EBI)	<b>0,5 m/s<sup>2</sup></b> (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.

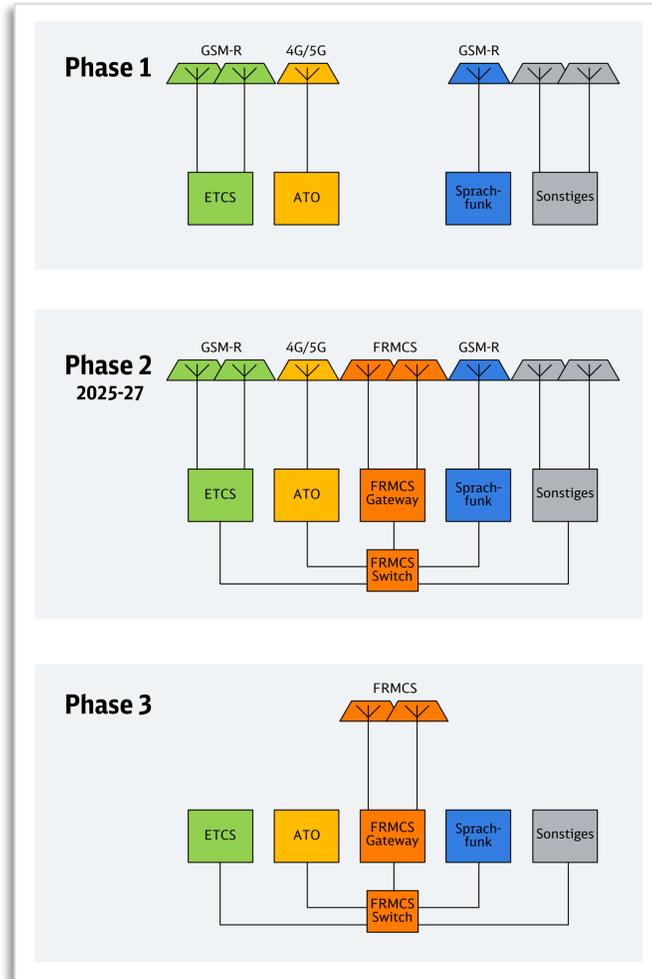
# Feinheiten in der Fahrzeugausrüstung können einen erheblichen Nutzen in der Infrastruktur entfalten.



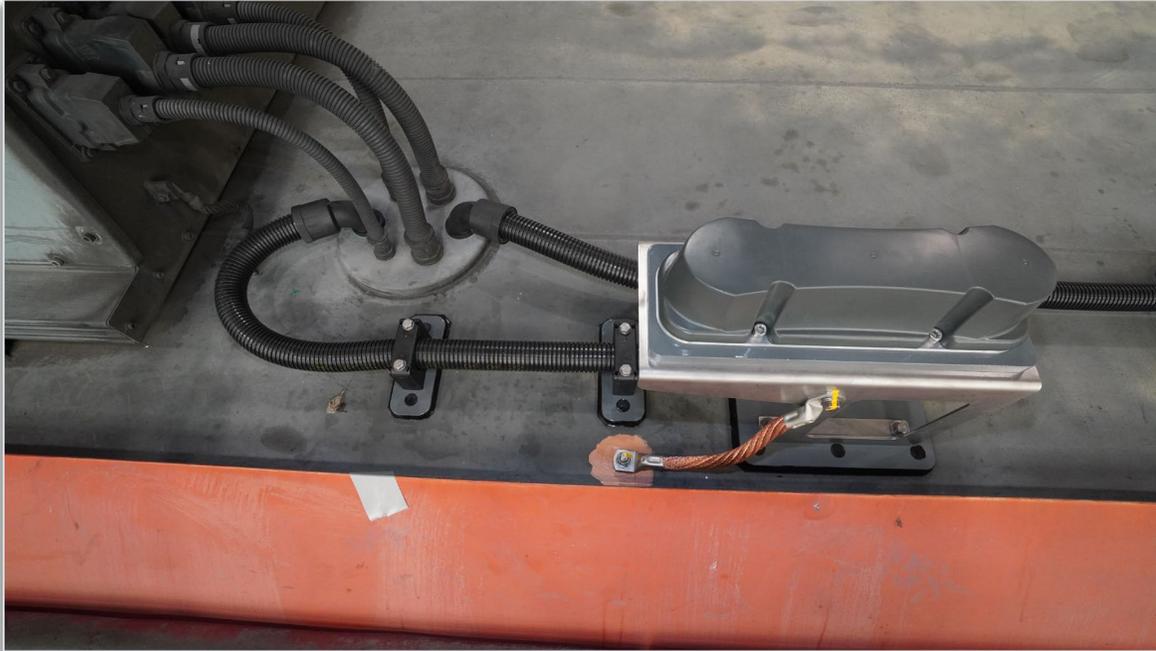
Fahrzeugausrüstung	(potenzielle) Wirkung in der Infrastruktur
ETCS-Ausrüstung	Verzicht auf Doppelausrüstung der Infrastruktur
ETCS mit SRS 3.6.0	Spätere Bremsenansatzpunkte
Cold Movement Detection	wesentlich weniger Balisen in Bahnhöfen
ATO GoA 2	Vermeidung von Fahrwegverschleiß
Fahrzeugzustandsdaten (TCR)	Präzisere Regelung durch CTMS
Baseline 4	Verzicht auf Sperrsignale (neue Betriebsart SM)
Erweitertes GSM-R-Frequenzband	Vereinfachte Funknetzplanung
verkürzte Verarbeitungszeiten	sehr kurze Blöcke
...	...

Vertiefend: *Fahrzeugnausrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 9/2021 (<https://bit.ly/3tFQWUB>) sowie *Förderung der DSD-Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart*. Der Eisenbahningenieur 4/2023 (<https://bit.ly/3N24h5o>) und *FRMCS-Ausrüstung von 463 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart*. Signal+Draht 5/2023 (<https://bit.ly/3C5ZetG>) sowie [https://de.wikipedia.org/wiki/Supervised\\_Manoeuvre](https://de.wikipedia.org/wiki/Supervised_Manoeuvre)

# 463 Triebzüge für den Kern des DKS werden zweistufig mit dem GSM-R-Nachfolgesystem FRMCS ausgerüstet.



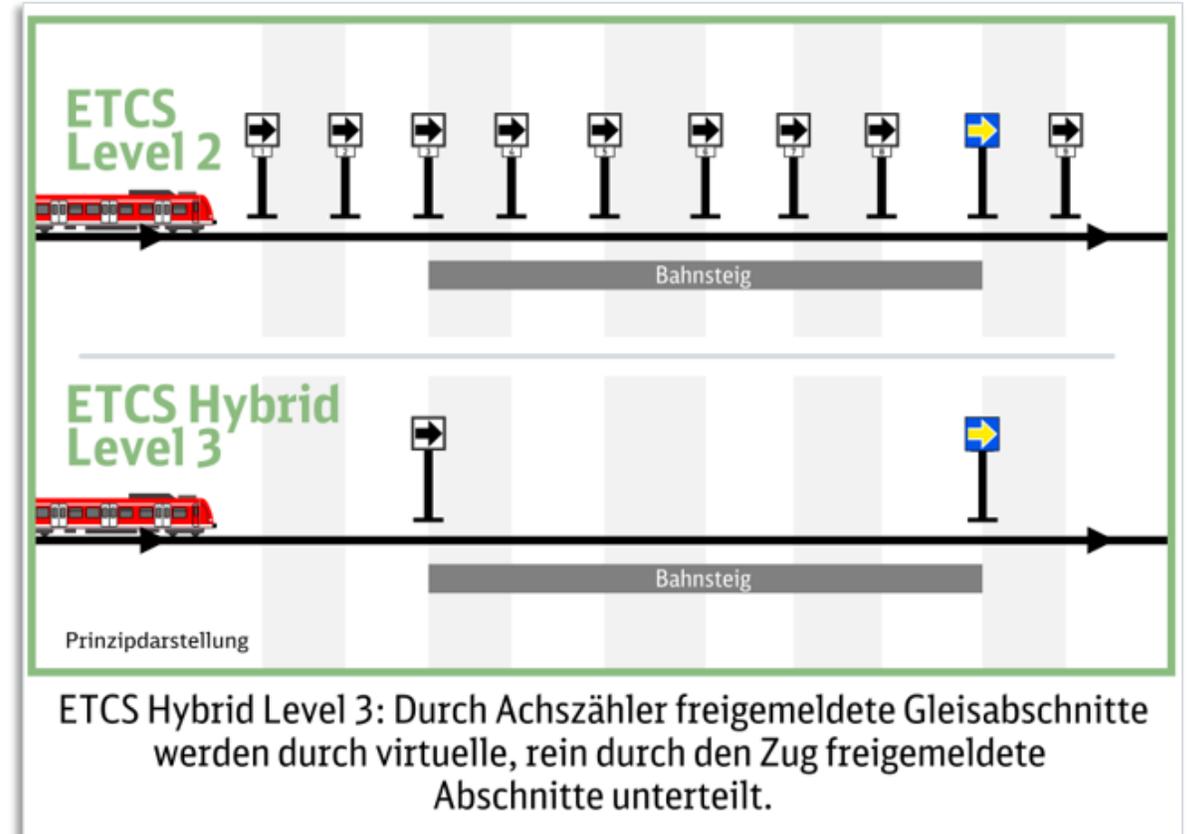
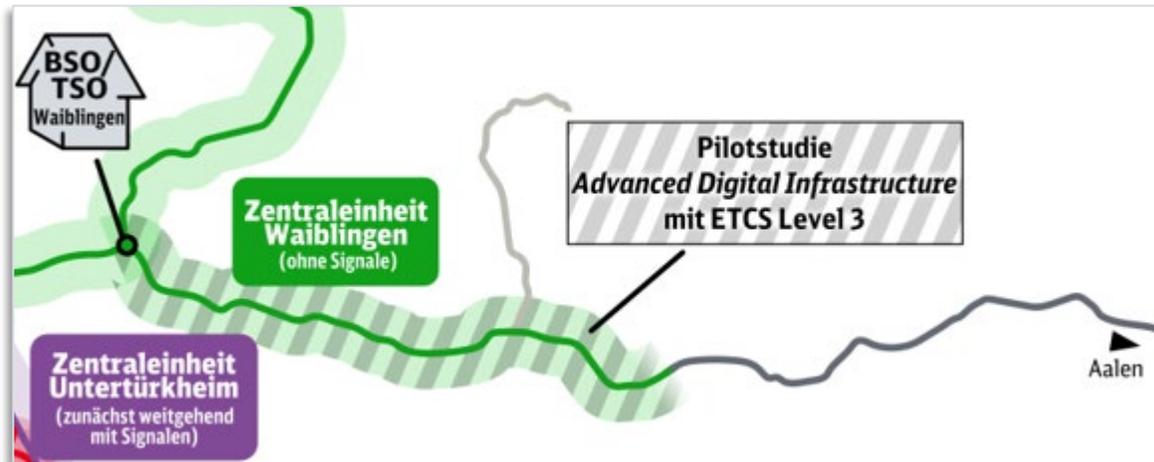
# „Digitale“ Leistungspotenziale zeigen sich immer wieder an gänzlich unerwarteten Stellen, z. B. durch schneller ladende Fahrpläne.



- 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>).

# Die weitgehende DSD-Fahrzeugausrüstung (inkl. Level 3 und TIMS) eröffnet Potenziale für eine massiv vereinfachte Infrastruktur (ADI).

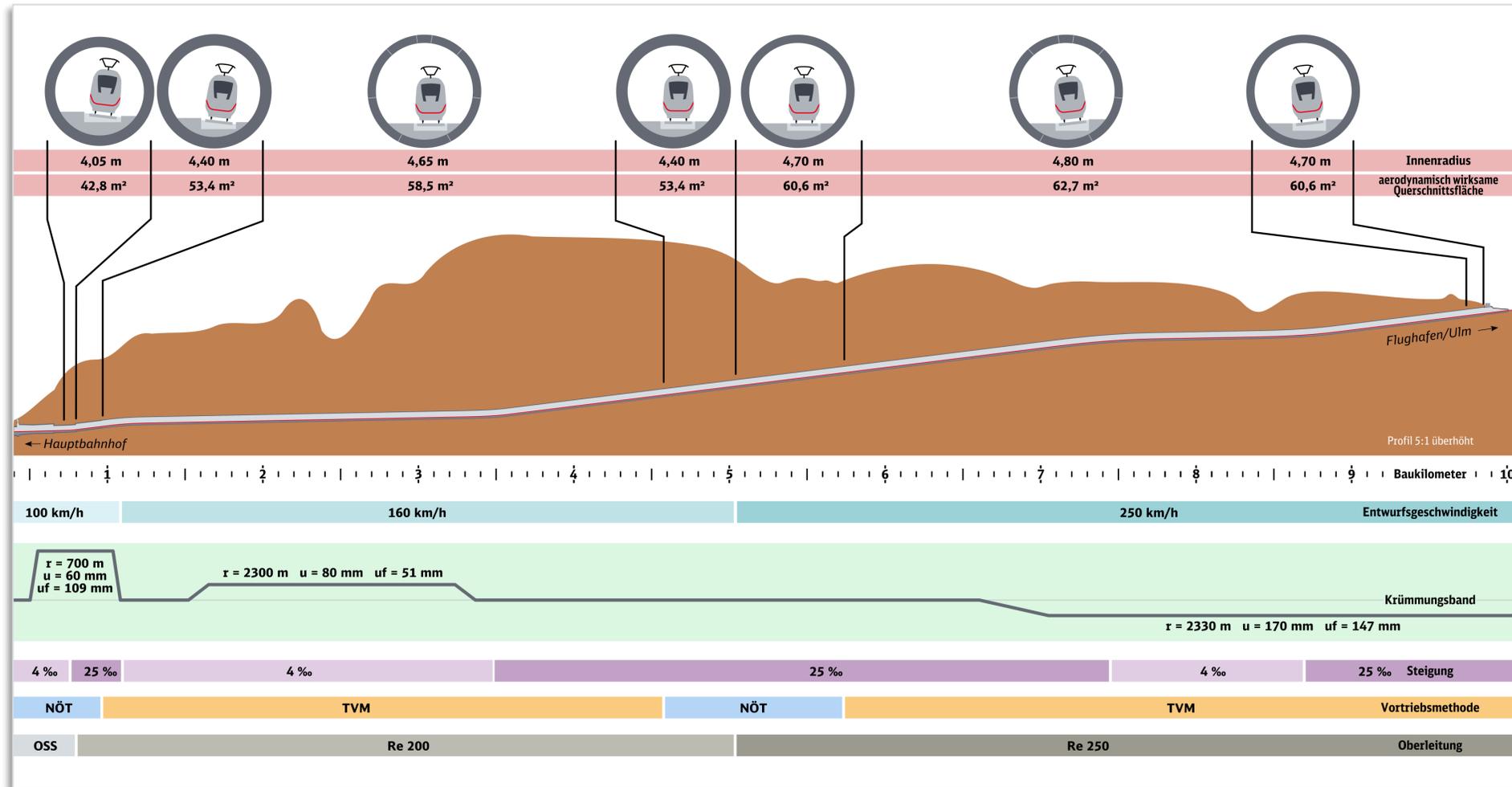


Links: Untersuchungsraum für eine laufende Studie zur möglichen Pilotierung der *Advanced Digital Infrastructure* (ADI), auf der Achse Stuttgart–Aalen–Nürnberg.

Auszüge aus einem Plakat zu den „Tagen der offenen Baustelle“ 2023 (<https://bsu.link/tdob-infotafeln>)

Vertiefend: *Methode zur Optimierung einer Blockteilung von ETCS Hybrid Level 3 am Beispiel des Digitalen Knotens Stuttgart*. Studienarbeit TU Dresden 2023 (<https://bit.ly/3L7LFhg>)

# Der mit bis zu 250 km/h befahrbare Fildertunnel in Stuttgart überwindet rund 150 Höhenmeter.



# Eine von vielen Wechselwirkungen: Oberleitung und Bahnenergieversorgung 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.“



# Die DSD-Nachrüstung einer Baureihe ist in der Regel mit mehreren First-of-Class-Zügen und weiteren Prototypen verbunden.

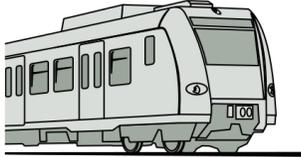
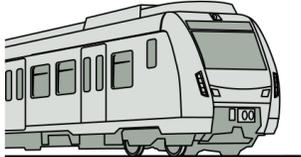
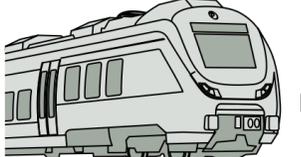
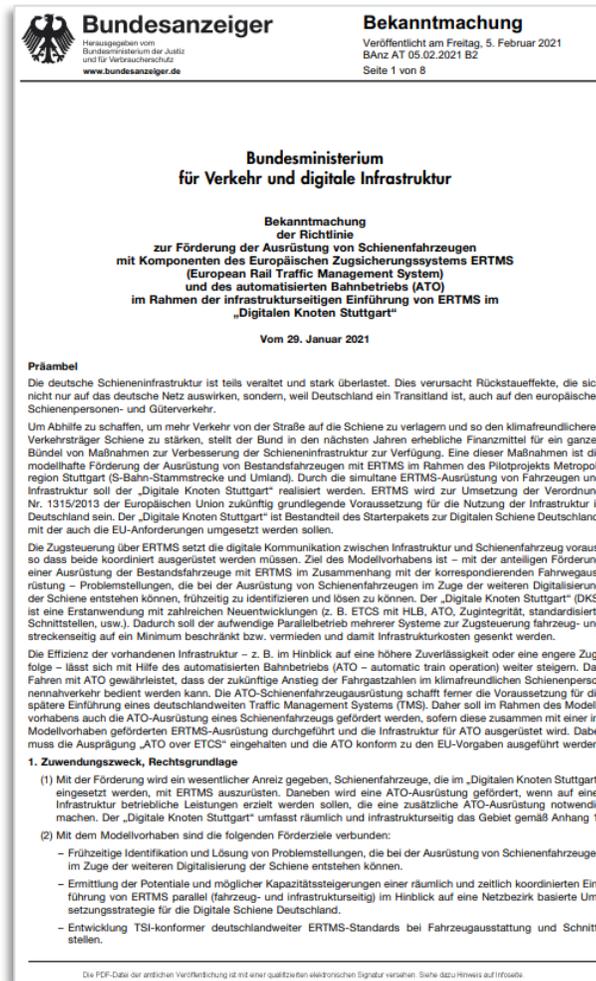
Baureihe	Hersteller	Stückzahl	Typ	Anzahl First of Class	zusätzliche Prototypen	Gründe für Notwendigkeit
 BR 423 S-Bahn	ALSTOM	60		1	2	
 BR 430 S-Bahn	ALSTOM	97 58	(BR 430.0) (BR 430.2)	1 1	1 1	zwei Generationen, 2. Serie nach 4. Eisenbahnpaket in Betrieb genommen und später entwickelt/gefertigt
 Flirt 3 Regionalverkehr	STADLER	13 9 19 14 11	(3-teilig) (4-teilig) (5-teilig) (6-teilig) (XL, 3-tlg.)	5	2	fünf verschiedene Längen, unterschiedliche Zugbeeinflussungssysteme
 Talent 3 Regionalverkehr	ALSTOM	26 26	(3-teilig) (5-teilig)	2	1	zwei Zuglängen
		<b>zusammen: 333</b>		<b>10</b>	<b>7</b>	

Abbildung: Stand April 2023.

Vertiefend: Förderung der DSD-Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart. Der Eisenbahningenieur 4/2023 (<https://bit.ly/3N24h5o>).

# Eine klug gestaltete Koordination und angemessene Förderung sind zwei wesentliche Elemente für die flächenhafte Fahrzeugausrüstung.



- Der Bund fördert im DKS im Rahmen eines Modellvorhabens erstmals anteilig die DSD-Fahrzeugausrüstung, mit fast einer halben Milliarde Euro.
- Die Förderung ist für Triebzüge an 24 technische Bedingungen geknüpft, darunter ATO GoA 2, ETCS Level 3, FRMCS und optimierte Bremskurven.
- Diese sind für einen Großteil der im DKS verfolgten Kapazitätssteigerungen elementar und ebnet den Weg für ein insgesamt einfacheres, robusteres und kostengünstigeres Gesamtsystem.
- Sie können größtenteils jedoch nicht über technische Netznutzungsbedingungen gefordert werden.
- Etwa 90 Prozent der Kosten der Serienausrüstung von Triebzügen im DKS-Kern fallen für ETCS an, auf sämtliche weiteren Optimierungen entfallen nur etwa 10 Prozent.
- Eine erste Evaluierung des Modellvorhabens wurde abgeschlossen, die Ergebnisse weitgehend veröffentlicht.
- Koordination und Förderung sind zwei elementare Elemente, neben beispielsweise Zugangsbedingungen, Preisdifferenzierung und Nutzentransparenz.

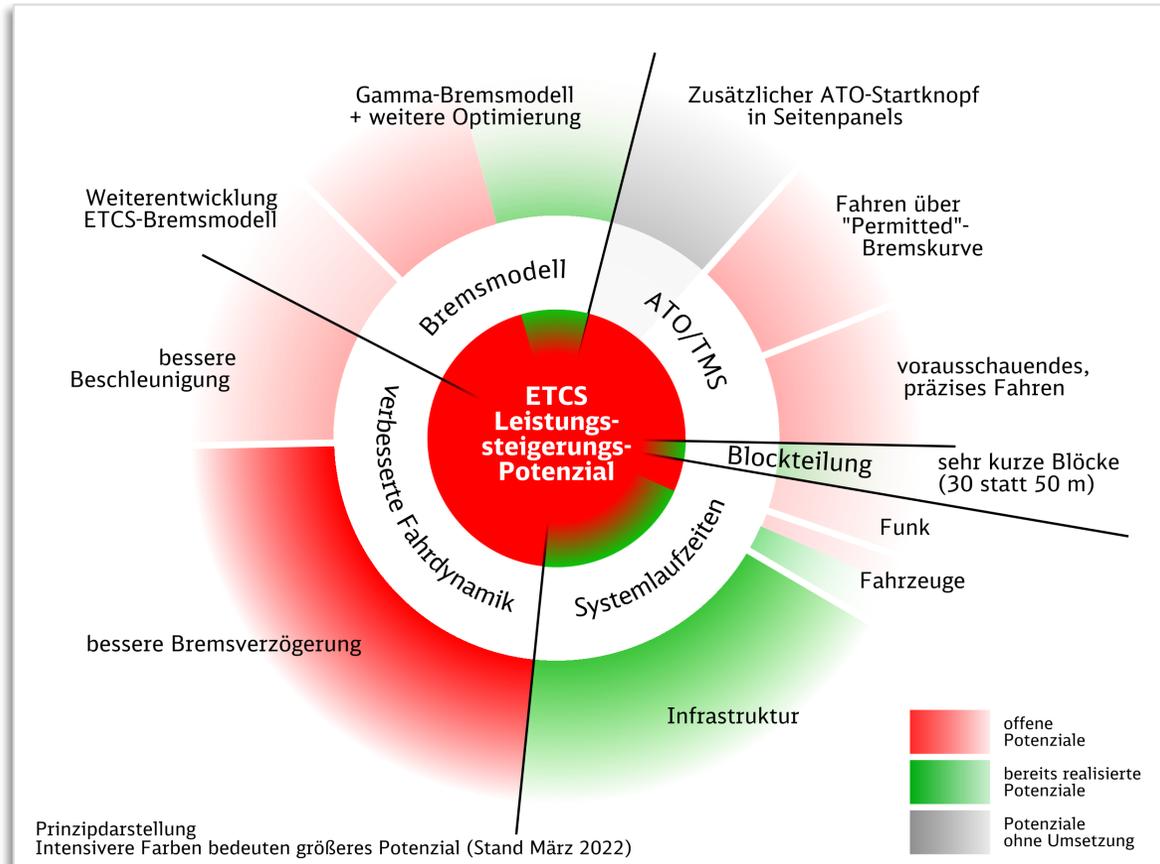
Abbildung: Deckblatt der Richtlinie zur pilothaften Förderung der DSD-Fahrzeugausrüstung im DKS (<https://bit.ly/3hX5CJx>)  
Vertiefend: Förderung der DSD-Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart. Der Eisenbahningenieur 4/2023 (<https://bit.ly/3N24h5o>).

# Besondere Geschenke besonderer Gäste im Digitalen Knoten Stuttgart



Foto: Dominic Stucki, SBB

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

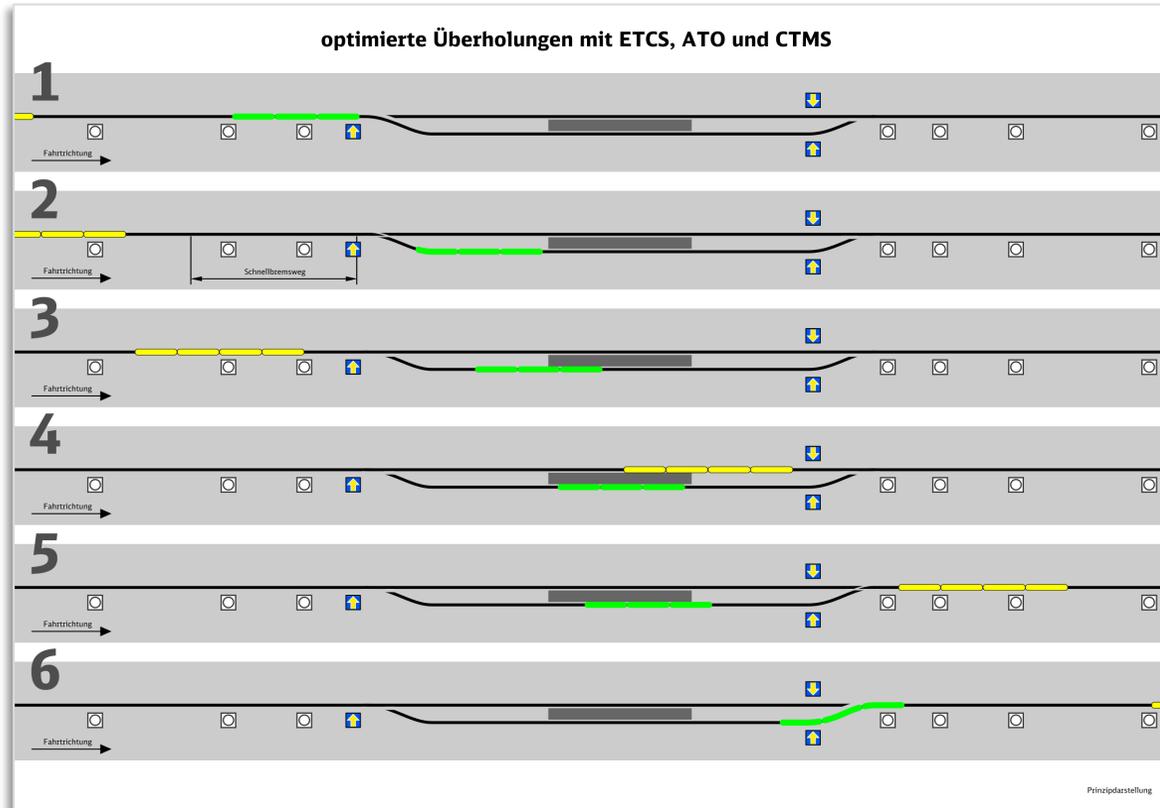


Nicht dargestellt: genauere Lokalisierung als zunächst unterstellt (rund 5 statt modellierten 55 m Ortungsfehler) sowie reine Qualitätspotenziale (z. B. Geschwindigkeitserhöhungen für verspätete Züge).

- Die S-Bahn-ETCS-Untersuchung wies 2018 – unter konservativen Prämissen – mit ETCS und ATO GoA 2 um rund 20 Prozent kürzere Zugfolgezeiten 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,<sup>1</sup> 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 verzichten.

# 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 Regionalverkehrs zug während eines ca. 30-sekündigen Halts.  
Vertiefend: *Maximierung der Fahrwegkapazität mit Digitaler Leit- und Sicherheitstechnik*. Eisenbahntechnische Rundschau 7+8/2021 (<https://bit.ly/2SlQvjY>) sowie  
*Optimierung von Überholvorgängen mit digitaler Leit- und Sicherheitstechnik*. Bachelorarbeit Mai 2022 (<https://bit.ly/3BbuPJR>) sowie  
<https://bsu.link/task-force-trassierung>  
DB Netz | Dresden | 15.06.2023

# Transparenz als Grundlage für Sachdebatten: Warum sind z. B. viele Bremskurven, Infrastrukturdaten oder Lastenhefte bislang „geheim“?



 																																																																																
<b>2.3 Dreifachtraktion</b>																																																																																
Zuglänge	205 m																																																																															
Bremshundertstel	150																																																																															
Brake Position (Passenger train in P, freight train in P oder freight train in G)	Passenger train in P																																																																															
Nominale Schnellbremsverzögerung A_brake_emergency(V)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Geschwindigkeit [km/h]</th> <th>140-120</th> <th>120-100</th> <th>100-80</th> <th>80-50</th> <th>50-30</th> <th>30-15</th> <th>15-0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A_brake_emergency [m/s<sup>2</sup>]</td> <td>1,01</td> <td>0,95</td> <td>0,93</td> <td>0,95</td> <td>1,00</td> <td>1,06</td> <td>0,95</td> </tr> </tbody> </table>	Geschwindigkeit [km/h]	140-120	120-100	100-80	80-50	50-30	30-15	15-0	A_brake_emergency [m/s <sup>2</sup> ]	1,01	0,95	0,93	0,95	1,00	1,06	0,95																																																															
Geschwindigkeit [km/h]	140-120	120-100	100-80	80-50	50-30	30-15	15-0																																																																									
A_brake_emergency [m/s <sup>2</sup> ]	1,01	0,95	0,93	0,95	1,00	1,06	0,95																																																																									
Sicherheitsfaktor auf trockener Schiene Kdry_rst(V,EBCL)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Geschwindigkeit [km/h]</th> <th>140-120</th> <th>120-100</th> <th>100-80</th> <th>80-50</th> <th>50-30</th> <th>30-15</th> <th>15-0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="10">Kdry_rst(V,EBCL)</td> <td>EBCL = 0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>EBCL = 1</td> <td>0,97</td> <td>0,97</td> <td>0,97</td> <td>0,97</td> <td>0,97</td> <td>0,97</td> </tr> <tr> <td>EBCL = 2</td> <td>0,94</td> <td>0,94</td> <td>0,94</td> <td>0,94</td> <td>0,94</td> <td>0,94</td> </tr> <tr> <td>EBCL = 3</td> <td>0,92</td> <td>0,92</td> <td>0,92</td> <td>0,92</td> <td>0,92</td> <td>0,92</td> </tr> <tr> <td>EBCL = 4</td> <td>0,90</td> <td>0,90</td> <td>0,90</td> <td>0,90</td> <td>0,90</td> <td>0,90</td> </tr> <tr> <td>EBCL = 5</td> <td>0,88</td> <td>0,88</td> <td>0,88</td> <td>0,88</td> <td>0,88</td> <td>0,88</td> </tr> <tr> <td>EBCL = 6</td> <td>0,85</td> <td>0,85</td> <td>0,85</td> <td>0,85</td> <td>0,85</td> <td>0,85</td> </tr> <tr> <td>EBCL = 7</td> <td>0,81</td> <td>0,81</td> <td>0,81</td> <td>0,81</td> <td>0,81</td> <td>0,81</td> </tr> <tr> <td>EBCL = 8</td> <td>0,80</td> <td>0,80</td> <td>0,80</td> <td>0,80</td> <td>0,80</td> <td>0,80</td> </tr> <tr> <td>EBCL = 9</td> <td>0,78</td> <td>0,78</td> <td>0,78</td> <td>0,78</td> <td>0,78</td> <td>0,78</td> </tr> </tbody> </table>	Geschwindigkeit [km/h]	140-120	120-100	100-80	80-50	50-30	30-15	15-0	Kdry_rst(V,EBCL)	EBCL = 0	1	1	1	1	1	1	EBCL = 1	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	EBCL = 2	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	EBCL = 3	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	EBCL = 4	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	EBCL = 5	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	EBCL = 6	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	EBCL = 7	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	EBCL = 8	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	EBCL = 9	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
Geschwindigkeit [km/h]	140-120	120-100	100-80	80-50	50-30	30-15	15-0																																																																									
Kdry_rst(V,EBCL)	EBCL = 0	1	1	1	1	1	1																																																																									
	EBCL = 1	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97																																																																									
	EBCL = 2	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94																																																																									
	EBCL = 3	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92																																																																									
	EBCL = 4	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90																																																																									
	EBCL = 5	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88																																																																									
	EBCL = 6	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85																																																																									
	EBCL = 7	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81																																																																									
	EBCL = 8	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80																																																																									
	EBCL = 9	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78																																																																									

<b>8 ATO (GoA2)</b>
Das Fahrzeug erhält ein ATO-System (GoA2).
Der AN setzt CR 1238 inklusive den dazugehörigen SUBSET 125, 126, 126 Appendix A, 139 und 140 um.
Es wird der SUBSET 143 umgesetzt.
Die Applikationen für ETCS und ATO werden entsprechend SUBSET 130 mindestens so getrennt, dass eine unabhängige und rückwirkungsfreie Anpassung möglich ist.
Die ATO ist fähig, einen Zug mit Doppel- und Mehrfachtraktion zu steuern.
Falls nur das führende Fahrzeug einer Doppel- oder Mehrfachtraktion mit ATO ausgerüstet ist, ist die ATO fähig, den Zugverband zu steuern.
Für den Betrieb mit ATO ist keine ATO-Zugdateneingabe im Rahmen der Start of Mission (SoM) erforderlich.
Falls die ATO-Fahrzeugausrüstung gestört ist, bietet das Fahrzeug dem Tf in jedem Führerraum die Möglichkeit, die ATO-Fahrzeugausrüstung mit einem Störschalter zu deaktivieren.
Die Funktion "ATO engage" und "ATO disengage" wird über einen Taster neben dem Fahr-/Bremshebel angesteuert.
Die Wegimpulsgeber für die ATO-Fahrzeugausrüstung sind an nicht angetriebenen Radsätzen montiert.
Die ATO realisiert eine Haltegenauigkeit von +/- 2 m mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,99%.

Links: Ausriss aus der Dokumentation der Gamma-Bremsmodell-Parameter für die S-Bahn-Baureihe 430.

Rechts: Auszug aus dem Lastenheft zur DSD-Fahrzeugausrüstung der Baureihe 423.

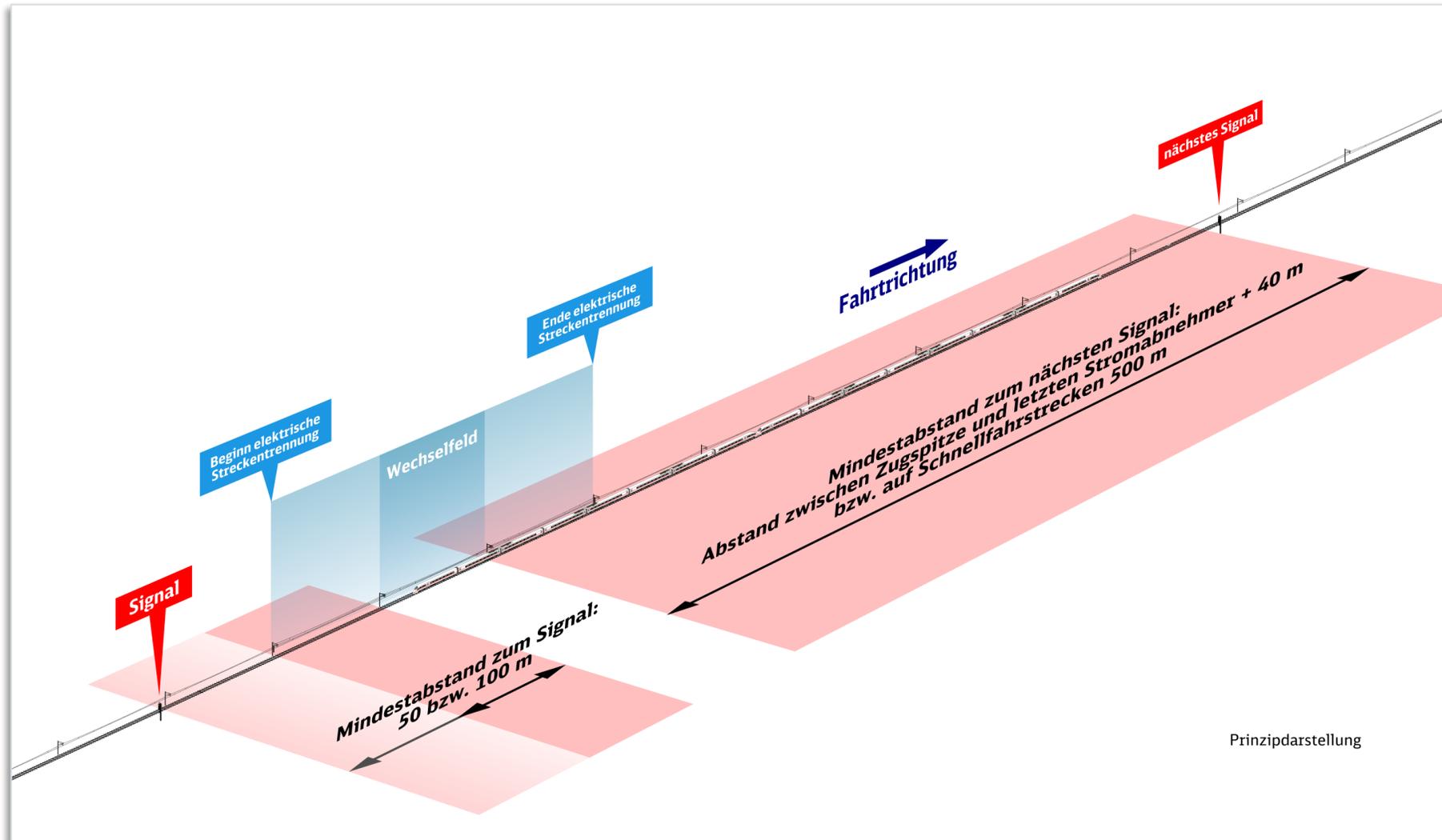
Diese und weitere Daten sind auf [www.digitale-schiene-deutschland.de/digitaler-knoten-stuttgart](http://www.digitale-schiene-deutschland.de/digitaler-knoten-stuttgart) veröffentlicht. Weitere Daten folgen.



**Vielen Dank. Fragen?**

Vertiefend:  
[www.digitaler-knoten-stuttgart.de](http://www.digitaler-knoten-stuttgart.de)

# Der Teufel steckt (auch bei der Blockteilung) in vielen 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>).