

ETCS-Bremskurven im Spiegel der Praxis

Erfahrungen aus dem Digitalen Knoten Stuttgart zeigen, wie Bremskurven zu Kapazitätssteigerungen beitragen können und welche Knackpunkte und Spielräume verbleiben.

JONAS FÖRSTER | MICHAEL KÜMMLING |
MARTIN OLESCH | PETER REINHART |
KRISTOF VANDOORNE | THOMAS VOGEL

Die Auswirkungen von ETCS (European Train Control System) auf die Fahrwegkapazität sind auch aufgrund von durchwachsenen Erfahrungen mit dessen Bremskurven umstritten. Nach mehrjährigen Vorarbeiten liegen nun für vier Typen von Nahverkehrstriebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart (DKS) optimierte ETCS-Bremsmodelle vor. Zusammen mit weiteren Erkenntnissen zeigt sich auf dem Prüfstand der Infrastruktur des Pilotprojekts ein vielschichtiges, schattiertes Bild, in dem ETCS-Bremskurven vielfach zu kürzeren Zugfolgezeiten (als im konventionellen Betrieb) beitragen. Darüber hinaus bestehen einige Potenziale und offene Fragen. Zeit für einen ersten Überblick.

Motivation

Landläufig ist zu hören, ETCS führe (auch) aufgrund flacher Bremskurven zu weniger Fahrwegkapazität bzw. längeren Fahrzeiten. [1, 2] Insbesondere aus der Schweiz wird von Kapazitätsrückgängen [3, 4] und Geschwindigkeitseinschränkungen [5] sowie „Schleichfahrten“ mit Fahrzeitverlängerungen [6, 7] berichtet. Teils werden dort flache Bremskurven auch als ein Grund für eine rückläufige Pünktlichkeit im Personenverkehr [8], die zögerliche Einführung von ETCS Level 2 [9] sowie dessen mangelnden Eignung für Knoten [10] genannt.

Ein Abriss über ETCS-Bremskurven

ETCS verwendet eine Schar von Bremskurven, die verschiedenen Zwecken dienen, die von der Bremsankündigung für den Triebfahrzeugführer (Indication) bis zu der Schnellbremsablaufkurve (EBD) reichen (Abb. 1) [11]. Sie werden vom ETCS-Fahrzeuggerät (EVC) zugsspezifisch berechnet. Im Spannungsfeld zwischen Sicherheit, betrieblicher Leistungsfähigkeit und Verschleiß kommt dieser Modellierung erhebliche Bedeutung zu.

Die Arbeit an ETCS-Bremskurven und den zugrunde liegenden Modellen reicht bis in die 1990er Jahre zurück [12, 13]. Ein Großteil der landläufigen Kritik fußt auf dem noch nicht umfassend standardisierten Bremsmodell der inzwischen veralteten ETCS-Baseline 2. Infolge unzureichender Vorgaben der damaligen Spezifikation oblag es den ETCS-Fahrzeugausrüstern, ein Bremsmodell mit (oft zu großen) Sicherheitsmargen aufzustellen [14]. Dies führte zu übermäßig flachen Bremskurven [15, 16, 17]. Aufgrund dieser Unzulänglichkeiten wurden in den 2000er Jahren zwei Bremsmodelle entwickelt [18, 19] und in die (inzwischen gängige) Baseline 3 aufgenommen [20]:

- Das Conversion Model (auch Lambda- oder Brems Hundertstel-Modell) berechnet für beliebige Züge bis 200 km/h Bremskurven aus Brems Hundertsteln (Brh), Zuggattung (Reise-/Güterzug), Bremsstellung (G/P) und Zuglänge [11, 21, 22].
- Mit dem Gamma-Modell werden Bremskurven (insbesondere für feste Kompositionen wie Triebzüge) durch zugsspezifisch ermittelte Momentanverzögerungen und darauf

einwirkende Korrekturfaktoren sowie Bremsaufbauzeiten berechnet [11, 23].

In die Bremskurvenberechnung auf dem EVC gehen – jeweils für Voll- und Schnellbremsung (SBI/EBI) – Bremsaufbauzeit, Verzögerungen für bis zu sieben Geschwindigkeitsstufen sowie Vorgaben des Infrastrukturbetreibers (Nationale Werte [24]) und Infrastrukturdaten wie Längsneigungen und Durchrutschwege (D-Wege) ein. Der Großteil der weiteren Bremskurven wird wiederum aus SBI und EBI abgeleitet (Abb. 1).

Während das Conversion Model sichere Bremskurven anhand altbekannter Eingangsdaten auf Basis empirischer Regeln berechnet, verfolgt das Gamma-Modell einen völlig anderen Ansatz: EBI und SBI werden anhand von (im EVC hinterlegten und in Bremsversuchen ermittelten) Bremsverzögerungen und Bremsaufbauzeiten berechnet. Auf die nominelle Schnellbremsverzögerung wirken wiederum zwei Korrekturfaktoren ein, die in Tabellen (Abb. 2) im EVC hinterlegt sind. Im Netz der DB spielt dabei nur ein Korrekturfaktor (K_{dry_rst} , im Folgenden „k“) eine Rolle.¹ Er bildet die Verfügbarkeit des Bremssystems ab und trägt zuvor unerkannten, den Bremsweg verlängern den Teilausfällen Rechnung. Mittels Nationalem Wert [25] gibt das Eisenbahninfrastrukturunter-

¹ Der zweite Korrekturfaktor (K_{wet_rst}) ist ein Reduktionsfaktor für verminderten Kraftschluss auf „nasser“ Schiene. Die mit ETCS mögliche Unterscheidung zwischen „trockener“ und „nasser“ Schiene wird im DB-Netz jedoch nicht verwendet. K_{wet_rst} bleibt damit ohne Einfluss.

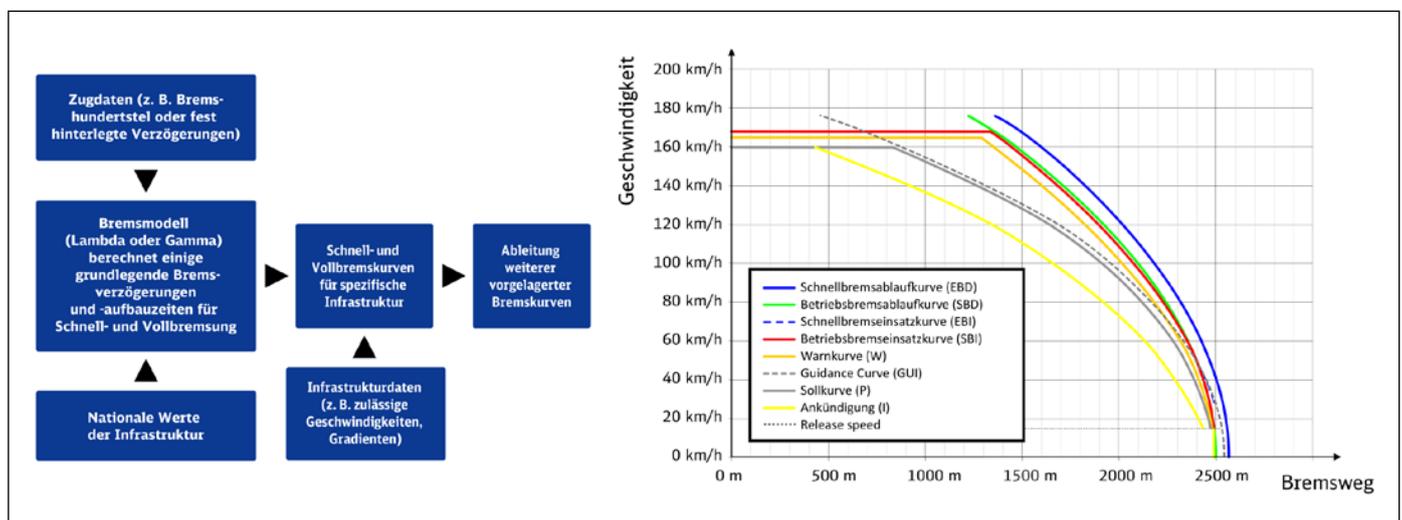


Abb. 1: Vereinfachte Darstellung der ETCS-Bremskurvenberechnung und der daraus resultierenden Bremskurvenschar

Quelle: Deutsche Bahn

Zuglänge	57 m									
Bremshundertstel	194									
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)	Geschwindigkeit [km/h]	160 – 130	130 – 80	80 – 40	40 – 20	20 – 15	15 – 5	5 – 0		
	A_brake_emergency [m/s ²]	1,28	1,28	1,35	1,35	1,25	0,92	0,90		
Sicherheitsfaktor auf trockener Schiene Kdry_rst(V,EBCL)	Geschwindigkeit [km/h]	160 – 130	130 – 80	80 – 40	40 – 20	20 – 15	15 – 5	5 – 0		
	Kdry_rst(V,EBCL)	EBCL = 0	1	1	1	1	1	1	1	
		EBCL = 1	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	
		EBCL = 2	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	
		EBCL = 3	0,91	0,92	0,92	0,92	0,92	0,90	0,90	
		EBCL = 4	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	
		EBCL = 5	0,77	0,76	0,74	0,73	0,73	0,72	0,72	
		EBCL = 6	0,74	0,71	0,69	0,69	0,69	0,69	0,69	
		EBCL = 7	0,72	0,69	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	
		EBCL = 8	0,63	0,64	0,64	0,63	0,63	0,63	0,63	
EBCL = 9	0,56	0,54	0,53	0,51	0,53	0,46	0,46			
Zuglänge	266 m									
Brake Position (Passenger train in P, freight train in P oder freight train in G)	Passenger train in P									
Bremshundertstel	194									
Nominale Schnellbremsverzögerung A_brake_emergency(V)	Geschwindigkeit [km/h]	160 – 130	130 – 80	80 – 40	40 – 20	20 – 15	15 – 5	5 – 0		
	A_brake_emergency [m/s ²]	1,31	1,27	1,34	1,41	1,40	1,16	1,10		
Sicherheitsfaktor auf trockener Schiene Kdry_rst(V,EBCL)	Geschwindigkeit [km/h]	160 – 130	130 – 80	80 – 40	40 – 20	20 – 15	15 – 5	5 – 0		
	Kdry_rst(V,EBCL)	EBCL = 0	1	1	1	1	1	1	1	
		EBCL = 1	1	1	1	1	1	1	1	
		EBCL = 2	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	
		EBCL = 3	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	
		EBCL = 4	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	
		EBCL = 5	0,94	0,92	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93	
		EBCL = 6	0,92	0,90	0,90	0,91	0,92	0,91	0,91	
		EBCL = 7	0,91	0,89	0,88	0,89	0,90	0,90	0,90	
		EBCL = 8	0,89	0,87	0,87	0,88	0,89	0,88	0,88	
EBCL = 9	0,87	0,83	0,83	0,85	0,87	0,85	0,85			

Abb. 2: Auszüge aus dem Gamma-Bremsmodell des Talent 3 für die Einfachtraktion mit drei Wagen sowie die Dreifachtraktion mit 15 Wagen
Quelle: Alstom

nehmen (EIU) dabei dem Fahrzeug vor, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Fußpunkt der EBD (nominell) einzuhalten ist. Im DB Netz liegt dieser Emergency Brake Confidence Level (EBCL) bei 7 bzw. 99,99999 % für ETCS Level 2. Das bedeutet: In einer von 10⁷ Schnellbremsungen darf die Supervised Location (SvL) überfahren werden. Die Schnellbremsverzögerung wird mit dem entsprechenden k-Wert (typischerweise zwischen 0 und 1) multipliziert, die Bremsverzögerung damit reduziert und somit eine Bremswegreserve geschaffen. Je länger ein Zug ist, desto geringer sind die Auswirkungen eines einzelnen Ausfalls im Bremssystem, entsprechend größer wird k. Die ETCS-Bremskurven eines Triebzugs können

– je nach gewähltem Modell – erheblich voneinander abweichen. Im Übrigen können Fahrzeugbetreiber eine Führungskurve (Guidance Curve – GUI) definieren und somit beispielsweise Verschleiß mindern, soweit das EIU (wie DB Netz für ETCS Level 2) diese per Nationalem Wert erlaubt. [26, 27] Während das Lambda-Modell anhand ohnehin vorliegender Informationen die notwendigen Eingangsdaten unkompliziert zurückerhält, sind die Parameter des Gamma-Modells zunächst aufzustellen, wofür insbesondere Monte-Carlo-Simulationen (für k) [28, 29] und ggf. gesonderte Bremsversuche erforderlich sind.

Modellbildung für den DKS

Im DKS treten die Deutsche Bahn AG (DB) und ihre Partner an, erstmals in Deutschland die Leit- und Sicherungstechnik in einem großen Knoten vollumfassend zu „digitalisieren“ [30]. Dazu gehört auch die Nachrüstung von 333 S-Bahn- und Regionaltriebzügen [31], die durch den Bund pilothaft u.a. mit dem Ziel gefördert wird, die Kapazitätseffekte einer zeitlich und räumlich koordinierten Fahrzeug- und Infrastrukturausrüstung zu ermitteln [32, 33]. Zu den begleitenden Förderbedingungen zählt auch, für Triebzüge Gamma-Modelle aufzustellen. Aufbauend auf frühere ETCS-Ausrüstungsprojekte, den Empfehlungen der S-Bahn-ETCS-

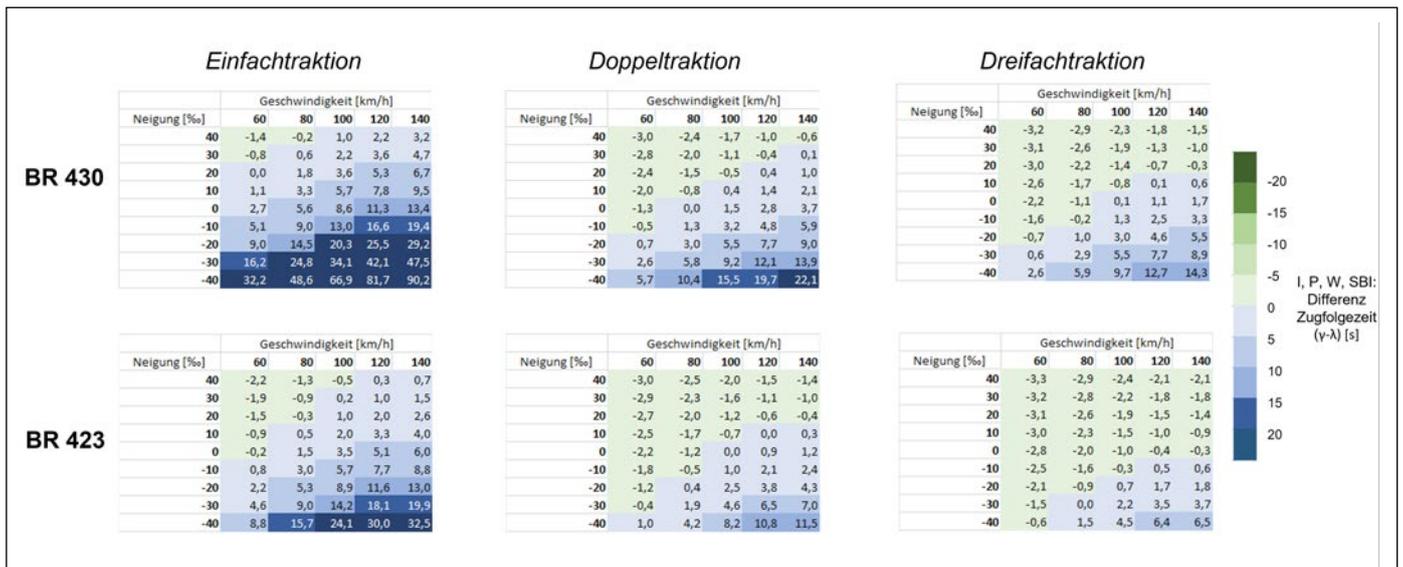


Abb. 3: Unterschiede zwischen Gamma- und Lambda-Modell in Bezug auf die Zugfolgezeiten bei den S-Bahn-Baureihen 423 und 430 und konstanten Geschwindigkeiten und Neigungen. Bei grünen Werten ist das Gamma-Modell von Vorteil, bei blauen Lambda. Quelle: Deutsche Bahn

Untersuchung sowie weiterführender Diskussionen und Überlegungen formulierte der Bereich Beschaffung der DB einige Anforderungen im Hinblick auf die Bremsmodelle [34, 35, 36]. Dazu zählen insbesondere die Auswahl von Gamma oder Lambda beim Aufstarten in Abhängigkeit von Zuglänge und Brh, nach Zuglänge unterschiedene k-Faktoren in Schritten von maximal 0,01 sowie die präzise Modellierung rotierender Massen².

Die vier Lose umfassenden Nachrüstungs-aufträge wurden Mitte 2021 an Alstom vergeben. Für die Flirt 3-Triebzüge wurden die Modelle (einschließlich Korrekturfaktoren) durch Stadler aufgestellt, für die übrigen drei Baureihen durch DB Systemtechnik [37]. Für die beiden S-Bahn-Baureihen (423, 430) wurden durch DB Systemtechnik neue Bremsversuche gefahren, für Flirt- und Talent-Triebzüge konnten hinreichende Rohdaten früherer Versuche verwendet werden. Zur Bewertung der Verfügbarkeit wurden Daten der Bremssystem-Lieferanten herangezogen. Gamma-Modelle wurden für alle Zugkonfigurationen für den Gutzustand sowie wenige noch gängige Ausfallszenarien (z. B. Ausfall einer Magnetschienenbremse) gebildet. Viele hundert weitere denkbare Kombinationen von Zugkonfiguration und Ausfallszenarien wurden nicht weiter betrachtet – ein derart gestörter Zug ist ohnehin zügig aus dem Betrieb zu nehmen, der Aufwand zur Modellbildung und ein etwaiger Nutzen von Gamma-Modellen stünden für diese seltenen Fälle außer Verhältnis. Parallel entwickelte Alstom seine ETCS-Software weiter: Um beim Aufstarten eine möglichst schnelle und unkomplizierte Auswahl

² Gemäß SRS, Abschnitt 3.13.4.3, anstelle der sonst vorgesehenen Standardwerte. Dies führt zu etwas kürzeren modellierten Bremswegen in Steigungen und Gefälle.

des Bremsmodells zu gewährleisten, werden dem Triebfahrzeugführer (Tf) Zugdaten aus der Leittechnik (TCMS) vorgeschlagen und zur Bestätigung vorgelegt. Anhand der Kombination von Zuglänge und Brh wird im Hintergrund das richtige Bremsmodell ausgewählt. Das bedeutet, dass die komplexe Auswahl zwischen Gamma- und Lambda-Modell, den anwendbaren Korrekturfaktoren sowie die Werte für rotierende Massen des Fahrzeugs bzw. der Fahrzeugkomposition, abgesehen von der obligatorischen Eingabe der Zugdaten, für den Tf transparent abläuft. Außerdem wurde die k-Schrittweite von 0,05 auf 0,01 gesenkt.

Überblick über die Bremsmodelle

Bei den in den letzten Monaten vorgelegten Modellen bestätigte sich die Erwartung, dass kürzere Konfigurationen und größere EBCL zu geringeren k-Werten, somit zu geringeren modellierten Schnellbremsverzögerungen und letztlich längeren Bremswegen führen. Für kurze Konfigurationen (Einfachtraktion mit drei bis fünf Wagen) zeigten sich bei EBCL 7 k-Werte von zumeist 0,5 bis 0,7, für lange Konfigurationen (Dreifachtraktionen mit zwölf bis 15 Wagen) hingegen Werte von etwa 0,8 bis 0,9 (siehe auch Beispiel in Abb. 2).

Bei 160 km/h schnellen Flirt- und Talent-Triebzügen, deren Schnellbremsverzögerung sich in erheblichem Maße auf Magnetschienenbremsen stützt, wird eine GUI konfiguriert, um eine Sollgeschwindigkeitskurve zu realisieren, der durch den Tf mit Betriebsbremsungen gefolgt werden kann. Bei den beiden S-Bahn-Baureihen (für 140 km/h) liegen hingegen Voll- und Schnellbremsverzögerung nah beieinander, sodass auf eine GUI verzichtet wird.³

³ Die Vollbremsung wird elektrisch und ergänzend mit der pneumatischen Bremse realisiert, die Schnellbremsung mit Scheibenbremsen.

Betriebliche Wirkungen

Im DKS wird von Beginn an bewusst auf Level 2 in der ETCS-Betriebsart „Full Supervision“ (FS) nach Baseline 3 mit SRS 3.6.0 gesetzt. Die Bremskurven sind dem Tf jederzeit transparent, D-Wege und Freigabegeschwindigkeiten (Release Speed) meist auskömmlich.⁴ Die u. a. in der Schweiz beobachteten Effekte, bei denen Hintergrundüberwachung in Level 1 in der Betriebsart „Limited Supervision“ (LS) in Verbindung mit teils geringen, hart überwachten⁵ Release Speeds zu sehr vorsichtiger und damit fahrzeitverlängernder Fahrweise führt, werden im Kern des DKS somit weitgehend vermieden.

Ganz grundlegend haben gut bremsende Triebzüge mit ETCS insbesondere unter 160 km/h vielfach spätere Bremsensatzpunkte als im konventionellen, vom Sichtpunkt auf das Vorsignal determinierten Betrieb [38]. Zu flachen ETCS-Bremskurven bei Annäherung an einen Halt wird im DKS auch mit einer auf wenige Meter genauen Ortung vor Fahrterlaubniszielpunkten [31] sowie (sofern möglich) der rechtzeitigen Verlängerung der Fahrterlaubnis begegnet. Mit ETCS-Bremskurven verlängerten Sperrzeiten an Geschwindigkeitswechseln nach unten wird durch eine gezielt optimierte Blockteilung entgegengewirkt [39]. Mit der 5-km/h- und metergenaue Geschwindigkeitssignalisierung [40], Bremswegen über mehrere konventionelle Zugfolgeabschnitte hinweg, schnellen Einfahrten mit kurzen D-Wege und ins teilbesetzte Gleis [30], ent-

⁴ Mindestens 30 m D-Weg auf der S-Bahn-Stammstrecke, 50 m auf der Fernbahn (ausgenommen Doppelbelegungen) mit Release Speeds von 5 bis 15 km/h

⁵ SRS, Abschnitt 3.13.9.4.6 (Eine Überschreitung von nur einem km/h führt zur Zwangsbremsung.)

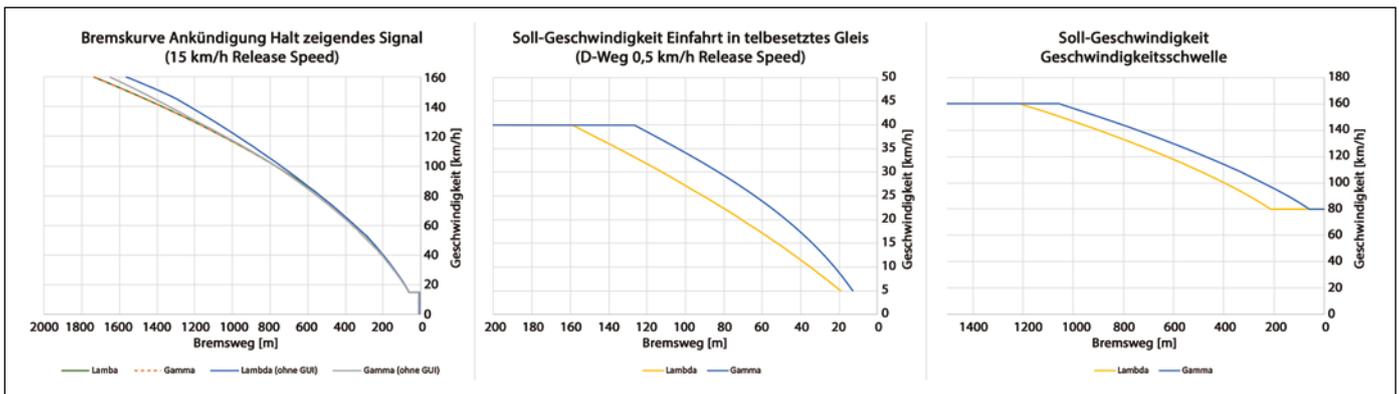


Abb. 4: Wesentliche Bremskurven mit Lambda- und Gamma-Modell für einen 160 km/h schnellen Regionaltriebzug (Talent mit 15 Wagen) in wesentlichen Betriebsfällen

Quelle: Deutsche Bahn

fallenden Lichtsignal-Restriktionen [41, 42] sowie hochautomatisiertem Fahren mit Tf (ATO GoA 2) [31, 38] werden im DKS zusätzliche Möglichkeiten von ETCS genutzt, die so in der konventionellen LST nicht bestehen. Damit werden insgesamt kürzere Zugfolge- und (geringfügig) kürzere Fahrzeiten als konventionell erwartet.

Ein ungleich vielschichtigeres Bild zeigt sich beim Vergleich der beiden ETCS-Bremsmodelle. Einige Blickwinkel:

- An Geschwindigkeitswechseln nach unten kann die mit mindestens 5,77 Sekunden modellierte Bremsaufbauzeit des Lambda-Modells im Lichte der restriktiven ETCS-Geschwindigkeitsüberwachung zu Fahrzeitverlusten führen, da derartige Bremsungen bis zu 5 Sekunden früher eingeleitet werden müssen.⁶ (Abb. 4)
- Aus niedrigeren Geschwindigkeiten und in der Steigung führt die realitätsnah kurz modellierte Bremsaufbauzeit des Gamma-Modells zu kürzeren Zugfolgezeiten. Aus höheren Geschwindigkeiten und im Gefälle dominieren die höheren Bremsverzögerungen des Lambda-Modells.⁷
- Während Modellrechnungen von hoher Geschwindigkeit und konstanter Längsneigung ausgehen (Abb. 3), sind in der tatsächlichen Infrastruktur oft andere Abschnitte für die Mindestzugfolgezeit maßgebend: beispielsweise Bahnhofsköpfe oder Bahnsteige, in denen oft niedrigere Geschwindigkeiten gefahren werden und wechselnde Längsneigungen eine Rolle spielen.

⁶ Beim Lambda-Modell wird die Schnellbremsaufbauzeit anhand einer Mindestzuglänge von 400 m modelliert, was mit dem Nationalen Wert $M_{NVKTINT}$ von 1,15 zu einer Mindestbremsaufbauzeit von 5,77 Sekunden führt (SRS, Abschnitt 3.8.1 und [27]). Dem gegenüber steht eine tatsächliche Bremsaufbauzeit (Gamma) zwischen 0,89 Sekunden (Talent) und 1,9 Sekunden (Baureihe 423).

⁷ Die in Lambda modellierte Verzögerung liegt mitunter über der tatsächlichen Bremsverzögerung der Triebzüge. Dem wirkt der Effekt aus Fußnote 6 entgegen, sodass die modellierten Bremswege vom Fahrzeug eingehalten werden können.

- Bei kurzen D-Wegen und niedrigen Release Speeds, beispielsweise bei Einfahrt in teilbesetzte Gleise⁸, führen die kurzen Bremsaufbauzeiten des Gamma-Modells zu wesentlich steileren Bremskurven vor dem Ziel (Abb. 4). Während damit lange Regionaltriebzüge beispielsweise im neuen Hauptbahnhof in Stuttgart schneller in Doppelbelegungen einfahren können, sind derartige Fälle im S-Bahn-Netz selten.

- Wird eine GUI verwendet, drückt diese die für Fahr- und Zugfolgezeit maßgeblichen Bremskurven, sodass beide Modelle in dieser Hinsicht oftmals gleichwertig sind. Der Unterschied liegt dann in den modellierten Bremsaufbauzeiten (Abb. 4).

- Einen geringen Einfluss hat auch die genaue Modellierung rotierender Massen sowie die Traktionsabschaltzeit [43].

Alles in allem ist bei kurzen Zügen das Gamma gegenüber dem Lambda-Modell von Nachteil: Infolge niedriger k -Werte liegt mitunter sogar die Schnellbremsverzögerung unter der in der „konventionellen“ Fahrplankonstruktion üblichen Betriebsbremsverzögerung von $0,7 \text{ m/s}^2$. Gleichzeitig können die Schwächen des Lambda-Modells bei diesen (abseits des Hochleistungsbetriebs verkehrenden) Konfigurationen eher hingenommen werden, weil derartige Züge kaum in teilbesetzte Gleise einfahren oder sie an Geschwindigkeitswechseln

⁸ 0 m D-Weg und 5 km/h Release Speed gemäß BTSF3

nach oben früher beschleunigen können (und somit den Effekt an Geschwindigkeitswechseln nach unten eher ausgleichen können). Bei langen Zügen, wie sie im Hochleistungsbetrieb typischerweise eingesetzt werden, ist hingegen das Gamma-Modell durch spätere Bremsenpunkte an Geschwindigkeitswechseln und bei Doppelbelegungen im Vorteil. Für die meisten Zugbildungen wird das Gamma-Modell voreingestellt werden.

Die bisherigen Erkenntnisse sind dabei nicht ohne Weiteres übertragbar auf lokbespannte Reise- und Güterzüge – auch Effekte an Bahnübergängen [44, 45], mit Zuglenkanstößen [46] und an Landesgrenzen [47] spielen im Kernbereich des DKS keine Rolle.

Fazit und Ausblick

Die bisherigen Erfahrungen im DKS zeigen, wie optimierte ETCS-Bremskurven zu Leistungssteigerungen im Hochleistungsbetrieb mit Triebzügen beitragen können. Je nach Randbedingungen können das Lambda- oder das (aufwendigere) Gamma-Modell von Vorteil sein. Durch Optimierungen können – bei unveränderter Bremsanlage – steilere Bremskurven erreicht werden.

Inzwischen wurden die Bremskurvenparameter als Teil der EVC-Software auf die ersten Prototyp-Fahrzeuge (First in Class) aufgespielt. Zuvor hatten die Fahrzeugbetreiber zu entscheiden, in welcher Konfiguration welches ETCS-Bremsmodell zum Einsatz kommt. Ab 2024 werden die Bremskurven zunächst im

i

Gamma-Modellparameter

Obwohl für eine Reihe von Triebzügen bereits Gamma-Bremsmodelle gebildet wurden, standen deren Modellparameter bislang nicht öffentlich zur Verfügung. Eine Sachdiskussion war daher bislang kaum möglich. Auch aufgrund der an entsprechende Bedingungen geknüpften Bundesförderung wurden nun erstmals in Deutschland Gamma-Modellparameter veröffentlicht. Sie können unter <https://digitale-schiene-deutschland.de/Digitaler-Knoten-Stuttgart> heruntergeladen werden. Die Autoren des Artikels freuen sich über Eindrücke und Erfahrungen.

und Fahrzeugen ETCS überzustülpen. Viel mehr gilt es, die damit verbundenen Chancen und Grenzen im Gesamtsystem Bahn in den Blick zu nehmen.

Das Projekt wird kofinanziert von der Europäischen Union.



QUELLEN

[1] Busse, M.; Bräuer, D.: Leistungsfähigkeit und ETCS. Vortrag auf der Sicherungstechnischen Fachtagung der TU Dresden, 1. Oktober 2021
 [2] Jäger, B.; Mönsters, M.: „Der Zug zur Digitalisierung“, Retrospektive zum DLR-Symposium 2022, Eisenbahntechnische Rundschau 3/2023 (https://bit.ly/41VG8I7)
 [3] SBB-Strecke Sion – Sierre auf ETCS Level 2 umgestellt, Eisenbahn-Revue International 12/2018, S. 622 ff.
 [4] Deutschland: ETCS und Digitale Stellwerke als Heilsbringer, Eisenbahn-Revue International 11/2019, S. 565
 [5] Neuer ETCS-Abschnitt im Tessin in Betrieb, Eisenbahn-Revue International 7/2018, S. 354
 [6] Schweiz: ETCS bringt Fahrzeitverlängerungen, Eisenbahn-Revue International 2/2020, S. 100
 [7] Die neue Zugsicherung führt zu Verspätungen, Neue Zürcher Zeitung am Sonntag, 19. Februar 2023
 [8] Zur Pünktlichkeit der SBB, Schweizer Eisenbahn-Revue 3/2022, S. 124
 [9] ETCS auf der Wiener S-Bahn? Eisenbahn-Revue International 12/2019, S. 633
 [10] Zufahrt Luzern: Zusätzliche Blockstellen statt ETCS Level 2, Eisenbahn-Revue International 11/2022, S. 568 f.
 [11] Artikel „ETCS-Bremsskurven“ in der deutschsprachigen Wikipedia (https://de.wikipedia.org/wiki/ETCS-Bremsskurven, Fassung vom 20. April 2023
 [12] Singer, A.: Entwicklung und Erprobung von Bremsskurven für den Hochgeschwindigkeitsverkehr mit Funkzugbeeinflussung (FZB). Tagungsband zur 3. Schienenfahrzeugtagung Dresden, 24.-26. Februar 1999
 [13] Singer, A.; Voß, G.: Entwicklung und Erprobung von Bremsskurven für den Hochgeschwindigkeitsverkehr mit Funkzugbeeinflussung, Glasers Annalen 2/1999
 [14] ERTMS/ETCS – Class 1: Systems Requirements Specification, SUB-SET-026-3, Version 2.3.0, 24. Februar 2006, Abschnitt 3.13.3.1.5 (https://bit.ly/3DKvIIN)
 [15] ETCS-Tagung in Berlin, Eisenbahn-Revue International 2/2008, S. 72 f.

[16] Castan, P.: Evolution of Signalling Systems and Implementation of ETCS on New High-Speed Lines. SIGNAL+DRAHT 12/2006
 [17] Making progress towards standardised train control, Railway, Gazette International 3/2012 (https://bit.ly/3NmUmoT)
 [18] Gröpler, O.: Bremswege und Bremswegsicherheit bei ETCS, ZEVrail 1-2/2008
 [19] Eichenberger, P.; Gröpler, O.: ETCS-Bremsskurven in Europa. Tagungsband der Schienenfahrzeugtagung Graz 2005
 [20] Exemplarisch: ERTMS/ETCS-System Requirements Specification (SRS). SUBSET-026-3, Version 3.6.0, 13. Mai 2016.
 [21] SRS, Abschnitt 3.13.3
 [22] UIC-Kodex 544.1, 6. Ausgabe, Oktober 2014, Anlage G
 [23] SRS, Abschnitt 3.13.2.2.3
 [24] https://de.wikipedia.org/wiki/Nationale_Werte, Fassung vom 21. Januar 2023
 [25] SRS, Anhang 3.2: M_NVEBCL und M_NVAADH. Zur Berechnung siehe 3.13.6.2.1.4
 [26] SRS, Abschnitt 3.13.8.5 und A.3.2 (Q_NVQUIPERM)
 [27] Pinter, P.: Übersicht der nationalen Werte für ETCS auf den Strecken der DB Netz AG. Schreiben vom 27. Januar 2022 (https://bit.ly/3RktcQB)
 [28] Gröpler, O.; Pavlović, O.: Chancen und Möglichkeiten der Monte-Carlo-Methode bei der Bestimmung der ETCS-Bremsskurven, Eisenbahntechnische Rundschau, 9/2017
 [29] Horn, S.; Pavlović, O.: ETCS-Bremsskurven – Bestimmung der Sicherheitsmargen für HGV-Triebzüge mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation. Tagungsband zur 14. Internationalen Schienenfahrzeugtagung Dresden, 23.-25. September 2015
 [30] Beyer, M.; Blateau, V.; Bitzer, F.; Dietrich, F.; Lamerskitten C.; Lück, B.; Richter, R.; Rudolph, C.; Vogel, T.: Der Digitale Knoten Stuttgart wird Realität, DER EISENBAHNINGENIEUR 1/2023 (https://bit.ly/3RCeqFR)
 [31] Dietrich, F.; Erdmann, J.; Jost, M.; Raichle, F.; Sane, N.; Vogel, T.; Wagner, P.: Nachrüstung von 333 Triebzügen für den Digitalen Knoten Stuttgart, ZEVrail 5/2022 (https://bit.ly/3DHZIO5)
 [32] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung der Ausrüstung von Schienenfahrzeugen mit Komponenten des Europäischen Zugsicherungssystems ERTMS (European Rail Traffic Management System) und des automatisierten Bahnbetriebs (ATO) im Rahmen der infrastrukturseitigen Einführung von ERTMS im „Digitalen Knoten Stuttgart“, Bundesanzeiger, BAnz AT 05.02.2021 B2 (https://bit.ly/3hX5CJx)
 [33] Dietrich, F.; Molterer, L.; Philippsen, F.; Reinhart, P.; Schunke-Mau, C.; Vogel, T.; Wester-Ebbinghaus, H.: Förderung der DSD-Fahrzeugausrüstung im Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 4/2023 (https://bit.ly/3N24h5o)
 [34] Ingenieurgesellschaft Machbarkeitsstudie ETCS S-Bahn Stuttgart: Untersuchung zur Einführung von ETCS im Kernnetz der S-Bahn Stuttgart (https://bit.ly/2Yyav6h)
 [35] Dietrich, F.; Meyer, M.; Neuhäuser, R.; Rohr, F.; Vogel, F.; Wenkel, W.:

Fahrzeugnachrüstung für den Digitalen Knoten Stuttgart, DER EISENBAHNINGENIEUR 9/2021 (https://bit.ly/3tFQWUB)
 [36] Neuhäuser, R.; Reinhart, P.; Richter, R.; Vogel, T.: Digitale Leit- und Sicherungstechnik ist kein Selbstzweck, Deine Bahn 3/2021 (https://bit.ly/2Xu7P8P)
 [37] DB Systemtechnik: Systemtechnik Leistungsbericht 2021/2022, S. 39 (https://bit.ly/3h2Cm75)
 [38] Kümmling, M.; Wanstrath, S.: Maximierung der Fahrwegkapazität mit Digitaler Leit- und Sicherungstechnik, Eisenbahntechnische Rundschau 7+8/2021 (https://bit.ly/3eY0apT)
 [39] Denißen, J.; Flieger, M.; Kümmling, M.; Küpper, M.; Wanstrath, S.: Optimierung der Blockteilung mit ETCS Level 2 im Digitalen Knoten Stuttgart, SIGNAL+DRAHT 7+8/2021 (https://bit.ly/3Ai0gQR)
 [40] Exemplarisch: Berner, T.; Frye, C.; Henzler, L.; Reinhart, P.; Schäfer, D.; Walf, F.: Der Pfaffensteigtunnel nimmt Kontur an, DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2022 (https://bit.ly/3UmnvCv)
 [41] Eichenberger, P.: Kapazitätssteigerung durch ETCS, SIGNAL+DRAHT 3/2007
 [42] Eichenberger, P.; Spori, B.: Optimierte Signalisierungskonzepte zur Kapazitätssteigerung mit ETCS Level 2, SIGNAL+DRAHT 9/2013
 [43] SRS, Kapitel 3, „traction cut-off“ (diverse Fundstellen)
 [44] Fehlauer, L.; Kahl, R.: Verhinderung betrieblicher Einschränkungen durch ETCS-Bremsskurven an Bahnübergängen, DER EISENBAHNINGENIEUR, 8/2020 (https://bit.ly/3Fng0Wl)
 [45] Bieh, A.: Einbindung moderner Überwachungsarten für Bahnübergänge auf ETCS-Strecken. Diplomarbeit 2022 (https://bit.ly/3HQ05Gj)
 [46] Fehlauer, L.; Kahl, R.: Einfluss von ETCS-Bremsskurven auf die Infrastrukturplanung, DER EISENBAHNINGENIEUR 8/2019 (https://bit.ly/3U8ZVJK)
 [47] Schwenger, L.; Brune, L.: ETCS-Bremsskurvenkonflikte an Landesgrenzen, DER EISENBAHNINGENIEUR 6/2022 (https://bit.ly/3sDEWDI)
 [48] Deutsche Bahn: ETCS & Co. für „maximale Leistungsfähigkeit“. Foliensatz vom 24. Oktober 2022, S. 11, 20, 23 (https://bit.ly/3DP66j)
 [49] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg: So sehen die 130 neuen Doppelstockzüge fürs Land aus. Webseite https://bit.ly/3UQA5KR, abgerufen am 13. November 2022
 [50] Bührsch, P.; Büker, T.; Schotten, S.; Hardsel, S.: Vorteile und Nutzen von ETCS L2o5 und DSTW im Schienenverkehr, Eisenbahn Ingenieur Kompendium, 2022 (https://bit.ly/3sill4I)
 [51] SRS, 3.13.4.2
 [52] Marek, J.; Myslivec, I.; Drápal, B.: Modell der ETCS-Bremsskurven: Verbesserungsvorschlag für bereits bremsende Züge, SIGNAL+DRAHT 3/2020, mit Korrektur im Heft 4/2020 (S. 44)
 [53] Becker, M.; Büker, T.: Digitalisierung im Gesamtsystem denken, ZEVrail 10/2020 (https://bit.ly/430X661)
 [54] Marek, J.; Myslivec, I.; Bubenik, M.; Drápal, B.: Aktualisierung des Vorschlags zur Verbesserung der ETCS-Bremsskurven, SIGNAL+DRAHT 6/2020 (https://bit.ly/41xwrcM)

Jonas Förster
 Systemingenieur ETCS-Retrofit
 Alstom Transport Deutschland GmbH,
 Berlin
 jonas.foerster@alstomgroup.com

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

Martin Olesch
 Systemingenieur Bremssystem
 Stadler Deutschland GmbH, Berlin
 martin.olesch@stadlerail.com

Peter Reinhart
 Monitoring Gesamtsystem Bahn
 DB Netz AG, Stuttgart
 peter.reinhart@deutschebahn.com

Kristof Vandoorne
 Programm S-Bahn 2025
 DB Regio AG, Plochingen
 kristof.vandoorne@deutschebahn.com

Thomas Vogel
 Projektgruppe „Digitale Schiene“
 Ministerium für Verkehr
 Baden-Württemberg, Stuttgart
 thomas.vogel@vm.bwl.de



Lassen Sie sich unverbindlich beraten!

DIGITALE SONDERDRUCKE

Onlinemarketing mit Ihrem Fachartikel zur Nutzung in Ihren digitalen Kanälen

Werben Sie mit Ihrem maßgeschneiderten digitalen Sonderdruck!

Wir finden mit Ihnen die beste Ergänzung zu Ihrem Onlinemarketing-mix, sodass Sie Ihre digitale Reichweite optimal ausnutzen können.



Interesse? Ihre Ansprechpartnerin: Martina Seemann

@ lizenzen@dvvmedia.com | 040 237 14 139
 DVV Media Group GmbH, Heidenkampsweg 73–79, 20097 Hamburg

Mehr-Informationen unter www.eurailpress.de/digitaler-sonderdruck

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Alstom Transport Deutschland GmbH, DB Projekt Stuttgart-Ulm GmbH, Stadler Deutschland GmbH, DB Netz AG, DB Regio AG, Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

