



## Diplomarbeit

# Auswirkungen flacher ETCS Bremskurven auf zeitabhängige Streckenausrüstungen

eingereicht von Lars Fehlauer

geb. am 23.09.1993 in Dresden

Prüfer:

- Prof. Dr.-Ing. Jochen Trinckauf
- Dr.-Ing. habil. Ulrich Maschek

Betreuer:

- Dipl.-Ing. Richard Kahl
- Dipl.-Ing. Daniel Trenschele (DB Netz)

Dresden, den 18.12.2018

.....

Unterschrift des  
Diplomanden

## Autorenreferat

In den nächsten Jahren wird das interoperable Zugbeeinflussungssystem ETCS die bisher genutzten, konventionellen Systeme ablösen. Zur Eisenbahninfrastruktur gehören jedoch auch Anlagen, deren Dimensionierung bzw. Projektierung direkt mit der Charakteristik des genutzten Sicherungssystems in Zusammenhang steht. Einen wesentlichen Unterschied von ETCS stellt dabei die genutzte Bremskurvenschar zur Überwachung der Zugfahrten dar. Durch den Einbezug zusätzlicher Sicherheitsmargen werden Züge teilweise gezwungen, früher als bisher die Bremsung einzuleiten. In vorliegender Arbeit wird daher die Anwendbarkeit der ETCS-Bremskurven auf zeitabhängige Streckenausrüstungen untersucht. Dabei sollen mögliche betriebliche Einschränkungen analysiert und Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Speziell am Beispiel von ETCS-Teilblocklängen sowie Einschaltstrecken von Bahnübergängen und Zuglenkungsanlagen wird auf die Notwendigkeit geänderter Dimensionierungsregeln eingegangen.

## Bibliografischer Nachweis

Lars Fehlauer

Auswirkungen flacher ETCS Bremskurven auf zeitabhängige Streckenausrüstungen

Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“,  
Professur für Verkehrssicherungstechnik

Diplomarbeit 2018, überarbeitete Version vom Februar 2019

Anzahl der Seiten:	180
Anzahl der Abbildungen:	57
Anzahl der Tabellen:	8
Anzahl der Quellenangaben:	66
Anzahl der Anlagen:	6

## **Abstract**

Over the next years, the interoperable European Train Control System (ETCS) will replace the previously used conventional systems. However, the railway infrastructure also contains installations whose dimensioning or configuration is closely linked to the characteristics of the safety system currently in use. A key difference of ETCS is the set of braking curves used to monitor the train movements. Due to the inclusion of additional safety margins, some trains will be forced to initiate braking earlier than before. Thus, the following paper investigates the applicability of the ETCS braking curves for time-dependent track elements. In the process, potential operational limitations will be analysed, and courses of action will be outlined. The need for modified dimensioning rules will be addressed in particular with the example of partial block section lengths as well as activating paths for level crossings and automatic route setting equipment.

## **Danksagung**

Danke, Mira. Von ganzem Herzen!

## Überarbeitungshinweis

Dieses Dokument entspricht nicht der originalen, zur Bewertung eingereichten Version der Diplomarbeit. Vielmehr stellt dieser Stand eine Überarbeitung dar. Dabei wurden

- grammatikalische Fehler
- Rechtschreibfehler
- sonstige Formatierungsfehler

gegenüber dem Original korrigiert. Es wird hiermit versichert, dass inhaltlich keine Änderungen vorgenommen wurden.

## Thesen zur wissenschaftlichen Arbeit

1. Die Bremskurven von ETCS sind flacher als die von konventionellen Zugbeeinflussungssystemen. ETCS-geführte Züge müssen daher bei der Fahrt auf ein Halt zeigen des Signal früher mit Bremsen anfangen, als PZB-geführte Züge gleicher Geschwindigkeit.
2. Durch ETCS kann die Streckenhöchstgeschwindigkeit von schlecht bremsenden (Güter-)Zügen angehoben werden, da es keinen zulässigen Bremsweg gibt, welcher eingehalten werden muss. Somit muss für Teilsysteme wie z. B. Bahnübergänge auch mit Bremswegen von größer 1000 m gerechnet werden.
3. Aufgrund der flachen Bremskurven von ETCS sinkt die Leistungsfähigkeit von Strecken.
4. Die Länge des vorhandenen Gefahrpunktabstandes bzw. Durchrutschweges hinter einem Signal wirkt sich direkt auf die Steilheit der ETCS-Bremskurven und somit die Leistungsfähigkeit der Strecke aus.
5. Die Standorte der Teilblockkennzeichen des LZB-Hochleistungsblockes können unverändert auch für einen ETCS-Hochleistungsblock verwendet werden.
6. Durch die Anordnung von extrem kurzen Teilblöcken im Bahnsteigbereich kann die Leistungsfähigkeit von hochbelasteten S-Bahn-Stammstrecken deutlich erhöht werden.
7. Die Lage des Einschaltkontaktes bzw. Anrückmelders von Bahnübergängen der Überwachungsart ÜS und Hp muss bei Ausrüstung der Strecke mit ETCS L2 angepasst werden, wenn betriebliche Einschränkungen vermieden werden sollen.
8. Bei ungünstigen Konstellationen kann das Vorhandensein einer nicht angepassten, konventionellen Zuglenkung dazu führen, dass die Fahrerlaubnis für den anrückenden ETCS-geführten Zug nicht rechtzeitig verlängert wird und dieser unnötigerweise eine Bremsung einleiten muss.
9. Um betriebliche Einschränkungen auf ETCS-Strecken zu verhindern und die Leistungsfähigkeit von ETCS zu steigern, bedarf es zahlreicher Anpassungen von Lastenheften und Planungsrichtlinien.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Zweck der Arbeit .....	2
1.3	Abgrenzung der Arbeit .....	3
1.4	Methodik.....	5
1.5	Hinweise zu Berechnungen .....	6
1.6	Grundlegende Literatur .....	7
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>9</b>
2.1	<b>Begriffsdefinitionen</b> .....	<b>9</b>
2.1.1	Zeitabhängige Streckenausrüstung .....	9
2.1.2	Arten von Bremsungen.....	10
2.2	<b>Bewertung des Bremsvermögens von Zügen</b> .....	<b>13</b>
2.2.1	Bremshundertstel.....	14
2.2.2	Bremsbewertung unter ETCS.....	15
2.3	<b>Leistungsfähigkeit von Strecken</b> .....	<b>16</b>
2.3.1	Bedeutung der Streckenleistungsfähigkeit.....	16
2.3.2	Sperrzeitenmodell für das Fahren im festen Raumabstand .....	18
2.3.3	Modifizierung des Sperrzeitenmodells für ETCS L2.....	19
2.4	<b>Überwachungsarten von Bahnübergängen</b> .....	<b>20</b>
2.4.1	Fernüberwachung (Fü).....	20
2.4.2	Überwachung mit Überwachungssignal (ÜS) .....	21
2.4.3	Optimierte Einschaltung mit Überwachungssignal (ÜS <sub>OE</sub> ).....	22
2.4.4	Überwachung mit Hauptsignal (Hp).....	23
2.5	<b>Funktionsprinzip der konventionellen Zuglenkung</b> .....	<b>25</b>
2.5.1	Funktionsziele.....	25
2.5.2	Wirkungsweise .....	26
2.5.3	Ermittlung der Anstoßverzögerungszeit.....	27
2.6	<b>Tool zum Berechnen von ETCS-Bremswegen</b> .....	<b>28</b>
2.6.1	Ausgabemöglichkeiten.....	28
2.6.2	Eingangswerte .....	29
<b>3</b>	<b>ETCS-Bremsmodelle</b> .....	<b>31</b>

---

<b>3.1</b>	<b>Lambda-Modell.....</b>	<b>31</b>
3.1.1	Bremshundertstel-Konvertierungsmodell .....	32
3.1.2	Bremstellungs-Konvertierungsmodell .....	32
3.1.3	Beschreibung der Korrekturfaktoren .....	33
3.1.4	Ermittlung der sicheren Bremsverzögerung.....	36
3.1.5	Ermittlung der sicheren Bremsaufbauzeit.....	37
<b>3.2</b>	<b>Gamma-Modell .....</b>	<b>38</b>
3.2.1	Beschreibung der Korrekturfaktoren .....	39
3.2.2	Ermittlung der sicheren Bremsverzögerung.....	41
3.2.3	Ermittlung der sicheren Bremsaufbauzeit.....	42
<b>3.3</b>	<b>Weitere bremskurvenrelevante, nationale Werte.....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>Charakteristik der Überwachungskurven verschiedener Zugbeeinflussungssysteme .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1</b>	<b>Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB) .....</b>	<b>44</b>
4.1.1	Überwachungsprinzip .....	44
4.1.2	Einfluss des Bremsvermögens.....	46
<b>4.2</b>	<b>Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB).....</b>	<b>47</b>
4.2.1	Überwachungsprinzip .....	47
4.2.2	Einfluss des Bremsvermögens und der Streckenneigung.....	48
<b>4.3</b>	<b>European Train Control System (ETCS).....</b>	<b>50</b>
4.3.1	Erläuterung der Bremskurven .....	50
4.3.2	Abhängigkeit der Bremskurven zueinander .....	56
4.3.3	Einflussfaktoren auf die Steilheit der Bremskurven .....	57
4.3.4	Besonderheiten bei ETCS signalgeführt (ESG).....	61
<b>4.4</b>	<b>Vergleich der Charakteristiken .....</b>	<b>64</b>
<b>4.5</b>	<b>Beispiele zum Vergleich der resultierenden Bremswege.....</b>	<b>66</b>
4.5.1	Vergleich zwischen PZB und ESG.....	66
4.5.2	Vergleich zwischen LZB und ETCS L2 .....	69
4.5.3	Vergleich zwischen ETCS L2 und PZB.....	71
<b>4.6</b>	<b>Leistungspotenzial der Bremskurven .....</b>	<b>75</b>
<b>4.7</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>75</b>
<b>5</b>	<b>Dimensionierung von ETCS-Teilblöcken .....</b>	<b>77</b>
<b>5.1</b>	<b>Allgemeine Zusammenhänge .....</b>	<b>77</b>

---

5.1.1	Abhängigkeit zwischen Teilblocklänge und Mindestzugfolgezeit.....	78
5.1.2	Abhängigkeit zwischen Mindestzugfolgezeit und Geschwindigkeit ...	79
5.1.3	Zusammenhang zwischen Mindestzugfolgezeit und Systemlaufzeiten .....	80
<b>5.2</b>	<b>Verkürzung von Teilblöcken auf Unter-D-Weg-Länge.....</b>	<b>81</b>
<b>5.3</b>	<b>Anwendbarkeit der ETCS-Bremskurven auf bestehende (Teil-) Blocklängen .....</b>	<b>83</b>
5.3.1	Notwendiger Zeitpunkt der Übertragung der MA-Verlängerung .....	84
5.3.2	Anpassungen für ETCS signalgeführt.....	85
5.3.3	Blockteilung der freien Strecke bei ETCS L2 .....	86
5.3.4	Hochleistungsblock für ETCS L2 .....	87
<b>5.4</b>	<b>Exkurs: Nutzung kurzer Teilblöcke auf S-Bahn-Stammstrecken.....</b>	<b>89</b>
5.4.1	Nachrücken aus dem Stillstand .....	90
5.4.2	Zielbremsung zum Halteplatz .....	90
<b>5.5</b>	<b>Potenzielle Regelwerksanpassungen .....</b>	<b>91</b>
<b>5.6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>91</b>
<b>6</b>	<b>Dimensionierung der Einschaltstrecken von Bahnübergängen mit ETCS .....</b>	<b>93</b>
<b>6.1</b>	<b>Überwachungsart FÜ .....</b>	<b>93</b>
6.1.1	Aktuelle Planungsvorgaben für ETCS L2.....	93
6.1.2	Auswirkung der ETCS-Bremskurven .....	94
<b>6.2</b>	<b>Überwachungsart ÜS.....</b>	<b>94</b>
6.2.1	Betrachtungen zu ESG .....	94
6.2.2	Betrachtungen zu ETCS L2.....	98
6.2.3	Hinweise zur Überwachungsart ÜS <sub>OE</sub> .....	104
<b>6.3</b>	<b>Überwachungsart Hp.....</b>	<b>104</b>
6.3.1	Auswirkung der ESG-Bremskurven .....	104
6.3.2	Auswirkung der ETCS L2-Bremskurven .....	104
6.3.3	Lösungsmöglichkeiten .....	105
6.3.4	Zusammenhang zur Zuglenkung.....	107
<b>6.4</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>107</b>
<b>7</b>	<b>Anpassungsbedarf der konventionellen Zuglenkung auf ETCS-Strecken.....</b>	<b>109</b>
<b>7.1</b>	<b>Abläufe zur Verlängerung der Fahrterlaubnis .....</b>	<b>109</b>
7.1.1	Konventioneller Zug .....	109
7.1.2	ETCS-Zug .....	110

---

7.1.3	Vergleich.....	111
7.1.4	Abhängigkeit zu Bahnübergängen der Überwachungsart Hp .....	111
<b>7.2</b>	<b>Möglichkeit von betrieblichen Einschränkungen .....</b>	<b>112</b>
<b>7.3</b>	<b>Handlungsspielräume .....</b>	<b>113</b>
<b>7.4</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>114</b>
<b>8</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>115</b>
8.1	Auswirkung der ETCS-Bremskurven .....	115
8.2	Anpassungspotenzial der ETCS-Bremskurven.....	115
8.3	Notwendige Regelwerksänderungen .....	116
<b>9</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>117</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>118</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>120</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>122</b>
	<b>Formelverzeichnis .....</b>	<b>123</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>124</b>
	<b>Erklärung .....</b>	<b>130</b>
	<b>Anhangsverzeichnis .....</b>	<b>131</b>
	<b>Anhang A: Gesprächsprotokolle .....</b>	<b>132</b>
	<b>Anhang B: Eingangsparameter für die Berechnungen mit dem ETCS- Bremskurventool.....</b>	<b>133</b>
	<b>Anhang C: Übersicht über die Variablen des ETCS-Bremssmodells.....</b>	<b>143</b>
	<b>Anhang D: Schaubilder zu den Parametern der ETCS-Bremskurven.....</b>	<b>144</b>
	<b>Anhang E: Weitere Vergleiche der Bremskurven verschiedener Zugbeeinflussungssysteme .....</b>	<b>151</b>
	<b>Anlage .....</b>	<b>170</b>

# 1 Einführung

## 1.1 Motivation

Bereits seit vielen Jahren wird durch die europäischen Eisenbahnen angestrebt, eine weitestgehende Interoperabilität des Zugverkehrs zunächst auf transeuropäischen Hauptkorridoren herzustellen (vgl. [WIN09]). Neben unterschiedlichen Spurweiten, Lichtraumprofilen, Stromabnehmerbreiten und Stromsystemen stellen die nicht miteinander kompatiblen Zugsicherungs- bzw. Zugbeeinflussungssysteme eine besondere Hürde dar.

Mit der zunehmenden Ausrüstung von Strecken mit dem europäischen Zugbeeinflussungssystem European Train Control System (ETCS) soll eine durchgehende Befahrbarkeit ohne fahrzeugseitige Doppelausrüstung möglich werden. Die Streckenausrüstung mit ETCS stellt die beteiligten Infrastrukturunternehmen dabei vor große Herausforderungen. Dies liegt darin begründet, dass das Layout der Infrastruktur meist auf das bisher verwendete, nationale Zugbeeinflussungssystem abgestimmt ist.

Ein wesentlicher Unterschied ist der Umgang mit dem Bremsverhalten der Züge. In Deutschland muss jeder Zug auf konventionellen, mit punktförmiger Zugbeeinflussung (PZB) ausgerüsteten Strecken innerhalb eines festen Bremswegabstandes zum Stehen gebracht werden können (vgl. [EBO17]). Daraus ergibt sich eine für den konkreten Zug geltende Höchstgeschwindigkeit entsprechend seinem vorhandenen Bremsvermögen. Im Gegensatz dazu wird bei ETCS bei gegebener Geschwindigkeit die Einhaltung eines für jeden Zug individuell entsprechend seines Bremsvermögens berechneten Bremsweges überwacht. Aus diesem Grund kann nicht mehr davon ausgegangen werden, dass sich der Bremsesatzpunkt (BEP) verschiedener Züge bzw. Zugarten bei Bremsvorgängen am selben Standort befindet.

Hinzu kommt, dass durch die Einberechnung zusätzlicher Sicherheiten die Bremskurven von ETCS tendenziell eher flacher verlaufen als jene von konventionellen Systemen. Somit wird ein Zug unter Umständen gezwungen, früher eine Bremsung einzuleiten, als dies bisher der Fall ist.

Aufgrund dieser Systemeigenschaften ist es zwingend erforderlich, die Anwendbarkeit der ETCS-Bremskurven auf zeitabhängige Streckenausrüstungen, bei deren Auslegung die Lage des BEP direkt oder indirekt zu beachten ist, zu überprüfen.

## 1.2 Zweck der Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Auswirkungen der vermeintlich flachen Bremskurven von ETCS auf vorhandene, zeitabhängige Streckenausrüstung untersucht. Wie bereits in Abschnitt 1.1 eingeführt, ändert sich mit ETCS die Philosophie der Bremswegüberwachung.

Während z. B. bei der PZB von einem einzuhaltenden Bremsweg von meist 1000 m<sup>1</sup> auszugehen ist, wird für ETCS-Züge der Bremsweg auf Basis der individuellen Zugeigenschaften sowie der zulässigen Fahrzeug- und Streckengeschwindigkeit dynamisch berechnet. Dies führt zu unterschiedlichen BEP, welche bei ungünstigen Bedingungen örtlich und somit auch zeitlich deutlich vor den bisherigen BEP liegen können.

Die Kenntnis über die BEP und das Verhalten der Züge ist allerdings wichtig für die Dimensionierung eines Teils der Streckenausrüstung. Der Standort des BEP spielt immer dann eine Rolle, wenn ein Zug zeitoptimal eine Information über den weiteren Fahrtverlauf benötigt. Trifft diese erst verzögert nach Befahrung des BEP ein, muss der Triebfahrzeugführer (Tf) bereits eine Bremsung einleiten.

Dies ist z. B. bei der Verlängerung einer Fahrterlaubnis von Bedeutung. Die Lage des BEP hat somit einerseits Einfluss auf Blockabschnittslängen, andererseits auf Systeme wie die Zuglenkung (ZL), welche rechtzeitig das Einlaufen der nächsten Fahrstraße zur unbehinderten Weiterfahrt anstoßen muss.

Des Weiteren wirkt sich der BEP auf die Länge der Einschaltstrecken von Bahnübergängen (BÜ) aus. Da ein Zug unter ETCS ggf. früher eine Information über den Sicherungszustand des BÜ benötigt als bisher, muss dieser auch früher geschlossen werden. Ansonsten würde auch hier der Tf unnötigerweise eine Bremsung einleiten müssen.

Bei punktförmiger Übertragung der Fahrweginformationen wie bei ETCS Level 1 Limited Supervision (ETCS L1LS) oder bei Überwachungssignalen (ÜS) von BÜ gilt es weiterhin zu beachten, dass der Zug keine plötzliche und unerwartete Zwangsbremsung durch das ETCS-System erhalten sollte.

In dieser Arbeit werden die beschriebenen, potenziellen Auswirkungen flacher Bremskurven auf Betrieb und Kapazität hinsichtlich ihrer Auftretensbedingungen analysiert und bestehende Zusammenhänge zwischen Bremskurven, Anordnung von Infrastrukturelementen und Streckenleistungsfähigkeit herausgearbeitet.

Vertieft werden dabei die folgenden Teilbereiche:

---

<sup>1</sup> In Deutschland kommen neben 1000 m auch Bremswegabstände von 700 m und 400 m zur Anwendung (vgl. [DB08b]).

- Dimensionierung von (Teil-)Blocklängen
- Dimensionierung der Einschaltstrecken von Bahnübergängen
- Anpassungsbedarf bei der konventionellen Zuglenkung
- Optimierungspotenzial der Bremskurvenparametrierung

Das Ziel der Betrachtungen ist die Erarbeitung von Lösungsmöglichkeiten, betriebliche Einschränkungen unter ETCS-Führung so gering wie möglich zu halten und gleichzeitig die Leistungsfähigkeit der Strecken weiter zu optimieren. Dabei werden sowohl Anpassungen infrastruktureller Art als auch systemseitig in der Konfiguration von ETCS in Betracht gezogen. Gegebenenfalls resultierende, neue Dimensionierungsregeln bezüglich der oben genannten Teilgebiete können zukünftig in die Überarbeitung bestehender Regelwerke und Lastenhefte einbezogen werden.

### **1.3 Abgrenzung der Arbeit**

Diese Arbeit verfolgt das im Abschnitt 1.2 beschriebene Ziel, betriebliche Beeinträchtigungen aufgrund der gegenüber konventioneller Signalisierung früheren BEP zu verhindern.

Hierfür wird eine umfassende Analyse der ETCS-Bremskurven und deren Berechnungsvorschriften durchgeführt. Es erfolgt ein Vergleich der grundsätzlichen Charakteristiken der verschiedenen, in Deutschland zum Einsatz kommenden, Zugbeeinflussungssysteme und deren Bremskurven. Dies bildet die Grundlage, um die Auswirkungen auf zeitabhängige Streckenausrüstungen verstehen und einordnen zu können.

Es ist dabei nicht das Ziel, Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme herauszuarbeiten, sondern lediglich deren Eigenschaften hinsichtlich dem notwendigen Bremsbeginn gegenüberzustellen. Dieser ist maßgebend für die Beurteilung eventueller betrieblicher Einschränkungen und muss bei der Auslegung der zeitabhängigen Infrastruktur berücksichtigt werden.

Im Rahmen der Arbeit wurde zunächst die Ist-Situation mit den aktuell gültigen Regelwerken betrachtet, anhand derer mögliche betriebliche Einschränkungen in bestimmten Konstellationen aufgezeigt werden. Als Ergebnis stehen somit Hinweise zur Verfügung, welche Aspekte des aktuellen Regelwerkes zu den betrachteten Einschränkungen führen und was getan werden muss, um diese abzumindern. Aufgrund des begrenzten zeitlichen Umfangs der Untersuchungen kann an dieser Stelle jedoch kein konkreter, verbesserter Regelwerksentwurf erstellt werden. Es wird lediglich aufgezeigt, an

welchen Stellen Handlungsbedarf besteht und Vorschläge für eine Entschärfung der Konflikte unterbreitet.

Weiterhin werden in dieser Arbeit keine grundsätzlichen Untersuchungen zum Einfluss von ETCS auf die Kapazität von Strecken und Knoten durchgeführt. Diesbezüglich bieten die zwei im Auftrag des Internationalen Eisenbahnverbandes (UIC) erstellten Studien [UIC08a] und [UIC10] bereits einen umfassenden Überblick. Dennoch ist die Leistungsfähigkeit von ETCS für die durchgeführten Betrachtungen von Relevanz, sodass an gegebenen Stellen kurz darauf eingegangen wird. Insbesondere die Untersuchung zur Dimensionierung von (Teil-)Blocklängen zielt auf die Verringerung der Mindestzugfolgezeit (MZF) und damit der Steigerung der Kapazität ab.

Obwohl ETCS als standardisiertes, europäisches Zugbeeinflussungssystem eine interoperable Betriebsführung auch über Ländergrenzen hinweg ermöglichen soll, bietet das System dennoch großen Spielraum, in konkreter Implementierung nationale betriebliche Besonderheiten abzudecken. So sind die Funktionen auf das vorhandene Layout der Infrastruktur abstimmbaar.

An dieser Stelle sei daher darauf hingewiesen, dass sich die Betrachtungen dieser Arbeit ausschließlich auf die nationale Implementierung des ETCS-Systems in Deutschland auf die Infrastruktur der Deutschen Bahn (DB) Netz beziehen. Gleichwohl ist ein Großteil der Erkenntnisse auch auf andere Bahnen übertragbar.

In Deutschland kommt ETCS sowohl in der Ausrüstungsstufe L1LS, welches als ETCS signalgeführt (ESG) bezeichnet wird, als auch in der Stufe Level 2 (ETCS L2) zum Einsatz. Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen liegt auf ETCS L2. Dies wird damit begründet, dass das deutsche ESG derart an die bisher zum Einsatz kommende PZB angeglichen wurde, dass betriebliche Einschränkungen durch flachere Bremskurven unwahrscheinlich sind. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 5.3.2 vertieft erläutert. Bei ETCS L2 sind hingegen größere Abweichungen und betriebliche Einschränkungen zu erwarten. Auf Besonderheiten bezüglich der Implementierung von ETCS Level 2 ohne Signale (ETCS L2oS) wird an den geeigneten Stellen kurz eingegangen. Es ist keine gesonderte Betrachtung notwendig.

Alle Untersuchungen und Betrachtungen zu den ETCS-Bremswegen beziehen sich auf die derzeit aktuellste Version der europäischen ETCS-Spezifikationen, der ETCS-Baseline 3. Besonders hervorzuheben ist die Systemanforderungsspezifikation (System Requirements Specification, SRS) der Version 3.6.0, welche in [ERA16a] beschrieben ist. Wichtige Unterschiede zur Vorgängerversion, der SRS 3.4.0, werden an entsprechender Stelle erläutert. Die SRS 3.4.0 bildet die Grundlage für die sich derzeit in der Planung und Realisierung befindenden deutschen ETCS-Projekte.

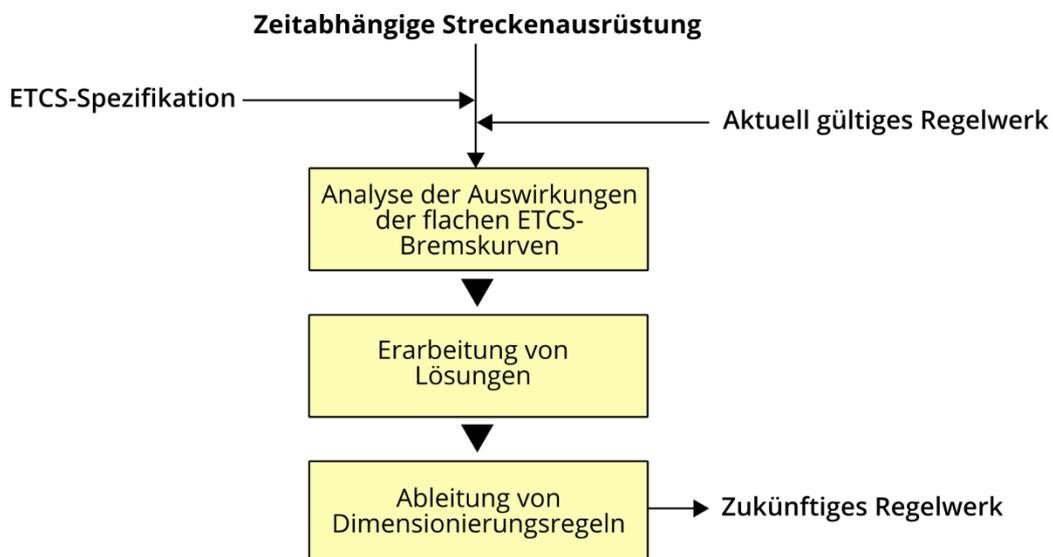
## 1.4 Methodik

Aufgrund der Komplexität und Vielschichtigkeit der Problemstellung dieser Arbeit war es notwendig, sich sehr strukturiert und von mehreren Seiten gleichzeitig dem Thema zu nähern. Nachfolgend werden das angewandte Vorgehen und der daraus resultierende Aufbau der Arbeit kurz beschrieben.

Grundlage aller Betrachtungen bildete eine umfangreiche Literaturrecherche. Diese umfasste zunächst das Erarbeiten der Eigenschaften sowohl der ETCS-Bremskurven als auch der Überwachungskurven der konventionellen Zugbeeinflussung. Insbesondere die ETCS-Spezifikation mit dem Subset 026 (vgl. [ERA16a]) sowie die nationalen Lastenhefte (LH) für ETCS wurden ausgewertet.

Um die Auswirkungen der ETCS-Bremskurven beurteilen zu können, ist die Kenntnis der derzeitigen Dimensionierungsvorgaben der betrachteten Streckenausrüstungen erforderlich. Daher wurden die für jedes betrachtete Teilproblem mitgeltenden Richtlinien (Ril) ebenfalls einbezogen. Die wichtigste Literatur dieser Arbeit ist in Abschnitt 1.6 zusammengefasst.

Abb. 1 stellt das grundsätzliche Vorgehen beim Lösen der einzelnen Teilprobleme dar:



**Abb. 1: Vorgehen beim Lösen der Teilprobleme**

Der gezeigte Ablauf wird für jede untersuchte, zeitabhängige Streckenausrüstung separat durchlaufen, d. h. für (Teil-)Blocklängen ebenso wie für die Einschaltstrecken von BÜ und der Anstoßverzögerungstrecken der ZL. Dabei stellen die jeweils gültigen Regelwerke und die Bremskurvenberechnungsvorschriften gemäß ETCS-Spezifikation, ergänzt durch das ETCS-Lastenheft, die Eingangsparameter dar. Als Ergebnis der

einzelnen Untersuchungen stehen dann ggf. geänderte Dimensionierungsregeln, welche schließlich in ein zukünftiges Regelwerk überführt werden können.

Die Untersuchungen zu den in dieser Arbeit vertieften Streckenausrüstungen erfolgen jeweils in mehreren Schritten:

- **Analyse der Auswirkungen:** In diesem Schritt erfolgt eine Aufnahme der Ist-Situation. Es wird untersucht, ob und welche betrieblichen Einschränkungen bzw. negativen Rückkopplungen auf die Streckenleistungsfähigkeit bei Anwendung der aktuell gültigen LH und Regelwerke zu erwarten sind. Als Ergebnis kann die Aussage getroffen werden, inwiefern Handlungsbedarf besteht.
- **Erarbeitung von Lösungen:** Untersucht wird, mit welchen Anforderungen und unter welchen Bedingungen die im vorherigen Schritt ermittelten Einschränkungen vermieden werden können.
- **Ableitung von Dimensionierungsregeln:** Auf Grundlage der im zweiten Schritt ermittelten Anforderungen werden konkrete Dimensionierungsregeln formuliert, mit deren Hilfe die entsprechenden Regelwerke weiterentwickelt werden können.

Nach Betrachtung aller Teilprobleme wurde schließlich auf zusätzliche Einflussmöglichkeiten zur Abschwächung der Einschränkungen eingegangen. Im Fokus standen dabei mögliche Anpassungen der Eingangsparameter für die Bremskurvenberechnung sowie strecken- und fahrzeugseitige Konfigurationen des ETCS-Systems, welche ebenfalls das Bremsverhalten der Züge beeinflussen.

## 1.5 Hinweise zu Berechnungen

Im Rahmen dieser Arbeit ist es erforderlich, zahlreiche Berechnungen zu Bremseinsatzpunkten (BEP), Bremsweglängen und Mindestzugfolgezeiten (MZF) verschiedener Zugbeeinflussungssysteme durchzuführen. Für alle Berechnungen im Zusammenhang mit den ETCS-Bremskurven wird ein von der europäischen Eisenbahnagentur (European Railway Agency, ERA) entwickeltes und veröffentlichtes Berechnungsprogramm verwendet. Die Verwendung dieses Tools und dessen Möglichkeiten wird in Abschnitt 2.6 beschrieben.

Um sich innerhalb des Hauptteils dieser Dokumentation auf die wesentlichen Ergebnisse der Berechnungen konzentrieren zu können, ist es nicht zweckmäßig, die Eingangsgrößen jeder Berechnung in der Arbeit ausführlich aufzulisten. Mithilfe des Berechnungstools der ERA können alle Berechnungen zu ETCS-Bremskurven eigenständig nachvollzogen werden. Hierfür ist lediglich die Kenntnis über alle verwendeten

Eingangsparameter für das Tool notwendig. Für jede in der Arbeit getätigte Berechnung zu ETCS-Bremskurven erfolgt daher in Anhang B eine Zusammenstellung der Eingangsparameter.

Die Berechnungen zu Überwachungskurven der PZB und der LZB wurden in einer separaten, eigenständig erstellten Excel-Tabelle durchgeführt. Innerhalb der Arbeit wird lediglich auf die Berechnungsergebnisse zurückgegriffen und darauf hingewiesen, welche Eingangsparametergruppe des Anhangs für die Berechnung verwendet wurde.

Weiterhin wird darauf hingewiesen, dass alle mit der Berechnung der ETCS-Bremskurven zusammenhängenden Variablen auch physikalischer Größen mit Großbuchstaben bezeichnet werden, um eine einheitliche Verwendung gemäß der ETCS-Spezifikation sicherzustellen. So wird z. B. die Schnellbremsverzögerung mit *A\_brake\_emergency* bezeichnet.

## **1.6 Grundlegende Literatur**

Für die Erstellung dieser Arbeit erfolgte eine umfangreiche Literaturrecherche. Dabei spielten Lastenhefte und Richtlinien der DB ebenso eine Rolle wie die offiziellen ETCS-Spezifikationen der ERA. Weiterhin konnten viele Informationen aus Fachartikeln der gängigen Eisenbahnfachzeitschriften gewonnen werden, auf die an den entsprechenden Stellen verwiesen wird.

Um einen Überblick über die dieser Arbeit zu Grunde liegenden Literatur zu erhalten, erfolgt nachstehend eine Auflistung der wichtigsten Quellen, die nach den bearbeiteten Teilbereichen geordnet ist (vgl. Tab. 1). Insbesondere soll Tab. 1 einen Überblick über die verwendeten DB-Richtlinien und LH geben, welche für die Betrachtungen in dieser Arbeit von Relevanz sind. Eine vollständige Auflistung aller genutzten Quellen enthält das Literaturverzeichnis.

Zusätzlich wurde mithilfe von Experteninterviews auf das Erfahrungswissen von Mitarbeitern der DB und von deutschen Signalbauunternehmen zurückgegriffen. Die Ergebnisse dieser Gespräche sind im Anhang A zusammengefasst. Auf sie wird an den entsprechenden Stellen gemäß demselben Prinzip wie bei den gewöhnlichen schriftlichen Literaturquellen verwiesen.

	<b>Titel der Literaturquelle</b>	<b>Verweis zum Literaturverzeichnis</b>
<b>Allgemein</b>	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)	[EBO17]
	Sicherung des Schienenverkehrs	[MAS18]
	ETCS for Engineers	[STA11]
	Compendium on ERTMS	[WIN09]
	Ril 405: Fahrwegkapazität	[DB09c]
	Ril 457.0401A02: Grundbremstafeln	[DB09b]
	Ril 819.0202: Hauptsignale	[DB12b]
	Ril 819.0203: Vorsignale	[DB08b]
<b>ETCS-Bremskurven</b>	Lastenheft ETCS: Betrieblich-technische Systemfunktionen für ETCS SRS Baseline 3	[DB16a]
	Lastenheft ETCS signalgeführt	[DB16b]
	Subset 026 – System Requirements Specification (Version 3.6.0)	[ERA16a]
	Introduction to ETCS Braking Curves	[ERA16b]
<b>Teilblocklängen</b>	CIR-ELKE (HBL): Planungsgrundsätze	[DEU93]
	Lastenheft für das Elektronische Stellwerk (ESTW) – Teilheft F8: Hochleistungsblock CIR-ELKE	[DB12a]
	Ril 405.0304: Bemessung zweigleisiger Strecken	[DB08a]
	Ril 819.0508: CIR-ELKE	[DB00]
	Ril 819.1100: Planungsgrundsätze für selbsttätige Gleisfreimeldeanlagen mit Achszähltechnik	[DB14]
<b>Bahnübergänge</b>	Ril 408.0641: Sonstige Unregelmäßigkeiten an technischen Einrichtungen	[DB17c]
	Ril 815.0033: Technische Sicherungen an Bahnübergängen berechnen	[DB09a]
	Ril 819.1344: Grundsätze zur Erstellung der Ausführungsplanung für ETCS L2	[DB17b]
	Ril 819.1348: Grundsätze zur Erstellung der Ausführungsplanung für ETCS signalgeführt	[DB17e]
<b>Zuglenkung</b>	Betriebliches und technisches Lastenheft für eine Zuglenkung	[DB07]
	Ril 819.0732: Zuglenkung planen	[DB10]

Tab. 1: Zusammenstellung der wichtigsten Literaturquellen

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird in die Grundlagen dieser Arbeit eingeführt. Wichtige Begriffe, welche einer präzisen Verwendung bedürfen, werden definiert. Es erfolgt die Vorstellung der gängigen Verfahren, das Bremsvermögen von Zügen zu beschreiben. Weiterhin wird ein Überblick über die in dieser Arbeit untersuchten Streckenausrüstungen gegeben. Dies betrifft Betrachtungen zur Blockteilung bzw. Streckenleistungsfähigkeit, den Überwachungsarten von Bahnübergängen sowie dem Funktionsprinzip der konventionellen Zuglenkung.

### 2.1 Begriffsdefinitionen

Die Ausführungen dieser Arbeit beziehen sich in erster Linie auf deutsche Verhältnisse und insbesondere auf das Streckennetz der DB Netz. Daher erfolgt eine Verwendung der Begrifflichkeiten, wie sie bei der DB üblich ist. Es ist durchaus möglich, dass in der Fachliteratur teils andere Begriffe verwendet werden oder Definitionen geringfügig voneinander abweichen. Damit für das Verständnis dieser Arbeit ein einheitlicher Stand herrscht, werden die Begriffe, bei denen eine präzise Verwendung wichtig ist, nachfolgend kurz erläutert.

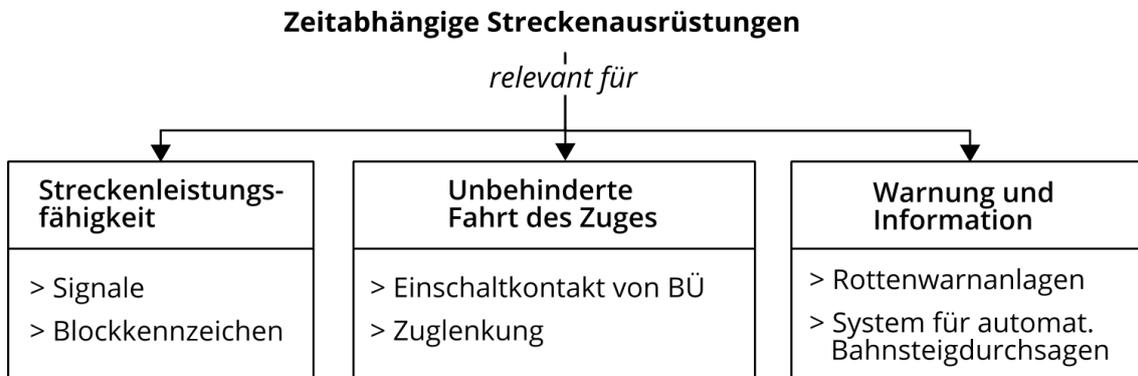
#### 2.1.1 Zeitabhängige Streckenausrüstung

Der Begriff der „zeitabhängigen Streckenausrüstung“ wird in der einschlägigen Fachliteratur in der Form nicht verwendet. Um ein einheitliches Verständnis dieses Ausdrucks herzustellen, soll dieser für die Ausführungen in dieser Arbeit wie nachstehend definiert werden:

Unter zeitabhängigen Streckenausrüstungen sollen im Folgenden diejenigen Komponenten der Eisenbahninfrastruktur verstanden werden, deren absolute Anordnung am Gleis bzw. deren relative Lage zueinander direkt von sich aus der Fahrt des Zuges ergebenden, zeitlichen Berechnungen abhängt. Dies beinhaltet auch alle von diesen Komponenten direkt oder indirekt abhängigen Systeme, für deren anlagenspezifische Projektierung diese Zeitkomponenten Eingangsparameter darstellen.

Die betreffenden Elemente und Systeme sind in der Regel direkt oder indirekt dafür verantwortlich, dass sowohl eine geforderte Streckenleistungsfähigkeit erreicht wird, als auch, dass Informationen verschiedener Art zeitgerecht einen bestimmten Empfänger erreichen. Dies können zum einen Züge sein, welche z. B. für eine unbehinderte Fahrt rechtzeitig eine Information über die Verlängerung der Fahrterlaubnis benötigen. Auf

der anderen Seite sind hiermit aber auch für Fahrgäste relevante Systeme wie z. B. automatische Lautsprecherdurchsagen am Bahnsteig bei ein- und durchfahrenden Zügen gemeint. Abb. 2 teilt zeitabhängige Streckenausrüstungen in drei Kategorien ein und nennt Beispiele.



**Abb. 2: Beispiele für zeitabhängige Streckenausrüstungen**

Für die Betrachtungen in dieser Arbeit sind diejenigen zeitabhängigen Streckenausrüstungen relevant, deren Anordnung oder Projektierung in Zusammenhang mit den Überwachungs- und Führungskurven des jeweiligen Zugbeeinflussungssystems und den daraus resultierenden Bremsesatzpunkten (BEP) steht. Dies sind:

- Standorte von Signalen und (Teil-)Blockkennzeichen (Bk) und daraus resultierender Blockteilung, insbesondere Hochleistungsblock (HBL)
- Bahnübergangssicherungsanlagen (BÜSA) mit ihren Einschaltkontakten, Anrückmeldern und ggf. Schließkommandoverzögerungszeiten
- Zuglenkungsanlagen mit ihren Anstoßverzögerungszeiten

Eine Erläuterung, warum die Bremskurven und der BEP wichtig für die Dimensionierung und Projektierung der oben genannten Anlagen ist, ergibt sich aus den Kapiteln 5, 6 und 7.

## 2.1.2 Arten von Bremsungen

Im eisenbahnbetrieblichen Sinn sowie aus der Sicht von Zugbeeinflussungssystemen werden verschiedene Arten von Bremsungen differenziert. Diese unterscheiden sich maßgeblich in Kriterien wie Stärke und Schnelligkeit der Bremswirkung, auslösendes Ereignis und Zielgeschwindigkeit. Grundsätzlich können die Bremsarten gemäß [JAE16a] hinsichtlich der Aufgaben und Anforderungen an Bremssysteme eingeteilt werden (vgl. Abb. 3).



**Abb. 3: Übersicht über verschiedene Bremsarten nach [JAE16a]**

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen sind lediglich die Bremsarten von Interesse, welche in direktem Zusammenhang mit der Bremskurvenberechnung stehen sowie als Reaktion auf ein auslösendes Ereignis durch die betrachteten Zugbeeinflussungssysteme eingeleitet werden können. Hierzu zählen:

- Betriebsbremsung
- Vollbremsung
- Schnellbremsung
- Zwangsbetriebsbremsung
- Zwangsbremsung

Die verschiedenen Bremsarten und deren Verwendung bei der DB sind in der Ril 915.0101 [DB16c] festgehalten. Für die folgenden Beschreibungen wurde zusätzlich auf die Definitionen aus [NEU16], [JAE16a], [JAN00] und [JAN16] zurückgegriffen, die sich alle in Details leicht unterscheiden. An dieser Stelle sei auch angemerkt, dass abweichend von der Begriffsbestimmung aus der Ril 915.0101 für die Zwangsbetriebsbremsung hier eine leicht andere Definition verwendet wird.

Die präzise Verwendung der Begriffe der Bremsarten ist insbesondere für die Erläuterung der Fahrzeugreaktionen bei Überschreitung der verschiedenen Überwachungskurven von ETCS im Abschnitt 4.3 von großer Bedeutung.

### 2.1.2.1 Betriebsbremsung

Unter einer Betriebsbremsung wird für gewöhnlich die Bremsung eines Zuges im regulären Betrieb verstanden. Sie ist hinsichtlich ihrer Bremswirkung und Dauer variabel. Mithilfe des Führerraumbremsventils oder einer automatischen Fahr- und Bremssteuerung (AFB) kann der Druck in der Hauptluftleitung (HL) in mehreren Stufen gesenkt und

somit die Bremskraft stufenweise erhöht werden (vgl. [JAN00]). Die größtmögliche Bremswirkung des Zugverbandes soll möglichst nicht erreicht werden (vgl. [NEU16]). Diese Bremsart genügt somit den Anforderungen an hohen Fahrgastkomfort (Verhinderung starker Rucke und Beschleunigungen) und geringen Bremsverschleiß.

### **2.1.2.2 Vollbremsung**

Die Vollbremsung stellt eine maximale Betriebsbremsung dar. Das Führerraumbremsventil befindet sich in der Stufe, mit welcher die höchste im Bereich der Betriebsbremsstellungen einstellbare Bremsverzögerung erreicht wird (vgl. [DB16c]). Dies entspricht bei Druckluftbremsen einer Absenkung des Drucks in der HL um 1,5 bar auf 3,5 bar (vgl. [JAN00]).

### **2.1.2.3 Schnellbremsung**

Bei einer Schnellbremsung wird die höchste Bremsverzögerung innerhalb kürzester Zeit erreicht. Dies erfolgt bei selbsttätigen Druckluftbremsen über eine vollständige Entlüftung der HL auf 0 bar (vgl. [JAN00]). Eine Schnellbremsung kann durch das Einstellen des Führerraumbremsventils in die rastierte Schnellbremsstellung (vgl. [DB16c]) oder die Kommandierung durch das Zugbeeinflussungssystem eingeleitet werden. Zusätzlich zu den bei einer Betriebsbremsung genutzten Bremsen können weitere, hochverfügbare Bremsen zum Einsatz kommen, wie z. B. vom Kraftschluss zwischen Rad und Schiene unabhängige Magnetschienenbremsen (vgl. [NEU16]).

### **2.1.2.4 Zwangsbremsung**

Eine Zwangsbremsung entspricht hinsichtlich der Höhe der Bremsverzögerung einer Schnellbremsung. Die Einleitung erfolgt jedoch unabhängig vom Tf automatisch durch technische Systeme (vgl. [JAN16]). Dies kann z. B. die Reaktion einer Zugbeeinflussung bei unerlaubter Vorbeifahrt an einem Gefahrpunkt sein. Eine Zwangsbremsung bleibt bis zum Stillstand des Zuges aufrechterhalten (vgl. [JAE16a]).

### **2.1.2.5 Zwangsbetriebsbremsung**

Wie bei der Zwangsbremsung wird auch bei einer Zwangsbetriebsbremsung eine der Schnellbremsung vergleichbare Bremsung durch technische Systeme eingeleitet. Der Unterschied besteht allerdings darin, dass die Zwangsbetriebsbremsung aufgehoben wird, sobald die auslösende Bedingung entfallen ist (vgl. [JAE16a]). Dies ist z. B. beim Auslösen der Sicherheitsfahrschaltung (Sifa) oder bei einfachen Geschwindigkeitsüberschreitungen der Fall.

Diese Definition unterscheidet sich somit von der Erläuterung in der Ril 915.0101, bei der die zwangsweise Einleitung einer Betriebsbremsung angenommen wird. Zur Differenzierung der Fahrzeugreaktionen unter ETCS wird in dieser Arbeit jedoch die zuerst genannte Begriffsbestimmung genutzt.

### **2.1.2.6 Zwangsvollbremsung**

Das System ETCS ist prinzipiell auch in der Lage, eine zwangsweise Einleitung einer Vollbremsung zu kommandieren (vgl. [ERA16a]). Hierfür soll zusätzlich zu den in der Fachliteratur existierenden Bremsarten der Begriff der Zwangsvollbremsung eingeführt werden. Gleichzeitig sei angemerkt, dass diese ETCS-Funktion in Deutschland nicht genutzt wird (vgl. [DB16a]).

## **2.2 Bewertung des Bremsvermögens von Zügen**

Die Beschreibung und Bewertung des Bremsvermögens von Zügen ist für die Bestimmung von Bremswegen und damit verbundenen BEP von elementarer Bedeutung. Bei konventionellen Signalisierungssystemen ist dies insofern wichtig, als dass anhand des Bremsvermögens die Höchstgeschwindigkeit abgeleitet wird, um innerhalb eines vorgegebenen Bremswegabstandes den Zug anhalten zu können.

Systeme wie ETCS rechnen dagegen mit variablen Bremswegen. Hier ist die Kenntnis über das Bremsvermögen des Zuges dahingehend notwendig, um den Punkt ermitteln zu können, an dem spätestens die Bremsung eingeleitet werden muss, damit ein bestehender Gefahrpunkt nicht überfahren wird.

In Deutschland und Europa existieren zwei Methoden, das Bremsvermögen der Züge zu beschreiben (vgl. [GRÖ03]):

- Verwendung der dimensionslosen Größe „Brems Hundertstel“ (Brh), deren Wert aus empirischen Untersuchungen zu Bremsweglängen spezifischer Fahrzeuge abgeleitet wird
- Verwendung der physikalischen Größe der Beschleunigung  $a$ , entweder als mittlere Verzögerung über den gesamten Bremsweg oder als Momentanverzögerung mit verschiedenen Geschwindigkeitsstufen

Prinzipiell ließe sich das Bremsverhalten der Züge mittels der physikalischen Beschleunigung realitätsnaher darstellen als mit Brh (vgl. [EIC05]). Der Tatsache geschuldet, dass insbesondere bei Güterzügen die Zugkomposition laufend geändert wird, ist die Bewertung des Bremsvermögens des gesamten Zugverbandes solcher Züge mittels

physikalischer Größe jedoch nicht bzw. nur aufwändig darstellbar (vgl. [ERA16b]). Aus diesem Grund ist die Verwendung der Brh als Bewertungsgröße weiterhin üblich.

Für das Berechnungsmodell der Bremsweglängen und Bremskurven unter ETCS ist die Kenntnis über die anzunehmenden Verzögerungen allerdings Voraussetzung. Somit ist die Ermittlung der Verzögerungswerte erforderlich, was jedoch nur für feste Zugkonfigurationen sinnvoll ist (Gamma-Modell, vgl. Abschnitt 3.2). Für alle anderen Züge musste ein Modell entwickelt werden, mit dem die empirisch ermittelten Brh in eine Beschleunigung bzw. Verzögerung umgerechnet werden können (Lambda-Modell, vgl. Abschnitt 3.1). Für ETCS existieren daher zwei verschiedene Bremsmodelle. Sie bilden die Grundlage für die Berechnung der Bremskurven und haben damit direkten Einfluss auf zeitabhängige Streckenausrüstung. Eine Einführung erfolgt in Kapitel 3.

Im Folgenden soll die empirische Größe der Brh sowie die für ETCS benötigten Grundwerte zur Beschreibung des Bremsverhaltens mit Verzögerungswerten erläutert werden.

### 2.2.1 Brems Hundertstel

Züge können aus vielen Einzelfahrzeugen gebildet werden, welche sich hinsichtlich ihres Bremsvermögens und Gewichts unterscheiden können. Für das Fahren der Züge im konventionellen Haupt-/Vorsignalsystem muss die Geschwindigkeit bekannt sein, bis zu welcher der Zug innerhalb des Bremswegabstandes der Strecke in Abhängigkeit der Streckenneigung zum Halten gebracht werden kann (vgl. [JAN16]). Dafür wurde die Bewertungsgröße Brems Hundertstel (Brh) mit Formelzeichen  $\lambda$  als dimensionsloser Ausdruck für die Bremswirkung eingeführt. Dabei wird ein sogenanntes Bremsgewicht  $B$  zur Fahrzeugmasse  $m$  ins Verhältnis gesetzt. Zur Ermittlung der Brh eines Zugverbandes wird zunächst die Summe aus allen Bremsgewichten sowie Fahrzeugmassen der Einzelfahrzeugen gebildet (vgl. Formel 1). Die Angabe erfolgt in Prozent, weshalb auch der Name Bremsprozent üblich ist.

$$\lambda [\%] = \frac{\sum B}{\sum m} \cdot 100$$

#### Formel 1: Berechnung der Brems Hundertstel

Das Bremsgewicht  $B$  eines Fahrzeuges wird in [JAN00] wie folgt definiert:

*Das Bremsgewicht ist ein im Eisenbahnbetrieb eingeführter Begriff, der das zu einer Bremsstellung gehörende Leistungsvermögen der Fahrzeugbremse beschreibt. Das Bremsgewicht eines Eisenbahnfahrzeuges wird üblicherweise durch Versuche ermittelt und für eine Fahrzeugbauart einheitlich festgelegt.*

Die Vorgehensweise für dieses Bremsbewertungsverfahren ist im UIC-Merkblatt 544-1 (vgl. [UIC14b]) beschrieben.

Neben den Brh existieren als betriebliche Unterlagen auch sogenannte Bremswegtafeln. Diese beinhalten eine zusätzliche Bremswegsicherheit von 10 % (vgl. Abschnitt 4.1) und stellen die zulässige Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Streckenneigung und der vorhandenen Bremshundertstel im Zugverband dar (vgl. [GRÖ03]). Die vom Bundesminister für Verkehr genehmigten Bremsstafeln für das Netz der DB sind in [DB09b] zu finden. Weiterhin sind für jeden Streckenabschnitt Mindestbremshundertstel festgelegt, die ein Zug haben muss, um die jeweils zulässige Geschwindigkeit fahren zu können (vgl. [MIN07])

Zusammenfassend kann aus den vorhandenen Brh eines Zugverbandes der Bremsweg in der Ebene in Abhängigkeit der Bremsausgangsgeschwindigkeit abgelesen werden. Somit kann bei vorgegebenem Bremswegabstand auf die höchste zulässige Geschwindigkeit dieses Zuges rückgeschlossen werden.

### 2.2.2 Bremsbewertung unter ETCS

ETCS überwacht neben zulässigen Geschwindigkeiten auch das ordnungsgemäße Bremsen eines Zuges auf einen Halt, um das Überfahren eines definierten Gefahrenpunktes zu verhindern. Dafür werden verschiedene Bremswege des Zuges berechnet; unter anderem ein Schnellbremsweg, der unter möglichst allen Umständen eingehalten wird, und ein Betriebsbremsweg. Daher müssen ETCS sowohl die verschiedenen Verzögerungswerte als auch die jeweiligen Bremsaufbauzeiten bekannt sein. Für die Bremsbewertung des Zugverbandes werden folgende Grundwerte benötigt (vgl. [ERA16b]):

- Schnellbremsverzögerung  $A_{brake\_emergency}^2$
- Betriebsvollbremsverzögerung  $A_{brake\_service}$
- Schnellbremsaufbauzeit  $T_{brake\_emergency}$
- Betriebsbremsaufbauzeit  $T_{brake\_service}$

Die Schnellbremsverzögerung sowie die Schnellbremsaufbauzeit werden im weiteren Verlauf der Bremskurvenberechnung mit Korrekturfaktoren belegt, mit denen der Infrastrukturbetreiber die Wahrscheinlichkeit der Einhaltung der Bremswege an seine Sicherheitsphilosophie sowie das Infrastrukturlayout anpassen kann (vgl. Abb. 17 und

---

<sup>2</sup>Die Verwendung der ETCS-Variablen und Formelzeichen erfolgt gemäß ETCS-Spezifikation. Daher werden für die Formelzeichen der Beschleunigung und der Zeit Großbuchstaben verwendet.

Abb. 21). Die Bestimmung dieser garantierten, sicheren Schnellbremsverzögerung und Schnellbremsaufbauzeit mit den ETCS-Bremsmodellen ist im Abschnitt 3 beschrieben. Wie aus den genannten Grundwerten letztlich die Bremskurven und einzuhaltenden Bremswege errechnet werden, erläutert Abschnitt 4.3.

## 2.3 Leistungsfähigkeit von Strecken

In Kapitel 5 wird unter anderem untersucht, inwieweit sich der ETCS-Betrieb und die damit verbundenen Bremskurven unter Beibehaltung der bisherigen Blockteilung inklusive der Nutzung von Teilblöcken negativ auf die Leistungsfähigkeit der Strecken auswirkt. Daher soll nachfolgend als Grundlage kurz in die Kapazitätsbetrachtung für Schieneninfrastruktur eingeführt werden.

### 2.3.1 Bedeutung der Streckenleistungsfähigkeit

Zunächst muss darauf hingewiesen werden, dass der Begriff der Leistungsfähigkeit und die damit verbundenen Kenngrößen in nationalen und internationalen Richtlinien sowie Lehrinrichtungen unterschiedlich definiert werden. Einigkeit herrscht allerdings darin, dass es nicht die eine Leistungskenngröße gibt, sondern die erbringbare Leistung auf einer Eisenbahnbetriebsanlage von folgenden Randbedingungen beeinflusst wird (vgl. [BÄR15]):

- Struktur des Betriebsprogramms
- erwartete Qualität und Wirtschaftlichkeit der Leistungserbringung
- betrachtete Ebene der Leistungsermittlung (Fahrplan oder Betriebsdurchführung)
- betrachteter Untersuchungsraum

Untersuchungen zur Fahrwegkapazität bei der DB sind in der Ril 405 (vgl. [DB09c]) beschrieben. Demnach gelten die Begriffe Fahrwegkapazität bzw. Leistungsfähigkeit, welche quasi gleichbedeutend verwendet werden, als „Oberbegriff für verschiedene Kenngrößen der Fahrwegkapazität“ [DB09c]. Die Kenngrößen werden dahingehend unterteilt, ob ein Qualitätsbezug besteht, oder nicht. So existiert der Begriff der „theoretischen Leistungsfähigkeit“. Dieser beschreibt die maximale Zuganzahl auf einem Netzelement (z. B. Blockabschnitt) innerhalb des Untersuchungszeitraumes. Es existiert kein Qualitätsbezug – außerhalb des betrachteten Netzelementes würde es zu unbegrenzten Stauererscheinungen kommen (vgl. [DB09c]).

Die „praktische Leistungsfähigkeit“ bezieht sich dagegen auch auf die Qualität und ist Oberbegriff für verschiedene Leistungskenngrößen wie z. B. die infrastrukturbezogene Leistungsfähigkeit. Diese stellt aus Sicht der Infrastruktur die optimale Zuganzahl dar, die mit wirtschaftlich optimaler Betriebsqualität fahrbar ist (vgl. [DB09c]).

Für die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit wird der Begriff der Leistungsfähigkeit im Sinne der theoretischen Leistungsfähigkeit verwendet. Die Untersuchungen zur Auslegung der Infrastruktur sollen sich dabei auf die technisch maximal fahrbare Zuganzahl im Untersuchungszeitraum auf einem Netzelement ohne Berücksichtigung von Pufferzeiten beziehen, wengleich die Wartezeit der Züge außerhalb des Untersuchungsraumes unendlich groß werden würde (vgl. Abb. 4).



**Abb. 4: Wartezeitfunktion [PAC13]**

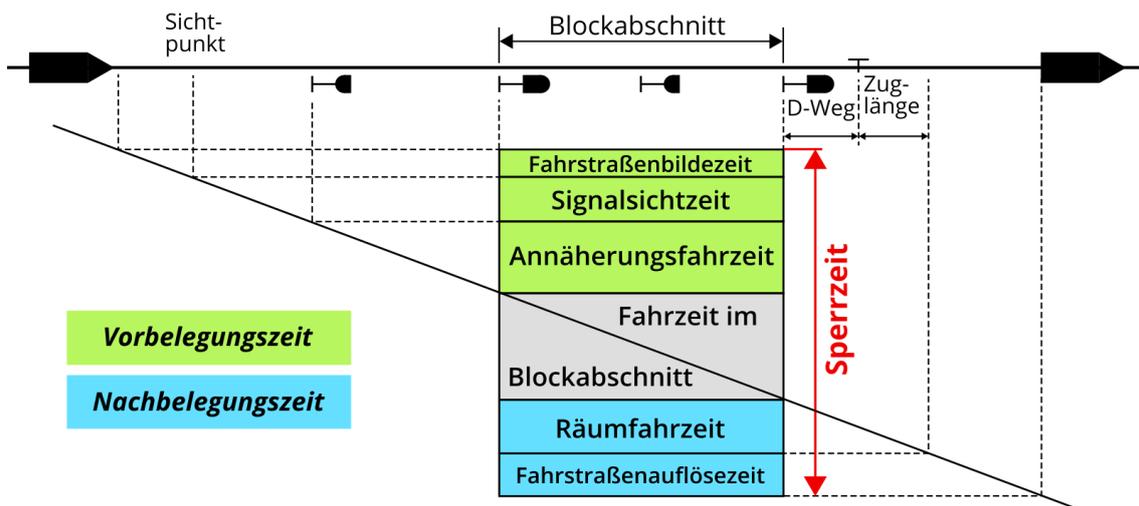
Der dargestellte Zusammenhang zwischen Steigerung der Zuganzahl je Zeiteinheit und die damit einhergehende Zunahme der mittleren Wartezeit wird als Leistungsverhalten einer Eisenbahnanlage bezeichnet (vgl. [PAC13]).

Die Leistungsfähigkeit kann alternativ auch mithilfe der Zugfolgezeit beschrieben werden. Diese gibt den Zeitabstand an, in welchem sich zwei Züge an einem Infrastrukturstandort folgen (vgl. [DB09c]) und berechnet sich aus der Differenz des Beginns der Sperrzeiten (vgl. nachfolgender Abschnitt 2.3.2). Bei Annahme der theoretischen Leistungsfähigkeit ergibt sich so die technische Mindestzugfolgezeit (MZF). Dies ist der kürzest mögliche Zeitabstand, in dem sich zwei Züge an einem Infrastrukturstandort behinderungsfrei folgen können.

Ziel der Dimensionierung von (Teil-)Blocklängen ist die Minimierung der MZF.

### 2.3.2 Sperrzeitenmodell für das Fahren im festen Raumabstand

Grundlage des Eisenbahnbetriebes und dessen Sicherung ist die Aufteilung der Infrastruktur in Fahrwegabschnitte, welche jeweils nur von einem Zug gleichzeitig beansprucht werden können. Die Beanspruchung eines solchen Fahrwegelements wird Sperrzeit genannt (vgl. [DB09c]). Abb. 5 veranschaulicht die Bestandteile der Sperrzeit.



**Abb. 5: Sperrzeit eines Blockabschnittes**

Grundsätzlich kann die Sperrzeit beim Fahren im festen Raumabstand in folgende drei Hauptbestandteile aufgegliedert werden:

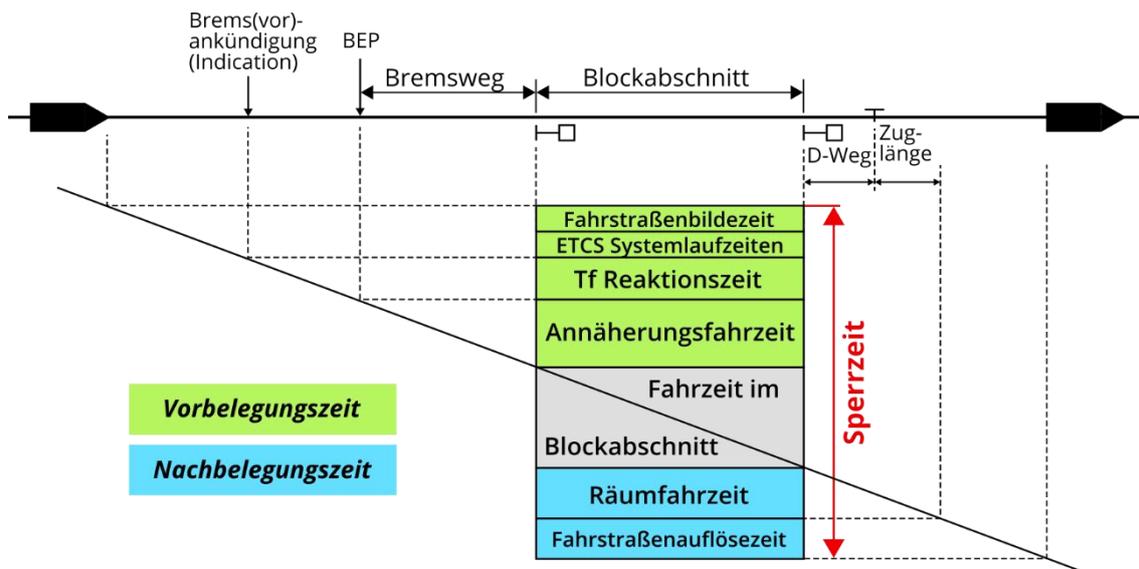
- **Vorbelegungszeit**, bestehend aus Fahrstraßenbildezeit, Signalsichtzeit und Annäherungsfahrzeit
- **Fahrzeit im Blockabschnitt**
- **Nachbelegungszeit**, bestehend aus Räumfahrzeit über den Durchrutschweg (D-Weg) und die eigene Zuglänge sowie Fahrstraßenauflösezeit

Die grafische Visualisierung der Aneinanderreihung der Sperrzeiten der benachbarten Fahrwegabschnitte wird als Sperrzeitentreppe bezeichnet (vgl. [DB09c]). Dieses Sperrzeitenmodell bildet die Grundlage sowohl für analytische als auch grafische Verfahren der Leistungsuntersuchung und ihrer Visualisierung und wird auch in dieser Arbeit genutzt.

In Abb. 5 gut erkennbar ist zudem der notwendige Zugfolgeabstand für die behinderungsfreie Fahrt. Bei Blockabschnitten gleicher Länge und der Zugfolge zweier Züge mit der gleichen, konstanten Geschwindigkeit kann die Sperrzeit eines Blockabschnittes mit der MZF gleichgesetzt werden.

### 2.3.3 Modifizierung des Sperrzeitenmodells für ETCS L2

Da unter ETCS L2 nicht nach Außensignalisierung gefahren wird, müssen die Bestandteile der Sperrzeit teilweise neu gedeutet bzw. ergänzt werden. Insofern war es für diese Arbeit erforderlich, das konventionelle Sperrzeitenmodell für ETCS L2 anzupassen (vgl. Abb. 6).



**Abb. 6: Modifiziertes Sperrzeitenmodell für ETCS L2**

Es bestehen folgende Unterschiede zum konventionellen Sperrzeitenmodell:

- zusätzliche Zeitkomponente für Systemlaufzeiten von ETCS; diese beinhaltet die Zeitdauer zwischen Abschluss der Fahrstraßenbildung und Anzeige der Verlängerung der Fahrterlaubnis auf dem Driver Machine Interface (DMI) im Führerstand (vgl. Abb. 42)
- bisherige Sichtzeit zur Wahrnehmung der Stellung des Vorsignals ändert sich zur Reaktionszeit des Tf zur Wahrnehmung der Brems(vor)ankündigung
- bisheriger Sichtpunkt wird somit durch den Indication Point von ETCS ersetzt; für eine unbehinderte Fahrt im Regelbetrieb muss spätestens bei Erreichen dieses Punktes die Verlängerung der Fahrterlaubnis vorliegen (vgl. hierzu auch Abschnitt 5.3.1).
- Annäherungsfahrzeit bezieht sich nicht mehr auf den festen Bremswegabstand zwischen Vor- und Hauptsignal, sondern auf den zugindividuellen, dynamisch berechneten Bremsweg des jeweiligen Zuges, bezogen auf die Sollbremskurve

Die Fahrstraßenbildezeit, Fahrzeit im Blockabschnitt sowie die Bestandteile der Nachbelegungszeit bleiben unverändert zum konventionellen Sperrzeitenmodell bestehen.

## 2.4 Überwachungsarten von Bahnübergängen

In Kapitel 6 werden die Auswirkungen der Charakteristik der ETCS-Überwachungskurven auf die Dimensionierung der Einschaltstrecken von Bahnübergängen (BÜ) betrachtet. Dabei muss klar zwischen den verschiedenen Überwachungsarten von Bahnübergängen unterschieden werden, da jede in einem teils anderen Zusammenhang zu den Bremskurven und BEP steht.

Die Überwachung der Funktion von BÜ ist erforderlich, um Zusammenpralle aufgrund einer fälschlicherweise fehlenden Sicherung des BÜ zu verhindern. In solch einem Fall müssen Züge rechtzeitig gestoppt werden können. Nach [MAS18] können die verschiedenen Möglichkeiten der Überwachung der BÜ-Funktion in zwei Hauptgruppen unterteilt werden:

- **Überwachung der Einschaltung:** geprüft wird, ob sich der BÜ in gesichertem Zustand<sup>3</sup> befindet
- **Überwachung der Einschaltbereitschaft:** geprüft wird, ob die BÜSA auf Kommando einschalten wird

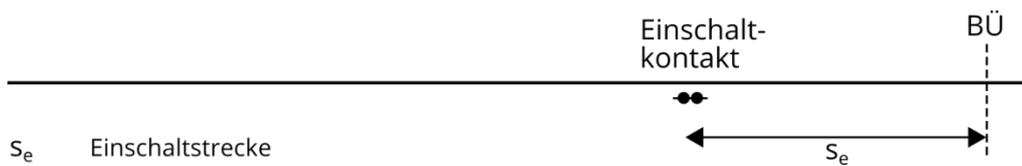
Im Folgenden sollen als Grundlage für Kapitel 6 die vier bisher im Netz der DB zum Einsatz kommenden Überwachungsarten und deren Eigenschaften kurz beschrieben werden.

### 2.4.1 Fernüberwachung (Fü)

Die Überwachungsart „Fernüberwachung“ (Fü) gehört zu der Gruppe, bei welcher die Einschaltbereitschaft der BÜSA überwacht wird. Daraus entstehen sehr hohe Anforderungen an die technische Verfügbarkeit dieser Anlagen (vgl. [MAS18]). Es existiert weder ein Überwachungssignal (ÜS) noch ein Hauptsignal, was sicherungstechnisch mit der BÜSA in Zusammenhang steht. Die Einschaltung der BÜSA kann daher für den schnellsten verkehrenden Zug am zeitoptimalen Punkt mit Auslösung z. B. durch einen Einschaltkontakt erfolgen (vgl. [MAS18]). Die Anordnung stellt Abb. 7 dar.

---

<sup>3</sup> Was als gesicherter Zustand verstanden wird, ist in den Richtlinien des EIU festgeschrieben und kann sich bei den verschiedenen Überwachungsarten unterscheiden.



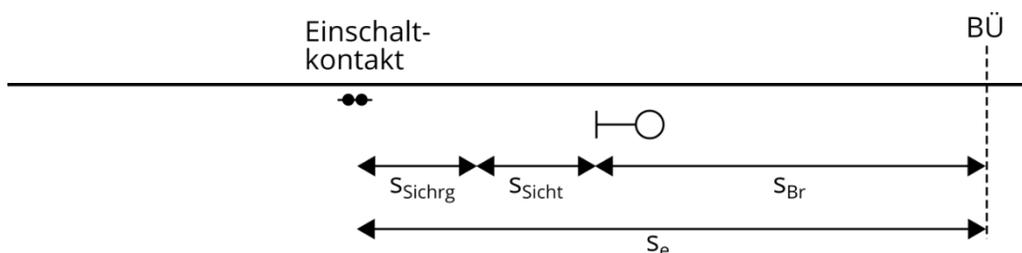
**Abb. 7: Überwachungsart FÜ**

Die Annäherungszeit des schnellsten Zuges, welche die Fahrzeit zwischen Einschaltkontakt und BÜ darstellt, entspricht annähernd der Räumzeit des BÜ bzw. der Zeit, bis die Schranken ihre Endlage erreicht haben, inklusive einer Restzeit. Nach Ablauf der Räumzeit hat auch das letzte Straßenfahrzeug den BÜ sicher geräumt. Somit kann mit der Überwachungsart FÜ die minimal mögliche Sperrzeit für den Straßenverkehr erreicht werden.

Da ein sich nähernder Zug nicht durch ein Signal zum Stehen gebracht werden kann, muss sich die BÜSA im Fehlerfall sofort schließen. Das erfordert, dass sich die Anlage zu jeder Zeit selbst überwacht. Störungen einer FÜ-Anlage werden über eine technische Verbindung dem Fahrdienstleiter gemeldet, welcher entsprechende Maßnahmen einleitet (vgl. [MAS18]). So werden bei der DB die auf den BÜ zufahrenden Züge mittels Befehl angewiesen, vor dem BÜ zu halten und eine Sicherung vorzunehmen (vgl. [DB17c]).

### 2.4.2 Überwachung mit Überwachungssignal (ÜS)

Bei BÜ der Überwachungsart ÜS wird die ordnungsgemäße Einschaltung des BÜ überwacht. Der Sicherungszustand des BÜ wird mittels einem ÜS dem Tf mitgeteilt (vgl. [MAS18]). Abb. 8 stellt die erforderliche Anordnung der Komponenten im konventionellen Betrieb dar.



- $S_{Sichrg}$  zurückgelegter Weg während der BÜ-Sicherung
- $S_{Sicht}$  zurückgelegter Weg während der Sichtzeit
- $S_{Br}$  Bremswegabstand der Strecke
- $S_e$  Einschaltstrecke

**Abb. 8: Überwachungsart ÜS**

Die Annäherungszeit der Züge setzt sich aus dem festen Bremswegabstand der Strecke, der Signalsichtzeit sowie der Zeit für das Sichern des BÜ zusammen. Diese Zeit ist in der

Regel deutlich größer als die Räumzeit bzw. Summe aus Vorleuchtdauer, Schrankenschließ- und Restzeit. Somit ergeben sich für die Straßenverkehrsteilnehmer längere Sperrzeiten, als minimal möglich wäre (vgl. [MAS18]).

Das ÜS kann gemäß Signalbuch zwei Signalbilder zeigen (vgl. [DB17d]):

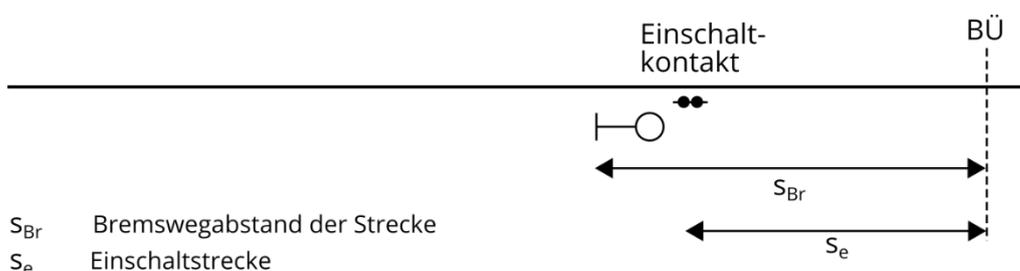
- BÜ 0: Halt vor dem BÜ; Weiterfahrt nach Sicherung
- BÜ 1: BÜ darf befahren werden

Im Grundzustand, d. h. der BÜ ist nicht gesichert, zeigt das ÜS den Begriff BÜ 0. Im Störfall leitet der Tf daher spätestens am ÜS eine Bremsung ein, um innerhalb des Bremswegabstandes der Strecke zum Stehen zu kommen. Durch die Anordnung eines bei BÜ-Störung aktiv geschalteten 1000 Hz Magneten der PZB am ÜS wird die Einleitung und Stärke der Bremsung überwacht (vgl. [DB18]).

Ein BÜ der Überwachungsart ÜS gilt bei der DB als gesichert, sobald das Rotlicht der Lichtzeichen ordnungsgemäß leuchtet. Lediglich bei der Sicherungsart mit Vollabschluss gilt dies erst ab Freimeldung des Gefahrenraums (vgl. [DB09a]). Dann kann das ÜS den Begriff BÜ 1 zeigen. Diese Information über die erfolgreiche Sicherung benötigt der Tf spätestens am Sichtpunkt des ÜS, um sich nicht auf eine Bremsung einstellen zu müssen.

### 2.4.3 Optimierte Einschaltung mit Überwachungssignal (ÜS<sub>OE</sub>)

Bei dieser Überwachungsart handelt es sich um eine Kombination von FÜ-Anlagen und BÜ der Überwachungsart ÜS. Die Überwachung mit Überwachungssignal und optimierter Einschaltung (OE) verbindet die Vorteile der kurzen, minimalen Sperrzeiten der Fernüberwachung mit dem Vorteil der Überwachungsart ÜS, dass diese komplett autark arbeitet und keinerlei Abhängigkeiten zu Stellwerken oder Betriebszentralen (BZ) besitzt (vgl. [MAS18]). Es erfolgt eine Überwachung der Einschaltbereitschaft. Das Anordnungsprinzip zeigt Abb. 9.



**Abb. 9:** Überwachungsart ÜS<sub>OE</sub>

Herauszustellen ist, dass die Lage des Einschaltkontaktes prinzipiell unabhängig vom Standort des ÜS ist, welches weiterhin im Bremswegabstand der Strecke vor dem BÜ steht. Somit kann die Sperrzeit auf ein Minimum reduziert werden, da die Annäherungszeit in etwa der Räumzeit bzw. Summe aus Vorleuchtdauer, Schrankenschließ- und Restzeit des BÜ entspricht. Die Information über den Sicherungszustand des BÜ benötigt der Tf auch hier spätestens am Sichtpunkt des ÜS.

ÜS<sub>OE</sub>-Anlagen existieren in zwei Ausführungsvarianten. Bei der ersten Variante zeigt das ÜS im Grundzustand immer den Signalbegriff BÜ 1 (vgl. [MAS18]). In diesem Fall muss die sich selbst überwachende BÜSA im Fehlerfall sofort einschalten, da ein sich nähernder Zug bereits den Standort des ÜS passiert haben könnte. Dies wirkt sich nachteilig auf die Straßenverkehrsteilnehmer aus.

Bei der zweiten Variante ist das ÜS im Grundzustand dunkel. Nur bei Annäherung eines Zuges wird über einen vor dem ÜS liegenden Annäherungskontakt dieses aktiviert, so dass der Tf rechtzeitig am Sichtpunkt den Signalbegriff BÜ 1 sieht (vgl. [KOL07]). In diesem Fall muss sich die BÜSA im Fehlerfall nur dann einschalten, wenn das ÜS durch einen sich nähernden Zug bereits aktiviert wurde.

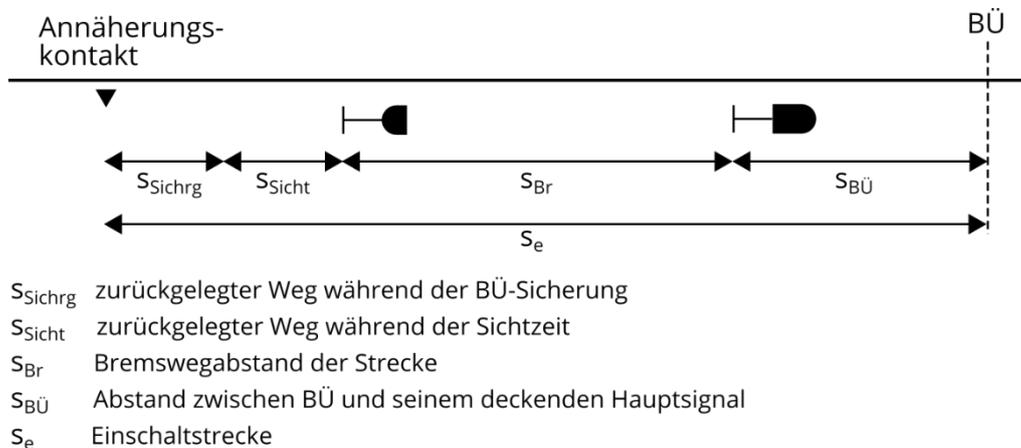
Auch für die Aktivierung des ÜS gibt es wiederum zwei Umsetzungsmöglichkeiten. Sie erfolgt entweder durch einen zusätzlichen Annäherungskontakt vor dem ÜS, welcher zusätzliche Kosten bedeutet, oder gleichzeitig mit Befahrung des Einschaltkontaktes (vgl. [KOL07]). In letztgenanntem Fall muss der Einschaltkontakt ggf. bis auf einen geeigneten Abstand vor das ÜS verschoben werden, was wiederum zu längeren Sperrzeiten des BÜ führt. Diese sind jedoch immer noch kürzer als die Sperrzeiten bei herkömmlichen ÜS-Anlagen, da die Zeit zur Aktivierung des ÜS wesentlich geringer ist als die benötigte Zeit zur Sicherung des BÜ.

#### **2.4.4 Überwachung mit Hauptsignal (Hp)**

Bei der Überwachungsart Hp erfolgt wie auch bei ÜS die Überwachung der ordnungsgemäßen Einschaltung des BÜ. Diese Überwachungsart ist u. a. immer dann erforderlich, wenn sich zwischen dem theoretischen Einschaltpunkt und dem BÜ ein Hauptsignal oder eine Streckenverzweigung befindet. Bei Halt zeigendem Signal oder Nutzung des abzweigenden Fahrweges würde der BÜ unnötigerweise geschlossen werden (vgl. [MAS18]).

Dies macht es erforderlich, dass der BÜ in die Sicherheitslogik der Fahrstraße im Stellwerk eingebunden wird. Im Störfall kann das Hauptsignal nicht auf Fahrt gestellt werden. Dann gelten die Regeln zur ersatzweisen Zulassung einer Fahrt gemäß

Regelwerk. So kann der Tf auf den ungesicherten BÜ hingewiesen werden. Abb. 10 zeigt die erforderliche Anordnung.



**Abb. 10: Überwachungsart Hp**

Das deckende Hauptsignal kann nur Fahrt zeigen, wenn sich der BÜ in gesichertem Zustand befindet. Ein Hp-überwacher BÜ mit Schranken gilt bei der DB dann als gesichert, wenn die Geschlossenmeldung der BÜSA, dass sich die Schranken in der unteren Endlage befinden, im Stellwerk vorliegt (vgl. [DB09a]). Dies stellt somit einen Unterschied zur Überwachungsart ÜS dar, bei der ein BÜ bereits bei Rotlicht der Lichtzeichen als gesichert gilt.

Ein Hp-überwacher BÜ beginnt zu schließen, wenn folgende zwei Bedingungen erfüllt sind (vgl. [DB10]):

- Fahrstraße über den BÜ ist eingestellt (Signal noch in Halt, Fahrstraßenüberwachungsmelder blinkend)
- Anrückmeldung liegt vor, z. B. durch Befahrung eines Annäherungskontaktes

Dies ist insbesondere bei der Wahl des Standortes des Annäherungskontaktes sowie der Auslegung der Zuglenkung für zuglenkgesteuerte Fahrstraßen, die über einen BÜ führen, zu beachten. Durch gezielte Beeinflussung des zeitlichen Zustandekommens einer der beiden Bedingungen kann die Sperrzeit des BÜ reduziert werden.

Generell ist die Sperrzeit für den Straßenverkehr bei Hp-überwachten Anlagen am höchsten (vgl. [MAS18]). Das liegt daran, dass bei der Annäherung des Zuges zusätzlich der Weg zwischen Hauptsignal und BÜ zurückgelegt werden muss. Zudem ist die Sicherungszeit größer, da die vollständige Schließung der Schranken abgewartet werden muss, bevor das Hauptsignal Fahrt und somit das zugehörige Vorsignal „Fahrt erwarten“ zeigen kann. Für eine behinderungsfreie Fahrt benötigt der Zug bereits am Sichtpunkt des Vorsignals die Information über die Verlängerung seiner Fahrterlaubnis.

Generell wäre es auch denkbar, die Überwachungsart  $H_{p_{OE}}$  einzuführen. Hierbei könnte das Hauptsignal auf Fahrt gestellt werden, wenn die BÜSA einschaltbereit ist (vgl. [MAS18]). Somit muss bei Fahrtstellung des Signals der BÜ noch nicht geschlossen sein und die Annäherungszeit kann auf das Minimum der Räumzeit bzw. Sicherheitszeit reduziert werden. Die Lage des Einschaltkontaktes wäre unabhängig vom Hauptsignalstandort. In Deutschland kommt diese Überwachungsart allerdings wegen ungelöster Probleme (noch) nicht zum Einsatz (vgl. [MAS18] und [SCH00]).

## 2.5 Funktionsprinzip der konventionellen Zuglenkung

Inwieweit der Prozess der Verlängerung der Fahrterlaubnis unter ETCS L2 mit seinen gegenüber heute flacheren Bremskurven im Konflikt mit dem Prinzip der konventionellen Zuglenkung (ZL) steht, wird in Kapitel 7 untersucht. Als Grundlage dafür wird im Folgenden das Funktionsprinzip der ZL-Anlagen erläutert.

### 2.5.1 Funktionsziele

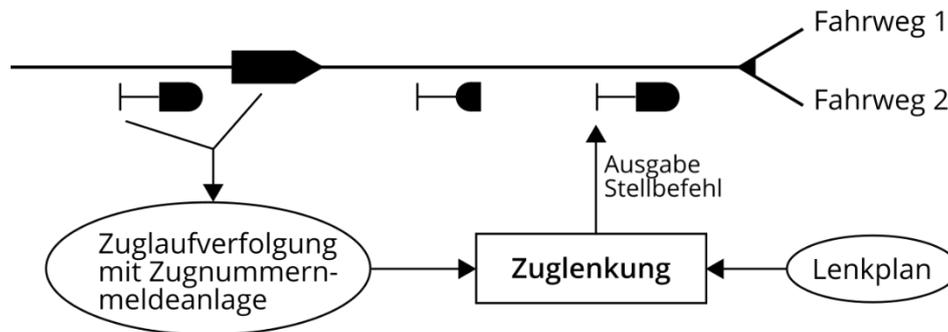
ZL-Anlagen sind nicht Teil der Sicherungsebene eines Stellwerkes, sondern leittechnische Einrichtungen. Somit müssen keine hohen Sicherheitsanforderungen an das System gestellt werden. Mit der ZL werden primär folgende Ziele verfolgt (vgl. [PAC13]):

- automatisierte Fahrstraßenwahl vor Fahrwegverzweigungen
- zeitgerechte Ausgabe eines Stellbefehls zur Fahrstraßeneinstellung an das Stellwerk
- Reihenfolgeregelung bei örtlichen Belegungskonflikten
- Berücksichtigung von Wartebedingungen

Die Ziele haben gemeinsam, dass der für den Bereich zuständige Fahrdienstleiter im Sinne einer zentralisierten Betriebsführung von Routinehandlungen entlastet wird (vgl. [MAS18]). Außerdem kann durch das zeitoptimale Einstellen der Fahrstraßen die vorhandene Kapazität der Infrastruktur besser ausgenutzt werden, da Fahrstraßenausgänge ggf. kürzer wirken.

## 2.5.2 Wirkungsweise

Damit die Zuglenkung zeitgerecht die korrekte Fahrstraße im Stellwerk anstoßen kann, benötigt sie entsprechende Informationen von anderen Teilsystemen. Die grundlegende Wirkungsweise von ZL-Anlagen ist in Abb. 11 dargestellt.



**Abb. 11:** Wirkungsweise der Zuglenkung

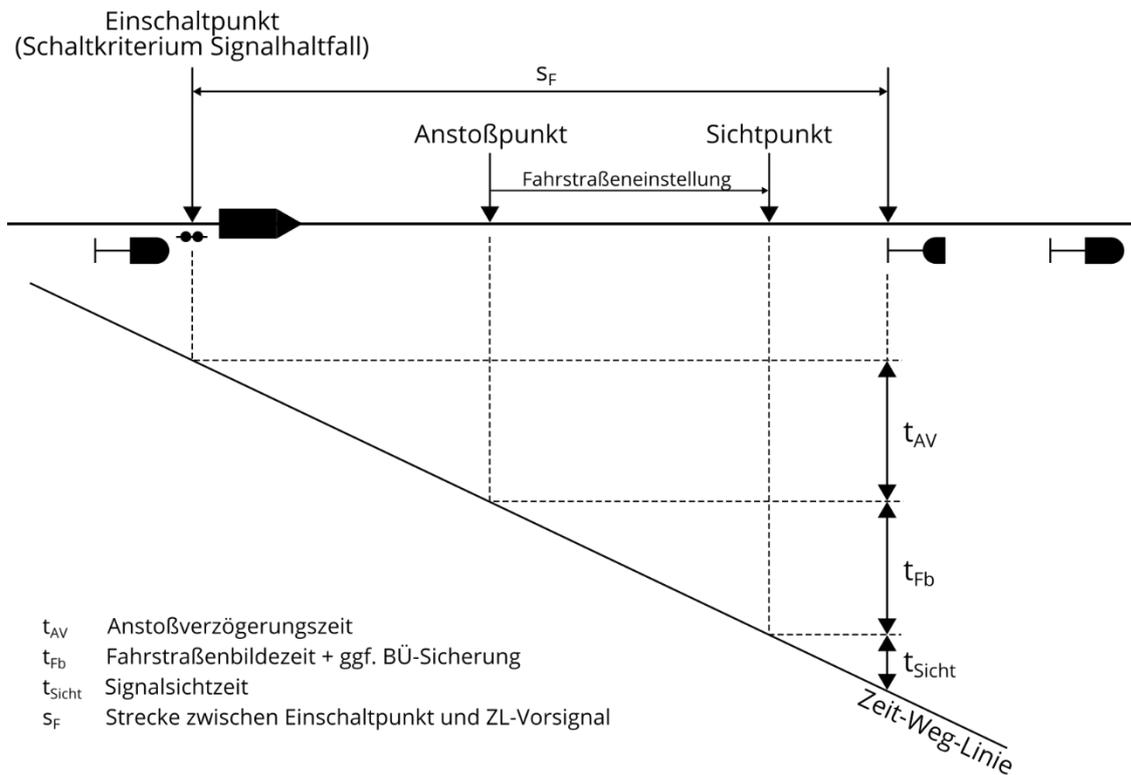
Zum einen benötigt die ZL für einen sich nähernden Zug die Information, welcher Fahrweg für diesen eingestellt werden muss. Dies geschieht über einen Abgleich der Zugnummer. Im sogenannten Lenkplan ist für jede Zugnummer der entsprechende Fahrweg und die Geschwindigkeitsklasse des Zuges hinterlegt. Der Lenkplan kann dabei manuell erstellt oder automatisch aus Fahrplansystemen gespeist werden (vgl. [MAS18]).

Somit muss die ZL also auch die Zugnummer des Zuges wissen, welcher sich dem zu stellenden Signal nähert. Diese Information wird von der Zugnummernmeldeanlage (ZN) abgegriffen, welche für die Zuglaufverfolgung zuständig ist. Hierfür existiert für jedes Signal ein sogenannter Meldeort. Bei Signalhaltfall des zurückliegenden Signals wird die Zugnummer in den nächsten Meldeort weitergeschaltet (vgl. [DB12c]). Durch diese Weiterschaltung kann eine entsprechend projektierte ZL-Anlage aktiviert werden. Der Ort der Weiterschaltung der Zugnummer wird für die ZL als Einschaltpunkt bezeichnet.

Anhand der im Lenkplan hinterlegten Geschwindigkeitsklasse und dem erforderlichen Fahrweg berechnet die ZL für den konkreten Zug den optimalen Anstoßpunkt zur Ausgabe des Stellbefehls an das Stellwerk. Dies erfolgt nach der Maßgabe, dass das zum zu stellenden ZL-Signal zugehörige Vorsignal spätestens dann den Begriff „Fahrt erwarten“ zeigt, wenn der sich nähernde Zug den Sichtpunkt dieses Vorsignals erreicht (vgl. [DB10]). Die Zeit zwischen der Befahrung des Einschaltpunktes, an dem die Weiterschaltung der Zugnummer ausgelöst wird und dem tatsächlichen Anstoßpunkt, an dem die Ausgabe des Stellbefehls erfolgt, wird Anstoßverzögerungszeit genannt. Als Einschaltstrecke einer Zuglenkung wird die Strecke zwischen dem Einschaltpunkt und dem zu stellenden ZL-Hauptsignal verstanden (vgl. [DB07]).

### 2.5.3 Ermittlung der Anstoßverzögerungszeit

Die Anstoßverzögerungszeit kann für jede zu berücksichtigende Geschwindigkeitsklasse und jede einzustellende Fahrstraße unterschiedlich sein. Ihre Berechnung für die Projektierung der ZL-Anlagen im Netz der DB ist in der Ril 819.0732 [DB10] beschrieben. Abb. 12 zeigt eine Prinzipskizze zur Ermittlung des Anstoßpunktes.



**Abb. 12: Ermittlung des Anstoßpunktes**

Spätestens am Sichtpunkt des ZL-Vorsignals muss die Fahrstraße vollständig eingelaufen sein und das Signal auf Fahrt stehen. Ausgehend vom Sichtpunkt muss also der zurückgelegte Weg über die Fahrstraßenbildezeit abgezogen werden. Liegt ein BÜ in der zu stellenden Fahrstraße, muss dessen Sicherheitszeit ebenfalls berücksichtigt werden, da erst dann das Signal „Fahrt“ zeigen kann. Die Anstoßverzögerungszeit bis zum optimalen Anstoßpunkt zur Ausgabe des Stellbefehls wird daher für jede Geschwindigkeitsklasse wie folgt berechnet:

$$t_{AV} = \frac{S_F}{v} - t_{Fb} - t_{Sicht}$$

#### Formel 2: Anstoßverzögerungszeit

Die berechnete Anstoßverzögerungszeit  $t_{AV}$  muss positiv sein. Ist dies nicht der Fall, muss ein weiter zurückliegendes Signal bzw. das dazugehörige Schaltkriterium für den Signalhaltfall als Einschaltpunkt gewählt werden. Ist der Signalabstand sehr groß,

kommt es zwangsweise zu sehr langen Verzögerungszeiten. Für unterschiedliche Geschwindigkeitsklassen können verschiedene Anstoßverzögerungszeiten und daher auch verschiedene Einschaltpunkte projiziert werden (vgl. [DB10]).

## 2.6 Tool zum Berechnen von ETCS-Bremswegen

Die Berechnung der Bremskurven von ETCS ist aufgrund der Vielzahl der zu berücksichtigenden Eingangsparameter sehr komplex. Um dennoch die Möglichkeit zu besitzen, die vom Fahrzeug in konkreten Situationen berechneten Bremskurven zu kennen, wurde von der ERA hierfür ein Simulationstool entwickelt und veröffentlicht.

Das im weiteren Verlauf der Arbeit als Bremskurventool bezeichnete Simulationstool ist frei zugänglich von der Internetseite der ERA herunterladbar (vgl. [ERA18a]). Eine Anleitung zur Bedienung des Tools ist in [ERA18b] beschrieben. Verwendet wurde das Tool in der Version 4.2, welche der Umsetzung der SRS 3.6.0 entspricht, auf die sich auch diese Arbeit bezieht. Die im Tool verwendeten Berechnungsvorschriften sind in Kapitel 3.13 des Subset 026 [ERA16a] beschrieben.

Für diese Arbeit wurde das Bremskurventool für alle Berechnungen genutzt, die mit den Bremskurven von ETCS zusammenhängen. Dies betrifft einerseits die Visualisierung der resultierenden Bremskurven, aber auch die Ermittlung von Bremsseinsatzpunkten, Bremsweglängen und Bremsvorankündigungspunkten. Mit Kenntnis der verwendeten Eingangswerte können alle Berechnungen mit der Version 4.2 des Tools nachvollzogen werden. Die Zusammenstellung der Eingangswerte für jedes Berechnungsbeispiel befindet sich in Anhang B. Da oft dieselben Daten verwendet wurden, erwies sich die Definition von sogenannten Musterzügen als sinnvoll, welche an den entsprechenden Stellen der Arbeit eingeführt werden.

Um einen Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen des Tools zu erhalten, werden nachfolgend kurz die Ein- und Ausgabemöglichkeiten vorgestellt.

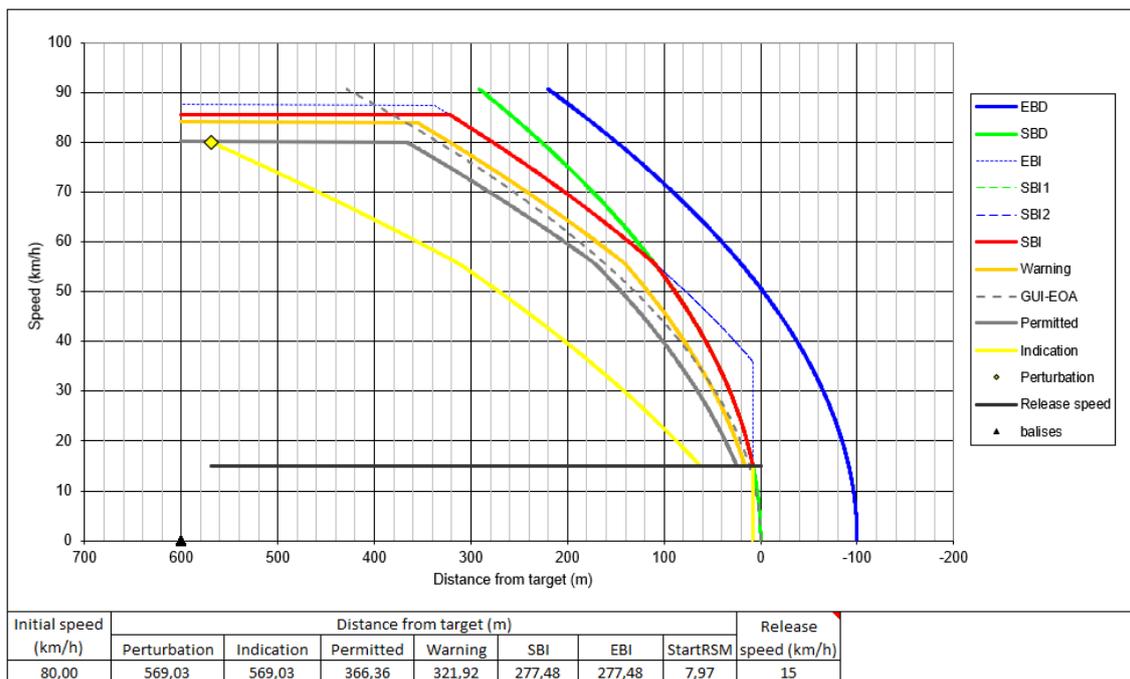
### 2.6.1 Ausgabemöglichkeiten

Ziel des Tools ist grundsätzlich die Simulation der auf dem ETCS-Fahrzeug berechneten, geschwindigkeitsabhängigen Bremskurven (vgl. Abschnitt 4.3). Es werden folgende Daten ausgegeben:

- Distanzen jeder definierten Bremskurve zu dem Punkt, an dem die Fahrerlaubnis endet (End Of Authority, EOA) in Geschwindigkeitsschritten von 0,1 km/h

- grafische Visualisierung aller aus der Berechnung resultierenden Bremskurven
- tabellarische Ausgabe der wichtigsten Kenngrößen der Berechnung; dies beinhaltet die Bremsausgangsgeschwindigkeit, die Schnittpunkte der Bremsankündigungs-, Soll- und Warnkurve sowie der Vollbrems- und Schnellbremseinsatzkurve mit der Bremsausgangsgeschwindigkeit und Start und Höhe der Release Speed

Abb. 13 zeigt die grafische Visualisierung und die Ausgabe der Kennwerte.



**Abb. 13: Bremskurvenvisualisierung mit dem ERA-Bremskurventool**

Es gilt zu beachten, dass für diese Arbeit die Farbdarstellung der Bremskurven teilweise gegenüber der Darstellung in Abb. 13 verändert wurde und jeweils nur die für das konkrete Beispiel relevanten Bremskurven dargestellt werden.

### 2.6.2 Eingangswerte

Im Bremskurventool besteht die Möglichkeit, annähernd alle die Bremskurvenberechnung beeinflussende Faktoren zu variieren. Somit können für fast jede denkbare Kombination aus Fahrzeugkenngrößen und Streckenparametern die resultierenden Bremskurven berechnet werden. Die Eingangsdaten lassen sich unterscheiden in Zugdaten, Streckendaten sowie Werte der nationalen Variablen. Variablen, welche in der ETCS-Spezifikation bereits mit festen (Zeit-)Werten belegt sind, können nicht verändert werden.

### 2.6.2.1 Zugdaten

Es können folgende zugabhängige Daten eingegeben werden (vgl. [ERA18b]):

- Wahl des Bremsmodells zur Bremsbewertung des Zuges (Lambda oder Gamma, vgl. Kapitel 3)
- Zugart, Bremsstellung, Zuglänge, rotierende Masse, Abstand der Balisenantenne von der Fahrzeugspitze
- ETCS-Zugdaten (benötigte Zeit zur sicheren Abschaltung der Traktion, Bremsparameter, ...)
- Beschleunigung des Zuges
- Vorhandensein der Betriebsbrems- und Traktionsabschaltungsschnittstelle
- Weg- und Geschwindigkeitsmessungenauigkeit

### 2.6.2.2 Streckendaten

Es bestehen folgende Einstellmöglichkeiten streckenseitiger Daten (vgl. [ERA18b]):

- Zieltyp, -geschwindigkeit und -ort; Information zur Release Speed
- Abstand zwischen Bremszielpunkt (EOA) und überwachtem Gefahrenpunkt (Supervised Location, SvL)
- Bremsausgangsgeschwindigkeit
- Gradientenprofil
- Liste der Standorte von Ortungsbalisen
- Bereiche verminderter Haftreibung, Bereich mit Verbot bestimmter Bremsen

### 2.6.2.3 Nationale Variablen

Zusätzlich können die Werte aller nationalen Variablen, welche auch das EIU selbst bestimmt, festgelegt werden. Dies betrifft insbesondere:

- Schnellbremsvertrauensniveau und Wichtungsfaktor zur Berücksichtigung nasser Schienen (Gamma-Bremsmodell, vgl. Abschnitt 3.2)
- integrierte Korrekturfaktoren (Lamba-Bremsmodell, vgl. Abschnitt 3.1)
- sonstige nationale Werte, die in Abschnitt 3.3 beschrieben sind

### 3 ETCS-Bremssysteme

Bereits in Abschnitt 2.2 wurde in die Bremsbewertung von Zügen eingeführt. Für die weitere Berechnung der ETCS-Bremskurven werden die Bewertungsgrößen als physikalische Größen der Verzögerung und Bremsaufbauzeit benötigt. Diese werden entweder aus der empirischen Bewertungsgröße „Bremsleistung“ umgerechnet, oder direkt an einer festen Zugkomposition durch Bremsversuche bestimmt.

Nachfolgend werden die beiden verwendeten ETCS-Bremssysteme zur Berechnung der Bewertungsgrößen erläutert. Es wird auch detailliert darauf eingegangen, wie aus den Grundgrößen der Bremsbewertung die garantierte, sichere Schnellbremsverzögerung und Schnellbremsaufbauzeit ermittelt wird. Diese geschwindigkeitsabhängigen Werte haben direkten Einfluss auf die Größe der Sicherheitsmarge und somit die Steilheit der Bremskurven.

Das Verständnis der beiden Bremsysteme bildet die Grundlage, um das Potenzial der Anpassung der darin enthaltenen Korrekturfaktoren in Bezug auf die Verringerung der Auswirkungen von flachen Bremskurven auf zeitabhängige Streckenausrüstungen abschätzen zu können.

#### 3.1 Lambda-Modell

Wie in Abschnitt 2.2 erwähnt, ist für Züge mit variabler Zugkomposition keine direkte Bestimmung des Bremsvermögens mittels Verzögerungswerten möglich. Dies betrifft z. B. Güterzüge oder lokbespannte Reisezüge. Daher wird auch hier die bereits eingeführte Größe Bremsleistung verwendet. Mittels den von der UIC im Merkblatt 544-1 (vgl. [UIC14b]) beschriebenen Konvertierungsmodellen können die Zugparameter  $Brh$ , Zugart, Bremsstellung und Zuglänge in Bremsverzögerungen und Bremsaufbauzeiten umgerechnet werden. ETCS-Züge, deren Bremsbewertung über die Umrechnung der  $Brh$  erfolgt, werden Lambda-Züge genannt (vgl. [ERA16b]).

Der Gültigkeitsbereich der Konvertierungsmodelle liegt nach [ERA16b] in folgenden Grenzen:

- maximale Geschwindigkeit von 200 km/h
- vorhandene  $Brh$  zwischen 30 % und 250 %
- maximale Zuglänge von 900 m bei Reisezügen und 1500 m bei Güterzügen

Daraus folgt, dass das Lambda-Modell nicht für Züge des Hochgeschwindigkeitsverkehrs über 200 km/h anwendbar ist. Für diese Züge muss daher zwangsläufig das Gamma-Modell (vgl. Abschnitt 3.2) verwendet werden.

### 3.1.1 Bremsleistungskennwert-Konvertierungsmodell

Beim Brh-Konvertierungsmodell wandelt der ETCS-Fahrzeugcomputer die vom Tf eingegebenen oder auf dem Fahrzeug gespeicherten vorhandenen Brh des Zugverbandes in eine geschwindigkeitsabhängige Stufenfunktion der Verzögerung um. Abb. 14 stellt die Ein- und Ausgangsgrößen des Modells dar:

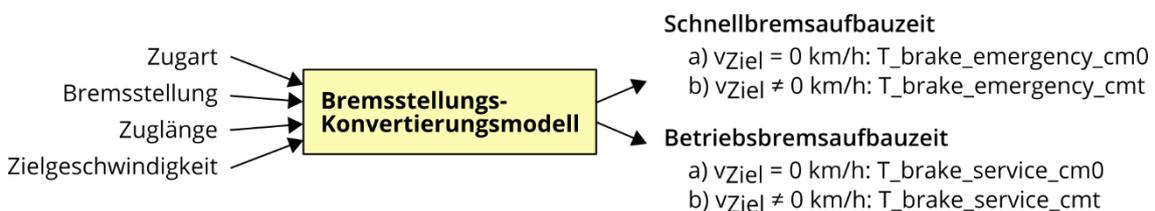


**Abb. 14: Bremsleistungskennwert-Konvertierungsmodell**

Gemäß [UIC14b] sind die Stufenfunktionen der Schnellbrems- und Betriebsbremsverzögerungen bis zu einer Höhe der Brh von 135 % identisch. Bei höheren Werten steigt lediglich die Schnellbremsverzögerung weiter an; die Betriebsbremsverzögerung bleibt auf dem Niveau der 135 Brh. Die Höhe der Verzögerungen kann mit dem Algorithmus aus [UIC14b] berechnet werden. Dieser ist auch im ETCS-Bremskurven-Tool der ERA implementiert (vgl. Abschnitt 2.6).

### 3.1.2 Bremsstufungs-Konvertierungsmodell

Das Bremsstufungs-Konvertierungsmodell (vgl. Abb. 15) berechnet anhand der vom Tf eingegebenen Zugart, Bremsstellung und Zuglänge die entsprechenden Bremsaufbauzeiten für Schnell- und Betriebsbremsungen. Diese sind im Modell für Stoppbremsungen und Regulierungsbremungen (vgl. Abb. 3) unterschiedlich hoch.



**Abb. 15: Bremsstufungs-Konvertierungsmodell**

Das ETCS-Bremssystem verwendet als Eingangsparameter für die Bremskurvenberechnung die Variablen  $T_{brake\_emergency}$  sowie  $T_{brake\_service}$  (vgl. [ERA16a]). Dabei gilt für die Schnellbremsaufbauzeit:

$$T_{brake\_emergency} = \begin{cases} T_{brake\_emergency\_cm0} & \text{für } v_{ziel} = 0 \\ T_{brake\_emergency\_cmt} & \text{für } v_{ziel} \neq 0 \end{cases}$$

mit  $v_{ziel}$ : Zielgeschw. der Bremsung

### Formel 3: Schnellbremsaufbauzeit

Analog gilt für die Betriebsbremsaufbauzeit:

$$T_{brake\_service} = \begin{cases} T_{brake\_service\_cm0} & \text{für } v_{ziel} = 0 \\ T_{brake\_service\_cmt} & \text{für } v_{ziel} \neq 0 \end{cases}$$

mit  $v_{ziel}$ : Zielgeschw. der Bremsung

### Formel 4: Betriebsbremsaufbauzeit

Somit liefert das Lambda-Modell mit seinen Konvertierungsmodellen alle für die weitere Bremskurvenberechnung notwendigen Grundwerte. Zu beachten sind die unterschiedlichen Werte der Bremsaufbauzeiten für Stopp- und Regulierungsbremungen. Dies führt in den weiteren Berechnungen unter anderem zu dem eher überraschenden Effekt, dass Züge, welche lediglich auf 5 km/h herunter bremsen, teilweise früher zur Bremsung aufgefordert werden, als Züge, die bis zum Stillstand bremsen.

## 3.1.3 Beschreibung der Korrekturfaktoren

Die aus den Konvertierungsmodellen erhaltenen Werte stellen nominelle Verzögerungen bzw. Bremsaufbauzeiten dar. Diese unterliegen in der Realität gewissen Abweichungen. Für die Berechnung des Schnellbremsweges müssen daher garantierte, sichere Verzögerungen und Bremsaufbauzeiten verwendet werden. In der Folge werden die Schnellbremsverzögerungswerte und die Schnellbremsaufbauzeiten mit sogenannten Korrekturfaktoren multipliziert, um Bremswege zu berechnen, welche mit einer zum Infrastrukturlayout passenden, gewählten Wahrscheinlichkeit eingehalten werden (vgl. [ERA16b]). Es entsteht eine sogenannte Bremswegsicherheit, welche bisher bei der PZB 10 % beträgt (vgl. [GRÖ08]).

Die Korrekturfaktoren für das Lambda-Modell können vom Infrastrukturbetreiber flexibel gewählt werden. Mittels nationaler Werte im Paket 3 erfolgt die Übertragung von der Strecke auf das Fahrzeug (vgl. [ERA16b]). Eine Erläuterung der ETCS-Datenpakete und die Bedeutung aller Variablen ist in [ERA16a] spezifiziert. Eine allgemeine Einführung in die für ETCS verwendete Datensprache findet sich auch in [STA11]. Für das Lambda-Modell wurden sogenannte integrierte Korrekturfaktoren definiert.

### 3.1.3.1 Geschwindigkeitsabhängiger Korrekturfaktor

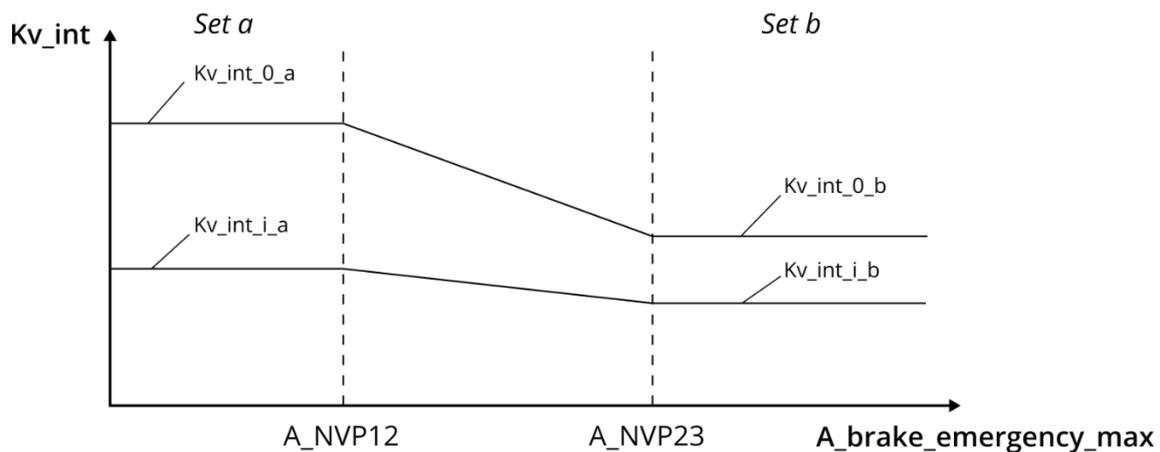
Um die geschwindigkeitsabhängige Stufenfunktion der Schnellbremsverzögerung in verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen unterschiedlich anpassen zu können, existiert der Korrekturfaktor  $Kv_{int}(v)$ . Er wird mit den nationalen Werten  $V_{NVKVINT}(n)$  und  $M_{NVKVINT}(n)$  übertragen.

Mit  $V_{NVKVINT}$  können insgesamt fünf Geschwindigkeitsstufen definiert werden. Der jeweils zugehörige Faktor  $Kv_{int}(v)$  kann Werte zwischen 0 und 2,54 annehmen (vgl. [ERA16a]). Es ist hervorzuheben, dass somit die nominelle Schnellbremsverzögerung des Konvertierungsmodelles vergrößert werden könnte, woraus unter Umständen eine negative Bremswegsicherheit resultieren würde. Tab. 2 zeigt beispielhaft die im LH aktuell für das Netz der DB festgelegten Werte für ETCS L2 (vgl. [DB16a]).

Nationale Variable	Wert	Nationale Variable	Enthaltener Korrekturfaktor	Wert
		M_NVKVINT	Kv_int_0	0,88
V_NVKVINT(1)	155 km/h	M_NVKVINT(1)	Kv_int_1	0,76
V_NVKVINT(2)	200 km/h	M_NVKVINT(2)	Kv_int_2	0,72
V_NVKVINT(3)	250 km/h	M_NVKVINT(3)	Kv_int_3	0,64
V_NVKVINT(4)	300 km/h	M_NVKVINT(4)	Kv_int_4	0,58

**Tab. 2: Korrekturfaktor  $Kv_{int}$  für ETCS L2 in Deutschland (vgl. [DB16a])**

Prinzipiell ist es möglich, drei solcher Sets von  $Kv_{int}$  zu definieren (vgl. [ERA16a]). Ein Set ist dabei für Güterzüge vorgesehen. Bei den anderen beiden Sets für Personenzüge kann der Korrekturfaktor hinsichtlich der maximalen Schnellbremsverzögerung, die das Konvertierungsmodell ausgegeben hat, differenziert werden. Damit ist es möglich, für sehr gut bremsende Züge andere Werte für  $Kv_{int}$  zu wählen, als für schlecht bremsende Züge. Hierfür wird mit den nationalen Variablen  $A_{NVP12}$  und  $A_{NVP23}$  eine untere und obere Grenze der maximalen Schnellbremsverzögerung gewählt (vgl. Abb. 16).



**Abb. 16: Korrekturfaktor  $Kv_{int}$  für Reisezüge, bearb. nach [ERA16a]**

Ist die maximale Schnellbremsverzögerung aus dem Konvertierungsmodell kleiner als  $A_{NVP12}$ , wird das eine Set verwendet; bei einer maximalen Verzögerung von  $A_{brake\_emergency} > A_{NVP23}$  das andere Set. Bei Verzögerungen zwischen  $A_{NVP12}$  und  $A_{NVP23}$  werden die jeweiligen Werte für  $Kv_{int}(v)$  entsprechend interpoliert (vgl. Abb. 16).

In Deutschland wird bisher für ETCS L2 nur ein Set definiert, was für alle Züge gültig ist (vgl. [DB16a]). An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für die deutsche Ausprägung von ETCS L1LS, d. h. ESG, andere als die in Tab. 2 enthaltenen Werte definiert sind. Für ESG werden zudem alle drei Sets für  $Kv_{int}(v)$  genutzt (vgl. [DB16b]).

### 3.1.3.2 Zuglängenabhängiger Korrekturfaktor

Neben einem geschwindigkeitsabhängigen Korrekturfaktor stellt ETCS auch die Möglichkeit bereit, einen von der Zuglänge abhängigen Korrekturfaktor  $Kr_{int}(l)$  zu definieren. Hierfür werden mit der nationalen Variable  $L_{NVKRINT}(n)$  bis zu fünf Zuglängenbereiche gewählt, für die jeweils der Korrekturfaktor  $Kr_{int}(l)$ , enthalten in der nationalen Variable  $M_{NVKRINT}(n)$ , festgelegt wird. Dabei sind Werte zwischen 0 und 1,55 möglich (vgl. [ERA16a]).

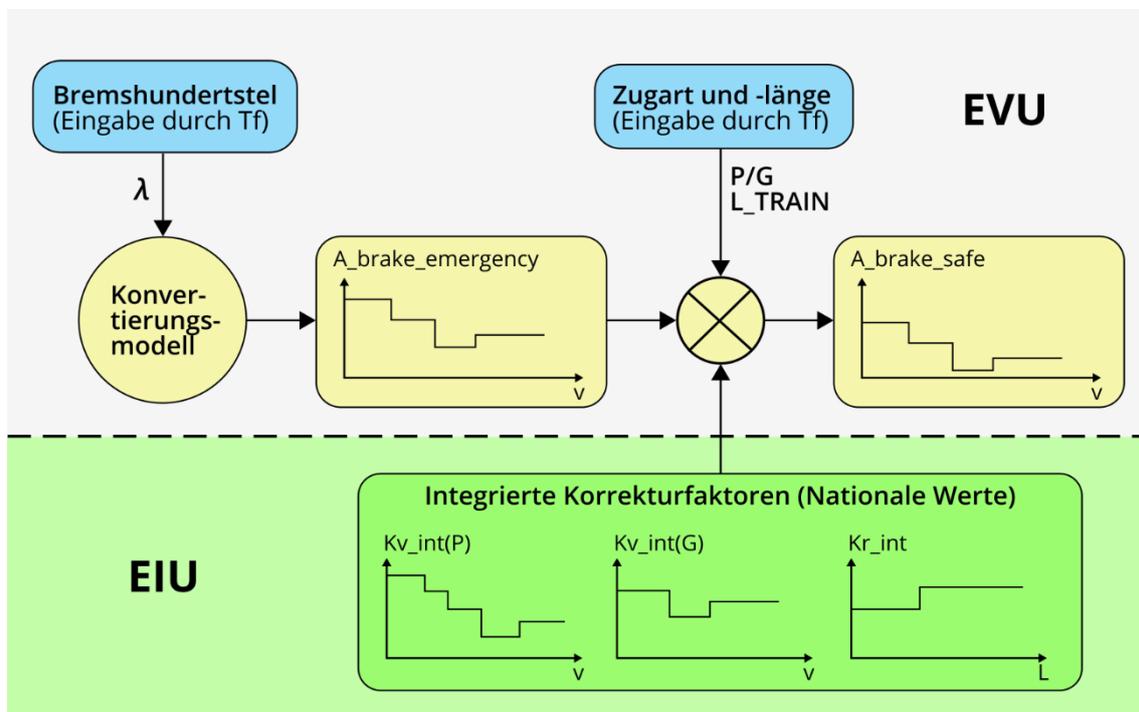
Für Deutschland wird aktuell einheitlich für ETCS L2 und ESG der Wert  $Kr_{int} = 1$  festgelegt (vgl. [DB16a] und [DB16b]). Das bedeutet, dass die Zuglänge keinen Einfluss auf die Höhe der für die Berechnung des Schnellbremsweges verwendeten Schnellbremsverzögerung hat. Es gibt aber durchaus auch Infrastrukturbetreiber, wie die Luxemburger Eisenbahngesellschaft CFL, welche die zuglängenabhängige Anpassung verwenden. Hier wird unterstellt, dass der verfügbare Kraftschluss durch die Überfahrt des ersten Zugteils, bezogen auf die gesamte Zuglänge, verbessert wird und die maximal mögliche Bremsverzögerung bei längeren Zügen dadurch höher ist (vgl. [FEL17]).

### 3.1.3.3 Korrekturfaktor für die Bremsaufbauzeit

Auch die nominelle Schnellbremsaufbauzeit, welche bei Lambda-Zügen mithilfe des Bremsstellungs-Konvertierungsmodells (vgl. Abschnitt 3.1.2) bestimmt wird, lässt sich mit dem Korrekturfaktor  $Kt_{int}$  durch den Infrastrukturbetreiber anpassen. Der Faktor wird mit der nationalen Variable  $M_{NVKTINT}$  im Paket 3 an das Fahrzeug übergeben und kann Werte zwischen 0 und 1,55 annehmen (vgl. [ERA16a]). Damit kann auch die Schnellbremsaufbauzeit vergrößert, aber ebenso verkleinert werden.

### 3.1.4 Ermittlung der sicheren Bremsverzögerung

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei den Ausgabewerten des Brh-Konvertierungsmodells um nominelle Werte. Die Schnellbremsverzögerung wird daher mit den bereits eingeführten Korrekturfaktoren multipliziert, um die zur Infrastruktur passenden, sicheren Bremsverzögerungswerte zu erhalten. Diese sind gemäß der Definition der Eingangswerte geschwindigkeits- und zuglängenabhängig. Die sichere Schnellbremsverzögerung wird im ETCS-Bremsmodell mit  $A_{brake\_safe}(v)$  bezeichnet. Abb. 17 stellt die Eingangsparameter zur Berechnung von  $A_{brake\_safe}$  übersichtlich dar und zeigt die Trennung der Verantwortlichkeiten von Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) und EIU:



**Abb. 17: Bestimmung der sicheren Verzögerung für Lambda-Züge, bearb. nach [ERA16b]**

Die sichere Bremsverzögerung berechnet sich demnach wie folgt:

$$A_{brake\_safe}(v) = A_{brake\_emergency}(v) \cdot Kv_{int}(v) \cdot Kr_{int}(l)$$

#### Formel 5: Sichere Bremsverzögerung für Lambda-Züge

Die berechnete Verzögerungsfunktion in Abhängigkeit der Geschwindigkeit findet im weiteren Verlauf Eingang in die Berechnung der Ablaufkurve für die Schnellbremsung. Die Berechnung der Bremskurven wird in Abschnitt 4.3 beschrieben.

### 3.1.5 Ermittlung der sicheren Bremsaufbauzeit

Auch der nominelle Wert der Schnellbremsaufbauzeit wird beim Lambda-Modell mit einem Korrekturfaktor angepasst. Da nur der eine, bereits eingeführte Faktor  $Kt_{int}$  einfließt, ist die Berechnung wesentlich einfacher. Abb. 18 stellt den Verlauf der Ermittlung der sicheren Bremsaufbauzeit  $T_{be}$  sowie die Trennung der Verantwortlichkeiten zwischen EIU und EVU dar:

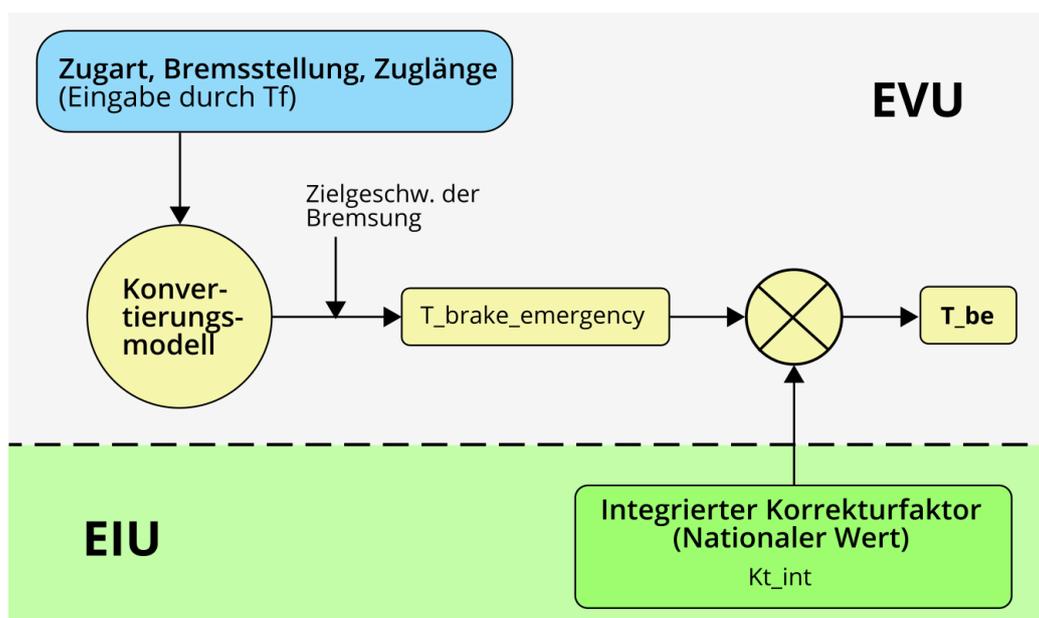


Abb. 18: Bestimmung der sicheren Bremsaufbauzeit für Lambda-Züge

Somit berechnet sich die sichere Bremsaufbauzeit wie folgt:

$$T_{be} = T_{brake\_emergency} \cdot Kt_{int}$$

#### Formel 6: Sichere Bremsaufbauzeit für Lambda-Züge

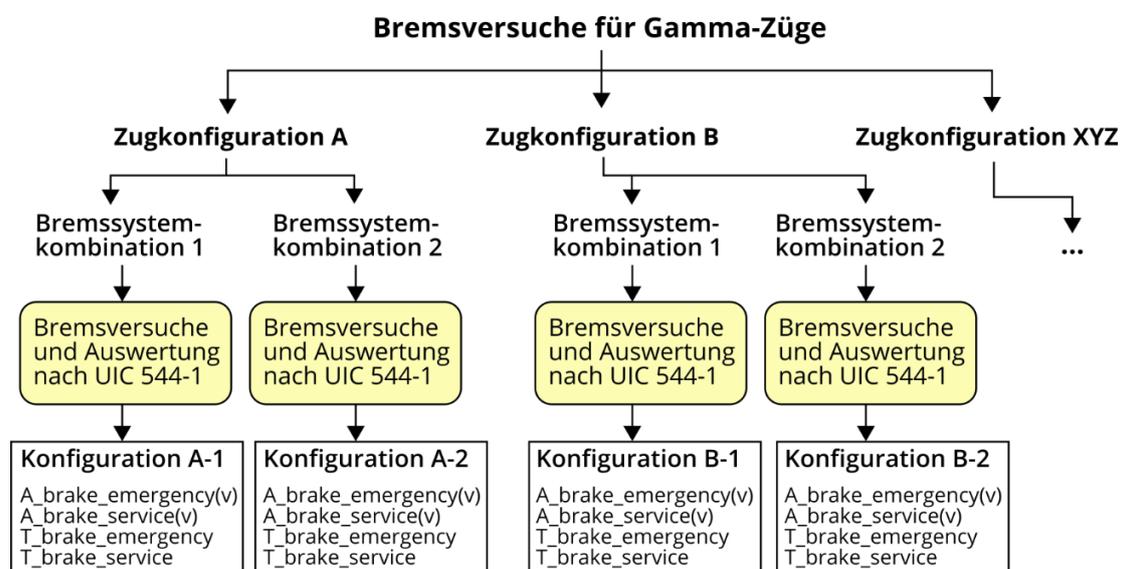
Die so ermittelte, sichere Schnellbremsaufbauzeit wird für die Berechnung der Schnellbremseinsatzkurve (vgl. Abschnitt 4.3) benötigt.

## 3.2 Gamma-Modell

Das Gamma-Modell ist für alle Züge anwendbar, die eine oder mehrere definierte, feste Zugkompositionen besitzen. Dies trifft insbesondere auf Triebzüge des Personenverkehrs zu, wie etwa Triebzüge des Hochgeschwindigkeitsverkehrs oder S-Bahn-Triebzüge. Denkbar wäre die Anwendung des Modells aber auch für Ganzzüge des Güterverkehrs, welche – und das muss in diesem Fall sichergestellt werden – immer in derselben Zugkonfiguration verkehren. Züge, deren Bremsvermögen mit dem Gamma-Modell beschrieben wird, werden Gamma-Züge genannt (vgl. [ERA16b]).

Die Bremsbewertung dieser Züge erfolgt direkt mittels physikalischen Verzögerungswerten und Bremsaufbauzeiten. Im Gegensatz zum Lambda-Modell werden die benötigten Grundwerte für die ETCS-Bremskurvenberechnung, d. h.  $A_{brake\_emergency}$ ,  $A_{brake\_service}$ ,  $T_{brake\_emergency}$  und  $T_{brake\_service}$ , nicht aus der bisher genutzten, empirischen Größe  $Brh$  sowie anderen Zugeigenschaften abgeleitet. Stattdessen werden die genannten nominellen Werte und Verzögerungsfunktionen der konkreten Zugkonfiguration mithilfe von Bremsversuchen ermittelt. Welche Art und Anzahl der Bremsversuche dabei durchzuführen ist und mit welcher Methode durch dessen Auswertung die Verzögerungsstufen und Bremsaufbauzeiten bestimmt werden, ist im UIC-Merkblatt 544-1 (vgl. [UIC14b]) beschrieben.

Analog zu den Ausgabewerten der Lambda-Konvertierungsmodelle stehen nach der Auswertung der Bremsversuche ebenso geschwindigkeitsabhängige Stufenfunktionen der Schnell- und Vollbremsverzögerung ( $A_{brake\_emergency}(v)$  und  $A_{brake\_service}(v)$ ) sowie Werte für die Schnellbrems- und Betriebsbremsaufbauzeit ( $T_{brake\_emergency}$  und  $T_{brake\_service}$ ) für die weitere Berechnung zur Verfügung (vgl. Abb. 19).



**Abb. 19:** Ermittlung der Bremsbewertung für Gamma-Züge

Die ermittelten Verzögerungsprofile und Bremsaufbauzeiten werden als Bestandteil der festen Zugdaten auf dem Fahrzeug gespeichert. Es besteht die Möglichkeit, für verschiedene Zugkonfigurationen und unterschiedliche Kombinationen beteiligter Bremssysteme sich unterscheidende Zugdaten zu speichern (vgl. [ERA16a]). Dies kann z. B. für S-Bahn-Züge erforderlich sein, die als Kurzzug, Vollzug oder Langzug verkehren können. Bremsversuche für die Schnellbremsverzögerungsfunktionen sind dann für verschiedene Bremssystemkombinationen erforderlich, wenn das Fahrzeug auf Strecken verkehren soll, auf denen abschnittsweise die Verwendung bestimmter Bremssysteme, z. B. der Wirbelstrombremse, unterbunden wird (vgl. [UIC14b]). Das zu verwendende Konfigurationsset wird entweder automatisch durch das Fahrzeug oder manuell durch den Tf gewählt.

Als Unterschied zum Lambda-Modell ist zu erwähnen, dass bei der Ermittlung der Bremsaufbauzeiten nicht unterschieden wird, ob es sich bei der erforderlichen Bremsung um eine Stoppbremsung oder Regulierungsbremsung handelt. Der Wert ist in beiden Fällen gleich.

### 3.2.1 Beschreibung der Korrekturfaktoren

Wie auch beim Lambda-Modell handelt es sich bei den aus Bremsversuchen ermittelten Grundwerten um nominelle Zugdaten. Diese entsprechen den Werten, die die höchste Auftretenswahrscheinlichkeit besitzen (vgl. Abb. 20).

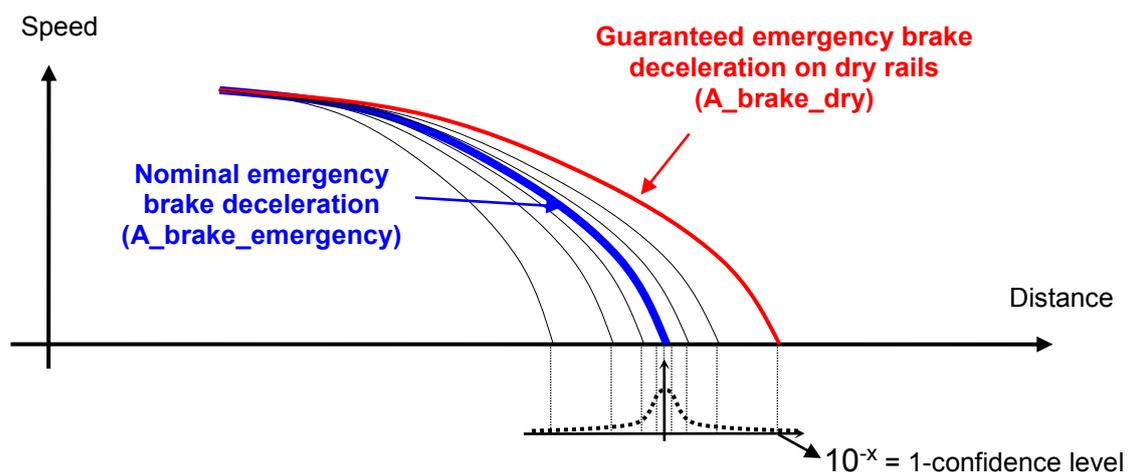


Abb. 20: Streuung der Schnellbremswege [ERA16b]

Durch die Charakteristik des Gamma-Modells ist es schwierig, eine konstante oder geschwindigkeitsabhängige, explizite Bremswegsicherheit zu berücksichtigen. Vielmehr wird durch das EIU eine Wahrscheinlichkeit definiert, mit welcher die berechneten Bremswege auf trockener Schiene eingehalten werden sollen. Dies wird mit dem

„Emergency Brake Confidence Level“ (EBCL), dem Schnellbremsvertrauensniveau, festgelegt. Hierfür existiert die Variable  $M_{NVEBCL}$ , welche Teil der nationalen Werte ist. Sie kann zehn definierte Werte zwischen 0,5 und  $10^{-9}$  annehmen, wobei 0,5 bedeutet, dass der Bremsweg auf trockenen Schienen in 50 Prozent aller Fälle eingehalten werden wird. In Deutschland gilt für ETCS L2 der Wert  $10^{-7}$  (d. h.  $EBCL = 7$ , vgl. [DB16a]) und für ESG  $10^{-3}$  (d. h.  $EBCL = 3$ , vgl. [DB16b]).

Ein Bezug auf feuchte Schienen ist deswegen nicht möglich, weil das hier auftretende physikalische Phänomen der teils gleitenden Räder bis heute nur schwer modellierbar ist (vgl. [ERA16b]). Um die für die Berechnung der Bremskurven benötigten Werte der garantierten, sicheren Schnellbremsverzögerungen zu bestimmen, wurden die fahrzeugseitigen Korrekturfaktoren  $K_{dry\_rst}$  und  $K_{wet\_rst}$  definiert. Auf die aus den Bremsversuchen ermittelten Bremsaufbauzeiten werden im Gamma-Modell keine Korrekturfaktoren angewendet.

### 3.2.1.1 Korrekturfaktor $K_{dry\_rst}$

Mithilfe des Korrekturfaktors  $K_{dry\_rst}(EBCL, v)$  werden die stochastischen Einflüsse auf die Bremsleistung der betrachteten Zugkonfiguration auf trockenen Schienen berücksichtigt. Es sind unter anderem folgende Abhängigkeiten einzubeziehen (vgl. [ERA16b] und [HOR17]):

- Streuung der Kennwerte einzelner Komponenten des Bremssystems, z. B. Zylinderdrücke, Gestängewirkungsgrade, Reibparameter
- Zuverlässigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit der einzelnen Bremssystemkomponenten
- Architektur des Bremssystems, d. h. Anzahl der unabhängigen Komponenten; wagen- oder drehgestellselektive Ansteuerung
- Effizienz des Gleitschutzsystems

Für jedes der Konfigurationssets der Grundparameter (vgl. Abb. 19) wird für alle zehn möglichen Vertrauensniveaus jeweils eine geschwindigkeitsabhängige Stufenfunktion für  $K_{dry\_rst}$  berechnet. Eine Möglichkeit der Berechnung stellt die sogenannte Monte-Carlo-Analyse dar, welche in [HOR17] beschrieben ist. Die Speicherung aller errechneten  $K_{dry\_rst}$ -Werte, erfolgt auf dem Fahrzeug als Teil der festen Zugdaten. Sie liegen im Bereich zwischen 0 und 1.

### 3.2.1.2 Korrekturfaktor $K_{wet\_rst}$

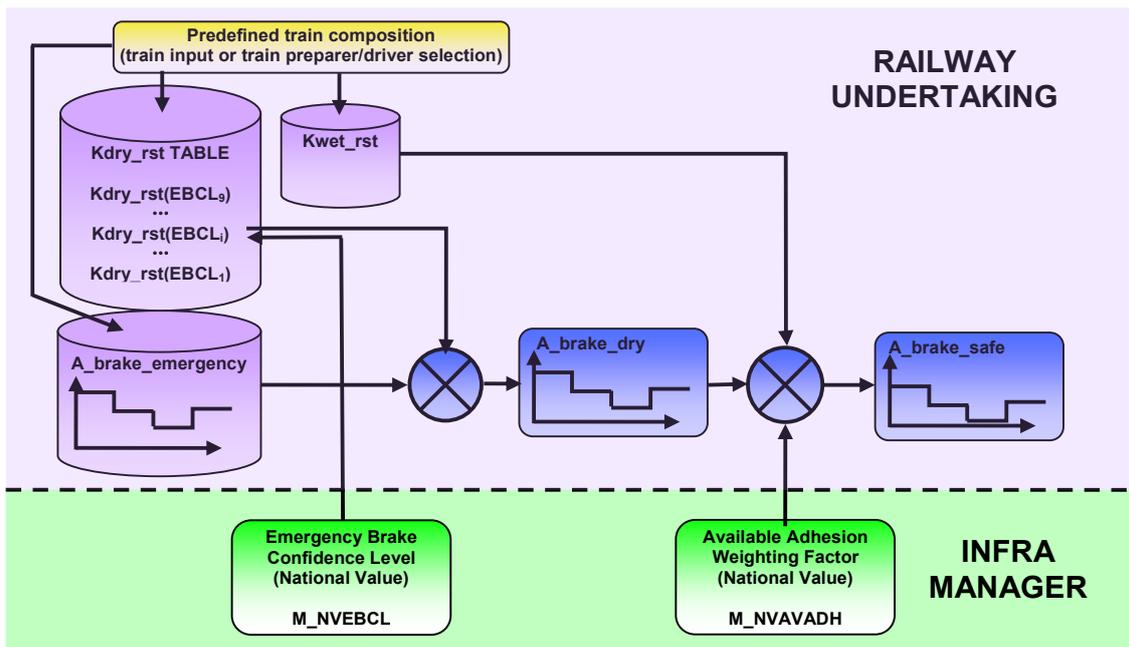
Um dennoch den Verlust der Schnellbremsleistung auf nassen Schienen zu berücksichtigen, existiert der Korrekturfaktor  $K_{wet\_rst}(v)$ . Auch dieser ist Teil der auf dem jeweiligen Fahrzeug fest gespeicherten Zugdaten und wird mit einer geschwindigkeitsabhängigen Stufenfunktion definiert (vgl. [ERA16b]). Er bezieht sich auf Bremsversuche auf einem Referenzgleis unter reduzierten Haftreibungsbedingungen. Der Faktor  $K_{wet\_rst}$  wird den für das Gleitschutzsystem des Zuges durchgeführten Tests gemäß der Norm EN 15595 entnommen (vgl. [ERA16b]).

Das EIU kann bestimmen, mit welchem Anteil der Faktor  $K_{wet\_rst}$  und damit nasse Schienen zur Bestimmung der sicheren Schnellbremsverzögerung berücksichtigt werden sollen. Dies erfolgt mit der nationalen Variablen  $M_{NVAVADH}$ . Sowohl  $K_{wet\_rst}$  als auch  $M_{NVAVADH}$  können Werte zwischen 0 und 1 annehmen.

In Deutschland wird  $M_{NVAVADH}$  zu 1 gesetzt, was bedeutet, dass sich die sichere Schnellbremsverzögerung ausschließlich auf trockene Schienen bezieht (vgl. [DB16a]). Für das Fahren von Zügen in Bereichen mit verringerter Haftreibung gelten die in der Ril 408.0561 und Ril 915.0107A01 festgelegten Prozesse. So muss der Tf unter anderem seine Geschwindigkeit und Fahrweise den Schienenbedingungen entsprechend anpassen und Bereiche mit verminderter Haftreibung dem Fahrdienstleiter melden (vgl. [DB15a] und [DB15b]).

### 3.2.2 Ermittlung der sicheren Bremsverzögerung

Eingangsfaktoren zur Berechnung der sicheren Schnellbremsverzögerung im Gamma-Modell bilden einerseits die beschriebenen, fahrzeugseitigen Korrekturfaktoren  $K_{dry\_rst}$  und  $K_{wet\_rst}$  sowie die vom Infrastrukturbetreiber festgelegten Werte für das Vertrauensniveau EBCL und das Verhältnis zur Berücksichtigung nasser Schienen,  $M_{NVAVADH}$ . Abb. 21 stellt die Verknüpfung dieser Faktoren und die Trennung der Zuständigkeiten zwischen EIU und EVU dar.



**Abb. 21: Bestimmung der sicheren Verzögerung für Gamma-Züge [ERA16b]**

Gemäß der ETCS-Spezifikation berechnet sich die sichere Schnellbremsverzögerung dann wie folgt (vgl. [ERA16a]):

$$A_{brake\_safe} = A_{brake\_emergency} \cdot Kdry\_rst(EBCL) \cdot (Kwet\_rst + M\_NVAVADH \cdot (1 - Kwet\_rst))$$

### Formel 7: Sichere Bremsverzögerung für Gamma-Züge

Es wird diejenige, geschwindigkeitsabhängige Stufenfunktion für  $Kdry\_rst$  verwendet, die dem durch das EIU gewählten EBCL entspricht. Die sichere Schnellbremsverzögerung  $A_{brake\_safe}$  ist Eingangsgröße für die Berechnung der Schnellbremsablaufkurve (vgl. Abschnitt 4.3).

### 3.2.3 Ermittlung der sicheren Bremsaufbauzeit

Die sichere Schnellbremsaufbauzeit  $T_{be}$  ergibt sich im Gamma-Modell direkt aus der in den Zugdaten gespeicherten Schnellbremsaufbauzeit  $T_{brake\_emergency}$ . Es erfolgt keine weitere Anpassung mittels Korrekturfaktoren. Somit gilt nach [ERA16a]:

$$T_{be} = T_{brake\_emergency}$$

### Formel 8: Sichere Bremsaufbauzeit für Gamma-Züge

Es gibt keinen Unterschied zwischen Stopp- und Regulierungsbremungen. Die ermittelte Bremsaufbauzeit ist Eingangsgröße für die Berechnung der Schnellbremseinsatzkurve (vgl. Abschnitt 4.3).

### 3.3 Weitere bremskurvenrelevante, nationale Werte

Neben den bereits beschriebenen Korrekturfaktoren und nationalen Werten des Lambda-Modells (vgl. Abschnitt 3.1.3) bzw. des Gamma-Modells (vgl. Abschnitt 3.2.1) existieren weitere nationale Variablen, mit denen der Infrastrukturbetreiber Einfluss auf die Bremskurvenberechnung unter ETCS nehmen kann. Diese sind in Tab. 3 zusammengestellt und gelten unabhängig vom verwendeten Bremsmodell für alle ETCS-Züge. Die DB-Werte beziehen sich auf die LH für ETCS L2 [DB16a] und ESG [DB16b].

Nationale Variable	Bedeutung	Wert der DB
A_NVMAXREDADH	max. anrechenbare Verzögerung bei vermindertem Kraftschluss	2,5 m/s <sup>2</sup>
Q_NVDRIVER_ADHES	Erlaubnis, ob Tf Bremsverzögerung für verminderten Kraftschluss auswählen darf	nicht erlaubt
Q_NVINHSMICPERM	Erlaubnis, die Berücksichtigung des Geschwindigkeitsmessfehlers zu unterdrücken	ja
Q_NVSBTSMPerm	Berechnung der Vollbremseinsatzkurve bei Zielbremsungen	nein
Q_NVSBFBPerm	Erlaubnis, Service Brake Feedback zu nutzen	nein
Q_NVGUIPerm	Erlaubnis, die Guidance curve als Soll-Betriebsbremskurve zu verwenden	ESG: nein ETCS L2: ja

**Tab. 3: Weitere bremskurvenrelevante, nationale Variablen**

Der Wert von 2,5 m/s<sup>2</sup> für *A\_NVMAXREDADH* liegt oberhalb von real möglichen Bremsverzögerungen. Dies bedeutet, dass die Funktion dieser Variable, die maximale Bremsverzögerung in Bereichen verminderten Kraftschlusses zu limitieren, nicht genutzt wird. Dies deckt sich mit den betrieblichen Regelungen der Ril 915.0107A01 (vgl. [DB15b]).

Ein Geschwindigkeitsmessfehler wird bei der Berechnung der ETCS-Bremskurven in Deutschland ebenfalls nicht einberechnet, da dieser bereits in der vorzuhaltenden Bremswegsicherheit berücksichtigt ist (vgl. [DB15c]).

Eine Erläuterung der Auswirkung der Variablen, welche die Benutzung bestimmter Bremskurven zulassen oder ausschließen, erfolgt in Abschnitt 4.3.

## 4 Charakteristik der Überwachungskurven verschiedener Zugbeeinflussungssysteme

Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Auslegung zeitabhängiger Streckenausrüstungen, wie z. B. Einschaltstrecken von BÜ, und dem auf der Strecke zur Anwendung kommenden Zugbeeinflussungssystem. Daher ist es für die Beurteilung der Auswirkungen von ETCS zweckmäßig, die Charakteristik der Bremskurven mit denen der bisher genutzten Systeme zu vergleichen.

In diesem Kapitel werden die Eigenschaften der Brems- bzw. Überwachungskurven der in Deutschland zum Einsatz kommenden PZB in der Betriebsart PZB 90, der LZB in der Ausführung LZB L72 sowie von ESG und ETCS L2 zusammengestellt und anschließend miteinander verglichen. Es folgt eine Gegenüberstellung der resultierenden Kurven, Bremsweglängen und daraus abgeleiteten Bremseinsatzpunkten.

### 4.1 Punktförmige Zugbeeinflussung (PZB)

Die PZB in der Betriebsart PZB 90 ist das bisher auf Strecken der DB mit einer zulässigen Streckengeschwindigkeit von bis zu 160 km/h standardmäßig zum Einsatz kommende Zugbeeinflussungssystem. Die Forderung hiernach ergibt sich aus der Eisenbahnbau- und Betriebsordnung (EBO, vgl. [EBO17]) aus § 15. Nach [MAS18] beinhaltet die PZB folgende grundsätzliche Funktionen:

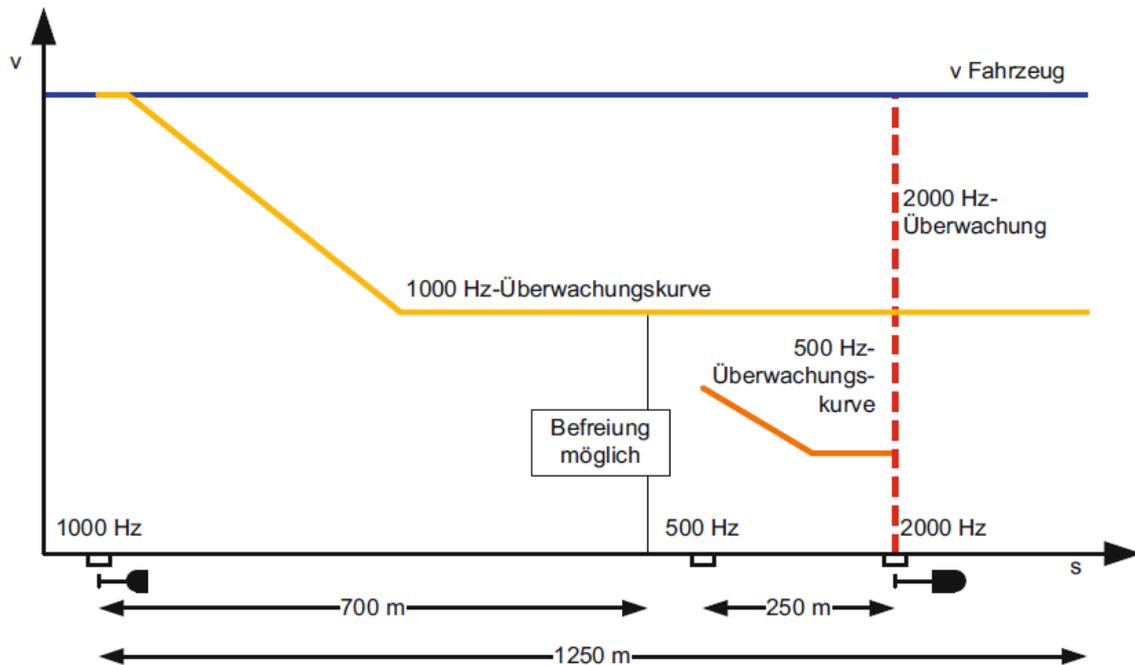
- Überwachung der Beachtung von restriktiven Signalbegriffen an schaltbaren Signalen (z. B. Vorsignal in Warnstellung, Begriff BÜ 0 an ÜS)
- Überwachung statischer Geschwindigkeitsbeschränkungen (ständige und vorübergehende Langsamfahrstellen)
- Überwachung sonstiger Geschwindigkeitsbeschränkungen (Höchstgeschwindigkeit des Zuges bzw. des führenden Fahrzeuges)

Für die Betrachtungen in dieser Arbeit ist lediglich der erste Punkt der genannten Funktionen und die dazugehörigen Bremskurven relevant.

#### 4.1.1 Überwachungsprinzip

Die Informationsübertragung erfolgt bei der PZB punktuell mithilfe von Gleismagneten, welche auf die Frequenzen 500, 1000 und 2000 Hz abgestimmte Schwingkreise enthalten (vgl. [MAS18]). Bei Überfahung mit dem Fahrzeugmagnet erfolgt bei restriktivem Signalbegriff die Aktivierung einer zur Frequenz des Gleismagnet zugehörigen,

(kontinuierlich) wirkenden Überwachungskurve. Somit erfolgt bei der PZB durch punktförmige Beeinflussung eine unterbrochen kontinuierliche Überwachung. Abb. 22 zeigt das grundsätzliche Überwachungsprinzip.



**Abb. 22: Grundsätzliches Überwachungsprinzip der PZB 90 [MAS18]**

Dabei ist der fallende Teil der 1000 Hz-Überwachungskurve zeitabhängig, der restliche Teil sowie die 500 Hz-Überwachungskurve wegabhängig. Bei Überschreitung dieser Überwachungskurven sowie bei Vorbeifahrt am 2000 Hz-Magnet wird auf dem Fahrzeug sofort eine Zwangsbremmung, d. h. eine Schnellbremsung bis zum Stillstand ausgeführt. Die 1000 Hz-Überwachungskurve beginnt sich zu senken, nachdem der Tf den restriktiven Signalbegriff mit der Wachsamkeitstaste bestätigt hat. Dies muss spätestens nach 2,5 s nach Überfahung des Gleismagneten geschehen, sonst erfolgt ebenfalls eine Zwangsbremmung. Die 1000 Hz-Kurve beginnt also spätestens 2,5 s hinter dem 1000 Hz-Magnet abzufallen.

Da die Überwachung des 2000 Hz-Magneten weder zeit- noch wegabhängig ist, wird sie im Folgenden nicht weiter betrachtet. Ebenfalls soll die restriktive Überwachung nach Halt bzw. Unterfahren einer bestimmten Geschwindigkeit keine Rolle für die weiteren Untersuchungen spielen.

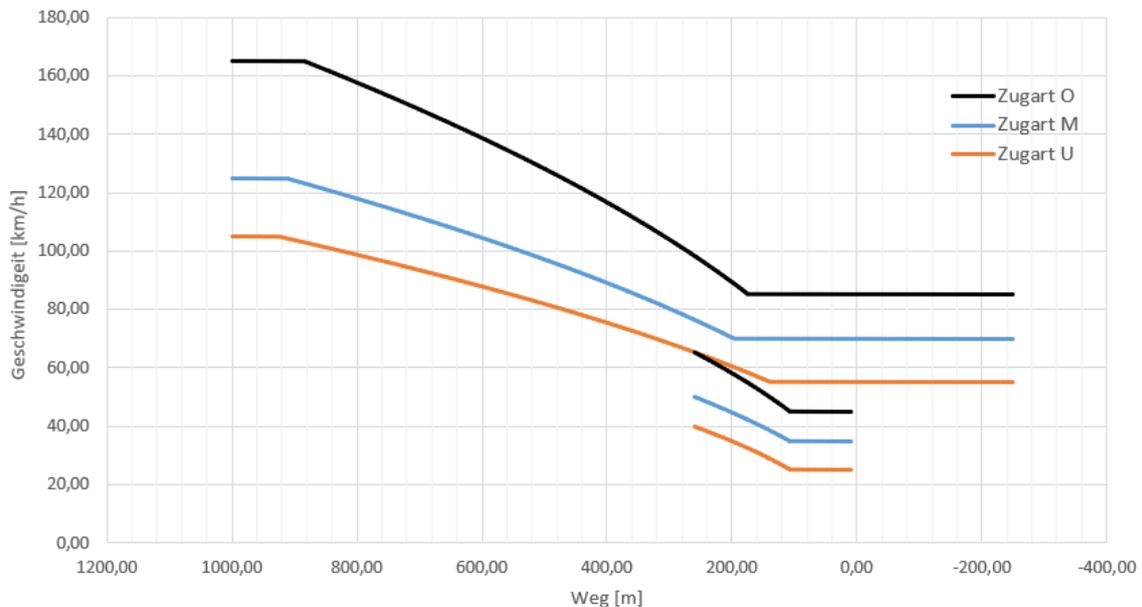
### 4.1.2 Einfluss des Bremsvermögens

Die in Abb. 22 dargestellten Überwachungskurven der PZB sind vom Bremsvermögen des Zuges – ausgedrückt durch die vorhandenen Brh – abhängig. Tab. 4 stellt die Eigenschaften der drei so definierten PZB-Zugarten dar.

PZB-Zugart	Bremstellung	Brh	1000 Hz-Überwachung	500 Hz-Überwachung
O	R oder P	> 110	von 165 km/h auf 85 km/h in 23 s	von 65 km/h auf 45 km/h in 153 m
M	R oder P	66 – 110	von 125 km/h auf 70 km/h in 29 s	von 50 km/h auf 35 km/h in 153 m
U	R oder P	< 66	von 105 km/h auf 55 km/h in 38 s	von 40 km/h auf 25 km/h in 153 m
	G	alle		

**Tab. 4: Zugarten der PZB, bearb. nach [MAS18]**

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass im Betriebsprogramm der PZB insgesamt sechs zeit- bzw. wegabhängige Überwachskurven existieren; für jede der drei PZB-Zugarten jeweils eine 1000 Hz- und eine 500 Hz-Überwachungskurve. Diese sind in Abb. 23 dargestellt. Für die Berechnung der Bremskurven wird eine konstante Verzögerung angenommen.



**Abb. 23: Darstellung der PZB-Überwachungskurven**

Es bleibt anzumerken, dass die PZB-Bremskurven von der Neigung unabhängig sind. Dies ist dadurch möglich, dass jeder Zug eine fahrplanmäßige Höchstgeschwindigkeit

aufgrund der vorhandenen Bremswertstufen zugewiesen bekommt, mit welcher er auf der Strecke – auch in Gefälleabschnitten – innerhalb des festen Bremswegabstandes zum Stehen kommen kann. Durch die Kategorisierung der vielfältigen Zugkombinationen in drei Zugklassen wird die Überwachung stark vereinfacht. In den Bremstafeln, die den Zusammenhang zwischen verfügbarem Brh des Zuges, Neigung der Strecke und zulässiger Höchstgeschwindigkeit des Zuges darstellen, ist eine Bremswegsicherheit von konstant 10 % eingearbeitet. Bei einem Bremswegabstand von 1000 m bedeutet dies, dass der Zug in der Regel bei Einleitung einer Schnellbremsung nach 900 m zum Stehen kommen wird.

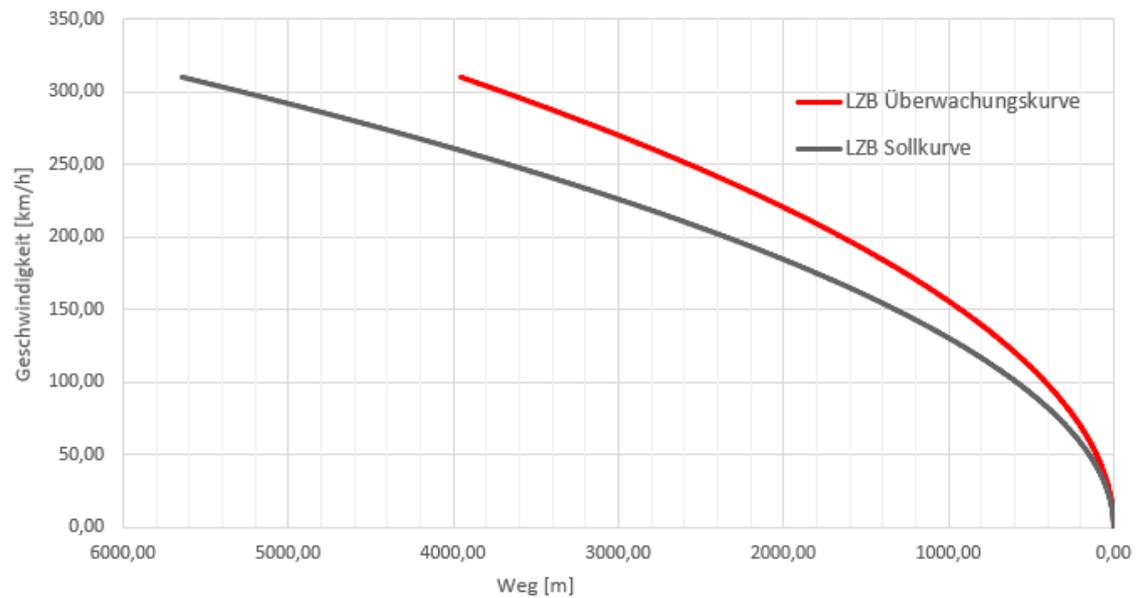
Die Bremskurven haben keinen Fußpunkt, sondern eine zur Zugart gehörende Entlassungsgeschwindigkeit, mit der sich die Züge einem Halt zeigenden Signal nähern können. Erst mit Überführung des 2000 Hz-Magneten am Signalstandort erfolgt die Zwangsbremsung.

## **4.2 Linienförmige Zugbeeinflussung (LZB)**

Gemäß EBO wird für Strecken mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von mehr als 160 km/h eine Zugbeeinflussung gefordert, mit der Züge zusätzlich „geführt“ werden können (vgl. [EBO17]). Hierfür ist eine kontinuierliche Zugbeeinflussung notwendig, was vom LZB-System erfüllt wird. Aufgrund der kontinuierlichen Führungsgrößen ist zudem eine Führerraumsignalisierung möglich. Dies erlaubt Bremswege, welche unabhängig vom Bremswegabstand der Strecke sind. Infolgedessen können auch Züge mit sehr schlechtem Bremsvermögen deutlich schneller fahren, als dies mit der PZB möglich wäre (vgl. [KOL86]). Als Grenze sind dann streckenseitige und fahrzeugtechnische Randbedingungen zu berücksichtigen.

### **4.2.1 Überwachungsprinzip**

Anhand der von der LZB-Streckenzentrale übermittelten Führungsgrößen wird das Fahrzeug in die Lage versetzt, seine Soll- und Überwachungsgeschwindigkeit zu berechnen (vgl. Abb. 24). Durch diese Kurven erfolgt eine kontinuierliche Überwachung der zulässigen Geschwindigkeit.



**Abb. 24: Darstellung der LZB-Bremskurven**

Der zu erwartende Bremsseinsatz wird dem Tf rechtzeitig optisch und akustisch mitgeteilt. Dieser Bremsvorankündigungspunkt befindet sich ca. 1000 m vor dem Absinken der Sollbremskurve (vgl. [MUR91]). Weiterhin erfolgt im Triebfahrzeug die Anzeige der Zielgeschwindigkeit und Zielentfernung (vgl. [MAS18]).

Wird die Sollbremskurve um 5 km/h überschritten, erfolgt zunächst eine akustische Warnung, zudem beginnt der Leuchtmelder G zu blinken. Aus Gründen der Vereinfachung wird in obiger Abbildung diese Warnkurve nicht dargestellt. Anschließend erfolgt die automatische Abschaltung der Traktion. Wird schließlich die LZB-Überwachungskurve erreicht, wird vom System eine automatische Zwangsbetriebsbremsung ausgelöst (vgl. [BRA88]). Diese wird wieder aufgehoben, wenn die Geschwindigkeit nicht mehr oberhalb der Sollkurve liegt. Die LZB-Überwachungskurve wird aus der Sollbremskurve abgeleitet. Dabei ist die zu verwendende Bremsverzögerung um den Faktor 1,4 größer als die Sollbremsverzögerung (vgl. [BRA88]). Fußpunkt der LZB-Bremskurven ist der sogenannte LZB-Halt; es existiert keine Entlassungsgeschwindigkeit.

#### 4.2.2 Einfluss des Bremsvermögens und der Streckenneigung

Die Ausführungen in diesem Abschnitt beziehen sich auf die LZB der Bauarten LZB L72 bzw. LZB L72 CE I. Die Bremskurven der LZB L72 CE II werden nach einem anderen Prinzip berechnet, dessen Erläuterung den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Die LZB-Streckenzentrale sendet folgende Führungsgrößen über den LZB-Kabellinienleiter an das Fahrzeug (vgl. [MUR91]):

- zu berücksichtigende Bremsverzögerung  $b$
- Zielentfernung bis zum nächsten Geschwindigkeitswechsel
- Zielgeschwindigkeit

Gemäß [BRA88] existieren für die LZB zwölf verschiedene, nummerierte Bremskurven, welche eine konstante Verzögerung über den kompletten Bremsweg aufweisen. Die Verzögerungswerte der LZB-Überwachungskurven liegen dabei zwischen  $0,115 \text{ m/s}^2$  und  $1,100 \text{ m/s}^2$ . Entsprechend dem Bremsvermögen des Zuges, ausgedrückt mit den vom Tf eingegebenen  $Brh$ , der Bremsausgangsgeschwindigkeit sowie der Streckenneigung wählt die LZB-Streckenzentrale die zu verwendende Bremskurve aus (vgl. [BRA88]). Die zugehörige Sollbremsverzögerung  $b$  dieser Bremskurve wird dann zusammen mit den anderen Führungsgrößen an das Fahrzeug übertragen, woraus dieses seine Soll- und Überwachungsgeschwindigkeit berechnen kann.

Um den Zusammenhang zwischen Bremsausgangsgeschwindigkeit, Bremsvermögen des Fahrzeugs und Streckenneigung beschreiben zu können, wurden für die LZB eigene Bremstafeln aufgestellt (vgl. [DB09b]). Für die vorhandenen  $Brh$  und die Bremsausgangsgeschwindigkeit sind darin Bremswege definiert, die mindestens freizuhalten sind. Diese beinhalten bereits eine Bremswegsicherheit, die bis  $150 \text{ km/h}$  wie bei der PZB  $10 \%$  beträgt und dann linear bis auf ca.  $30 \%$  bei  $300 \text{ km/h}$  ansteigt (vgl. [BRA88]). Der lineare Anstieg der Bremswegsicherheit ist dabei bei verschiedenen  $Brh$ -Werten unterschiedlich hoch (vgl. [GRÖ08]). Aus diesen verfügbaren Bremswegen kann schließlich auf die konstante Verzögerung rückgeschlossen und die Bremskurvennummer gewählt werden. Eine Herleitung findet sich auch in [BRA88].

Der Unterschied bei der LZB L72 CE II besteht unter anderem darin, dass die Verzögerungswerte nicht als konstant über den Bremsweg angenommen werden, sondern drei Stufen besitzen können. Neben der Momentanverzögerung findet auch die Bremsaufbauzeit und der Massenfaktor Eingang in die Berechnung. Weiterhin existieren zur Berücksichtigung der Bremswegsicherheit sogenannte Sicherheitsfaktoren. Das Prinzip der Berechnung des mindestens vorzuhaltenden Bremsweges für LZB L72 CE II Fahrzeuge ist in [GRÖ03] dargelegt. Weitere Anforderungen an diese LZB-Bauart beschreibt [FRA03].

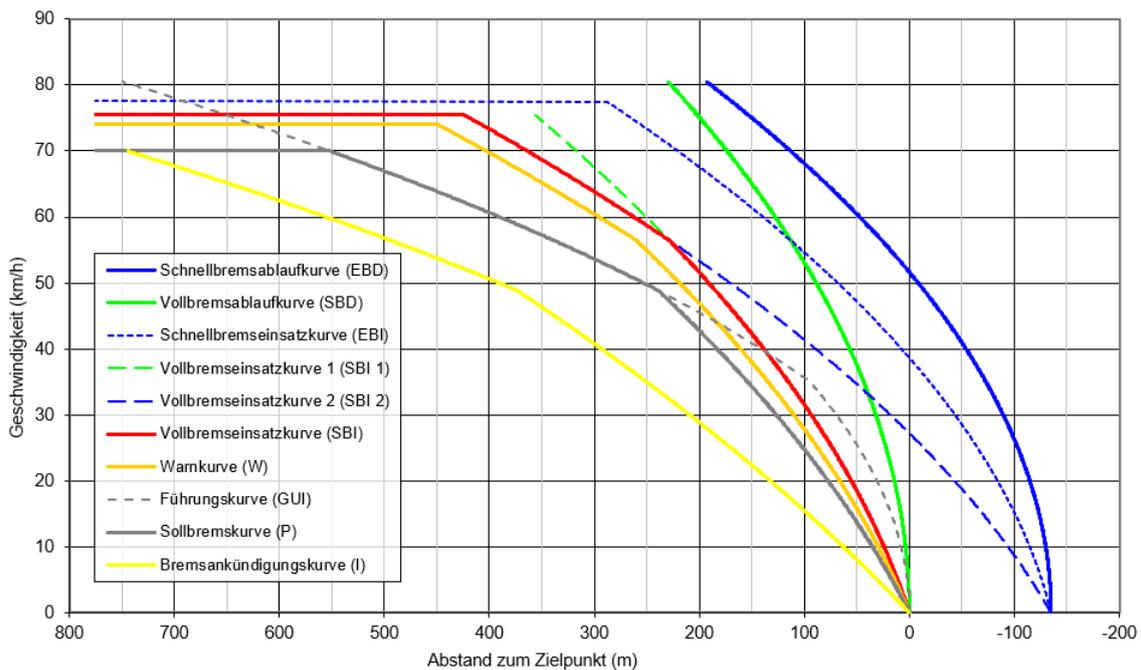
## 4.3 European Train Control System (ETCS)

Auch ETCS ist ein kontinuierlich wirkendes Zugbeeinflussungssystem und damit nach EBO für Strecken mit einer Höchstgeschwindigkeit über 160 km/h einsetzbar. Im Gegensatz zur LZB, die vorrangig auf Hochgeschwindigkeitsstrecken und Strecken mit sehr hohen Leistungsanforderungen zum Einsatz kommt, wird ETCS langfristig im Sinne eines interoperablen Betriebs auch auf herkömmlichen Mischverkehrsstrecken verwendet werden.

ETCS L2 ist dabei durch die kontinuierliche Datenübertragung generell in vielerlei Hinsicht mit der LZB vergleichbar. Die Charakteristiken der Bremskurven ähneln sich sehr (vgl. Abschnitt 4.4). ETCS L1LS wurde mit der deutschen Ausprägung ESG dagegen fast vollständig an die Charakteristik der PZB angepasst. Die nachfolgenden Ausführungen dieses Abschnittes beziehen sich – sofern nicht anders angegeben – auf Erkenntnisse aus dem Subset 026 der ETCS-Spezifikation (vgl. [ERA16a]) sowie [STA11] und [GRÖ14]. Speziell im Kapitel 3.13 des Subset 026 ist die Bremskurvenberechnung mit all ihren Einflussfaktoren spezifiziert. Es werden nachfolgend nur Bremskurven bezüglich Zielbremsungen betrachtet.

### 4.3.1 Erläuterung der Bremskurven

Die Berechnung der Bremskurven unter ETCS und ihre Abhängigkeit von Einflussfaktoren stellt sich als wesentlich komplexer heraus, als dies bei den bisher beschriebenen Systemen der Fall ist. Abb. 25 zeigt beispielhaft die vollständige Bremskurvenschar. Es ist anzumerken, dass dies ein stark konstruiertes Beispiel ist, um die Bremskurven möglichst zu entzerren und somit besser sichtbar zu machen. Im Normalfall überlagern sich bei Nutzung der in Deutschland verwendeten Parameter einige der Kurven gegenseitig. Die Eingangswerte des Berechnungsbeispiels sind in Anhang B, Nr. 1 zu finden. Die Release Speed soll im weiteren Verlauf der Arbeit keine Rolle spielen und wird daher nicht weiter behandelt.



**Abb. 25: Vollständige und entzerrte Bremskurvenschar von ETCS**

Wie zu sehen ist, existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Bremskurven, die teils voneinander abhängig sind. Grundsätzlich lassen sich die Kurven in drei Kategorien einteilen:

- **Ablaufkurven:** Diese Kurven beschreiben den Geschwindigkeitsverlauf, dem der Zug folgen soll bzw. folgen wird, sofern ein Eingriff durch das System erfolgt ist (P, GUI, SBD, EBD).
- **Interventionskurven:** Wird die Geschwindigkeit des Zuges größer als die durch diese Kurven beschriebene Geschwindigkeit, erfolgt ein systemseitiger Eingriff durch ETCS. Die eingeleitete Bremsung findet innerhalb der zugehörigen Ablaufkurve statt (SBI, EBI).
- **Informationskurven:** Diese Kurven haben rein informellen Charakter. Bei ihrer Überschreitung wird ein optisches und akustisches Signal ausgegeben (I, W).

Nachfolgend soll kurz der Zweck jeder Bremskurve erläutert werden. Dabei wird ebenfalls im Groben darauf eingegangen, wie sich die jeweilige Kurve berechnet. Die genauen Berechnungsvorschriften sind Kapitel 3.13 des Subset 026 [ERA16a] zu entnehmen.

Zusätzlich befinden sich in Anhang D für jede Bremskurve nach dem Bottom-Up-Prinzip erstellte Schaubilder, die sämtliche Berechnungsparameter der jeweiligen Kurve übersichtlich darstellen. So wird schnell ersichtlich, welche Faktoren auf welche Bremskurven Einfluss haben und wie die Kurven miteinander zusammenhängen. Anhand der Schaubilder kann auch beurteilt werden, an welchen Stellen der Infrastrukturbetreiber die Berechnung durch die Wahl geeigneter Werte anpassen kann.

### 4.3.1.1 Schnellbremsablaufkurve (EBD)

Die Schnellbremsablaufkurve (Emergency Brake Deceleration Curve, EBD) stellt die äußerste Kurve der Bremskurvenschar dar. Sie beschreibt die Geschwindigkeitsverminderung des Zuges, die dieser nach Aufbau der vollen Bremswirkung, also nach der Bremsaufbauzeit, garantiert einhalten kann. Sie hat ihren Fußpunkt am von ETCS überwachten Ort, der Supervised Location (SvL). Sofern ein Durchrutschweg (D-Weg) vorhanden ist, liegt die SvL an dessen Ende, ansonsten am ersten maßgeblichen Gefahrpunkt (vgl. Ril 819.0202). Sie ist demnach sicherheitsrelevant, da eine Überschreitung der Kurve – und damit das Überfahren des Gefahrpunktes – zu einer direkten Gefährdung führen könnte.

Aus diesem Grund liegt dieser Kurve eine sogenannte „sichere“ Bremsverzögerung zu Grunde, die der Zug mit einer vom EIU gewählten Wahrscheinlichkeit einhalten können wird. Diese Sicherheitsmarge, also die prozentuale Vergrößerung des so berechneten Bremsweges gegenüber dem nominalen Bremsweg, kann mittels den in den nationalen Werten festgelegten Korrekturfaktoren direkt beeinflusst und somit an die Sicherheitsphilosophie des Betreibers und das Infrastrukturlayout angepasst werden (vgl. Abschnitte 3.1.3 und 3.2.1). Wie auch in der Abb. D-3 aus Anhang D erkennbar ist, wird der Einfluss der Streckenneigung in der Berechnung der sicheren Verzögerung berücksichtigt. Dem Schaubild können alle Berechnungsparameter entnommen und zu den ursprünglichen Eingangsgrößen zurückverfolgt werden.

### 4.3.1.2 Schnellbremseinsatzkurve (EBI)

Um der EBD folgen zu können, muss der Zug dort bereits die volle Bremswirkung aufgebaut haben. Eine ggf. erforderliche Zwangsbremmung muss dementsprechend um die Bremsaufbauzeit verschoben vorher ausgelöst werden. Da die Einhaltung der EBD wie erwähnt sicherheitsrelevant ist, muss auch die Einhaltung der zugehörigen Bremsaufbauzeit garantiert sein. Daher wird hier die sogenannte „sichere“ Bremsaufbauzeit verwendet (vgl. Abschnitte 3.1.5 und 3.2.3).

Weiterhin ist es erforderlich, eine evtl. noch vorhandene Beschleunigung des Zuges zu berücksichtigen, die zunächst sicher auf null reduziert werden muss. Das für die EBI entwickelte Schaubild (vgl. Abb. D-3), in dem alle Einflussparameter dargestellt sind, befindet sich in Anhang D. Die EBI leitet sich direkt aus der EBD ab. Ihr Fußpunkt liegt daher ebenfalls an der SvL.

Wird die Schnellbremseinsatzkurve (Emergency Brake Intervention Curve, EBI) durch den Zug überschritten, wird durch ETCS eine Schnellbremsung ausgelöst. Diese wird im Netz der DB wieder aufgehoben, sobald die Geschwindigkeit des Zuges unterhalb der

Sollgeschwindigkeit liegt (vgl. [DB16a]). Zusätzlich verfärbt sich das Driver Machine Interface (DMI) rot.

#### **4.3.1.3 Vollbremsablaufkurve (SBD)**

Die Vollbremsablaufkurve (Service Brake Deceleration Curve, SBD) ist nicht sicherheitsrelevant. Sie beschreibt den Geschwindigkeitsverlauf des Zuges, der zustande kommt, wenn die volle Betriebsbremsverzögerung aufgebaut ist. Die zugrunde gelegte Vollbremsverzögerung beinhaltet keine Sicherheitsmarge (siehe auch Abb. D-5 in Anhang D). Die SBD ist somit eine reine Ablaufkurve und löst keinerlei Fahrzeugreaktionen aus. Ihr Fußpunkt liegt am Bremszielpunkt, dem EOA.

#### **4.3.1.4 Vollbremseinsatzkurve (SBI)**

Wird die Vollbremseinsatzkurve (Service Brake Intervention Curve, SBI) überschritten, wird auf dem Fahrzeug eine Zwangsvollbremsung eingeleitet, damit die tatsächliche Geschwindigkeitsverminderung entweder der SBD folgen kann, oder ein Zwangsbremseingriff durch Überschreiten der EBI verhindert wird. Dementsprechend liegt diese Bremskurve um die Bremsaufbauzeit für die volle Betriebsbremsverzögerung verschoben vor der SBD bzw. der EBI und ist der Gruppe der Interventionskurven zuzuordnen. Bei ihrer Überschreitung verfärbt sich das DMI rot.

Grundsätzlich werden somit drei verschiedene SBI berechnet: die SBI 1, die sich aus der SBD ableitet und ihren Fußpunkt am EOA hat; die SBI 2, welche sich aus der EBI ableitet mit ihrem Fußpunkt an der SvL und schließlich die SBI (in Abb. 25 rot), welche die minimierende Hüllkurve der SBI 1 und SBI 2 darstellt und ihren Fußpunkt somit am EOA hat. In der Baseline 2 wurde für die SBI noch der Begriff der „First Line Of Intervention“ verwendet. Die Berechnungsparameter zeigt Abb. D-11 aus Anhang D.

Bei dieser Bremskurve ist zu beachten, dass mit der nationalen Variablen *Q\_NVSBTSMPerm* die Benutzung des Zwangsvollbremseingriffs durch das EIU unterbunden werden kann. Wichtig hierbei ist, dass die Kurven SBD und SBI in diesem Fall nicht komplett entfallen. Es wird lediglich die zu berücksichtigende Vollbremsaufbauzeit zu null gesetzt. Somit ist die SBI im Bereich, wo die EBI restriktiver als die SBD ist, mit der EBI identisch. Im Bereich, in dem die SBD restriktiver als die EBI ist, sind SBI und SBD deckungsgleich.

Unabhängig davon, ob die Benutzung des Zwangsvollbremseingriffes zugelassen ist oder nicht, erfolgt bei Überschreitung der SBI ein Eingriff durch ETCS. Dies geschieht entweder als Vollbremseingriff oder als Schnellbremseingriff (siehe hierzu auch Punkt 3.13.10.2.3 des Subset 026). Ist die SBD in ihrem kompletten Bereich restriktiver als die

EBI, ändert die Anpassung von Korrekturfaktoren zur Beeinflussung der Steilheit der EBD und damit der EBI somit nichts am Standort des Bremsensatzpunktes.

#### **4.3.1.5 Warnkurve (W)**

Die Warnkurve (audible warning, W) gehört zur Gruppe der Informationskurven. Wird sie überschritten, erfolgt die dauerhafte Ausgabe des ETCS-Warntons; es erfolgt jedoch kein Bremsengriff. Dies stellt somit die letzte Information an den Tf dar, dass eine Intervention durch ETCS kurz bevorsteht. Bei Fahrzeugen, welche eine sogenannte Traktionsabschaltungsschnittstelle (Traction Cut Off Interface) zu ETCS besitzen, wird zusätzlich bei Überschreitung der Warnkurve die Traktionskraft abgeschaltet. Die Kurve liegt mit einem festen ETCS-Zeitwert der SBI vorgelagert und besitzt ihren Fußpunkt am EOA. In der SRS 3.6.0 beträgt dieser Wert 2 s. Demnach erfolgt zwei Sekunden nach Ertönen des Warntons ein Bremsengriff durch ETCS, wenn die Geschwindigkeit nicht ausreichend reduziert wird.

#### **4.3.1.6 Sollkurve (P)**

Die Sollkurve (Permitted Speed, P) entspricht der „zulässigen“ Geschwindigkeit, die vom Tf nicht überschritten werden soll. Diese Geschwindigkeit darf bei Zielbremsungen nicht mit der tatsächlich zulässigen Streckengeschwindigkeit verwechselt werden. Der Begriff „zulässige Geschwindigkeit“ ist demnach irreführend. Daher wird die Kurve im Deutschen auch mit „Sollkurve“ übersetzt.

Sie leitet sich wie auch die Warnkurve direkt aus der SBI ab und ist dieser mit einem festen Zeitwert, der in der SRS 3.6.0 4 s beträgt, vorgelagert. Ihr Fußpunkt liegt am EOA. Bei Überschreitung der Sollkurve wird ein einmaliger, kurzer Warnton ausgegeben. Zudem verfärbt sich das DMI orange. Die Sollkurve stellt die Bremsablaufkurve dar, welcher der Tf im Regelbetrieb möglichst folgen soll. Sie wird als Führungsgröße am DMI angezeigt und kann durch die nachfolgend beschriebene Führungskurve beeinflusst werden.

#### **4.3.1.7 Führungskurve (GUI)**

Bei gut bremsenden Zügen ergibt sich aufgrund der starren Ableitung aus der Bremsensatzkurve teils eine sehr steile Sollkurve. Würden die Tf immer entlang dieser steilen Kurven bremsen, ergäbe sich zum einen ein sehr hoher Bremsverschleiß, zum anderen könnte unter dieser straffen Fahrweise der Fahrkomfort für die Fahrgäste leiden. Daher existiert in der Bremskurvenschar auch die sogenannte Führungskurve (Guidance Curve, GUI). Sie ist vergleichbar mit der LZB-Sollkurve.

In den Zugdaten kann durch das EVU eine geschwindigkeitsabhängige Stufenfunktion der zugrunde zu legenden Betriebsbremsverzögerung definiert werden, die den Anforderungen an Bremsverschleiß, Fahrgastkomfort und Leistungsfähigkeit genügt. In der Bremskurvenschar beeinflusst die GUI direkt die Sollkurve. Die endgültige Sollkurve ergibt sich aus der minimalen Hüllkurve der ursprünglichen Sollkurve sowie der GUI.

In Abb. 25 ist am Knick der Sollkurve bei knapp 50 km/h sichtbar, dass oberhalb dieser Geschwindigkeit die GUI maßgebend wird. Unterhalb von 50 km/h ist die ursprünglich berechnete Sollkurve restriktiver. Die Berechnungsparameter sind in Abb. D-14 bzw. Abb. D-15 aus Anhang D dargestellt. Ob die Benutzung dieser Führungskurve erlaubt ist, kann durch das EIU mittels nationaler Werte festgelegt werden (vgl. Abschnitt 3.3).

#### **4.3.1.8 Bremsankündigungskurve (I)**

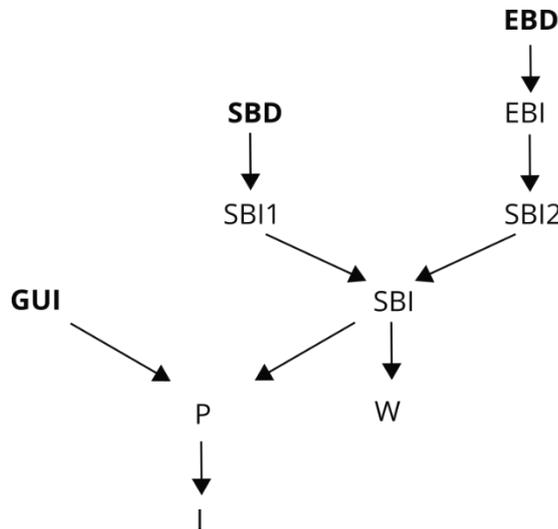
Die Bremsankündigungskurve (Indication Curve, I) kann, wie auch die Warnkurve, der Gruppe der Informationskurven zugeordnet werden. Wird diese Kurve überschritten, wird der Tf akustisch (ETCS-Aufmerksamkeitston) und optisch (Gelbverfärbung des DMI) auf einen nahenden, notwendigen Bremsbeginn aufmerksam gemacht.

Die Kurve wird direkt aus der (ggf. durch die GUI beeinflusste) Sollkurve abgeleitet und ist dieser mit einem zeitlichen Wert vorgelagert. Dieser setzt sich aus der Vollbremsaufbauzeit sowie einer Reaktionszeit von 4 s zusammen, beträgt insgesamt jedoch immer mindestens 5 s. Die Reaktionszeit, welche in ETCS mit der Variablen  $T_{driver}$  ausgedrückt wird, ist ein in ETCS fester Wert, der nicht durch das EIU verändert werden kann. Wenn der Tf also spätestens vier Sekunden nach Ertönen des Aufmerksamkeitstones die Bremsung einleitet, kann er der Sollkurve folgen.

Dies ist somit eine andere Vorgehensweise, also noch in der SRS 3.4.0 verfolgt wurde. Dort bedeutete die Bremsankündigungskurve, dass sofort bei dessen Überschreitung die Bremsung eingeleitet werden müsste, um der Sollkurve folgen zu können. Dafür existierte jedoch noch zusätzlich der Bremsvorankündigungspunkt (Pre-Indication Point), welcher sich 7 s vor der Bremsankündigungskurve befand (vgl. [ERA14]). Dieser Unterschied zwischen den SRS hat auch Einfluss auf die Überlegungen zur Dimensionierung der zeitabhängigen Infrastruktur.

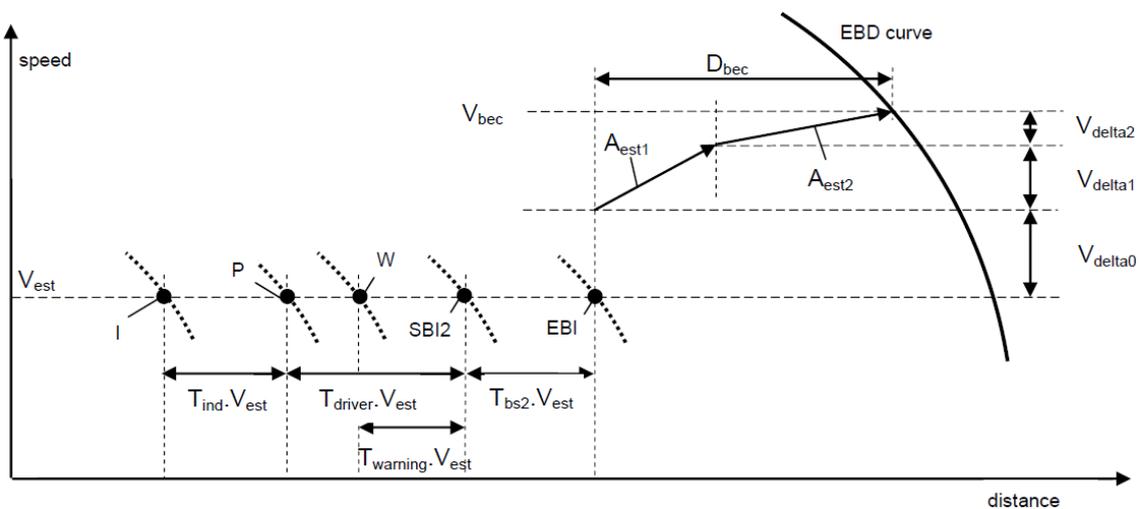
### 4.3.2 Abhängigkeit der Bremskurven zueinander

Wie bereits bei der Erläuterung der Bremskurven erwähnt, leiten sich die Bremskurven teilweise gegenseitig auseinander ab. Den grundlegenden Zusammenhang stellt Abb. 26 dar:



**Abb. 26: Ableitung der Bremskurven aus EBD, SBD und GUI**

Zu erkennen ist, dass fast alle Bremskurven letztlich auf die beiden Ablaufkurven EBD und SBD zurückzuführen sind. Mit welchen Einflussfaktoren die Kurven jeweils zusammenhängen, ist Abb. 27 zu entnehmen



**Abb. 27: Abhängigkeit zwischen den Bremskurven [ERA16a]**

Die Einflussfaktoren der Berechnung der Bremskurven kann den Schaubildern in Anhang D entnommen werden. Eine Übersicht über die verwendeten Variablen und ihrer Bedeutung befindet sich in Anhang C.

### 4.3.3 Einflussfaktoren auf die Steilheit der Bremskurven

In den Abschnitten 3.1.3 und 3.2.1 wurden bereits die Korrekturfaktoren eingeführt, mit denen der Infrastrukturbetreiber die Bremskurven beeinflussen kann. Wichtig zu erwähnen ist, dass sich diese Anpassung der Bremskurven nur auf die sicherheitsrelevante EBD und EBI beziehen. Da, wie Abb. 26 zeigt, die anderen Bremskurven jedoch unter bestimmten Bedingungen direkt daraus abgeleitet werden, führt eine flache EBD auch zu einer Abflachung der nachgelagerten Kurven. Neben den Korrekturfaktoren gibt es auch weitere Faktoren, die die Bremskurvenschar beeinflussen. Nachfolgend sollen an ausgewählten Beispielen die Einflüsse visualisiert werden.

#### 4.3.3.1 Geschwindigkeitsabhängige Korrekturfaktoren

In beiden verwendeten Bremsmodellen können geschwindigkeitsabhängige Korrekturfaktoren definiert werden. Im Lambda-Modell ist dies  $Kv_{int}$ , im Gamma-Modell sind es  $Kdry_{rst}$  und  $Kwet_{rst}$ . Von Seiten der Infrastruktur kann nur  $Kv_{int}$  direkt beeinflusst werden; die  $Kdry_{rst}$ -Werte werden implizit mit dem gewählten EBCL beeinflusst.

Mithilfe der geschwindigkeitsabhängigen Korrekturfaktoren wird die Steilheit der EBD in bestimmten Geschwindigkeitsbereichen beeinflusst. Da die Werte auch größer als eins sein können, kann die Kurve dabei nicht nur abgeflacht, sondern auch steiler gemacht werden. Abb. 28 zeigt einen Vergleich zwischen einer Grund-EBD, bei der alle Korrekturfaktoren auf den Wert „1“ gesetzt wurden, und einer mit  $Kv_{int}$  angepassten EBD. Die Eingangsparameter sind Tab. B-3 und Tab. B-4 aus Anhang B zu entnehmen.

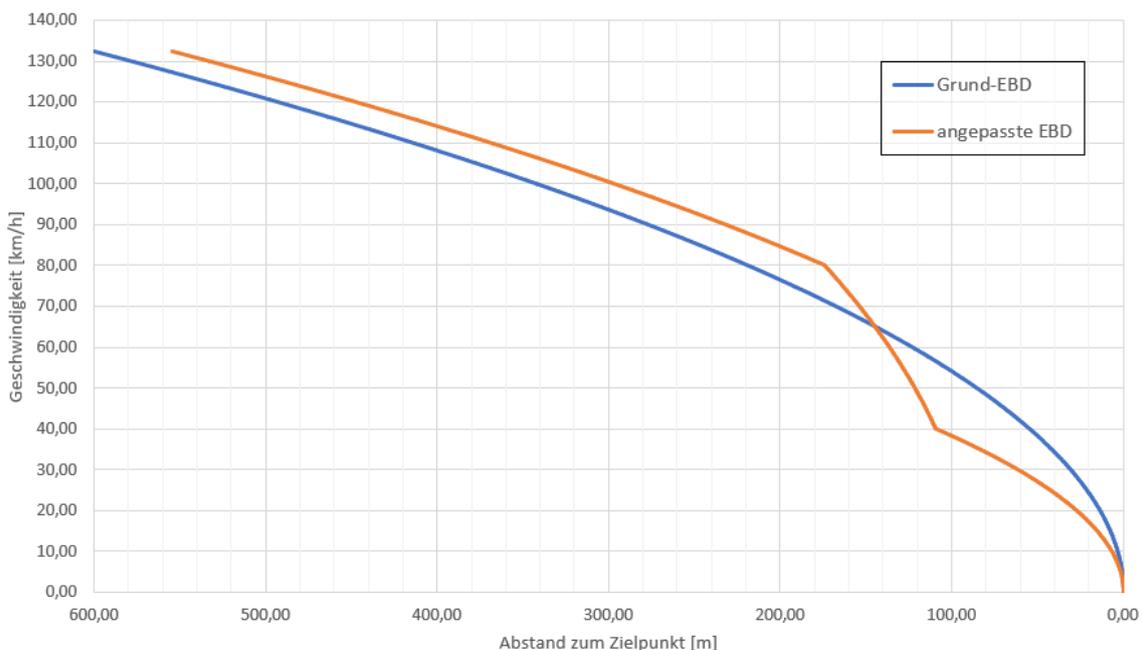


Abb. 28: Wirkung von  $Kv_{int}$  auf die EBD

Im Geschwindigkeitsbereich bis 40 km/h wurde die EBD abgeflacht, da ein Faktor kleiner als „1“ gewählt wurde. Im Bereich zwischen 40 und 80 km/h ist die angepasste EBD dagegen deutlich steiler als die Grund-EBD. So kann für jeden Geschwindigkeitsbereich die EBD an die gewünschte Bremswegsicherheit angepasst werden.

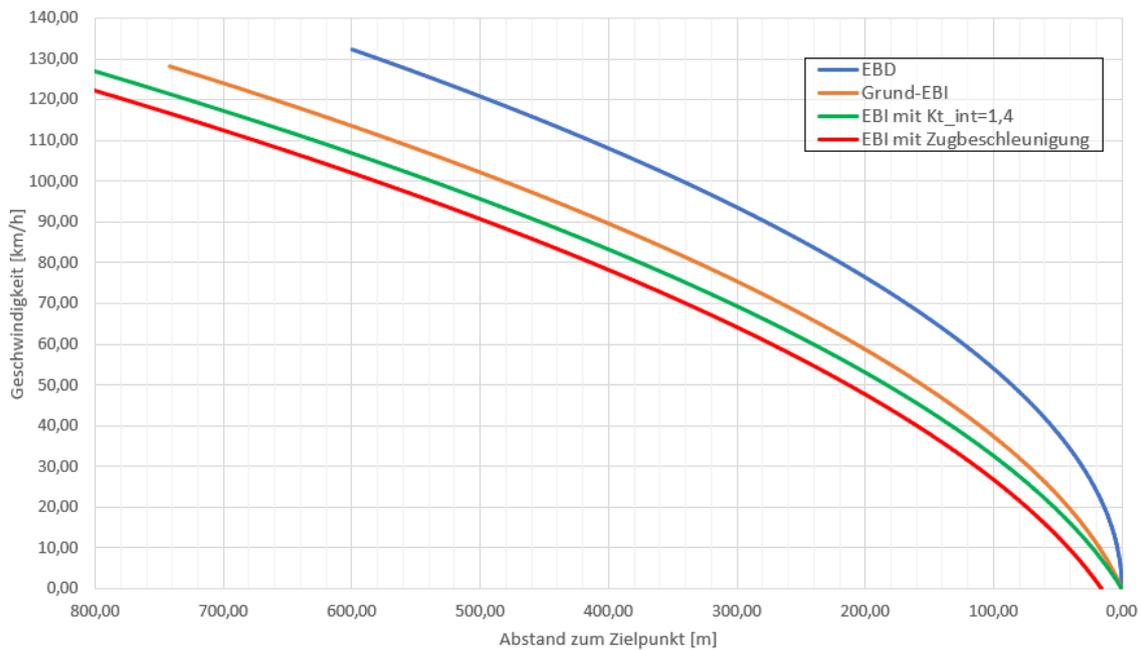
Für ETCS L2 wurden in Deutschland die Werte bereits derart angepasst, dass näherungsweise dieselbe Bremswegsicherheit wie bei der LZB erreicht wird (vgl. [GRÖ08]). Für ESG können andere Werte gewählt werden, da die Züge hier weiterhin gemäß der Fahrplangeschwindigkeit verkehren, die auf den Zusammenhängen der Streckenbremstafeln beruht. Die Bremswegsicherheit ist in diesen Bremstafeln bereits eingearbeitet.

#### **4.3.3.2 Zuglängenabhängiger Korrekturfaktor**

Der zuglängenabhängige Korrekturfaktor existiert nur im Lambda-Modell. Da er geschwindigkeitsunabhängig ist, wird die komplette EBD sowie die nachgelagerten Bremskurven flacher bzw. steiler, wenn er angepasst wird. Auf eine Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet.

#### **4.3.3.3 Bremsaufbauzeit und Zugbeschleunigung**

Die Schnellbremsaufbauzeit kann ebenfalls nur im Lambda-Modell angepasst werden. Der Korrekturfaktor  $Kt_{int}$  hat hier direkten Einfluss auf den Abstand zwischen EBI und EBD, wie der Vergleich in Abb. 29 zeigt. Nicht nur die Bremsaufbauzeit, auch die Zugbeschleunigung beeinflusst den Abstand zwischen EBI und EBD. So wird bei einem schnell anfahrenden Zug die EBI abgeflacht. Abb. 29 stellt die Grund-EBI ohne Korrekturfaktor und Zugbeschleunigung einer Kurve mit  $Kt_{int} = 1,4$  und einer Kurve mit Berücksichtigung einer Zugbeschleunigung von  $1,1 \text{ m/s}^2$  gegenüber. Es wurden die Eingangsparameter aus Tab. B-3 (EBD und Grund-EBI), Tab. B-5 (EBI mit  $Kt_{int}$ ) sowie Tab. B-6 (EBI mit Zugbeschleunigung) aus Anhang B verwendet.



**Abb. 29:** Wirkung von  $K_{t\_int}$  sowie der Zugbeschleunigung auf die EBI

Die abgeflachte EBI würde so auch zu flacheren nachgelagerten Kurven führen. Es lässt sich erkennen, dass in obigem Beispiel der Bremsankündigungspunkt für den beschleunigenden Zug (rote Kurve) etwas über 100 m früher liegt als für denselben Zug, wenn er nicht beschleunigt (orangene Kurve). Dieser Effekt ist insbesondere bei der Dimensionierung von Teilblöcken in Anfahrbereichen zu beachten. Diese sind in Bahnhofsabfahrten zu finden und damit für die Dimensionierung der sogenannten Hochleistungsausfahrt (vgl. Abschnitt 5.3.4.2) wichtig. Ebenso betroffen sind Bereiche an Bahnsteigen vor allem bei nachrückenden S-Bahnen (vgl. Abschnitt 5.4).

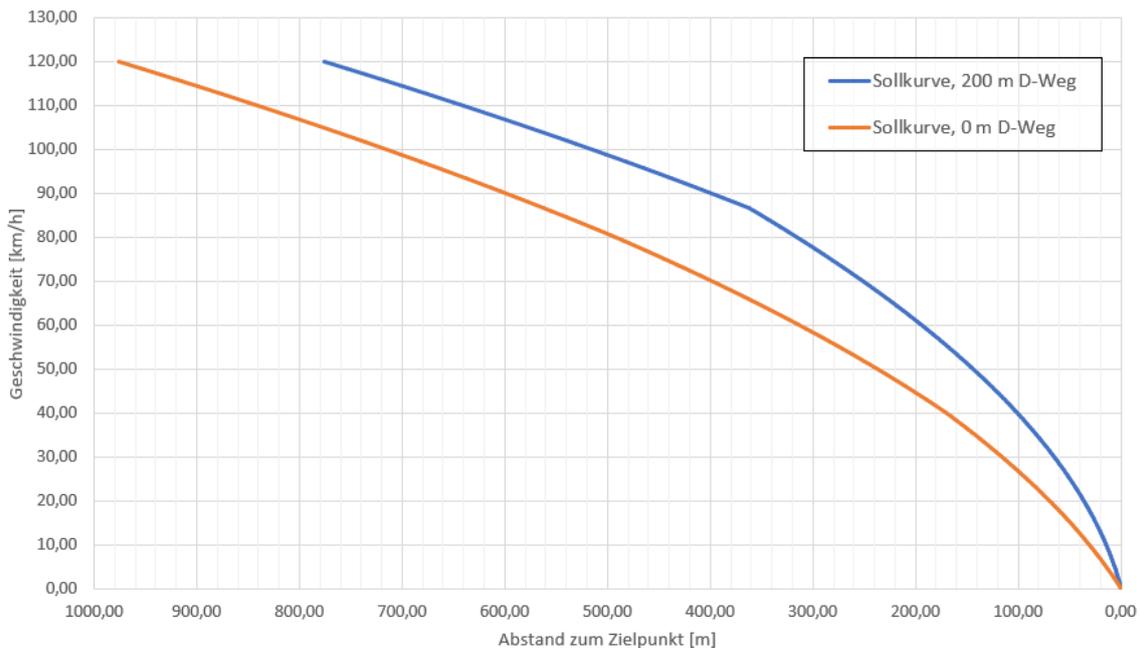
#### 4.3.3.4 Einfluss der Durchrutschweglänge

Die vorgehaltene D-Weg-Länge ist ein zentraler Punkt der Leistungsfähigkeit von ETCS. Da die Schnellbremsablaufkurve und die abgeleitete Interventionskurve EBI Sicherheitsmargen aufgrund der Korrekturfaktoren besitzen, sind diese deutlich flacher als die Betriebsbremskurven. Wird kein D-Weg bereitgestellt, ist die flache EBI dann für den kompletten Geschwindigkeitsbereich maßgebend. Wenn das bremsende Fahrzeug nicht zwangsgebremst werden soll, wird es somit gezwungen, sich mit der resultierenden, sehr niedrigen Verzögerung dem Bremszielpunkt anzunähern.

Dies erfordert einerseits eine deutlich frühere Einleitung der Bremsung. Andererseits wird durch das „Heranschleichen“ an den Zielpunkt der Zeitbedarf der Bremsung enorm hoch. Dies hat zur Folge, dass die Leistungsfähigkeit der Strecke stark abnimmt. Weiterhin stellt dieser Effekt auch ein Sicherheitsrisiko dar. So zeigt eine Untersuchung in [EIC05], dass ein herkömmlicher Personenzug über 30 s eine Geschwindigkeit von unter

20 km/h fahren müsste, um sich einem Halt ohne D-Weg anzunähern. Ungeduldige Fahrgäste am Bahnsteig könnten bereits versuchen, die Türen des Zuges zu öffnen und dabei zwischen Zug und Bahnsteigkante geraten.

In Abb. 30 erfolgt beispielhaft die Gegenüberstellung zwischen einer Sollkurve mit und ohne D-Weg. Als Eingangsparameter wurden die Werte aus Tab. B-7 und Tab. B-8 des Anhang B verwendet.



**Abb. 30: Einfluss der D-Weg-Länge auf den Bremsweg**

Auffällig ist bei der blauen Kurve der Knick bei etwa 85 km/h. Dieser ist darauf zurückzuführen, dass oberhalb dieser Geschwindigkeit statt der SBI 1 nun die flachere EBI bei der Berechnung der SBI maßgebend wird, was sich dementsprechend auch auf die Sollkurve auswirkt. Es kann geschlussfolgert werden, dass je länger der vorhandene D-Weg ist, desto geringer der Einfluss durch die mit Sicherheitsfaktoren belegte EBI wird. Dann führt eine Anpassung der Korrekturfaktoren zur Erreichung steilerer Bremskurven zu keiner Verbesserung der Leistungsfähigkeit. Im Umkehrschluss bedeutet das aber auch, dass wenn die D-Wege kurzgehalten werden sollen, die EBI möglichst steil sein muss, um die gleiche Leistungsfähigkeit zu erreichen.

Der Bremsweg ohne vorhandenen D-Weg verlängert sich um exakt den Betrag der Verkürzung der D-Weg-Länge. Die Annäherungsfahrzeit an den Halt nimmt ebenfalls drastisch zu.

### 4.3.3.5 Einfluss der Streckenneigung

Auch die Streckenneigung hat einen erheblichen Einfluss auf die Bremskurven. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Beschleunigung des Zuges aufgrund der Streckenneigung in die Berechnung der anzusetzenden Verzögerungen einfließt (siehe auch Schaubilder in Anhang D). Ein starkes Gefälle hat demnach aufgrund der zusätzlich wirkenden Beschleunigung einen ähnlichen Effekt auf die Bremskurven, wie bereits in Abb. 29 bei Berücksichtigung der Zugbeschleunigung dargestellt wurde. Die Bremskurven werden flacher. Hinzu kommt die Tatsache, dass für den kompletten Zug die restriktivste Neigung angenommen wird, auch wenn sich nur ein kleiner Teil des Zuges tatsächlich darin befindet. Bahnsteiggleise, welche im Gefälle liegen und für die nur ein sehr kurzer oder gar kein D-Weg vorgesehen ist, sind somit der worst case hinsichtlich der Streckenleistungsfähigkeit.

### 4.3.4 Besonderheiten bei ETCS signalgeführt (ESG)

Mit ESG, der deutschen Ausprägungsvariante von ETCS L1LS, wurde von Anfang an das Ziel verfolgt, die bisherige PZB mit ihrem Betriebsprogramm PZB 90 nachzubilden. Somit sollten, ähnlich der Gleismagnete mit drei verschiedenen Frequenzen, auch standardisierte Datenpunkte zur Anwendung kommen, um die Planung und Projektierung der Strecken zu vereinfachen (vgl. [NEU14]). Dadurch erfolgt bei ESG wie bei der PZB lediglich eine unterbrochen-kontinuierliche Bremsüberwachung, die jeweils an den Beeinflussungspunkten aktiv wird. Eine Führerraumsignalisierung ist nicht möglich, weil die Signalbeobachtung durch den Tf und die Überwachung durch ETCS unabhängig voneinander sein müssen.

Durch die Beachtung der streckenseitigen Signale können die Sicherheitsanforderungen an ETCS geringer sein, als dies bei anzeigegeführten Zügen unter ETCS L2 notwendig wäre. Dies spiegelt sich auch in den von der DB gewählten Korrekturfaktoren wider, welche abschnittsweise auch größere Werte als eins annehmen. Diese vom EIU zu wählenden Faktoren können somit frei angepasst werden, damit die resultierenden Überwachungskurven näherungsweise denen der PZB 90 (vgl. Abschnitt 4.1) entsprechen.

#### 4.3.4.1 Umfang der Bremskurvenschar

ESG nutzt die Betriebsart Limited Supervision von ETCS L1. Diese besitzt die Eigenschaft, dass die Bremskurvenschar stark vereinfacht wird, da lediglich die Schnellbremsablauf sowie Schnellbremseinsatzkurve verwendet werden. Da zusätzlich bei der DB der Korrekturfaktor für die Schnellbremsaufbauzeit  $Kt_{int}$  zu null gesetzt wird (vgl. [DB16b]),

liegen beide Kurven exakt übereinander. In den Betrachtungen zu ESG wird daher im Folgenden nur die EBI berücksichtigt.

#### **4.3.4.2 Reduktion der Einflussparameter**

In Abschnitt 4.3.3 wurden die Einflussfaktoren auf die Steilheit der Bremskurven erläutert. Auch diese sind bei ESG stark reduziert. So wird z. B. kein Neigungsprofil an das Fahrzeug übertragen, sodass die Überwachungskurve von der Streckenneigung unabhängig ist. Zudem wird generell kein D-Weg berücksichtigt. Somit lässt sich feststellen, dass lediglich die Wahl des geschwindigkeitsabhängigen Korrekturfaktors  $Kv_{int}$  einen Einfluss auf die Steilheit der EBI besitzt.

#### **4.3.4.3 Beeinflussungen bei Halt zeigendem Signal**

Aufgrund der zum Ziel gesetzten Verwendung von Standard-Datenpunkten wird beim Erteilen einer Fahrterlaubnis (Movement Authority, MA) nicht ein EOA mitgeteilt, welches dem nächsten Signal entspricht. Stattdessen besitzt die MA die maximal mögliche Länge von ca. 32 km. Restriktionen erfolgen durch schaltbare Balisengruppen am Vorsignal sowie am bisherigen Standort des 500 Hz-Magneten 250 m vor dem Hauptsignal.

Bei ESG erfolgt das Fahren wie bei der PZB nach der Philosophie des festen Bremswegabstandes, aus dem die Höchstgeschwindigkeit des Zuges anhand dessen Bremsvermögen abgeleitet wird. Auch diese Überwachung übernimmt ESG mit der Funktion der „zulässigen Bremsdistanz“ (Permitted Braking Distance, PBD).

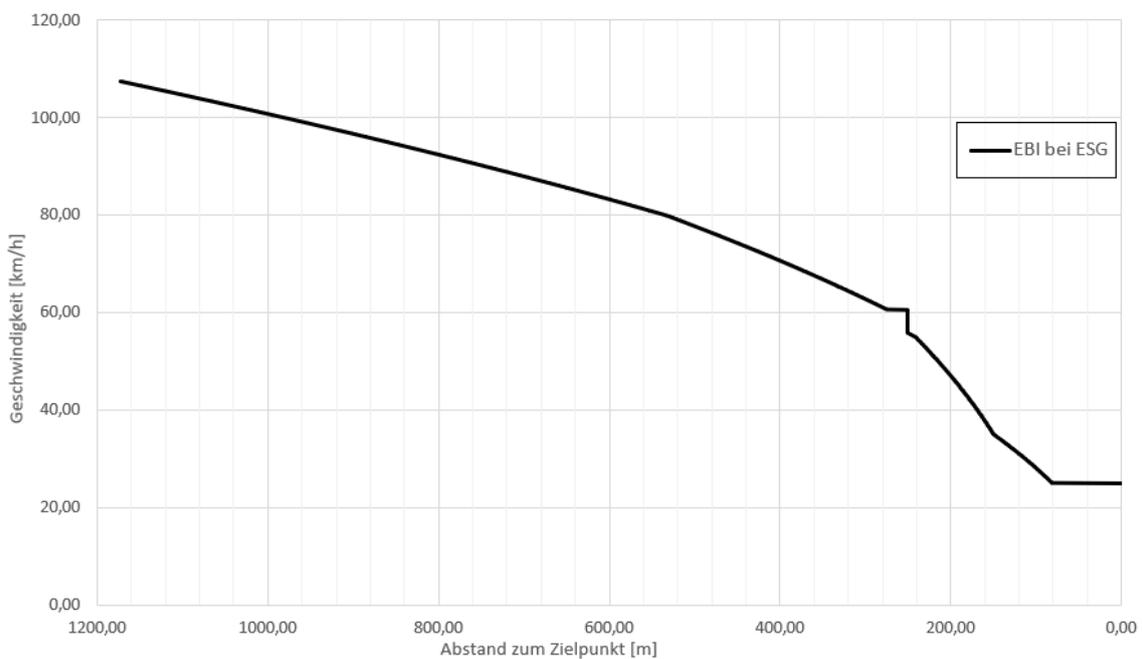
Die Funktion wird auch bei der Vorsignalbeeinflussung genutzt. So wird dort dem Zug mitgeteilt, dass er in 725 m auf eine entsprechend seines Bremsvermögens derartige Geschwindigkeit heruntergebremst haben muss, dass er ab dort innerhalb von weiteren 325 m bis zum Stillstand bremsen könnte (vgl. [DB16b]). Die ab diesen 725 m überwachte Geschwindigkeit ist zugindividuell und hängt vom vorhandenen Bremsvermögen des Zuges ab. Das Setting des geschwindigkeitsabhängigen Korrekturfaktors wurde jedoch derart gewählt, dass diese konstanten Überwachungsgeschwindigkeiten mit denen der PZB vergleichbar sind.

Am Aufwerte-Datenpunkt 250 m vor dem Hauptsignal erfolgt bei Halt zeigendem Signal die Ausgabe einer neuen MA, welche eine gültige Länge von 270 m ausweist (vgl. [DB16b]). Der Fußpunkt der EBI befindet sich somit 20 m hinter dem Signal, was sich aus einer zulässigen Planungstoleranz des Datenpunktstandortes von 10 m sowie weiteren 10 m zur Aufnahme und Verarbeitung der Informationen aus dem Hauptsignal-Datenpunkt zusammensetzt. Die Entlassungsgeschwindigkeit (Release Speed) zur

Annäherung an (ggf. nicht mehr) Halt zeigende Signale ist bei ESG standardmäßig auf 25 km/h festgelegt.

Am Hauptsignal-Datenpunkt wird schließlich bei Halt zeigendem Signal eine MA mit der Geschwindigkeit von 0 km/h übertragen, wodurch eine Zwangsbremung erfolgen würde.

Ein Beispiel einer sich aus den Beeinflussungspunkten ergebenden Überwachungskurve ab dem Vorsignal zeigt Abb. 31.



**Abb. 31: Überwachungskurve bei ESG**

Die dargestellte ESG-Überwachungskurve entspricht der eines 500 m langen Güterzuges in Bremsstellung G mit 80 Brh und einer gemäß Bremstafel fahrplanmäßigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Die verwendeten nationalen Werte entsprechen den im LH ESG definierten Werten (vgl. [DB16b]). Erkennbar ist der Sprung der Überwachungsgeschwindigkeit nach Überfahrt des Aufwerte-Datenpunktes 250 m vor dem Hauptsignal. Dieser ist auch bei der PZB vorhanden.

## 4.4 Vergleich der Charakteristiken

In den Abschnitten 4.1 bis 4.3 wurden die Bremskurvencharakteristiken der PZB, LZB, ETCS allgemein sowie dem deutschen ESG erläutert. In nachfolgender Tab. 5 werden die ermittelten Eigenschaften hinsichtlich verschiedener Kriterien miteinander verglichen.

Kriterium	PZB	LZB	ESG	ETCS L2
<b>Kontinuierlichkeit der Überwachung</b>	unterbrochen kontinuierlich	kontinuierlich	unterbrochen kontinuierlich	kontinuierlich
<b>Entlassungsgeschwindigkeit am Hauptsignal</b>	O: 45 km/h M: 35 km/h U: 25 km/h	keine	25 km/h	individuell projektierbar
<b>Fußpunkt der Kurven</b>	keiner	LZB-Halt vor Hauptsignal	20 m hinter Hauptsignal	je nach Kurve am Bremsziel-punkt oder Ende D-Weg
<b>Individualität</b>	drei Zugklassen	zehn mögliche Bremsverzögerungen	zugindividuell	zugindividuell
<b>Beeinflussbarkeit durch EIU</b>	nein	bedingt	ja	ja
<b>Aufhebung des Zwangsbremseingriffs</b>	Stillstand des Zuges	Entfall der Bedingung ( $v < v_{Soll}$ )	Entfall der Bedingung ( $v < v_{Soll}$ )	Entfall der Bedingung ( $v < v_{Soll}$ )
<b>Berücksichtigung der Streckenneigung</b>	nein	ja	nein	ja
<b>Berücksichtigung von Bremsaufbauzeiten</b>	nein	nein	nein	ja
<b>Bremsankündigung</b>	keine	ca. 1000 m vor Beginn Absenkung $v_{Soll}$	keine	Wert d. Bremsaufbauzeit + 4 s vor Beginn Absenkung $v_{Soll}$
<b>Anwendbarkeit für von 1000 m verschiedene Bremswege</b>	nur bedingt	vom Bremswegabstand unabhängig	ja	vom Bremswegabstand unabhängig

Tab. 5: Vergleich der Charakteristiken verschiedener Überwachungskurven

In diesem Vergleich ist erkennbar, dass die Überwachungskurven der betrachteten vier Zugbeeinflussungssysteme sowohl Unterschiede, als auch Gemeinsamkeiten aufweisen. Auffällig ist, dass dabei die Charakteristik der Bremskurven von PZB und ESG sehr ähneln. Ebenso sind die Unterschiede zwischen den Kurven der LZB und ETCS L2 nur sehr gering. Dies ist jedoch wenig verwunderlich, da die erstgenannten beiden Kurven jeweils für signalgeführte Züge entworfen wurden und die letztgenannten Kurven für anzeigegeführte Züge.

Sowohl bei der PZB als auch bei ESG existiert eine Entlassungsgeschwindigkeit am Signal. Zu beachten ist jedoch, dass diese bei ESG für alle Züge gleich ist, bei der PZB jedoch für jede PZB-Zugart unterschiedlich. Dies hat zur Folge, dass sich Züge der PZB-Zugart „O“ und „M“ schneller einem Signal annähern können, welches nach Befahrung des 500 Hz-Magneten auf den Fahrtbegriff gewechselt hat, als dieselben Züge unter ESG-Überwachung. Der Vorteil der Überwachungskurven von ESG besteht darin, dass diese für jeden Zug individuell entsprechend des vorhandenen Bremsvermögens berechnet werden und besser durch das EIU an die jeweilige Infrastruktur und den tatsächlich vorhandenen Bremswegabstand angepasst werden können. Somit erhöht sich das Sicherheitsniveau deutlich. Gleichwohl ist anzumerken, dass für den Bremswegabstand von 1000 m auch die PZB ein erprobtes, sicheres System darstellt, das seinen Zweck erfüllt. Ein weiterer Unterschied ist, dass bei der Überschreitung der Überwachungskurve der PZB eine Zwangsbremmung bis zum Stillstand eingeleitet wird, bei ESG jedoch nur eine Zwangsbetriebsbremsung, die aufgehoben wird, sobald die Geschwindigkeit des Zuges wieder unterhalb der Überwachungsgeschwindigkeit liegt. Somit ergeben sich im Falle einer Beeinflussung deutlich geringere betriebliche Einschränkungen, als dies bei der PZB der Fall wäre.

Ähnliche Unterschiede weisen auch die Bremskurven der kontinuierlichen Zugbeeinflussungen LZB und ETCS L2 auf. So werden die Bremskurven unter ETCS deutlich individueller für jeden Zug berechnet, als dies bei der LZB der Fall ist. Zudem ergibt sich bei ETCS die Sollkurve aus den Überwachungs- bzw. Interventionskurven. Bei LZB ist dies genau andersherum; es wird durch die LZB-Streckenzentrale eine Sollverzögerung übermittelt, aus der mit einem Faktor die Verzögerung der Bremseingriffskurve berechnet wird. Der Bremsankündigungspunkt ist bei LZB wegabhängig, bei ETCS L2 dagegen zeitabhängig, was zu einer besseren Bedienerergonomie für den Tf führt. Ein letzter Unterschied ist, dass bei LZB die Bremsaufbauzeit nicht explizit berücksichtigt wird. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Berechnung der ETCS-Bremskurven deutlich komplexer ist, als die der LZB-Bremskurven.

## 4.5 Beispiele zum Vergleich der resultierenden Bremswege

Die unterschiedlichen Charakteristiken der Überwachungskurven der verschiedenen Zugbeeinflussungssysteme haben auch Auswirkungen auf den Beginn der Bremsenleitung durch den Tf. Wenn sich eine Bremskurve früher senkt, muss die Bremsung auch früher begonnen werden, wenn keine Beeinflussung durch das System erfolgen soll. Nachfolgend sollen daher die aus den Charakteristiken der Kurven resultierenden Mindestbremswege anhand ausgewählter Beispiele gegenübergestellt werden.

Die Ergebnisse der folgenden Vergleiche bilden die Grundlage, um in den Kapiteln 5, 6 und 7 die Anwendbarkeit der ETCS-Bremskurven auf die jeweils betrachtete zeitabhängige Streckenausrüstung beurteilen zu können.

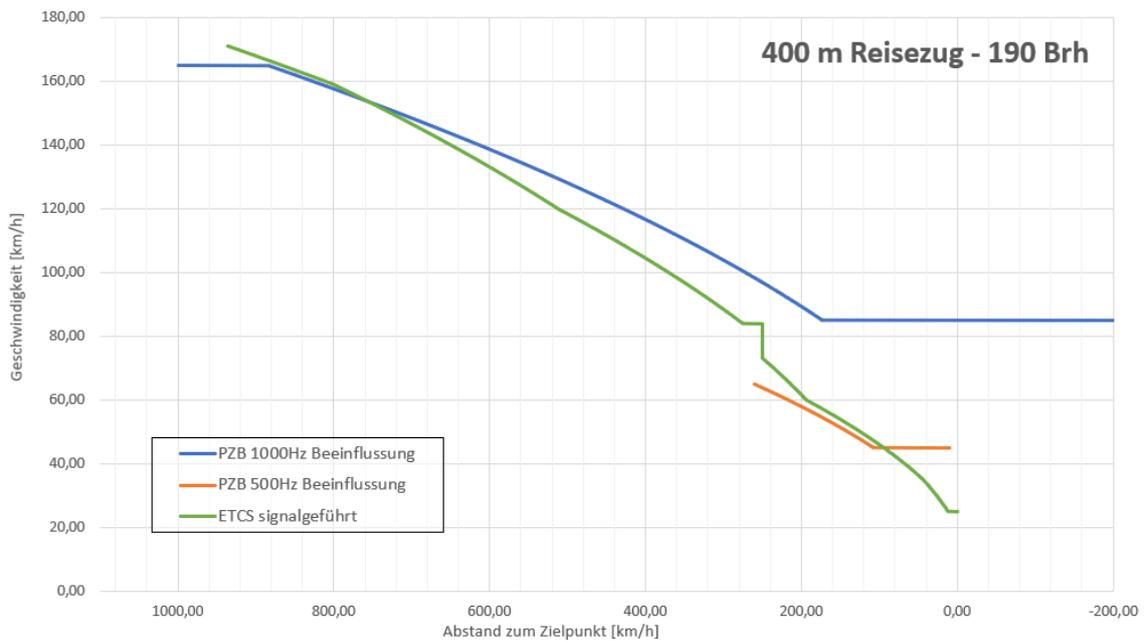
Für alle Berechnungen zu ETCS wurden die in den entsprechenden Lastenheften aufgeführten, nationalen Werte für die Korrekturfaktoren verwendet. Die weiteren Eingangsparmeter wie Bremsleistung und Bremsausgangsgeschwindigkeit sind in der jeweiligen Grafik aufgeführt oder im Text erwähnt. Für die Berechnungen zu ETCS L2 wurde einheitlich eine D-Weg-Länge von 50 m angenommen, welche bei der LZB auch mindestens vorzuhalten ist. Die grundsätzlichen Eingangsparmeter für das Bremskurventool sind in Tab. B-9 von Anhang B aufgeführt.

### 4.5.1 Vergleich zwischen PZB und ESG

Zunächst sollen die Bremsweglängen zwischen PZB- und ESG-Bremskurven verglichen werden. Hierfür wurden Musterzüge verwendet, die sich an den Grenzen der Streckenbremstafeln sowie der Umschaltkriterien der PZB-Zugart orientieren.

#### 4.5.1.1 Reisezüge

Die höchste zulässige Geschwindigkeit für signalgeführte Züge beträgt gemäß EBO 160 km/h. Um diese Geschwindigkeit fahren zu können, benötigt ein Reisezug auf einer fast ebenen Strecke laut Streckenbremstafel knapp 190 Brh. Der Vergleich der Überwachungskurven von ESG und PZB führt zu der Darstellung in Abb. 32.



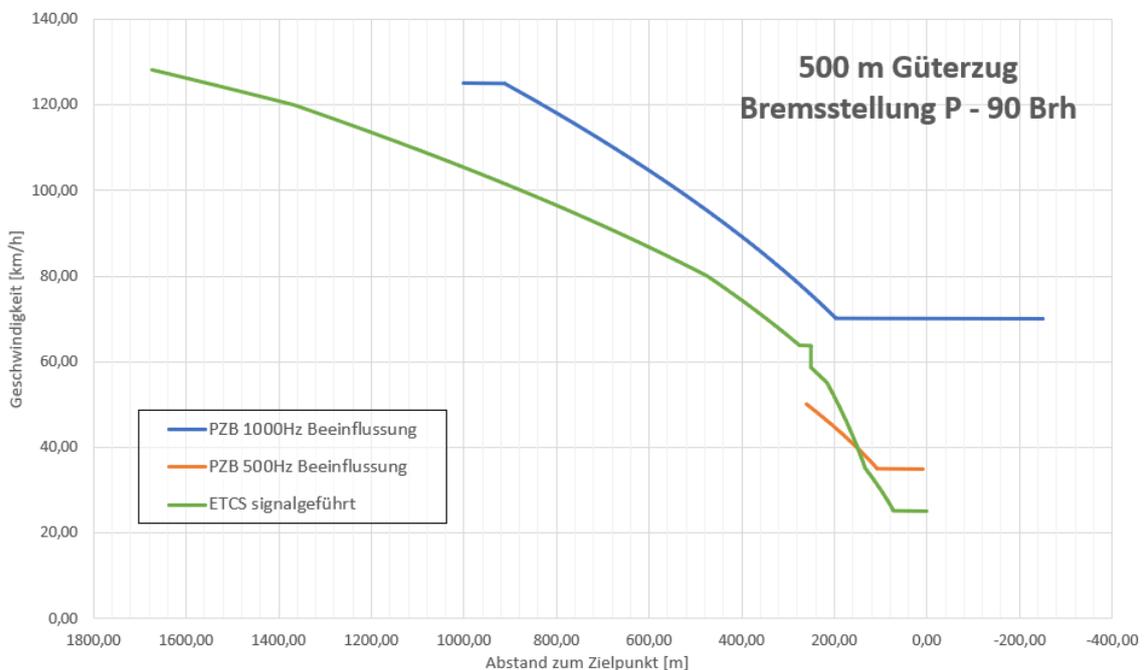
**Abb. 32: Vergleich der Bremskurven von PZB und ESG (Reisezug)**

Es zeigt sich, dass sich die ESG-Überwachungskurve später senkt, als die der PZB. Dabei ist anzumerken, dass der Beginn der Absenkung der PZB-Kurve so lang wie möglich herausgezögert wurde, in dem die Wachsamkeitstaste erst 2,5 s nach der 1000 Hz-Beeinflussung betätigt wurde. Bei früherer Betätigung würde sich die PZB-Kurve demnach noch früher senken. Die Entlassungsgeschwindigkeit aus der Vorsignalbeeinflussung ist bei beiden Systemen gleich, bei ESG muss diese jedoch früher erreicht werden. Wird zudem auch die Beeinflussung am Aufwerte-Datenpunkt bzw. 500 Hz-Magnet betrachtet, zeigt sich, dass die ESG-Bremskurve zunächst weniger restriktiv, die Entlassungsgeschwindigkeit allerdings geringer ist. Bei Strecken mit Gefälle werden laut Streckenbremstafel mehr Brh gefordert. Dann verschiebt sich die ESG-Kurve weiter in Richtung der PZB-Kurve. Es bleibt festzuhalten, dass sich aus fahrdynamischer Sicht keine Beeinflussungen durch ESG im Regelbetrieb ergeben. Der gewöhnliche Bremsesatzpunkt liegt wie bisher im Sichtbereich vor dem Vorsignal.

Im Anhang E befinden sich in Abb. E-9 und Abb. E-12 auch Gegenüberstellungen für einen 150 m Reisezug mit nur 90 bzw. 135 Brh. Auch dort gilt, dass aus fahrdynamischer Sicht bei Einleitung der Betriebsbremsung am selben Ort wie bei der PZB keine Beeinflussung durch die ESG-Bremskurven entsteht, da die Betriebsbremsung bereits vor dem Vorsignal eingeleitet wird und erst dort eine eventuelle Beeinflussung erfolgen würde.

### 4.5.1.2 Güterzüge

Laut EBO beträgt die maximale Güterzuggeschwindigkeit 120 km/h. Im Rahmen der Vergleichsrechnungen wurden dabei für jede PZB-Zugart Beispiele berechnet, die den schlimmsten anzunehmenden Fall darstellen. Dabei wurde neben dem Bremsvermögen und der damit einhergehenden zulässigen Höchstgeschwindigkeit auch die Bremsstellung variiert. Generell konnte anhand der Berechnungen festgestellt werden, dass bei Güterzügen die ESG-Bremskurven teils deutlich restriktiver sind als die der PZB. Nachfolgende Abb. 33 zeigt ein Beispiel, in dem sich die Situation am kritischsten darstellt. In allen anderen Berechnungen war die Abweichung der Bremskurven zwischen ESG und PZB auf Höhe der Bremsausgangsgeschwindigkeit geringer oder unkritisch.



**Abb. 33: Vergleich der Bremskurven von PZB und ESG (Güterzug)**

Gemäß Bremstafel benötigt ein Zug in Bremsstellung P auf ebener Strecke mindestens 90 Brh, um 120 km/h fahren zu können. Da eine Strecke, die auf ihrem kompletten Verlauf keine Steigung aufweist, unrealistisch ist, ist dieses Beispiel jedoch eher als Theorie zu verstehen. Erkennbar ist, dass die ESG-Bremskurve am Beeinflussungspunkt 1000 m vor dem Bremszielpunkt bereits deutlich abgesunken ist. Bei Vorbeifahrt am Vorsignal würde auf dem Zug also direkt eine Zwangsbetriebsbremsung ausgelöst werden, wenn er am Vorsignal schneller als ca. 105 km/h fährt. Dies ist somit eine gravierende Diskrepanz zur PZB-Bremskurve, die sich erst spätestens 2,5 s nach dem Vorsignal absenkt. Aus fahrdynamischer Sicht muss jedoch auch gesagt werden, dass derartige Züge auch heute bereits ihre Betriebsbremsung weit vor dem Vorsignal einleiten. Bei der Annahme einer Sichtzeit von mindestens 12 s wären dies bei 120 km/h immerhin 400 m. Dies

entspricht auch dem Punkt, an dem sich die ESG-Kurve bereits senkt. Kann der Zug innerhalb der 400 m seine Geschwindigkeit unter Beachtung der Bremsaufbauzeit um mindestens 15 km/h vermindern, ist die ESG-Bremsskurve unbedenklich. Aufgrund der starken Abweichung von der PZB 1000 Hz-Überwachung muss in diesem konkreten Fall jedoch mit ungewollten Bremsengriffen durch ETCS gerechnet werden.

In der Grafik weiterhin erkennbar ist der Knick der ESG-Bremsskurve bei 80 km/h. Dort verringert sich der durch die DB gewählte Wert des Korrekturfaktors  $Kv_{int}$ , weswegen die Bremsskurve an dieser Stelle flacher wird. Würde dieser Wert für den Geschwindigkeitsbereich oberhalb von 80 km/h vergrößert werden, könnten die Bremsengriffe leicht vermieden werden. Da für  $Kv_{int}$  ein eigenes Set nur für Güterzüge definiert werden kann, würde die Veränderung keine Rückwirkung auf Personenzüge haben.

In Anhang E sind auch die entsprechenden Gegenüberstellungen der Bremsskurven für Güterzüge mit maximaler Geschwindigkeit von 80 sowie 100 km/h zu finden. Es wurde jeweils der schlechteste Fall (Mindestbremsstrecke für die Ebene) sowie mindestens ein weiterer Grenzfall bezüglich Umschaltung der PZB-Zugart oder Bremsstufenrestriktionen untersucht und dargestellt.

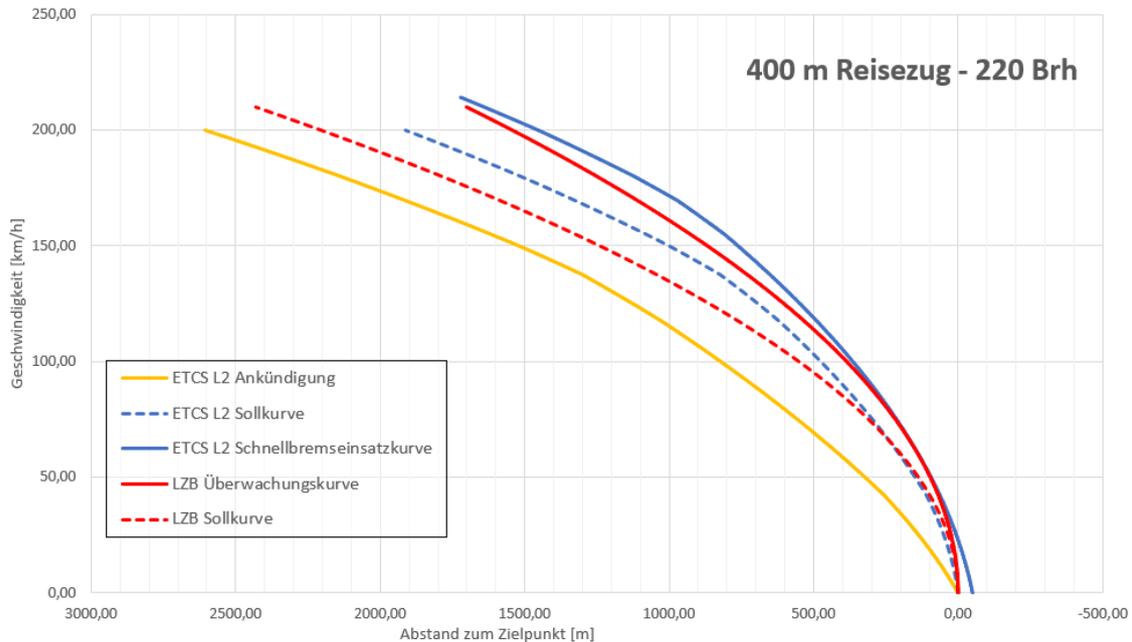
Nach der Analyse kann zusammengefasst werden, dass die Restriktionen aus obigem Beispiel in leicht abgeschwächter Form ebenso für Güterzüge in Bremsstellung P mit einer Fahrplangeschwindigkeit von 100 km/h zutreffen. Für Güterzüge mit einer Fahrplangeschwindigkeit von unter 100 km/h sowie für alle Güterzüge in Bremsstellung G sind die ESG-Bremsskurven aus fahrdynamischer Sicht als unkritisch zu bewerten. Bei der Beeinflussung 250 m vor dem Signal ist die 500 Hz-Kurve der PZB bis auf teilweise die Entlassungsgeschwindigkeit restriktiver.

#### **4.5.2 Vergleich zwischen LZB und ETCS L2**

Der Vergleich der Bremsskurven zwischen LZB und ETCS L2 erfolgte mit denselben Musterzügen, die bereits für den Vergleich zwischen PZB und ESG definiert wurden. Für die Berechnung der ETCS-Bremsskurven wurden die Eingangsparameter aus Tab. B-9 aus Anhang B verwendet. Für eine bessere Übersichtlichkeit werden nur die Überwachungs- und Sollkurven sowie zusätzlich die ETCS-Bremsankündigungskurve dargestellt. Der LZB Bremsvorankündigungspunkt liegt konstant 1000 m vor der LZB-Sollkurve. Bei der ETCS-Bremsberechnung wurde die Benutzung der Führungskurve ausgeschaltet, um zunächst die Grenze hinsichtlich der besten Leistungsfähigkeit darstellen zu können. Gleichwohl muss daher angemerkt werden, dass mithilfe der ETCS-Führungskurve die dargestellte ETCS-Sollkurve beliebig flacher gestaltet und somit an die LZB-Sollkurve angeglichen werden kann.

### 4.5.2.1 Reisezüge

Nachfolgende Abb. 34 zeigt einen typischen Vergleich zwischen LZB- und ETCS L2-Bremskurven für Reisezüge im oberen Geschwindigkeitsbereich.



**Abb. 34: Vergleich der Bremskurven von LZB und ETCS L2 (Reisezug)**

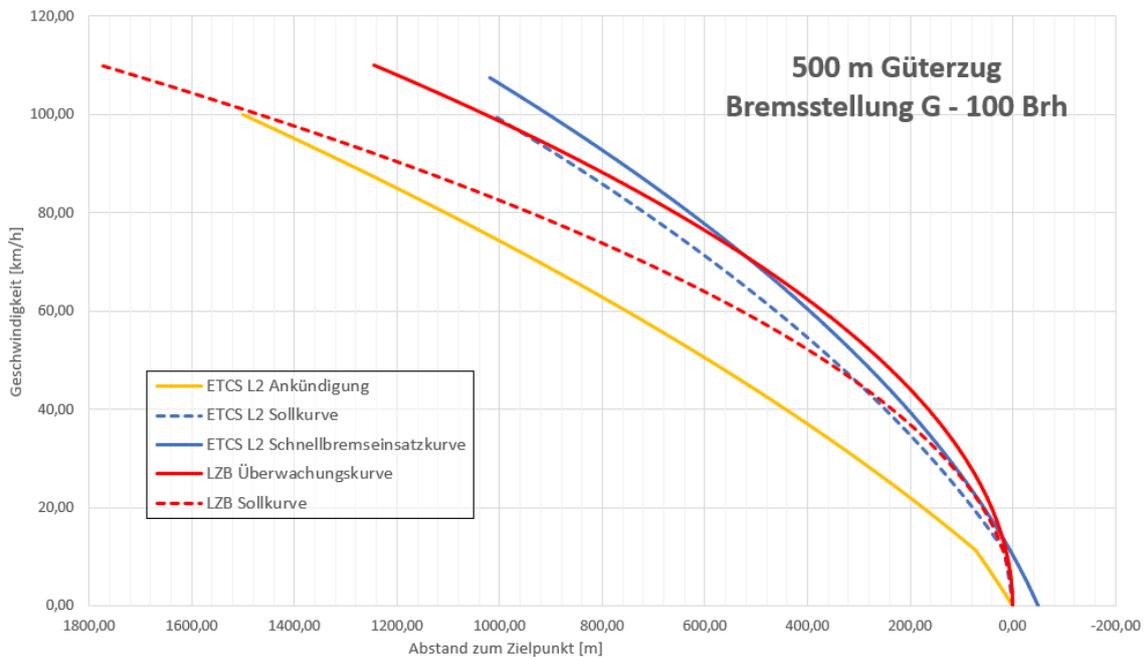
Es ist festzustellen, dass über fast den gesamten Geschwindigkeitsbereich die LZB-Bremskurven restriktiver wirken. Einzige Ausnahme bildet der Bereich unter 50 km/h, wo die ETCS-Sollkurve minimal restriktiver ist. Auch der Bremsereinsatzpunkt bei der LZB (nicht im Bild) liegt deutlich vor dem von ETCS.

Ähnliche Verhältnisse zeigten sich auch für andere Geschwindigkeiten und Bremsvermögen. Weitere Vergleichsgrafiken für unterschiedliche Konstellationen sind in Anhang E zu finden. Trotzdem muss angemerkt werden, dass es durchaus auch Szenarien gibt, in denen die ETCS-Bremskurven nahezu deckungsgleich mit denen der LZB sind, wie z. B. in Abb. E-10 des Anhangs zu sehen ist.

### 4.5.2.2 Güterzüge

Auch bei der Untersuchung der Güterzüge zeigte sich, dass grundsätzlich bei allen betrachteten Konstellationen der Punkt der Bremsankündigung durch die LZB vor dem von ETCS liegt. Somit stellt die LZB hinsichtlich kapazitiver Leistungsanforderungen das restriktivere System dar.

Eine Besonderheit konnte jedoch bei 100 km/h schnellen Güterzügen festgestellt werden, die in der Bremsstellung G verkehren, wie Abb. 35 zeigt.



**Abb. 35: Vergleich der Bremskurven von LZB und ETCS L2 (Güterzug)**

Bei der dargestellten Konstellation schneiden sich die Überwachungskurven von LZB und ETCS L2 zweimal, sodass im mittleren Geschwindigkeitsbereich die ETCS-Schnellbremseinsatzkurve restriktiver als die LZB-Überwachungskurve ist. Im unteren Geschwindigkeitsbereich ist die LZB-Sollkurve zudem etwas steiler als die ETCS-Sollkurve, wodurch sich schneller an einen Halt angenähert werden kann. Dieser Effekt könnte unter ETCS jedoch mit längeren D-Wegen abgemildert werden (vgl. Abschnitt 4.3.3.4).

Im Allgemeinen ist jedoch die LZB auch bei Güterzügen das restriktivere System, wie den entsprechenden Abbildungen in Anhang E entnommen werden kann.

### 4.5.3 Vergleich zwischen ETCS L2 und PZB

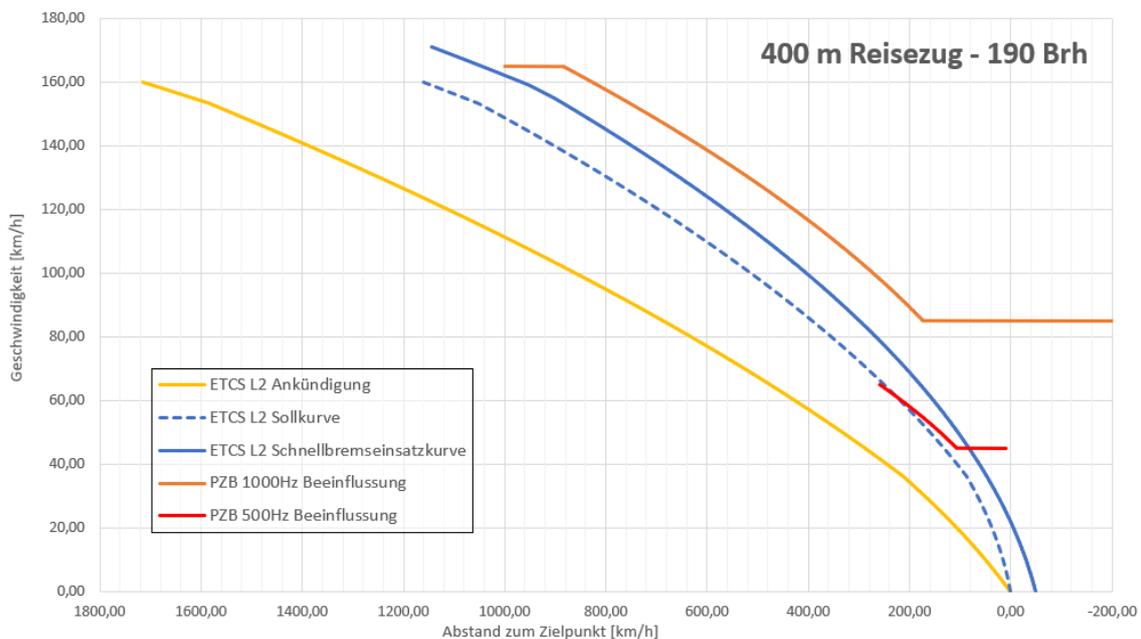
Auch für den Vergleich der Bremskurven bzw. Bremsseinsatzpunkte der PZB mit denen von ETCS L2 wurden dieselben Züge wie in den beiden Abschnitten zuvor verwendet. Für die Berechnung der ETCS-Bremskurven wurde das Bremskurventool der ERA mit den Eingangsparametern aus Tab. B-9 aus Anhang B verwendet.

Die zulässige Geschwindigkeit der PZB-überwachten Züge ergibt sich aus der Streckenbremstafel. ETCS-geführte Züge besitzen diese Geschwindigkeitsbeschränkung aufgrund eines fest einzuhaltenden Bremsweges nicht. Ihre Geschwindigkeit, insbesondere die der Güterzüge, könnte daher teilweise höher sein. Um eine möglichst hohe

Vergleichbarkeit zu erreichen, wurde jedoch für die ETCS-Züge dieselbe Bremsausgangsgeschwindigkeit angenommen, wie für die PZB-Züge.

### 4.5.3.1 Reisezüge

Für einen Vorsignalabstand von 1000 m ergibt sich für eine große Bandbreite von Reisezügen die in Abb. 36 dargestellte relative Lage der Bremskurven der betrachteten Systeme zueinander.



**Abb. 36: Vergleich der Bremskurven von PZB und ETCS L2 (Reisezug)**

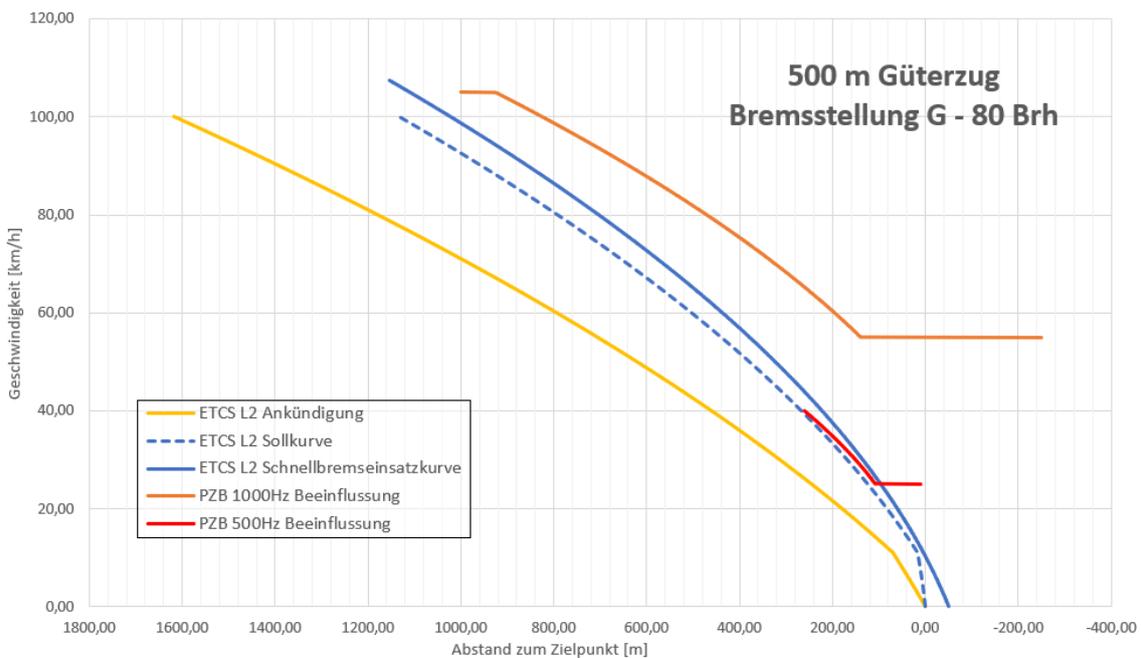
Typischerweise beginnt die Schnellbremseinsatzkurve von ETCS sich deutlich früher zu senken als die Bremskurve aus der 1000 Hz-Beeinflussung am Vorsignal. Die Sollkurve liegt in fast allen Fällen bereits am Vorsignal deutlich unterhalb der Bremsausgangsgeschwindigkeit. Im Bereich der 1000 Hz-Beeinflussung ist ETCS somit restriktiver als die PZB, was zu längeren Bremswegen und Annäherungszeiten an einen Halt führt. Im Bereich der 500 Hz-Beeinflussung ist die PZB-Kurve dagegen meist restriktiver als die Schnellbremseinsatzkurve von ETCS.

Für den Vergleich von den PZB- und ETCS-Bremskurven in Bezug auf die Folgekapitel von besonderer Relevanz sind die Standorte, an denen der Zug spätestens eine Information über die Verlängerung der Fahrterlaubnis aufgenommen haben muss. Bei der klassischen PZB ist dies der Sichtpunkt. Entsprechend den Hinweisen in der Ril 815.0033 [DB09a] soll die Sichtzeit auf ein Vorsignal mindestens 10 s betragen. In den berechneten Beispielen ergibt sich, dass die Bremsankündigungskurve von ETCS teils deutlich mehr als 10 s vor dem für signalgeführte Züge relevanten Vorsignal liegt. Somit

benötigen ETCS-geführte Reisezüge bei Berücksichtigung der aktuell durch die DB gewählten Korrekturfaktoren früher eine Information über die Verlängerung der Fahrterlaubnis als bisher. Eine mit ETCS mögliche Geschwindigkeitserhöhung bzw. Verringerung der für dieselbe Geschwindigkeit geforderten Brh verschärft diese Tatsache. Diese Erkenntnis wirkt sich direkt auf die Dimensionierung der zeitabhängigen Streckenausrüstungen aus.

#### 4.5.3.2 Güterzüge

Bei Güterzügen gelten die bereits für Reisezüge getroffenen Aussagen unverändert weiter. Aufgrund der im Vergleich zu Reisezügen oftmals deutlich längeren Bremsaufbauzeiten tritt der Effekt der restriktiveren Überwachungskurven teils noch deutlicher auf. Abb. 37 zeigt beispielhaft die beschriebene Situation für einen Güterzug der Bremsstellung G mit 80 verfügbaren Brh und einer Bremsausgangsgeschwindigkeit von 100 km/h.



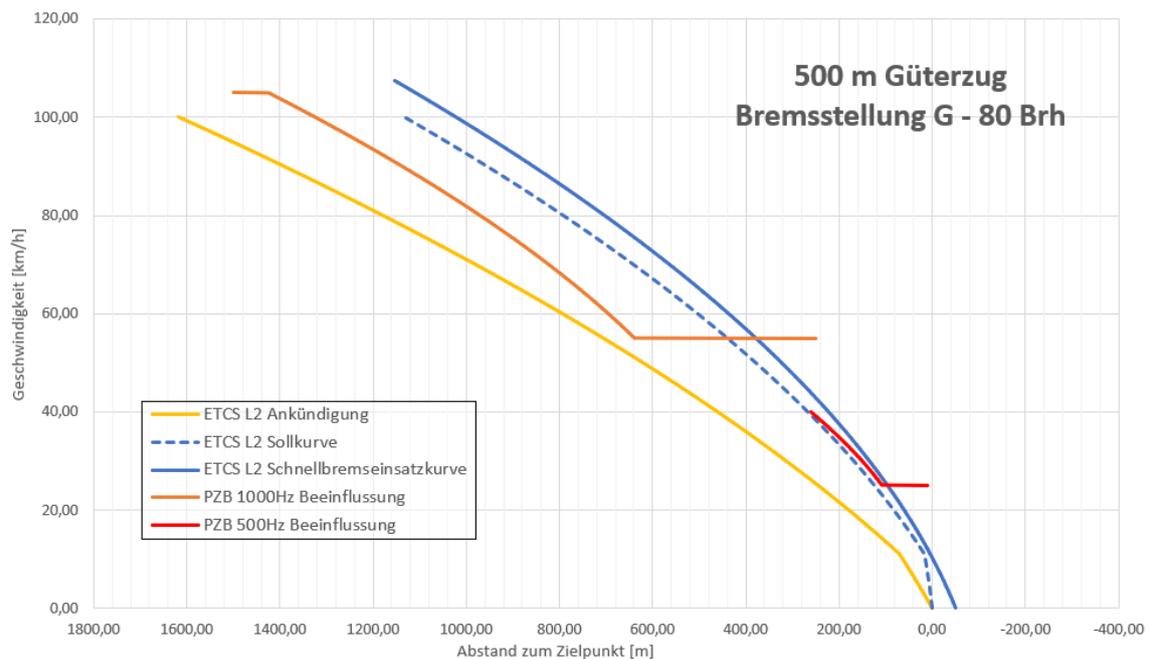
**Abb. 37: Vergleich der Bremskurven von PZB und ETCS L2 (Güterzug)**

Der Bremsankündigungspunkt durch ETCS liegt über 600 m vor dem Vorsignal; der gewöhnliche Sichtpunkt für diesen Zug bei Beachtung der Außensignalisierung wäre dagegen nur knapp 300 m vor dem Vorsignal. Für eine unbehinderte Fahrt müsste die folgende Fahrstraße daher ca. 11 s eher gestellt werden, als dies für den PZB-überwachten Zug nötig wäre.

Die Abbildungen weiterer Vergleiche zwischen PZB und ETCS L2-Bremskurven befinden sich in Anhang E.

### 4.5.3.3 Einfluss des Vorsignalabstandes

Die bisherigen Betrachtungen bezogen sich immer auf einen Vorsignalabstand von 1000 m. Gemäß der Ril 819.0203 [DB08b] ist es allerdings zulässig, den Vorsignalabstand um bis zu 50 % auf 1500 m zu vergrößern. Während sich der Sichtpunkt für einen PZB-Zug als Folge um die entsprechende Verlängerung des Vorsignalabstandes nach vorn verschiebt, bleibt die Lage der Bremsankündigung von ETCS, jeweils bezogen auf den Bremszielpunkt, an gleicher Stelle.



**Abb. 38: Vergleich der Bremskurven von PZB und ETCS L2 bei 1500 m Vorsignalabstand**

Der Abbildung ist zu entnehmen, dass durch die Vergrößerung des Vorsignalabstandes nun im kompletten Geschwindigkeitsbereich die PZB-Überwachungskurven restriktiver sind als die von ETCS L2. Auch der Bremsankündigungspunkt von ETCS befindet sich nun erst hinter dem Sichtpunkt signalgeführter Züge. Dieser Zusammenhang existiert für Reise- und Güterzüge gleichermaßen. In der dargestellten Konstellation wirkt sich die Bremskurvenberechnung von ETCS positiv auf die Streckenleistungsfähigkeit aus, da später mit Bremsen angefangen werden muss, als dies durch die PZB erzwungen werden würde.

Aus dieser Abhängigkeit ergibt sich, dass bezüglich der Anpassung der Dimensionierung der zeitabhängigen Streckenausrüstungen keine pauschalen Aussagen getroffen werden können. Die Notwendigkeit muss anhand des am konkreten Objekt vorhandenen Abstandes zum Bremszielpunkt individuell geprüft werden.

## 4.6 Leistungspotenzial der Bremskurven

Im Hinblick auf die Streckenleistungsfähigkeit stellt sich die Frage, ob die Bremskurven von ETCS weniger restriktiv gestaltet werden können. Es gelten folgende Aussagen:

- Die Korrekturfaktoren für ETCS L2 sind an die Bremswegsicherheit der LZB angepasst und können im Hinblick auf den Nachweis gleicher Sicherheit nur bedingt verändert werden.
- Die Korrekturfaktoren für ESG bieten noch Potenzial, angepasst zu werden. Insbesondere für Güterzüge wäre eine Lockerung für Geschwindigkeiten oberhalb von 80 km/h wünschenswert.
- Es sollte untersucht werden, inwieweit die Nutzung des zuglängenabhängigen Korrekturfaktors auch in Deutschland sinnvoll ist. Bremsversuche zur Ermittlung der Brh beziehen sich in der Regel auf 500 m lange Züge. Bei kürzeren Zügen ergibt sich eine Sicherheitsmarge, die ungenutzt ist.
- Die Nutzung des Gamma-Modells für feste Zugkonfigurationen bietet noch ungenutztes Potenzial. Durch die Messung des realen Bremsvermögens und realer Bremsaufbauzeiten kann die Bremsleistung besser bewertet und Sicherheitsmargen zielgenauer gewählt werden. Es sind steilere Bremskurven zu erwarten.
- Die Werte für  $K_{dry\_rst}$  sollten mit möglichst hoher Genauigkeit berücksichtigt werden können. Die Rundung der bereits zweiten Stelle nach dem Komma auf „0“ oder „5“ ist stark leistungseinschränkend.

## 4.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zunächst die Charakteristiken der Brems- und Überwachungskurven der konventionellen Zugbeeinflussungssysteme PZB und LZB analysiert. Anschließend erfolgte eine detaillierte Erläuterung der ETCS-Bremskurven, ihrer Abhängigkeiten zueinander sowie der wichtigsten Einflüsse auf ihre Steigung. Dabei konnte festgehalten werden, dass sich alle ETCS-Bremskurven hauptsächlich aus den zwei Grundkurven der Schnellbremsablaufkurve (EBD) sowie Betriebsbremsablaufkurve (SBD) direkt oder indirekt ableiten. Hinsichtlich der Einflussfaktoren ist zu unterstreichen, dass keine oder nur sehr kurze D-Wege unter ETCS zu extrem flachen Bremskurven und somit zu verminderter Leistungsfähigkeit führen. Eine weitere Besonderheit ist die Berücksichtigung der Zugbeschleunigung bei der Berechnung der Bremskurven.

Weiter erfolgte ein tabellarischer Vergleich der Bremskurvencharakteristik von PZB, LZB, ETCS signalgeführt sowie ETCS L2. Hier kann zusammengefasst werden, dass einerseits

die Bremskurven der Systeme mit Außensignalisierung, ESG und PZB, und andererseits die Kurven der Systeme mit Führerraumsignalisierung, LZB und ETCS L2, jeweils sehr ähnliche Charakteristiken aufweisen.

Schließlich wurden mit ausführlichen Berechnungen die jeweils resultierenden Bremskurven und Bremsweglängen in grafischen Darstellungen miteinander verglichen. Es konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Bremskurven von PZB und ESG sind miteinander vergleichbar. Die ESG-Bremskurven senken sich bei schlecht bremsenden Zügen zwar früher ab, dies ist aber nicht problematisch, da aus fahrdynamischer Sicht diese Züge ohnehin schon vorher mit Bremsen angefangen haben müssen. Die Übertragung der leicht restriktiveren Kurven erfolgt zudem erst am Vorsignal. Daher sind keine Anpassungen zeitabhängiger Streckenausrüstungen erforderlich.
- Auch bei der Gegenüberstellung der LZB- mit den ETCS L2-Kurven konnten keine oder nur marginale Verschlechterungen der Leistungsfähigkeit ermittelt werden. Bei ausgeschalteter ETCS-Führungskurve sind die LZB-Bremskurven im Allgemeinen restriktiver.
- Aus der Gegenüberstellung der ETCS L2-Bremskurven mit den Überwachungskurven der PZB ergab sich, dass der notwendige Bremseinsatzpunkt unter ETCS allein bei der Annahme der gleichen Bremsausgangsgeschwindigkeit deutlich vor dem der PZB liegt. Die Information über die Verlängerung der Fahrterlaubnis muss damit wesentlich früher an das Fahrzeug übermittelt werden. Erfolgt weder eine Anpassung der ETCS-Bremskurven noch der zeitabhängigen Streckenausrüstungen, ergeben sich zwangsläufig Verluste in der Streckenleistungsfähigkeit sowie weitere betriebliche Einschränkungen. Durch eine mögliche Geschwindigkeitserhöhung für Güterzüge unter ETCS-Führung verschärft sich der Konflikt.

## 5 Dimensionierung von ETCS-Teilblöcken

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der veränderten Charakteristik der ETCS-Bremskurven gegenüber denen der konventionellen Systeme auf die Blockteilung untersucht. Dabei wird einerseits darauf eingegangen, inwieweit bestehende Blockteilungen unter der Maßgabe gleicher Leistungsfähigkeit beibehalten werden können. Andererseits wird auch betrachtet, ob mit der Verwendung von kurzen ETCS-Teilblöcken die Streckenkapazität weiter erhöht werden kann.

Die Ausführungen sind rein theoretischer Art und müssen auf die konkret zu betrachtende Infrastruktur angewendet werden. Ein Berechnungsbeispiel zur Blockteilung in Bahnsteigbereichen auf hochbelasteten S-Bahn-Stammstrecken zeigt das Potenzial von kurzen Teilblöcken bei ETCS L2.

### 5.1 Allgemeine Zusammenhänge

Grundsätzlich gilt, dass es für Mischverkehrsstrecken nicht die eine optimale Blockteilung gibt (vgl. [BÄR15]). Vielmehr kann die Blockteilung für verschiedene Zugfolgefälle optimiert werden. Das Resultat hängt davon ab, ob die Geschwindigkeit der Züge homogen ist, ein schneller vor einem langsamen Zug fährt oder andersherum. Ziel der Bemessung der Blockteilung ist das Erfüllen gewisser Leistungsanforderungen über alle zu erwartenden Zugfolgefälle hinweg. Die bei der DB verwendete Herangehensweise zur Blockoptimierung ist in der Ril 405.0304 [DB08a] beschrieben. Betrachtungen zur Blockteilung sind Teil von eisenbahnbetriebswissenschaftlichen Untersuchungen (EBWU).

Generell lässt sich feststellen, dass die optimale Blockteilung für einen Zugfolgefall maßgeblich von zwei Grundfaktoren beeinflusst wird:

- Fahrdynamik der Züge
- Charakteristik des Zugbeeinflussungssystems

Auch hieraus lässt sich ableiten, dass die optimale Blockteilung aufgrund unterschiedlicher Zugfolgefälle immer am konkreten Beispiel entwickelt werden muss. In den nachfolgenden Abschnitten wird dagegen der Einfluss der Charakteristik der ETCS-Bremskurven näher untersucht, da dieser allgemeingültig ist.

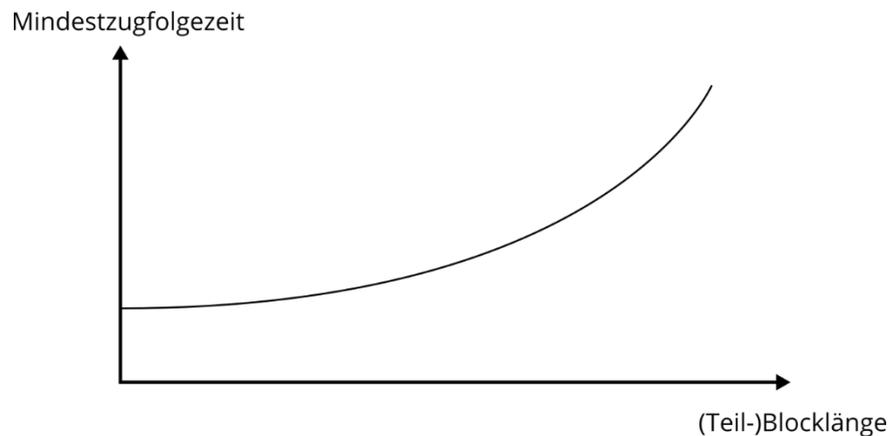
Weiterhin gelten auch Abhängigkeiten zu den folgenden Faktoren:

- Streckengeschwindigkeit
- Mindestlänge der (Teil-)Blöcke
- geforderte Mindestzugfolgezeit

Die Zusammenhänge werden nachstehend kurz erläutert.

### 5.1.1 Abhängigkeit zwischen Teilblocklänge und Mindestzugfolgezeit

Wird die Geschwindigkeit der Züge bzw. die Streckengeschwindigkeit als konstant angenommen, gilt folgender, allgemeiner Zusammenhang: Je kürzer die Teilblocklänge ist, desto geringer ist die Mindestzugfolgezeit. Diese Aussage gilt uneingeschränkt und ist in folgender Abb. 39 dargestellt.



**Abb. 39: Zusammenhang zwischen Mindestzugfolgezeit und Teilblocklänge**

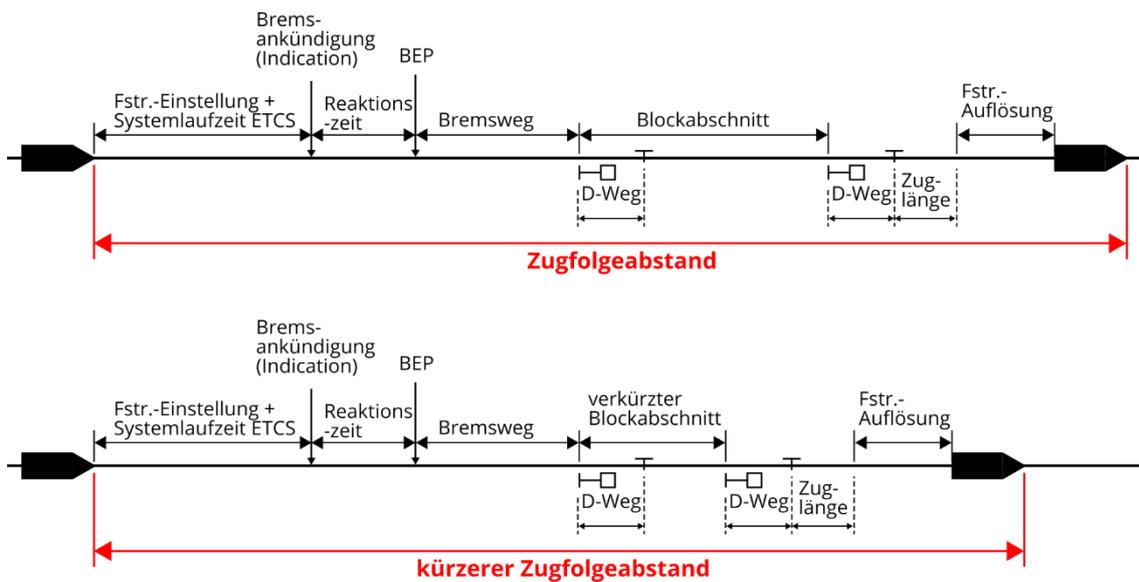
Die Grenze der Verkürzung von Blocklängen ist bei signalgeführten Zügen der Bremswegabstand. Bei anzeigegeführten Zügen können prinzipiell beliebig kleine Blocklängen beherrscht werden. Eine untere Grenze ergibt sich bei Nutzung der ortsfesten Gleisfreimeldung aus dem größtmöglichen inneren Radsatzabstand und wurde für das Netz der DB auf 30 m, in Ausnahmefällen 22 m festgelegt (vgl. [DB14])

In Abb. 39 ist erkennbar, dass bei ohnehin schon kurzen Teilblöcken eine weitere Verkürzung relativ gesehen eine geringere Auswirkung auf die MZF hat, als dies bei derselben Verkürzung von großen Blocklängen möglich wäre. Letztlich muss hier ein Kompromiss zwischen der Verbesserung der Leistungsfähigkeit durch geringere MZF und den dadurch entstehenden Kosten gefunden werden. Bei der Verwendung von ortsfesten Gleisfreimeldeeinrichtungen steigt der Ausrüstungs- und Instandhaltungsaufwand bei sehr kurzen Blocklängen enorm. Zusätzlich wird die Gleisfreimeldung auch störanfälliger, da mehr Komponenten ausfallen können.

Eine Blocklänge von 0 m in obiger Abbildung entspricht dem Fahren im wandernden Raumabstand, dem sogenannten Moving Block. Bei Vernachlässigung der längeren Übertragungszeiten für die dann erforderliche Gleisfreimeldung durch das Fahrzeug

ergibt sich beim Moving Block die geringste MZF. Eine vergleichende Untersuchung zu verschiedenen Abstandshalteverfahren bietet [BAR03].

Die Verringerung der Mindestzugfolgezeit bei Verkürzung der Blocklänge lässt sich anhand einer Grafik verdeutlichen: Abb. 40 stellt vergleichend den Zugfolgeabstand einer Referenzblockabschnittslänge dem einer verkürzten Blockabschnittslänge gegenüber. Mithilfe der Geschwindigkeit lässt sich vom Zugfolgeabstand schließlich auf die Zugfolgezeit rückschließen.

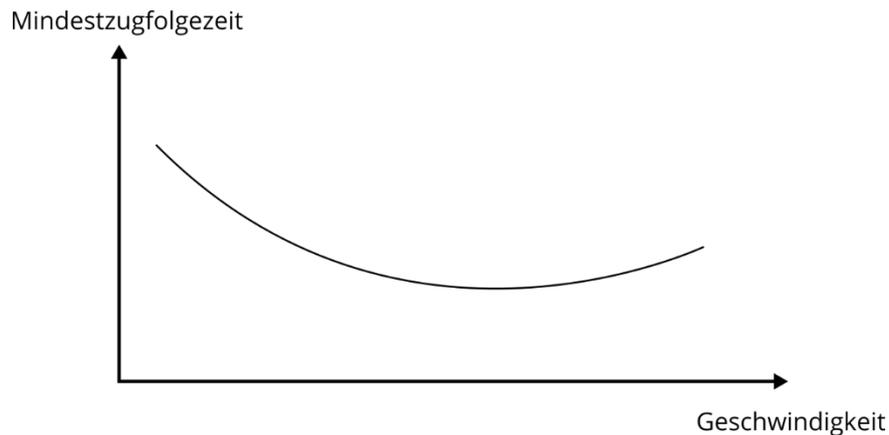


**Abb. 40: Ermittlung des Zugfolgeabstandes**

Ist die Blocklänge größer als die Länge des D-Weges, muss zum Zeitpunkt der Verlängerung der Fahrterlaubnis ein freier Blockabschnitt inkl. seines dazugehörigen D-Weges durch den vorderen Zug freigefahren sein. Wird die Teilblocklänge weiter derart verkürzt, dass sie kleiner als die Referenz-D-Weg-Länge wird, sind die in Abschnitt 5.2 beschriebenen Besonderheiten zu beachten.

### 5.1.2 Abhängigkeit zwischen Mindestzugfolgezeit und Geschwindigkeit

Bei konstanter (Teil-)Blocklänge und homogenen Zügen gilt: Es gibt eine optimale Geschwindigkeit, bei der die Mindestzugfolgezeit minimal wird. Den Zusammenhang stellt Abb. 41 dar.



**Abb. 41: Zusammenhang zwischen Mindestzugfolgezeit und Geschwindigkeit**

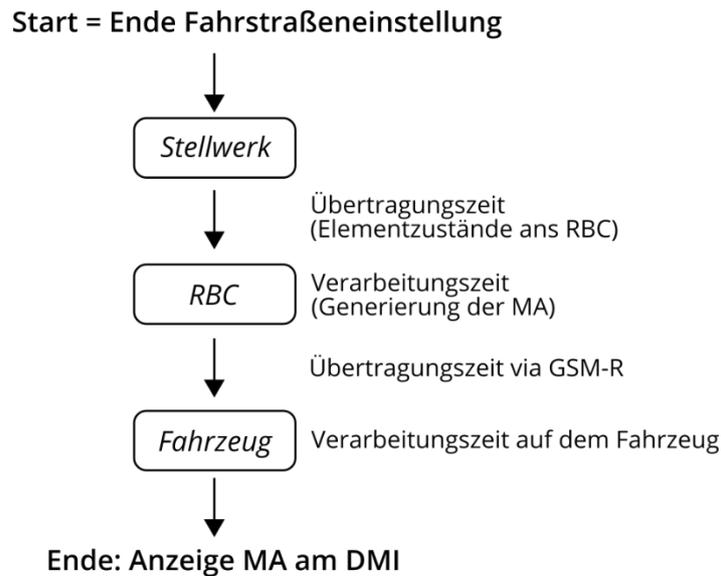
Wichtig zu erwähnen ist, dass dieser Zusammenhang nur für anzeigegeführte Züge gilt. Bei signalgeführten Zügen, die im festen Bremswegabstand verkehren, würde die Geschwindigkeit nicht größer werden können, als dass die Bremswege länger als die Blocklänge werden. Der Bremswegabstand ist von der Geschwindigkeit unabhängig, weshalb sich ihre Erhöhung bis zu ihrem Maximum direkt in kürzeren Zugfolgezeiten widerspiegelt. Bei anzeigegeführten Zügen wird der Zeitvorteil aufgrund der Geschwindigkeitserhöhung ab einer bestimmten Grenze wegen der ebenso resultierenden längeren Bremswege aufgehoben. Daher führt eine beliebige Geschwindigkeitserhöhung nicht zu einer Steigerung der Streckenleistungsfähigkeit, gleichwohl aber der Reisezeit.

### 5.1.3 Zusammenhang zwischen Mindestzugfolgezeit und Systemlaufzeiten

Weiterhin spielen bei der Ermittlung der Mindestzugfolgezeit auch mehr oder minder konstante Zeitfaktoren eine Rolle. Diese sind bereits in Abb. 40 dargestellt. Für ein und dieselbe Fahrstraße kann näherungsweise als konstant angenommen werden:

- Fahrstraßenbildezeit
- Fahrstraßenauflösezeit
- ETCS-Systemlaufzeit

Während die Fahrstraßenbilde- und -auflösezeit sowohl bei signalgeführten als auch bei anzeigegeführten Zügen zum Tragen kommt, stellt die ETCS-Systemlaufzeit für ETCS-geführte Züge eine zusätzlich zu berücksichtigende Zeitkomponente dar. Diese Zeit beinhaltet alle Prozesse, welche zwischen der (ggf. virtuellen) Signalfahrtstellung und der Anzeige der Fahrterlaubnis am DMI ablaufen müssen, wie z. B. die Generierung der Fahrterlaubnis in der ETCS-Streckenzentrale (Radio Block Center, RBC). Abb. 42 stellt die einzelnen Zeitkomponenten dar.



**Abb. 42: ETCS-Systemlaufzeiten**

Für die weitere Verwendung in den Leistungsfähigkeitsuntersuchungen kann für die ETCS-Systemlaufzeit insgesamt ein Wert von ca. 4 s angenommen werden. Dieser ergibt sich aus folgenden Einzelwerten:

	Zeit [s]	Quelle
Schnittstelle ESTW-RBC	0,5	LH ETCS [DB16a]
Verarbeitung RBC	0,5	LH ETCS [DB16a]
Übertragung GSM-R	1,5	LH ETCS [DB16a]
Verarbeitung Fahrzeug	1,5	Subset 041 [UNI15c]
<b>Summe</b>	<b>4 s</b>	

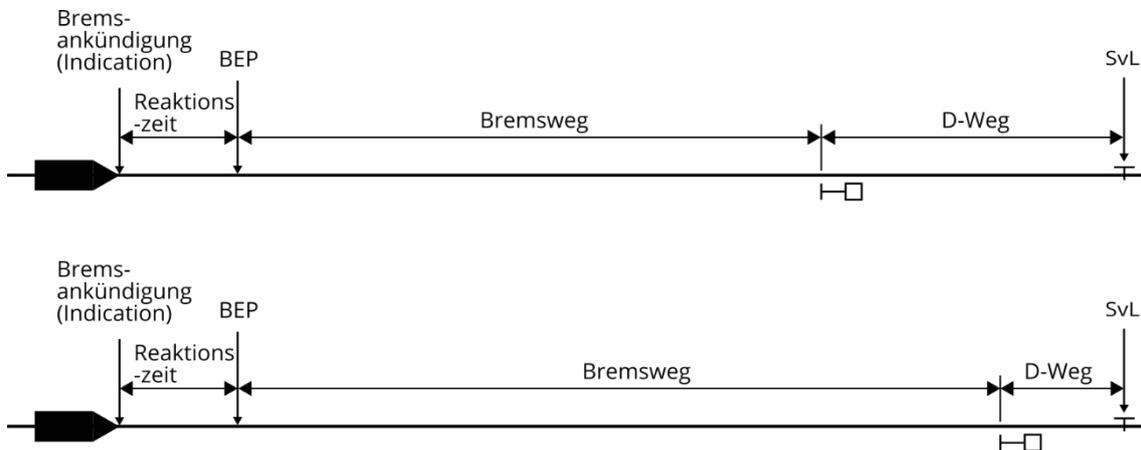
**Tab. 6: Werte für die ETCS-Systemlaufzeiten**

Gleichwohl bilden alle genannten Zeitkomponenten Potenzial hinsichtlich ihrer Verkürzung, wie [WSP18c] zeigt. Jede zeitliche Einsparung wirkt sich hier direkt auf die Erhöhung der Streckenleistungsfähigkeit aus.

## 5.2 Verkürzung von Teilblöcken auf Unter-D-Weg-Länge

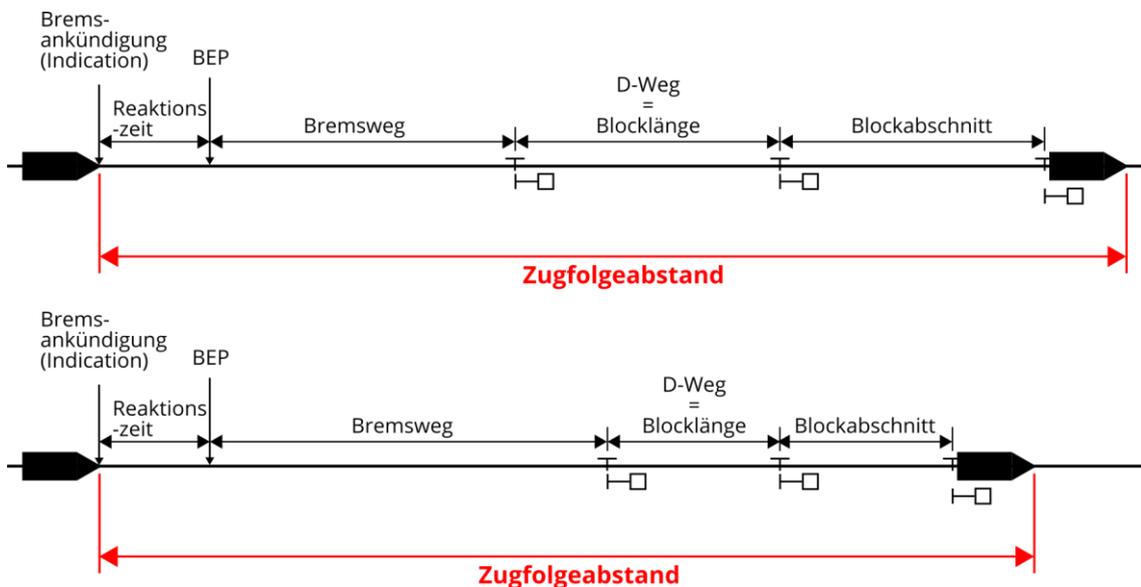
In Abschnitt 5.1.1 wurde bereits der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Teilblocklänge und MZF beschrieben. Aus Abb. 40 wird deutlich, dass in die Berechnung der MZF insbesondere der bei ETCS individuelle Bremsweg einfließt. Wie schon in Abschnitt 4.3.3.4 erläutert, hat die Länge des D-Weges einen direkten Einfluss auf den Anstieg der Bremskurven und somit die Bremsweglänge. Wird die Blocklänge nun derart verkleinert,

dass sie kürzer als die D-Weg-Länge ist, muss die Verlängerung des Bremsweges zusätzlich beachtet werden.



**Abb. 43: Auswirkung der Verkürzung des D-Weges**

Wie in Abb. 43 zu sehen ist, verändert sich die Lage des Bremseinsatzpunktes nicht, wenn der Ort der SvL unverändert bleibt. Die Auswirkung der Verkürzung der Blocklänge auf eine sogenannte Unter-D-Weg-Länge zeigt folgende Abb. 44. Für eine übersichtlichere Darstellung wurde auf die Berücksichtigung konstanter Zeitfaktoren wie die Fahrstraßenbilde- und -auflösezeit sowie die ETCS-Systemlaufzeit verzichtet (vgl. Abschnitt 5.1.3).

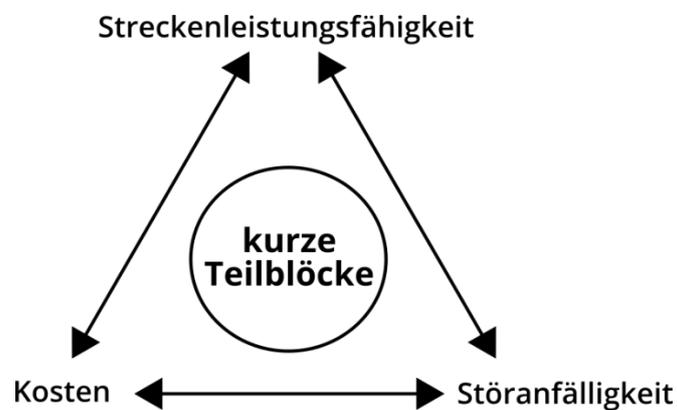


**Abb. 44: Zugfolgeabstand bei unter-D-Weg-langen Teilblöcken**

Es ist deutlich erkennbar, dass trotz verkürztem D-Weg der Zugfolgeabstand dennoch geringer geworden ist. Hinsichtlich der MZF gibt es somit keine untere Grenze der Teilblocklänge. Mit Blocklängen von 30 m, der Mindestlänge gemäß Regelwerk, würde also

die geringste MZF erreicht werden. Beachtet werden muss aber auch, dass sich, sofern der BEP an gleicher Stelle sein soll, auch der Ort der EOA weiter nach hinten verschiebt. Daraus kann abgeleitet werden, dass bei der Verwendung von unter-D-Weg-langen Teilblöcken, insbesondere bei S-Bahn-Systemen mit hohen Leistungsanforderungen, möglichst schon vor der Einfahrt in den Bahnsteig ein oder mehrere Teilblockfahrstraßen hinter dem eigentlichen Bremszielpunkt eingestellt sein sollten. Nur dann führt eine Verkürzung der Teilblocklängen auch zu einer Erhöhung der Leistungsfähigkeit. Ansonsten ist bei ungünstigen Konstellationen sogar eine Verschlechterung zu erwarten.

Bei der Dimensionierung der Teilblocklängen spielen jedoch nicht zwangsläufig nur Leistungsanforderungen eine Rolle. Die weiter zu beachtenden Einflussfaktoren und deren Abhängigkeit zueinander stellt Abb. 45 dar.



**Abb. 45: Einflussgrößen bei der Dimensionierung von Teilblocklängen**

Die tatsächliche Dimensionierung der Teilblöcke muss daher für jede Infrastruktur und deren Verhältnisse separat untersucht und abgewogen werden.

### 5.3 Anwendbarkeit der ETCS-Bremskurven auf bestehende (Teil-)Blocklängen

Nachfolgend soll die Anwendbarkeit der in Abschnitt 4.3 analysierten ETCS-Bremskurven auf bestehende (Teil-)Blocklängen erläutert werden. Zunächst wird betrachtet, wann eine Verlängerung der Fahrterlaubnis erfolgen muss. Nach Untersuchung der Verhältnisse bei ESG erfolgt anschließend die Erläuterung der Situation auf der freien Strecke bei Nutzung von ETCS L2. Schließlich wird auch auf den mit der LZB L72 CE II eingeführten und installierten Hochleistungsblock (HBL) eingegangen.

### 5.3.1 Notwendiger Zeitpunkt der Übertragung der MA-Verlängerung

In diesem Abschnitt wird für die weiteren Untersuchungen festgelegt, wann der Tf die Information über eine verlängerte Fahrterlaubnis erhalten soll, da dies hinsichtlich der Bewertung der Auswirkungen der ETCS-Bremskurven eine entscheidende Rolle spielt.

#### 5.3.1.1 ETCS signalgeführt

Bei ESG wird dem Zug eine MA übertragen, die eine Länge von ca. 32 km besitzt. Somit benötigen in dem Sinne ESG-geführte Züge keine Verlängerung der Fahrterlaubnis. Im Gegenteil wird diese bei restriktivem Signalbegriff eingeschränkt. Für ESG gilt somit wie auch für die PZB weiterhin der gewöhnliche Signalsichtpunkt des Vorsignals. Wird dieser erreicht, sollte das Vorsignal für eine behinderungsfreie Fahrt bereits „Fahrt erwarten“ zeigen und die Folgefahrstraße dementsprechend eingestellt sein. Ansonsten würde sich der Tf auf eine Bremsung einstellen oder diese bei schlecht bremsenden Zügen bereits einleiten.

Aus sicherungstechnischer Sicht müsste jedoch prinzipiell die Fahrstraßeneinstellung erst bei Erreichen des Vorsignals selbst abgeschlossen sein, da erst dort eine Restriktion durch das Zugbeeinflussungssystem erfolgen würde. Da der Tf jedoch nicht davon ausgehen kann, dass die Fahrstraße noch rechtzeitig eingestellt sein wird, wird er in den meisten Fällen entsprechend des Bremsvermögens seines Zuges bereits vor dem Vorsignal die Bremsung einleiten. Wäre bei Erreichen des Vorsignals die Fahrstraße noch nicht fertig eingestellt, müsste er u. U. sonst eine Schnellbremsung einleiten, wenn der Zug nur die für die Strecke mindestens erforderlichen Brh aufweist. Dieses Verhalten ist aus Gründen des Fahrgastkomforts sowie des Bremsverschleißes nicht akzeptabel. Somit wird weiterhin der Signalsichtpunkt als Bezugspunkt angenommen.

#### 5.3.1.2 ETCS L2

Bei ETCS L2 stellt sich die Situation ähnlich dar. In der Theorie müsste aus sicherungstechnischer Sicht für eine behinderungsfreie Fahrt die Verlängerung der MA erst vom Fahrzeug verarbeitet worden sein, kurz bevor die erste Interventionskurve überschritten wird. Es wäre demnach der Schnittpunkt der zulässigen Geschwindigkeit mit der (evtl. durch die EBI beeinflusste) SBI-Kurve, bei der in Deutschland eine Zwangsbetriebsbremsung ausgelöst wird, als Bezugspunkt anzunehmen. Da jedoch auch hier nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Verlängerung der MA tatsächlich kommt, würde der Tf derart eine Bremsung einleiten, dass er der Soll- bzw. Führungskurve folgen könnte. Bei ETCS L2 wäre dies ca. 4 s nach Erreichen der Bremsankündigungskurve der Fall.

Würde dieser Punkt jedoch bei der Auslegung der Blocklängen als Bezugspunkt angenommen werden, würde der Tf oft eine Bremsankündigung erhalten, welche innerhalb der 4 s wieder verschwindet. Sind die Teilblöcke z. B. in Teilbereichen von S-Bahn-Stammstrecken derart kurz, dass die MA alle 4 s oder weniger erneuert werden müsste, würde sich der Zug ununterbrochen in einer Bremsankündigung befinden, obwohl er nie Bremsen müsste. Um dieses unerwünschte Verhalten zu vermeiden, sollte die Infrastruktur derart ausgelegt werden, dass noch vor dem Erreichen der Bremsankündigungskurve die Verlängerung der MA verarbeitet wurde. In den weiteren Betrachtungen sollen daher der Schnittpunkt der Bremsankündigungskurve mit der zulässigen Geschwindigkeit als Bezugspunkt angenommen werden. Bei diesem muss die Folgefahrrstraße fertig eingestellt sowie die ETCS-Systemlaufzeit (vgl. Abschnitt 5.1.3) vergangen sein.

### **5.3.2 Anpassungen für ETCS signalgeführt**

In Abschnitt 4.5.1 wurde die Charakteristik zwischen PZB- und ESG-Bremskurven verglichen. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Bremskurven von ESG zwar teils restriktiver sind als die Überwachungskurven der PZB, die Beibehaltung des Sichtpunktes der PZB jedoch unkritisch ist.

Sowohl im LH für ESG [DB16b] als auch in [NEU14] wird darauf verwiesen, dass durch die ESG-Bremskurven keine betrieblichen Einschränkung bezüglich der Zufahrt auf ein Halt zeigendes Signal zu erwarten sind. Gemäß [DB16b] liegen dieser Aussage fahrdynamische Berechnungen zugrunde.

Dennoch wurden in Abschnitt 4.5.1 für einige wenige Grenzfälle kritische Situationen bezüglich der zeitigen Absenkung der ESG-Überwachungskurve ausfindig gemacht. Insgesamt betrachtet dürften jedoch die ESG-Bremskurven aus fahrdynamischer Sicht im Regelbetrieb restriktionsfrei abfahrbar sein. Eine Anpassung von Signalstandorten und daraufhin eine mögliche Verlängerung der Distanz, in welcher auf die niedrigere Geschwindigkeit abgebremst werden muss, ist zudem aufwandstechnisch nicht darstellbar und daher nicht zu verfolgen. Effektiver wäre die Anpassung des Korrekturfaktors  $Kv_{int}$  für Güterzüge im Geschwindigkeitsbereich oberhalb von 80 km/h.

Untersuchungen zu Teilblocklängen sind für ESG nicht relevant, da im festen Bremswegabstand gefahren wird.

### 5.3.3 Blockteilung der freien Strecke bei ETCS L2

Beim Vergleich der Bremsweglängen bzw. Bremskurven von PZB und ETCS L2 in Abschnitt 4.5.2 wurde festgestellt, dass die Bremsankündigungen durch ETCS bei Annahme der gleichen Zuggeschwindigkeit wie bei der PZB deutlich vor dem bisherigen Sichtpunkt des Vorsignals liegen. Da in Abschnitt 5.3.1.2 die Bremsankündigung bei ETCS jedoch als Bezugspunkt für den Erhalt der verlängerten MA definiert wurde, können Züge nicht mehr im gleichen Abstand wie unter PZB-Überwachung hintereinander herfahren. Die ETCS-Systemlaufzeit wurde hier noch nicht einberechnet.

Daraus folgt, dass bei Beibehaltung der bisherigen Blockteilung für ETCS L2 die Streckenleistungsfähigkeit abnimmt. Betrachtet werden soll als Beispiel der 120 km/h schnelle Güterzug mit 90 Brh aus Abb. E-17 des Anhangs E:

- gewöhnlicher Sichtpunkt 10 s vor dem Vorsignal: ca. 330 m vor Vorsignal
- Bremsankündigungspunkt von ETCS L2: ca. 760 m vor dem Vorsignal

Es ergibt sich eine Differenz von ca. 430 m, was bei 120 km/h etwa 13 s entspricht. Zusätzlich der 4 s für die zusätzliche ETCS-Systemlaufzeit vergrößert sich die MZF für einen Zugfolgefall zweier der genannten Züge um insgesamt 17 s.

Im Sperrzeitenmodell, welches in Abschnitt 2.3.2 eingeführt wurde, sind diese 17 s vollständig der Vorbelegungszeit des nachfolgenden Zuges zuzuordnen. Tab. 7 zeigt einen Vergleich der Sperrzeitanteile und der resultierenden Leistungsfähigkeit.

<i>500 m Güterzug (P), 90 Brh, 120 km/h, Blocklänge = Vorsignalabstand = 1000 m, D-Weg 50 m</i>	<b>PZB</b>	<b>ETCS L2</b>	<b>Differenz</b>
Vorbelegungszeit (Fstr.-Bildezeit 5 s)	45 s	62 s	+17 s/38 %
Fahrzeit im Block	30 s	30 s	± 0 s
Nachbelegungszeit (Fstr.-Auflösezeit 3 s)	19,5 s	19,5 s	± 0 s
<b>MZF gesamt</b>	<b>94,5 s</b>	<b>111,5</b>	<b>+ 17 s/18 %</b>
<b>Züge/h (theoretischer Wert)</b>	<b>38</b>	<b>32</b>	<b>- 16 %</b>

**Tab. 7: Vergleich der Sperrzeitanteile von PZB und ETCS L2**

Die Streckenleistungsfähigkeit des untersuchten Blockabschnittes würde somit um ca. 16 % abnehmen.

Diesem Effekt von ETCS L2 kann nicht allein durch eine Anpassung der Korrekturfaktoren begegnet werden. Diese sind ohnehin dem bisherigen Sicherheitsniveau der PZB bzw. LZB angepasst. Würden die Korrekturfaktoren weniger restriktiv gestaltet werden, könnte ETCS L2 nicht mehr mit dem Nachweis der gleichen Sicherheit zugelassen

werden. Zudem resultiert die frühere Bremsankündigung zu einem großen Teil auch aus der Charakteristik der Führerraumsignalisierung, da dem Tf eine gewisse Reaktionszeit eingeräumt werden muss. Des Weiteren benötigt die Bremskurvenschar durch die Anzeigeführung grundsätzlich mehr Platz, da mehr Bremskurven existieren.

Es stehen die folgenden weiteren Möglichkeiten zur Verfügung, die Streckenleistungsfähigkeit der PZB für ETCS L2-geführte Züge beizubehalten:

- Erhöhung von Mindestbrems Hundertstel
- Anpassung von Signalstandorten zur Verkürzung der Blocklängen
- Unterteilung der Blockabschnitte in Teilblöcke mit Teilblockkennzeichen

Eine Anpassung der Signalstandorte zugunsten kürzerer Blocklängen ist im Beispiel nicht möglich, da diese bereits im kürzest möglichen Bremswegabstand von 1000 m angeordnet sind. Für andere Konstellationen, in denen die Blocklänge übliche Werte von ca. 5 km (vgl. [BÄR15]) annimmt, ist diese Möglichkeit zur Beibehaltung der Streckenleistungsfähigkeit durchaus denkbar, wenn auch sehr teuer in ihrer Umsetzung.

Eine weitere Möglichkeit ist die Unterteilung der Blockabschnitte in zwei oder mehr Teilblöcke. Auch so kann durch die damit erreichte Verkürzung der Blocklänge für ETCS-geführte Züge der in Abschnitt 5.1.1 beschriebene Zusammenhang zur Verringerung der MZF umgesetzt werden. Für das Fahren im Teilblockmodus sind jedoch Anpassungen im Stellwerk notwendig, was auch mit nicht zu unterschätzenden Kosten verbunden ist. Das Aufstellen der Blockkennzeichen (Bk) beeinflusst PZB-überwachte Züge nicht.

An dieser Stelle muss auch erwähnt werden, dass bei der Betrachtung der Leistungsfähigkeit über einen größeren Untersuchungsraum, z. B. einen Überholungsabschnitt, die Blockteilung in Bereichen mit konstanter Geschwindigkeit meist nicht maßgebend für die Leistungsfähigkeit des Überholungsabschnittes sein muss. Vielmehr stellen Bereiche mit bremsenden und beschleunigenden Zügen die Restriktion dar. Daher sollte die Blocklänge in Ein- und Ausfahrbereichen sowie Ein- und Ausfädelungsstellen verringert werden. Eine Verkürzung unter den Bremswegabstand hinaus ist nur für anzeigegeführte Züge möglich. Hierfür wurde der sogenannte Hochleistungsblock (HBL) entwickelt.

### 5.3.4 Hochleistungsblock für ETCS L2

Mit der LZB wurde auch das Projekt CIR-ELKE gestartet, mit dem die Leistungsfähigkeit des Kernnetzes durch technische Neuerungen sowie besseres Marketing um bis zu 40 % gesteigert werden sollte (vgl. [DEB92]). Ein Bestandteil war der sogenannte Hochleistungsblock. Dessen Planungsgrundsätze sind in [DEU93] festgehalten. Zusätzlich gibt es

stellwerksseitige Anforderungen aus [DB12a] und [DB17a]. Mit dem HBL kann insbesondere die Blockteilung vor und hinter Betriebsstellen, die sich restriktiv auf die Zugfolgezeit auswirken, stark verkürzt werden. Die untere technische Grenze bei der LZB sind 37 m-Blöcke; bei ETCS beträgt die Mindestteilblocklänge 100 m (vgl. [DB16a]).

Das Prinzip des LZB-HBL gilt prinzipiell für alle anzeigegeführten Züge, unabhängig vom konkreten Zugbeeinflussungssystem. Es gilt daher zu untersuchen, ob die Teilblocklängen der LZB unter der Maßgabe der gleichen Leistungsfähigkeit unter ETCS L2 beibehalten werden können.

#### **5.3.4.1 Hochleistungseinfahrt**

Als Hochleistungseinfahrt wird die Teilblockverwendung im Bereich vor Bahnhöfen bezeichnet, um die MZF der bremsenden Züge zu verringern. Die Bk-Standorte sind für häufig auftretende Zugfolgefälle optimiert, unterliegen jedoch auch Restriktionen wie z. B. Schaltabschnittsgrenzen (vgl. [DEU93]).

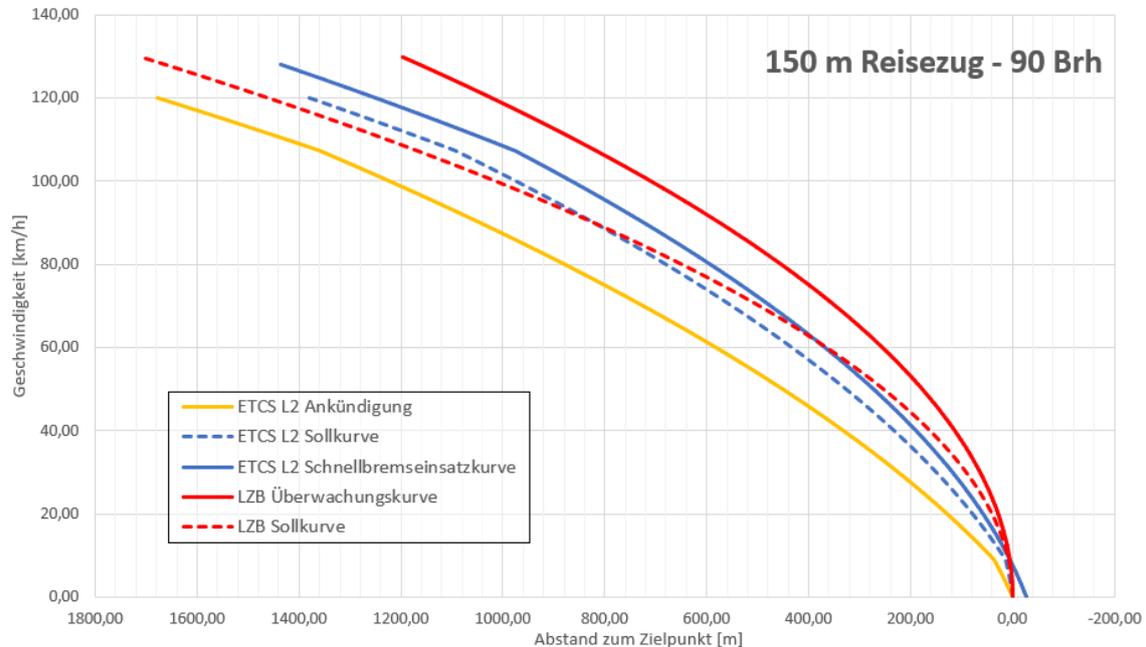
Mit der Umrüstung auf ETCS L2 ergibt sich die Fragestellung, inwieweit diese Teilblocklängen aufgrund der ETCS-Bremskurvencharakteristik weiterhin unverändert weiterverwendet werden können. Betrachtet man das Ergebnis aus Abschnitt 4.5.2, in dem die resultierenden Bremskurven von ETCS mit denen der LZB verglichen wurden, kann diese Frage relativ leicht beantwortet werden.

Fast alle untersuchten Zugkonstellationen zeigten, dass die LZB-Bremskurven leicht restriktiver als die von ETCS L2 sind. Insbesondere der Bremsankündigungspunkt liegt bei der LZB aufgrund des starren Wertes von 1000 m weit vor der Bremsankündigung von ETCS. Daher können die LZB-Teilblocklängen prinzipiell beibehalten werden. Mit ETCS L2 wird ggf. sogar eine leicht höhere Streckenleistungsfähigkeit erreicht. Sollen jedoch LZB-Blöcke, die kürzer als 100 m sind, übernommen werden, wäre zunächst eine Regelwerksanpassung für ETCS erforderlich.

#### **5.3.4.2 Hochleistungsausfahrt**

Die im vorherigen Abschnitt getroffenen Aussagen müssen für die Hochleistungsausfahrt leicht eingeschränkt werden. Dies liegt in dem in Abschnitt 4.3.3.3 erläuterten Zusammenhang mit der Zugbeschleunigung begründet. Im Ausfahrbereich von Bahnhöfen und den direkt daran anschließenden Streckenteilen beschleunigen die Züge auf die zulässige Geschwindigkeit. Diese Beschleunigung des Zuges berücksichtigt ETCS in der Bremskurvenberechnung. So wird der Abstand zwischen der Schnellbremsablauf- und der Schnellbremseinsatzkurve größer, da während der Bremsaufbauzeit die möglicherweise noch anhaltende Zugbeschleunigung berücksichtigt wird. Daraus resultieren

Bremskurven, die flacher sein können als die der LZB. Abb. 46 zeigt die Bremskurven desselben Zuges aus Abb. E-10, nur mit dem Unterschied, dass eine Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$  einbezogen wurde.



**Abb. 46: Vergleich zwischen LZB- und ETCS L2-Bremskurven bei Beschleunigung**

Es zeigt sich, dass im konkreten Beispiel die Schnellbremseinsatzkurve von ETCS deutlich unterhalb der LZB-Überwachungskurve liegt. Die Sollkurve ist im unteren Geschwindigkeitsbereich, in dem beschleunigt wird, ebenfalls restriktiver. Der Bremsankündigungspunkt der LZB liegt dennoch vor dem von ETCS.

Die LZB-Blocklängen der Hochleistungsausfahrt können somit im Regelfall ebenso für ETCS L2 weiterverwendet werden. Dies sollte bei der konkreten Um- bzw. Doppelausrüstung anhand der tatsächlich verkehrenden Züge und ihrer Eigenschaften jedoch verifiziert werden.

## 5.4 Exkurs: Nutzung kurzer Teilblöcke auf S-Bahn-Stammstrecken

Interessant ist auch die Untersuchung, wie stark die Verkürzung von Teilblöcken auf Unter-D-Weg-Länge tatsächlich zu einer Leistungssteigerung beiträgt und wie die konkrete Blockteilung aussieht. Dies soll am Beispiel einer S-Bahn-Stammstrecke untersucht werden. Grundsätzlich ist zwischen einer Blockteilung für das Nachrücken aus dem Stillstand und einer freien Zielbremsung zum Halteplatz zu unterscheiden.

### 5.4.1 Nachrücken aus dem Stillstand

Ein Nachrücken aus dem Stillstand ist z. B. dann erforderlich, wenn der vorausfahrende Zug Verspätung hat oder es zu einer Haltezeitüberschreitung kommt. Für diesen Fall wurde untersucht, ob eine Verkürzung der Teilblocklänge auf bis zu 22 m eine Verringerung der Bahnsteigwechselzeit der Züge zur Folge hat. Diese beschreibt die Zeit von der Abfahrt des vorausfahrenden Zuges bis zum Halt des nachfolgenden Zuges. Es wurde sowohl die Blocklänge in Schritten von 22 – 30 – 50 m als auch die Beschleunigung des nachrückenden Zuges variiert. Zudem wurde ein worst case definiert, bei welchem die Verlängerung der Fahrterlaubnis am Bremsankündigungspunkt vorliegen muss, ein best case, bei welchem die Verlängerung erst an der Sollkurve vorliegen muss und als letztes ein Zug, der das Gamma-Modell verwendet und zusätzlich ein Traction Cut Off Interface besitzt.

Die Berechnungsergebnisse sind dem elektronischen Anhang F zu entnehmen.

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Je geringer die Teilblocklänge, desto geringer die Mindestzugfolgezeit. Dieser Zusammenhang konnte uneingeschränkt bestätigt werden.
- Wird die Beschleunigung des nachrückenden Zuges bis zu einer gewissen Grenze verringert, verringert sich ebenso die Zugfolgezeit. Für einen Zugfolgefall existiert somit eine optimale „Nachrückbeschleunigung“.
- Bei einer für das Nachrücken optimierten Blockteilung befinden sich die kürzesten Teilblöcke jeweils im hinteren Bereich des Bahnsteigs sowie im Ausfahrbereich.
- Mit der Nutzung des automatischen Fahrens (best case bzw. Gamma-Zug) kann die Leistungsfähigkeit nochmals gesteigert werden.

### 5.4.2 Zielbremsung zum Halteplatz

Ähnliche Untersuchungen wurden für eine zielbremsende S-Bahn durchgeführt. Hierbei wurden jedoch nur Lambda-Züge betrachtet und davon ausgegangen, dass die Verlängerung der Fahrterlaubnis immer am Bremsankündigungspunkt da sein muss. Laufzeiten wurden nicht beachtet, da diese keinen Einfluss auf die Blockteilung haben.

Die Berechnungsergebnisse sind ebenfalls im elektronischen Anhang F zu finden.

Die kürzesten Zugfolgezeiten wurden auch hier für 22/30 m-Blöcke erreicht. Die konkrete Blockteilung ist im Anhang aufgeführt.

## 5.5 Potenzielle Regelwerksanpassungen

Die Untersuchungen zeigen, dass insbesondere in hochbelasteten Nahverkehrsnetzen die Einführung sehr kurzer Blockabschnitte zu einer Verbesserung der Leistungsfähigkeit führt. Aktuell ist die Mindestblocklänge bei ETCS auf 100 m begrenzt. Dies muss angepasst werden. Ein geeigneter Wert für die untere Grenze stellen 30 m dar. Diese Restriktion ergibt sich aus Forderungen der Gleisfreimeldung.

Das Regelwerk zur Bemessung von Strecken, in denen auch die Blockoptimierung beschrieben wird, muss nicht angepasst werden, da es nur allgemeingültige Aussagen enthält und auf die EBWU verweist.

Gleichwohl sollte es in Zukunft möglich sein können, Blockkennzeichen auch in Weichenbereichen und innerhalb konventioneller D-Wege aufzustellen. Dies ist aktuell aus Forderungen von [DB17a] nicht zulässig. Mit Wegfall der Restriktionen kann insbesondere die Blockteilung der Hochleistungsein- und -ausfahrt weiter optimiert werden. Die Einschränkung, welche sich auf die Lage zu Schaltabschnittsgrenzen bezieht, muss jedoch weiter bestehen bleiben. Um auch hier zu Verbesserungen zu kommen, laufen bereits wissenschaftliche Untersuchungen.

Schließlich sollten im LH auch Laufzeitanforderungen an verschiedene Komponenten gestellt werden. In der Laufzeitoptimierung steckt noch erhebliches Potenzial. Eine Verbesserung wirkt sich direkt auf eine höhere Leistungsfähigkeit aus.

## 5.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde untersucht, inwieweit die Charakteristik der ETCS-Bremskurven auf bisher vorhandene Blockteilungen angewendet werden kann. Es lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Die derzeitigen Blocklängen können für ESG beibehalten werden.
- Aufgrund der flacheren Bremskurven von ETCS L2 gegenüber der PZB ist bei Übernahme der bisherigen Blocklängen mit einer Verringerung der Leistungsfähigkeit zu rechnen. Um dies zu vermeiden, müssen Blöcke verkürzt oder unterteilt werden.
- Die Teilblocklängen der LZB für die Hochleistungseinfahrt können unter ETCS L2 unverändert übernommen werden.
- Die Teilblocklängen der LZB für die Hochleistungsausfahrt müssen aufgrund der in ETCS einberechneten Zugbeschleunigung genauer untersucht werden. Es

zeichnet sich aber ab, dass diese auch weiterverwendet werden können, ohne betriebliche Einschränkungen hinnehmen zu müssen.

Bezüglich der Untersuchung hochbelasteter S-Bahn-Stammstrecken wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Sehr kurze Teilblöcke im Bahnsteigbereich und darüber hinaus sind sinnvoll, um eine minimale Zugfolgezeit zu erreichen. Die kürzesten Blöcke befinden sich je nach den getroffenen Annahmen und Zugcharakteristiken im zweiten Drittel des Bahnsteiges und dahinter. Am Anfang wird nur ein kurzer Blockabschnitt zum „Anrücken“ benötigt.
- Die endgültige, optimale Blockteilung ergibt sich aus der Überlagerung der Blockteilung für das Nachrücken aus dem Stillstand und der für eine freie Zielbremsung.

## 6 Dimensionierung der Einschaltstrecken von Bahnübergängen mit ETCS

In diesem Kapitel erfolgt die Analyse, inwieweit die ETCS-Bremskurven mit ihrer in Abschnitt 4.3 erläuterten Charakteristik auf die nach aktuellem Regelwerk dimensionierten Einschaltstrecken von Bahnübergängen anwendbar sind. Für jede bei der DB verwendete Überwachungsart wird zunächst der Ist-Stand der ETCS-Planungsvorgaben erläutert und dahingehend ausgewertet, ob mit den ETCS-Bremskurven betriebliche Einschränkungen provoziert werden. Bei den Überwachungsarten, bei denen dies der Fall ist, werden anschließend Lösungsmöglichkeiten erarbeitet, um die Auswirkungen zu minimieren sowie Hinweise auf mögliche neue Dimensionierungsregeln für die Einschaltstrecken gegeben.

Die grundsätzliche Beschreibung der in Deutschland zum Einsatz kommenden Überwachungsarten kann Abschnitt 2.4 entnommen werden. Die grundlegenden Regelwerke, welche für die folgenden Betrachtungen herangezogen wurden, sind in Abschnitt 1.6 aufgeführt. Eine vertiefte Erläuterung der deutschen Planungsvorgaben für die Einbindung von BÜ unter ETCS liefert [KIR15].

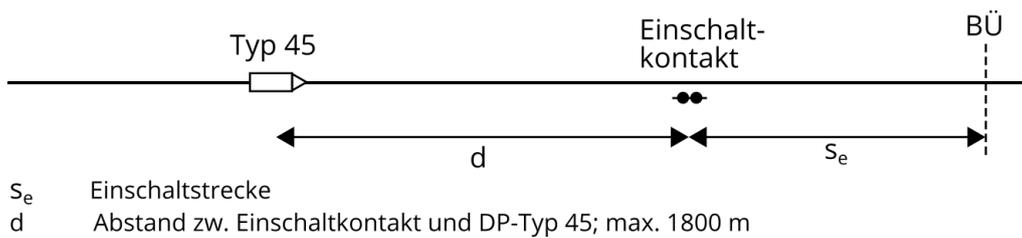
### 6.1 Überwachungsart FÜ

Gemäß dem ETCS-LH [DB16a] sowie der Ril 819.1344 [DB17b] und 819.1348 [DB17e] ist eine ETCS-Planung für die Überwachungsart FÜ nur für ETCS L2 notwendig. Bei ESG besteht keine Abhängigkeit zu FÜ-BÜ.

#### 6.1.1 Aktuelle Planungsvorgaben für ETCS L2

Bei BÜ der Überwachungsart FÜ besitzt ETCS keine Überwachungsfunktion. Im Störfall gelten dieselben Verfahren wie im konventionellen Betrieb mit PZB-Überwachung (vgl. Abschnitt 2.4.1). Da bei ETCS L2 jedoch mit Führerraumsignalisierung gefahren wird und streckenseitige Signale im Regelbetrieb nicht mehr beachtet werden müssen, ist es erforderlich, die Funktion der Merktafel für den Beginn der Einschaltstrecke (Signal BÜ 3) in der Führerraumanzeige umzusetzen. Hierfür wird ein Datenpunkt (DP) geplant, der auf dem DMI die Textmeldung „Einschaltstrecke“ anzeigen lässt (vgl. [DB16a]).

Die Planungsvorgaben stellt Abb. 47 dar.



**Abb. 47: ETCS L2-Planung für BÜ der Überwachungsart FÜ**

Mit dem ungesteuerten DP-Typ 45, der das Paket 72 enthält, wird die Textmitteilung mit dem Hinweis auf die Einschaltstrecke an das Fahrzeug übertragen.

### 6.1.2 Auswirkung der ETCS-Bremskurven

Es wird deutlich, dass bei der Dimensionierung der Einschaltstrecke sowie der ETCS-Ausrüstung von FÜ-BÜ die ETCS-Bremskurvencharakteristik nicht beachtet werden muss. Die Fehleroffenbarung sowie die Absicherung des BÜ im Störfall ist vollkommen unabhängig von ETCS, weshalb in keinem Fall eine Bremsung überwacht wird. Da die Bremskurven somit keine Rolle spielen, ergeben sich keine Anforderungen von ETCS an die Einschaltstrecken. FÜ-BÜ müssen daher hier nicht weiter betrachtet werden.

## 6.2 Überwachungsart ÜS

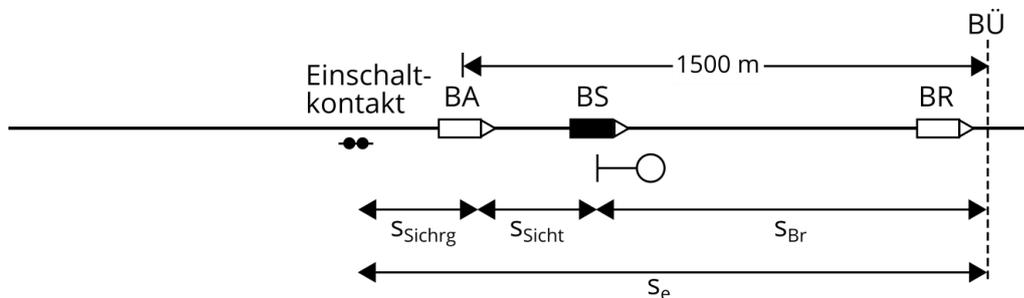
Bei BÜ der Überwachungsart ÜS ist laut LH und Planungsvorschriften eine ETCS-Planung sowohl für ESG als auch ETCS L2 erforderlich, welche sich deutlich voneinander unterscheiden. Da auch die Bremskurvencharakteristik von ESG und ETCS L2 unterschiedlich ist, erfolgt eine separate Betrachtung. In beiden Fällen muss ETCS die Bremsung des Zuges bei einem gestörten BÜ überwachen.

### 6.2.1 Betrachtungen zu ESG

Bei ESG fahren die Züge signalgeführt. Daher nimmt der Tf die Information über den Sicherungszustand des BÜ der Überwachungsart ÜS weiterhin über das ÜS auf. ESG ist – ähnlich wie die 1000 Hz-Beeinflussung der PZB am ÜS – für die Überwachung der Bremsung bei gestörtem BÜ verantwortlich.

### 6.2.1.1 Aktuelle Planungsvorgaben

Entsprechend den Vorgaben aus dem LH ETCS signalgeführt sowie der Ril 819.1348 ergibt sich für ÜS-BÜ folgende ETCS-Ausrüstung:



- $S_{Sichrg}$  zurückgelegter Weg während der BÜ-Sicherung
- $S_{Sicht}$  zurückgelegter Weg während der Sichtzeit
- $S_{Br}$  Bremswegabstand der Strecke
- $S_e$  Einschaltstrecke
- BA DP zur Ankündigung einer TSR
- BS DP zur Rücknahme der TSR, falls BÜ gesichert
- BR DP zur Rücknahme der TSR

**Abb. 48: ESG-Planung für BÜ der Überwachungsart ÜS**

Entsprechend der Darstellung in Abb. 48 werden bei der ESG-Ausrüstung für die Umsetzung der Überwachungsfunktion drei DP geplant. 1500 m vor dem BÜ wird dem Zug bei jeder Fahrt – unabhängig vom Sicherungszustand des BÜ – eine temporäre Langsamfahrstelle (Temporary Speed Restriction, TSR) übertragen. Diese aktiviert auf dem Zug eine Überwachung mithilfe der Bremskurven, sodass ab in einer Entfernung von 1550 m hinter dem BA-DP nur noch eine Geschwindigkeit von 25 km/h erlaubt ist.

Im Regelfall, wenn der BÜ gesichert ist und das ÜS „BÜ 1“ zeigt, erfolgt am schaltbaren BS-DP die Rücknahme der TSR. Der Zug kann dann seine Fahrt mit der entsprechenden Geschwindigkeit fortsetzen. Bei einer BÜ-Störung wird durch den DP lediglich ein Leer-Telegramm übermittelt. Somit bleibt die TSR bestehen und ESG überwacht im Hintergrund die Verminderung der Geschwindigkeit auf 25 km/h. Mit dem BR-DP erfolgt in diesem Fall die Rücknahme der TSR.

Entsprechend den Vorschriften ist bei einem ungesicherten BÜ davor anzuhalten und nach dessen Sicherung mit Schrittgeschwindigkeit bis zur Mitte des BÜ zu fahren. Der Halt sowie die Schrittgeschwindigkeit von 5 km/h wird nicht durch ESG überwacht. Dies war aber auch bisher mit PZB nicht der Fall.

### 6.2.1.2 Auswirkung der ESG-Bremskurven

Zunächst soll vom Störfall ausgegangen werden, in dem der BÜ nicht gesichert ist. Die Übertragung der TSR zur Geschwindigkeitsverminderung auf 25 km/h erfolgt derart rechtzeitig, dass die Züge noch nicht mit Bremsen angefangen haben müssen. Auch bei ESG erhalten Züge Fahrplangeschwindigkeiten, mit denen sie innerhalb des Bremswegabstandes der Strecke zum Stehen kommen können. Die Untersuchungen in Abschnitt 4.5.1 ergaben, dass durch die ESG-Bremskurven keine nennenswerten betrieblichen Einschränkungen zu erwarten und die Kurven restriktionsfrei abfahrbar sind. Dies gilt hier weiterhin. Da sogar nur eine Bremsung auf 25 km/h und nicht bis zum Stillstand durchgeführt werden muss, verschiebt sich die ESG-Bremskurve sogar noch weiter in Richtung Bremszielpunkt. Eine zu frühe Beeinflussung ist daher ausgeschlossen.

Anders kann sich die Situation im Regelfall darstellen. Da auch bei gesichertem BÜ zunächst die restriktive TSR übertragen wird, welche erst am Standort des ÜS zurückgenommen wird, darf die ESG-Bremskurve nicht schon vor der TSR-Rücknahme absinken. Aufgrund der Tatsache, dass der Tf nach Außensignalisierung fährt und durch die Aufnahme des Signals BÜ 1 seine Geschwindigkeit nicht vermindert, würde andernfalls ETCS zwangsläufig eine Bremsung einleiten.

Abb. 49 stellt die Bremskurve von ESG für die Überwachung der Bremsung zur Einhaltung der TSR dar.

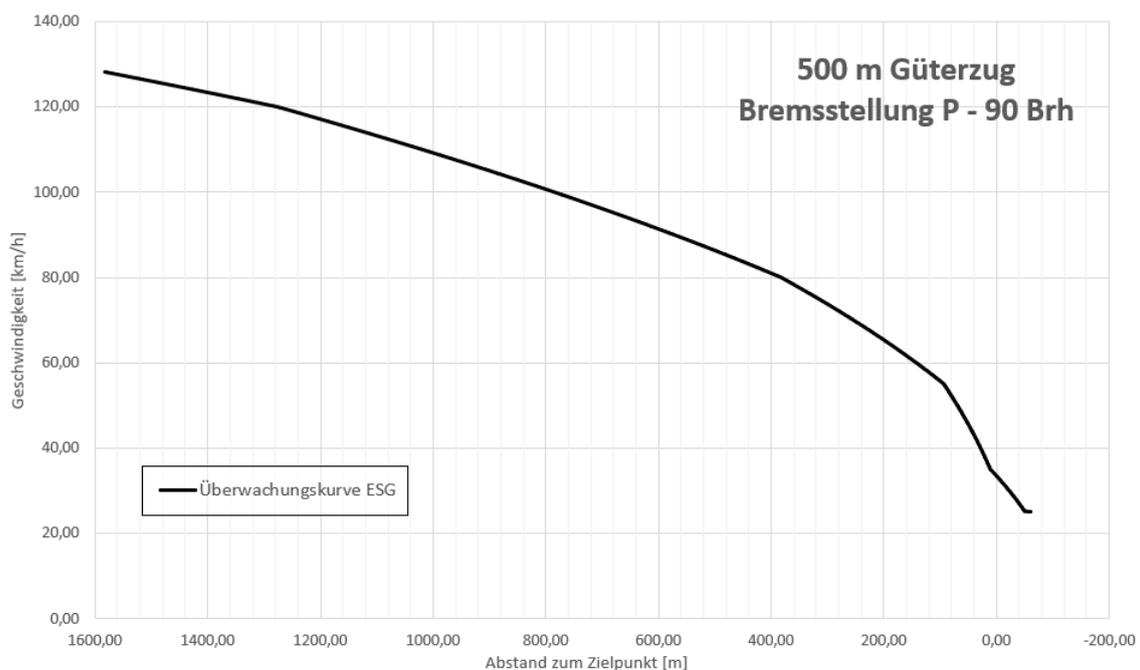


Abb. 49: ESG-Bremskurve bei Überwachung der BÜ-TSR

Entsprechend den Untersuchungen aus Abschnitt 4.5.1 stellt der hier verwendete Zug einen der kritischsten Fälle dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Überwachungskurve bereits weit vor der Rücknahme der TSR bei 1000 m vor dem BÜ bereits absenkt, obwohl dieser gesichert ist und das ÜS BÜ 1 zeigt. Der Zug würde in diesem Fall etwa 300 m vor dem ÜS in eine ungewollte und unnötige Zwangsbetriebsbremsung geführt werden, was nicht akzeptabel ist. Trotz, dass der betrachtete Zug einen kritischen Fall darstellt, tritt der einschränkende Effekt auch bei anderen Zügen mit besserem Bremsvermögen bzw. geringerer Geschwindigkeit auf.

### 6.2.1.3 Lösungsmöglichkeiten

Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie die ungewollte Einleitung der Bremsung durch ESG vermieden werden kann. Dazu zählt insbesondere:

- Verringerung der Geschwindigkeit
- Erhöhung der erforderlichen Mindestbremswert
- Anpassung der streckenseitigen ETCS-Ausrüstung

Eine Verringerung der Geschwindigkeit der schlecht bremsenden Züge käme einer Verringerung der Streckenleistungsfähigkeit sowie höherer Reise- und Beförderungszeiten gleich. Dies ist ebenso unerwünscht und wird daher nicht weiterverfolgt.

Eine Erhöhung der Mindestbremswert wäre prinzipiell möglich. Hierfür müssten jedoch für ESG eigene Streckenbremswert herausgegeben werden, was die betrieblichen Regelungen komplexer machen würde. Zudem entspricht die Erhöhung der Mindestbremswert indirekt einer Geschwindigkeitsverringerung, da der gleiche Zug seine vorhandenen Brh nicht ohne Weiteres steigern kann.

Als mögliche Lösung bleibt daher nur die Anpassung der ETCS-Streckenausrüstung. Wie bereits festgestellt wurde, darf die Bremskurve erst nach der Vorbeifahrt am ÜS abfallen. Dies kann nur dadurch erreicht werden, indem die TSR frühestens am Ort des ÜS übertragen wird<sup>4</sup>. Somit würde der bisherige BA-DP zur Ankündigung der TSR entfallen. Der DP am ÜS überträgt dann bei BÜ 0 eine TSR mit Beginn am BÜ (bzw. zur Berücksichtigung der Ortungsungenauigkeit kurz dahinter) und der Überwachungsgeschwindigkeit von 25 km/h. Bei BÜ 1 wird ein Leertelegramm gesendet. Das Vorgehen wäre somit genau andersherum, als dies die bisherige Planung vorsieht.

---

<sup>4</sup> Anmerkung: Da das ÜS zwischen 950 m und 1500 m vor dem BÜ stehen kann, müsste im DP immer ein spezifischer Wert für den Beginn der TSR projiziert werden, was dem Wunsch nach standardisierten DP widerspricht. Daher wäre eine feste Verlegung im geringst möglichen Abstand von 950 m vor dem BÜ zweckmäßiger als am Ort des ÜS.

Die Übertragung der TSR erst am ÜS ist unkritisch. Zwar erfolgt dort bei schlecht bremsenden Zügen ein Sprung der Überwachungsgeschwindigkeit auf einen Wert, der deutlich kleiner als die zulässige Zuggeschwindigkeit ist – in obigem Beispiel von 120 km/h auf ca. 110 km/h. Jedoch leitet der Tf im Regelfall ohnehin bereits vor dem ÜS eine Betriebsbremsung ein, mit der die sprunghafte Geschwindigkeitsrestriktion unterschritten werden würde. Auch, wenn der Tf nicht bremst, entsteht kein Sicherheitsrisiko. Aufgrund der aus der Streckenbremstafel abgeleiteten zulässigen Geschwindigkeit muss dieser in jedem Fall im Bremswegabstand der Strecke zum Stehen kommen können. Durch ESG würden schlecht bremsende Züge am ÜS in eine Schnellbremsung geleitet werden, mit der sie vor dem BÜ zum Stehen kommen.

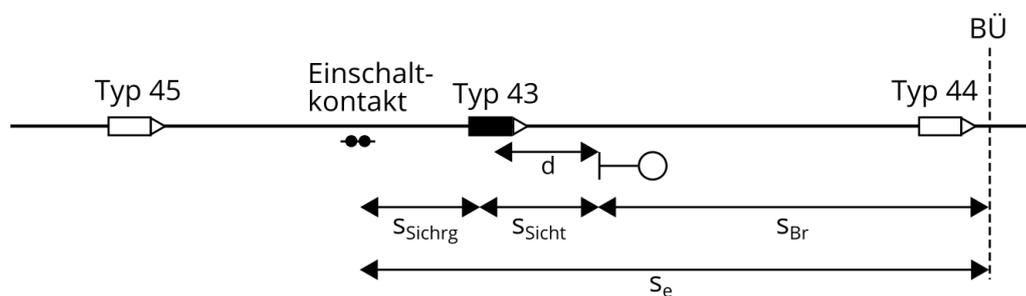
Diese geänderte Ausrüstungsforderung muss in das Regelwerk, genauer in die Ril 819.1348 einfließen, wenn betriebliche Einschränkungen vor BÜ bei ESG-Zügen vermieden werden sollen. Als positiver Nebeneffekt kann sogar ein DP eingespart werden. Die Einschaltstrecke des BÜ muss nicht angepasst werden.

## 6.2.2 Betrachtungen zu ETCS L2

Bei ETCS L2 wird die komplette Außensignalisierung, inklusive des ÜS, in der Führer- raumanzeige dargestellt. Auch unter ETCS L2 muss zusätzlich zur Anzeige des Siche- rungszustandes des BÜ die Überwachung der Bremsung bei gestörtem BÜ erfolgen.

### 6.2.2.1 Aktuelle Planungsvorgaben

Abb. 50 stellt die aktuellen Planungsvorgaben gemäß der Ril 819.1344 dar.



- $S_{Sichrg}$  zurückgelegter Weg während der BÜ-Sicherung
- $S_{Sicht}$  zurückgelegter Weg während der Sichtzeit
- $S_{Br}$  Bremswegabstand der Strecke
- $S_e$  Einschaltstrecke
- $d$  Abstand zwischen ÜS und DP-Typ 43

**Abb. 50: ETCS L2-Planung für BÜ der Überwachungsart ÜS**

Mit dem DP-Typ 45 wird eine Textmeldung auf dem DMI angezeigt, dass sich der Zug in der Einschaltstrecke befindet. Der DP kann derart projektiert werden, dass die Meldung am Ort des Einschaltkontaktes erscheint. Somit wird die Rautentafel, d. h. das Signal BÜ 2, in der Führerraumanzeige umgesetzt.

Für die Anzeige des Signalbildes des ÜS existiert der DP-Typ 43, der das Bahnübergangspaket 88 enthält. Mit diesem schaltbaren DP kann somit der Sicherungszustand des BÜ übertragen werden. Zusätzlich enthält das Paket 88 Informationen darüber, ob im Fall einer BÜ-Störung der Zug vor dem BÜ halten muss sowie mit welcher Geschwindigkeit der BÜ dann befahren werden darf. ETCS-Züge in der Rückfallebene (z. B. Betriebsart Staff Responsible) können jedoch das Paket 88 nicht auswerten. Für diese Züge wird zusätzlich eine TSR mit der geforderten Überwachungsgeschwindigkeit am BÜ übermittelt.

Der Abstand zwischen dem DP-Typ 43 und dem ÜS ist wie folgt definiert: er muss mindestens 1 m vor dem ÜS liegen und muss so weit hinter dem Einschaltkontakt angeordnet sein, dass für den schnellsten Zug der BÜ vollständig gesichert werden kann und der DP-Typ 43 die Änderung des Signalbegriffs bis zur Befahrung durch den Zug sicher verarbeitet hat. Der DP soll sich im Sichtabstand vor dem ÜS befinden (vgl. [DB17b]).

Mit dem DP-Typ 44 wird der Ortungsfehler des Zuges vor dem BÜ zurückgesetzt.

Im Regelfall, wenn der BÜ ordnungsgemäß gesichert ist, erfolgt keine Aktivierung der Bremskurvenüberwachung auf dem Fahrzeug. Der Zug fährt weiterhin mit seiner gültigen MA, deren EOA am nächsten Halt zeigenden Signal ist.

Im Falle einer BÜ-Störung wird mit dem schaltbaren DP-Typ 43 dem Fahrzeug mitgeteilt, dass der BÜ ungesichert ist. Auf dem Fahrzeug wird eine Überwachung ausgelöst, mit welcher der Zug bis zur BÜ-Kante zum Stillstand gebremst werden würde, falls der Tf nicht rechtzeitig die Geschwindigkeit ermäßigt. Die Schnellbremsablaufkurve hat ihren Fußpunkt somit an der BÜ-Kante, welche das temporäre EOA darstellt. Der Halt wird durch ETCS überwacht. Anschließend erfolgt die Überwachung der Weiterfahrt bis zur BÜ-Mitte mit 5 km/h. Es gilt dann wieder das EOA aus der ursprünglich gültigen MA.

Der Standort des DP-Typs 43 setzt voraus, dass die Züge innerhalb des Bremswegabstandes – bzw. genauer innerhalb des Abstandes zwischen dem DP 43 und dem BÜ – zum Stehen kommen können. Die individuellen Bremswege ETCS-geführter Züge können jedoch deutlich größer sein als dieser Bremswegabstand, da keine Restriktion der Geschwindigkeit durch verfügbare Brh erfolgt und durch die kontinuierliche Führung auch längere Bremswege beherrscht werden. Somit muss sichergestellt werden, dass ETCS-Züge vor dem BÜ höchstens mit einer Geschwindigkeit fahren dürfen, mit der sie

im Abstand zwischen DP und BÜ anhalten können. Das RBC überträgt hierfür das Paket 52 „PBD“ (Permitted Braking Distance) zusammen mit der MA.

### 6.2.2.2 Auswirkung der ETCS-Bremskurven

Der Abstand des ÜS zum BÜ und damit zwangsläufig auch der des DP-Typ 43 ergibt sich bisher aus dem Bremswegabstand der Strecke. Der DP-Typ 43 soll dabei im Sichtabstand vor dem ÜS verlegt werden. Somit entspricht die Situation eines ÜS-BÜ bei ETCS L2 in etwa den bereits untersuchten Verhältnissen bei Blocklängen (vgl. Abschnitt 5.3.3). Der Sichtpunkt des ÜS entspricht dabei dem Sichtpunkt des Vorsignals. Beide Signale befinden sich im Bremswegabstand vor dem Bremszielpunkt.

Wie in Abschnitt 4.5.3 festgestellt wurde, befindet sich die Bremsankündigung bei ETCS L2 deutlich vor dem Sichtpunkt des ÜS, an welchem sich der DP-Typ 43 befinden soll. Laut Regelwerk kann der DP auch sogar nur 1 m vor dem ÜS angeordnet werden. Da der Zug aufgrund der übertragenen PBD nur so schnell fahren darf, dass er mit einer Schnellbremsung am DP 43 bis zum BÜ zum Stehen kommen kann, die Übermittlung des BÜ-Sicherungsstatus jedoch auch erst mit diesem DP erfolgt, ergeben sich zwangsläufig zusätzliche Restriktionen durch ETCS.

Die Einschränkungen aufgrund der längeren ETCS-Bremswege lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Züge mit geringem Bremsvermögen müssen vor dem DP-Typ 43 derart abbremesen, dass sie innerhalb des Abstands zum BÜ anhalten können. Aus dieser mit der PBD erzwungenen Geschwindigkeitsverminderung ergeben sich ungewünschte betriebliche Einschränkungen, z. B. die Verlängerung der Reise- bzw. Beförderungszeit sowie die Verminderung der Streckenleistungsfähigkeit. Nicht zu vernachlässigen ist auch der Energiemehrbedarf zur Wiederbeschleunigung schwerer Güterzüge auf die zulässige Geschwindigkeit nach Entfall der BÜ-Restriktion sowie der zusätzliche Bremsverschleiß.
- Da die Information über eine notwendige Bremsung erst am DP-Typ 43 übertragen wird, dort aber bereits die Schnellbremseinsatzkurve von ETCS zu sinken beginnt, hat der Tf keine Möglichkeit mehr, den Bremsengriff durch ETCS zu verhindern. Im Falle einer BÜ-Störung würde daher immer eine Zwangsbremmung des Zuges erfolgen. Da ETCS jedoch lediglich ein Zugbeeinflussungssystem ist, besteht weiterhin die Forderung, dass der Tf zu jeder Zeit in der Lage sein muss, anhand der ihm zur Verfügung stehenden Informationen den Zug selbstständig und ohne zwangsweise Systemeingriffe führen zu können.

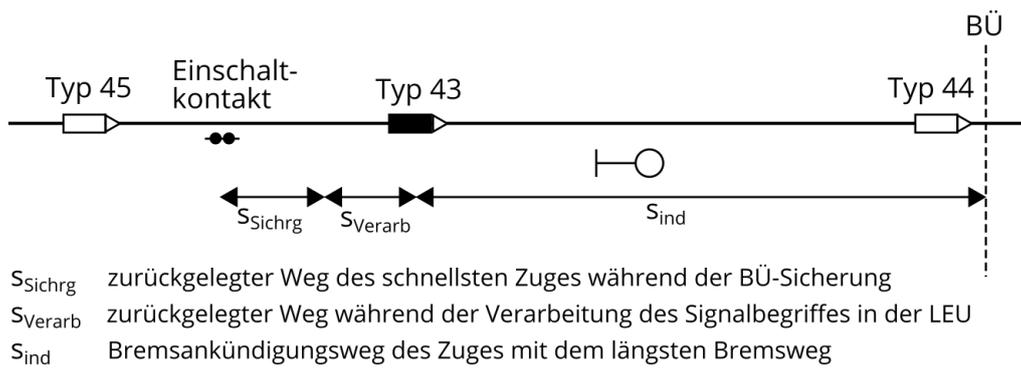
### 6.2.2.3 Lösungsmöglichkeiten

Sollen die mit der PBD erzwungenen Geschwindigkeitsverminderungen vermieden werden, muss der zulässige Bremsweg für ETCS-Züge vor BÜ erhöht werden. Dies ist nur möglich, wenn die Information über den Sicherungszustand des BÜ früher als bisher übertragen wird. Somit müsste der DP-Typ 43 entgegen der Fahrtrichtung verschoben werden. Dies hat in der Folge auch Einfluss auf die Lage des Einschaltkontaktes, da der Abstand zwischen Einschaltkontakt und DP-Typ 43 für den schnellsten Zug mindestens dem Weg während der BÜ-Sicherungszeit inklusive der Verarbeitung des Signalbegriffs am ÜS entsprechen muss.

Wird also der DP verschoben, muss auch die Einschaltstrecke verlängert werden. Dies wiederum führt zu längeren Sperrzeiten des BÜ für den Straßenverkehr. Gemäß der Ril 815.0033 darf die Sperrzeit bei der Sicherungsart mit Halbschranken jedoch 240 s nicht überschreiten; ansonsten wird ein Vollabschluss nötig. Dies ist jedoch unter allen Umständen zu verhindern, da dann auch die Freimeldung des Gefahrenraumes notwendig wird, was letztlich mit zusätzlichen Kosten und ggf. einer Mehrbelastung des zuständigen Fahrdienstleiters verbunden ist.

Soll außerdem verhindert werden, dass die Züge bei einer BÜ-Störung am DP eine nicht zu verhindernde Zwangsbremmung erhalten, muss die Projektierung der PBD verändert werden. Der Beginn der Absenkung der Schnellbremseinsatzkurve darf nicht direkt für den DP-Standort selbst projektiert werden, sondern erst in einem solchen Abstand, dass der Tf des in dieser Situation schnellsten Zuges ausreichend Reaktionszeit besitzt, den Zug selbstständig ohne Eingriff von ETCS zum Halt zu führen. Diese Projektierung führt aber auch dazu, dass die bereits oben beschriebene Geschwindigkeitsrestriktion noch stärker sein würde, da der zur Verfügung stehende Bremsweg noch geringer wird. Dem kann nur entgegengewirkt werden, indem der DP-Typ 43 (und somit auch der Einschaltkontakt) weiter entgegen der Fahrtrichtung verschoben wird und in dessen Folge die BÜ-Sperrzeit weiter zunimmt.

Nachstehende Abb. 51 zeigt die notwendige Anordnung des DP-Typs 43, sodass alle beschriebenen Restriktionen entfallen würden.



**Abb. 51: Notwendige DP-Anordnung für ÜS-BÜ unter ETCS L2**

Durch die dargestellte Anordnung wird erreicht, dass auch der Zug mit dem längsten Bremsweg einerseits seine Geschwindigkeit vor dem BÜ nicht verringern muss und andererseits der Tf im Fall einer Aktivierung der Bremskurvenüberwachung bei einer BÜ-Störung noch 4 s Reaktionszeit hat, ehe er die Bremsung einleiten muss. Da auch die Bremsaufbauzeit berücksichtigt ist, erfolgt keine Beeinflussung der Bremsung durch ETCS L2. Leitet der Tf dennoch keine Bremsung ein, wird bei Überschreiten der Schnellbremseinsatzkurve eine Zwangsbetriebsbremsung ausgelöst, mit der der Zug noch vor dem BÜ zum Stehen kommt.

Bei dieser Anordnung muss beachtet werden, dass die Sperrzeit des BÜ für den Straßenverkehr wesentlich länger wird. Daher wird in folgendem Beispiel die Einhaltung der 240 s-Grenze untersucht. Der worst case kann wie folgt angenommen werden:

- schnellster Zug: 160 km/h (größtmögliche Geschwindigkeit bei BÜ)
- langsamster Zug: 80 km/h (ergibt sich aus [VDV14])
- Zug mit längstem Bremsweg: 740 m Güterzug in Bremsstellung G mit 60 Brh und einer Geschwindigkeit von 120 km/h

Der Indikationsweg des angenommenen Zuges mit dem längsten Bremsweg beträgt ca. 2700 m. Die verwendeten Eingangsparameter sind Tab. B-10 aus Anhang B zu entnehmen.

Die Verarbeitungszeit der Lineside Electronic Unit (LEU), die den Signalbegriff des ÜS abgreift und den DP-Typ 43 steuert, wurde mit 2,5 s angenommen, was ein eher konservativer Wert ist (vgl. [SCH18]). Die BÜ-Sicherungszeit ergibt sich zu 15 s, bestehend aus 5 s Gelbzeit und 10 s Nachlaufzeit (vgl. Ril 815.0033 [DB09a])

Der Einschaltkontakt muss also für den schnellsten Zug 17,5 s vor dem DP-Typ 43 liegen, was einer Entfernung von 778 m entspricht. Die Einschaltstrecke des BÜ summiert sich somit auf insgesamt 3478 m. Der langsamste Zug benötigt für diese Strecke eine Zeit

von ca. 157 s. Dieser Wert liegt deutlich unter dem Grenzwert von 240 s. Die in Abb. 51 gewählte Anordnung ist daher zulässig.

Im Berechnungsbeispiel wurde bisher keine Streckenneigung berücksichtigt. Unter der Annahme eines Gefälles von 25 ‰ würde sich der Indikationsweg des Güterzuges auf 3960 m verlängern. Selbst dann wäre die Annäherungszeit des langsamsten Zuges über die Einschaltstrecke von nunmehr 4738 m mit 214 s noch innerhalb des Grenzwertes, in dem kein Vollabschluss benötigt wird. Diesen Überlegungen sind jedoch Grenzen gesetzt, da innerhalb dieser langen Einschaltstrecke zumeist ein Hauptsignal vorhanden sein wird. In diesem Fall ist die Planung der Überwachungsart ÜS ohnehin unzulässig; es wird stattdessen die Überwachungsart Hp verwendet. Die Auswirkungen der Bremskurven bei Hp-BÜ sind in Abschnitt 6.3 erläutert.

Kritisch wird die Annäherungsfahrzeit lediglich in Konstellationen, bei denen sich in der Einschaltstrecke ein planmäßiger Halt befindet. Außerdem müssen BÜ-BÜ-Ketten gesondert betrachtet werden. Diese sollen bei Neu- und Umrüstungen jedoch nicht mehr geplant werden und können daher an dieser Stelle vernachlässigt werden (vgl. [SUI18]).

Sollte sich ein Halt in der Einschaltstrecke befinden und der Grenzwert von 240 s überschritten werden, muss der Einschaltkontakt wieder soweit in Richtung BÜ verschoben werden, dass die Sperrzeit wieder unterhalb der 240 s liegt. Züge mit sehr schlechtem Bremsvermögen und entsprechend hoher Geschwindigkeit werden dann wieder mithilfe der PBD zur Einhaltung des Bremsweges gezwungen. Die Situation verbessert sich dennoch deutlich gegenüber den heutigen Dimensionierungsregeln.

Grundlage der Überlegungen ist also zusammenfassend, dass der Standort des DP-Typs 43 nicht mehr vom Bremswegabstand der Strecke ausgehend ermittelt wird, sondern anhand der individuellen Bremsankündigungsdistancen der auf der Strecke tatsächlich verkehrenden Züge. Bezüglich der Dimensionierung der Einschaltstrecke ist es somit zwingend erforderlich, einen Hinweis auf die Berücksichtigung der Bremsweglängen von ETCS-geführten Zügen in die Planungsrichtlinie aufzunehmen. Derzeit wird ETCS hier mit keinem Wort erwähnt.

Hinterfragt werden muss auch, ob als langsamste Regelzüge unter ETCS L2-Führung überhaupt noch Züge mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h angenommen werden müssen, da durch ETCS die Geschwindigkeit fast aller Güterzüge auf 120 km/h oder bei lauffechnischen Einschränkungen zumindest auf 100 km/h angehoben werden könnte (vgl. [BRA91]). Diese Geschwindigkeitserhöhung würde die Sperrzeit des BÜ verkürzen.

### **6.2.3 Hinweise zur Überwachungsart $\ddot{U}_{OE}$**

Eine deutliche Verbesserung hinsichtlich der BÜ-Sperrzeiten für den Straßenverkehr kann mit  $\ddot{U}_{OE}$ -Anlagen erreicht werden. Hier ist die Einschaltstrecke komplett unabhängig von der Geschwindigkeitsüberwachung durch ETCS. Somit könnte der DP-Typ 43 entsprechend den oben genannten Anforderungen „beliebig“ weit entgegen der Fahrtrichtung verschoben werden, sodass auch der Zug mit den schlechtesten Bremseigenschaften keine Geschwindigkeitseinbußen oder Zwangsbremungen hinnehmen muss.

Die Verwendung von  $\ddot{U}_{OE}$  unter ETCS wurde jedoch noch nicht sicherheitlich betrachtet und ist daher aktuell nicht zulässig (vgl. [SUI18]). Hinsichtlich einer Verbesserung der Zustände sowohl für ETCS-Züge als auch für den Straßenverkehr sollte die Zulassung für  $\ddot{U}_{OE}$ -Anlagen für die Verwendung mit ETCS jedoch mit hoher Priorität vorangetrieben werden.

## **6.3 Überwachungsart Hp**

Bei der Überwachungsart Hp ist nach den Planungsvorschriften keine gesonderte ETCS-Ausrüstung vorzusehen. Da der BÜ in die Sicherungslogik der Fahrstraße eingebunden ist, kann nur eine MA an den Zug gesendet und somit die Fahrt über den BÜ zugelassen werden, wenn dieser gesichert ist. Dennoch können sich aus der Bremskurvencharakteristik von ETCS Restriktionen ergeben.

### **6.3.1 Auswirkung der ESG-Bremskurven**

Für ESG-Züge sind keine Auswirkungen zu erwarten. Dies lässt sich damit begründen, dass wie bereits in Abschnitt 5.3.2 untersucht wurde, der Sichtpunkt identisch mit dem der PZB-Züge ist. Da in beiden Fällen für eine behinderungsfreie Fahrt am Sichtpunkt des Vorsignals die Fahrstraßeneinstellung abgeschlossen sein muss, kann auch der Anstoß zur Fahrstraßeneinstellung und BÜ-Sicherung zur gleichen Zeit erfolgen.

### **6.3.2 Auswirkung der ETCS L2-Bremskurven**

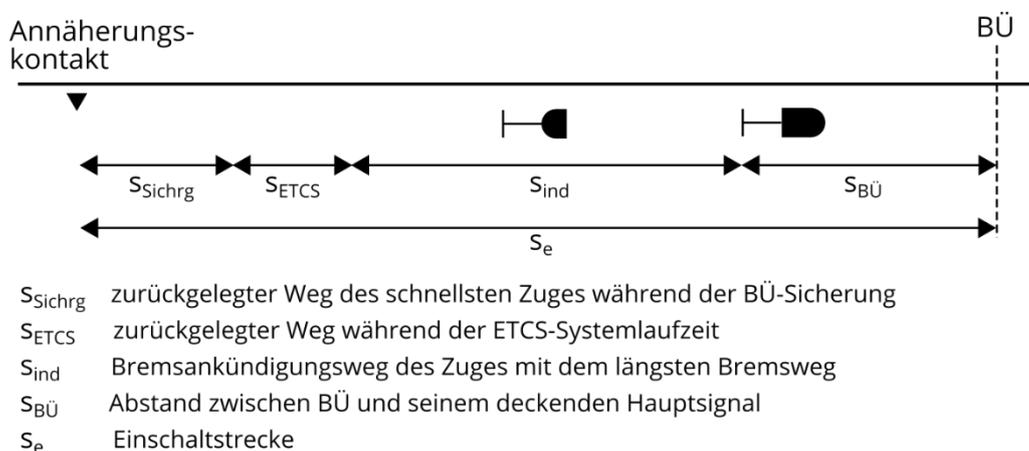
Anders verhält es sich bei ETCS L2-Zügen. Wie schon mehrfach erwähnt, liegt der Bremsankündigungspunkt, an dem die MA-Verlängerung verarbeitet sein muss, in vielen Fällen weit vor dem Sichtpunkt des Vorsignals für PZB-Züge. Dies wird durch eine mögliche Geschwindigkeitserhöhung bei Güterzügen verstärkt.

Bleibt der Annäherungskontakt, mit dessen Befahrung nach der Fahrstraßeneinstellung auch die zweite Bedingung zum Anstoß der BÜ-Sicherung vorliegt (vgl. Abschnitt 2.4.4), am selben Standort, bedeutet dies für ETCS L2-geführte Züge, dass die Verlängerung der Fahrerlaubnis über den BÜ hinaus noch nicht am Bremsankündigungspunkt vorliegt. Folglich müssen die ETCS-Züge bereits eine Bremsung einleiten. Dies führt zu betrieblichen Einschränkungen, einer verminderten Streckenleistungsfähigkeit, Energiemehrbedarf zur Wiederbeschleunigung sowie erhöhtem Bremsverschleiß. Es gilt daher, die Auswirkungen der ETCS-Bremskurven durch neue Dimensionierungsregeln zu vermeiden.

### 6.3.3 Lösungsmöglichkeiten

Bezüglich der Verhinderung der betrieblichen Einschränkungen ist es erforderlich, dass die BÜ-Schließung früher angestoßen wird, damit die MA-Verlängerung zeitgerecht vor dem Erreichen des Bremsankündigungspunktes vom Fahrzeug verarbeitet wurde. Somit darf die Lage des Annäherungskontaktes nicht wie bisher aus dem statischen Sichtpunkt des Vorsignals abgeleitet werden (vgl. Abb. 10), sondern muss ähnlich wie bei der Betrachtung der Überwachungsart ÜS vom individuellen Bremsvermögen der Züge abhängig gewählt werden.

Abb. 52 stellt das vorgeschlagene Anordnungsprinzip dar.



**Abb. 52: Anordnung des Annäherungskontaktes bei Hp-BÜ für ETCS L2**

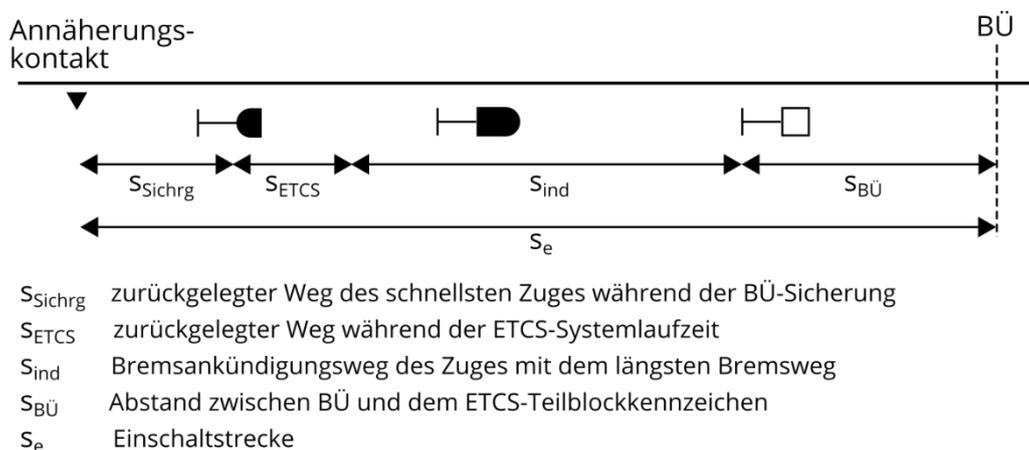
Die Ermittlung des Standortes des Annäherungskontaktes erfolgt nach demselben Prinzip wie bei ÜS-BÜ mithilfe des Indikationsweges für den auf der Strecke verkehrenden Zug mit dem längsten Bremsweg. Es ergeben sich jedoch drei wesentliche Unterschiede:

- Berücksichtigung des zusätzlichen Abstandes zwischen BÜ und deckendem Hauptsignal
- Berücksichtigung der zusätzlichen Zeitkomponente für die Übertragung der MA

- Abschluss der BÜ-Sicherung nicht bereits bei Rotlicht sondern erst bei Geschlossenmeldung der Schranken; anschließend zusätzliche Zeit für Signalstellzeit zu beachten

Der Sicherheitsabstand kann gemäß [DB09a] mit mindestens 50 m angenommen werden. Für die ETCS-Systemlaufzeit gilt der Wert aus Tab. 6 von 4 s. Für die Sicherungszeit soll ein Zeitmehrbedarf von 10 s angenommen werden. Für das Berechnungsbeispiel aus Abschnitt 6.2.2.3 ergibt sich dann insgesamt eine Verlängerung der Annäherungszeit vom Einschaltkontakt zum BÜ um ca. 14 s. Die Verarbeitungszeit der LEU wurde wieder abgezogen, da sie nicht mehr existiert bzw. durch die ETCS-Systemlaufzeit ersetzt wurde. Der Gesamtwert für die BÜ-Sperrzeit liegt dann bei ca. 228 s und damit unter der 240 s-Grenze.

Wird der Abstand zwischen Hauptsignal und BÜ jedoch zu groß, wird deutlich, dass der Grenzwert nicht mehr eingehalten werden kann. Für diesen Fall wäre es zweckmäßig, im kleinstmöglichen Sicherheitsabstand vor dem BÜ (50 m) ein ETCS-Teilblockkennzeichen aufzustellen. Somit kann unabhängig vom bestehenden Hauptsignalstandort der Bremsankündigungspunkt von ETCS so nah wie möglich an den BÜ verschoben werden. Die Sperrzeit des BÜ für eine behinderungsfreie Fahrt des Zuges kann so verringert werden. Abb. 53 stellt die Anordnung dar.



**Abb. 53: Anordnung eines zusätzlichen Bk vor Hp-BÜ für ETCS L2**

Zudem wird dringend empfohlen, eine Überwachungsart  $HP_{OE}$  einzuführen. Durch die Überwachung der Einschaltbereitschaft kann die BÜ-Schließung vom Zeitpunkt der Fahrstraßeneinstellung entkoppelt werden. Dann würde keine Abhängigkeit mehr zwischen ETCS und der Einschaltstrecke bestehen und die Sperrzeit des BÜ könnte auf ein Optimum reduziert werden.

In Europa existieren derweil bereits Anwendungen, bei denen die BÜ zeitoptimal direkt durch ETCS unter Zuhilfenahme eines Traffic Management Systems angesteuert werden

(vgl. [KIR15]). Dänemark ist hier ein prominentes Beispiel. Auch diese Möglichkeit zur Verringerung der Sperrzeit sollte untersucht werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung der Sperrzeit bei Hp-BÜ ist in nachfolgendem Abschnitt beschrieben.

### 6.3.4 Zusammenhang zur Zuglenkung

Mithilfe der Nutzung der Zuglenkung kann die Sperrzeit von Hp-BÜ weiter verringert werden. Dies beruht auf folgendem Grundprinzip: Für die BÜ-Schließung sind zwei Kriterien erforderlich; die eingestellte Fahrstraße sowie eine Anrückmeldung. Der Anrückmelder wird für den schnellsten Zug ausgelegt. Langsamere Züge befahren diesen Anrückmelder zeitlich gesehen früher, als ein Anstoß der BÜ-Sicherung erforderlich wäre. Durch die dann folgende lange Annäherungszeit ergibt sich eine lange Sperrzeit.

Für langsame Züge kann daher mit der Zuglenkung die Fahrstraßeneinstellung als zweites Kriterium zeitlich geschickt gewählt werden. So wird der Anrückmelder zwar schon befahren, der BÜ schließt sich jedoch noch nicht, da noch keine Fahrstraßeneinstellung vorliegt. Diese erfolgt zeitgerecht für den konkreten Zug anhand der im Lenkplan hinterlegten Geschwindigkeitsklasse.

## 6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde die Auswirkung der Bremskurven auf die Einschaltstrecken von Bahnübergängen untersucht. Tab. 8 fasst die Ergebnisse zusammen.

<i>Überwachungsart</i>	<b>Auswirkung der ETCS-Bremskurven</b>	
	<b>ESG</b>	<b>ETCS L2</b>
<b>Fü</b>	keine	keine
<b>ÜS</b>	teils nicht verhinderbare Zwangsbremssungen	unerwünschte Geschwindigkeitsreduzierung sowie Zwangsbremssung bei BÜ-Störung
<b>ÜS<sub>OE</sub></b>	bisher bei ETCS nicht vorgesehen	
<b>HP</b>	keine	nicht rechtzeitige Verlängerung der MA

**Tab. 8: Auswirkung der ETCS-Bremskurven auf BÜ-Einschaltstrecken**

Als Lösungsmöglichkeiten wurden Hinweise zur Anpassung der Regelwerke gegeben. So sollte das Überwachungsprinzip für ÜS-BÜ unter ESG verändert und die TSR frühestens

am ÜS selbst übertragen werden. So können Einschränkungen vermieden werden. Eine Rückkopplung auf die Einschaltstrecke hat dies nicht.

Für ETCS L2 wurde allerdings festgestellt, dass sowohl bei ÜS-BÜ als auch bei Hp-BÜ die Verlängerung der Einschaltstrecke notwendig wird. Dies resultiert aus der Forderung, die Information über den BÜ-Sicherungsstatus aufgrund der längeren Bremswege früher zu übertragen. In einem Berechnungsbeispiel konnte nachgewiesen werden, dass auch bei kritischen Kombinationen aus Zuggeschwindigkeit, Bremsvermögen und Streckenneigung die Obergrenze für die Sperrzeit eines BÜ mit Halbschranken eingehalten wird. Hinweise zur notwendigen Beachtung der ETCS-Bremsweglängen müssen in die Planungsrichtlinien für Bahnübergänge aufgenommen werden.

In allen anderen Fällen ist die Verwendung von Überwachungsarten mit optimierter Einschaltung zu favorisieren. Bis auf FÜ-Anlagen sind jedoch bisher keine weiteren Überwachungsarten mit Überwachung der Einschaltbereitschaft für ETCS zugelassen. Hier besteht dringender Handlungsbedarf, um eine Verbesserung sowohl für die ETCS-Leistungsfähigkeit als auch für die Straßenverkehrsteilnehmer zu erreichen.

Eine Verkürzung der Sperrzeiten von Hp-BÜ kann auch mit dem Aufstellen zusätzlicher Blockkennzeichen direkt vor dem BÜ erreicht werden. Hierdurch wird der Bremsankündigungspunkt, an dem die verlängerte MA benötigt wird, in Richtung BÜ verschoben. Weitere Potenziale sind in der Nutzung der Zuglenkung sowie der zeitoptimierten Ansteuerung aus ETCS heraus zu sehen.

## 7 Anpassungsbedarf der konventionellen Zuglenkung auf ETCS-Strecken

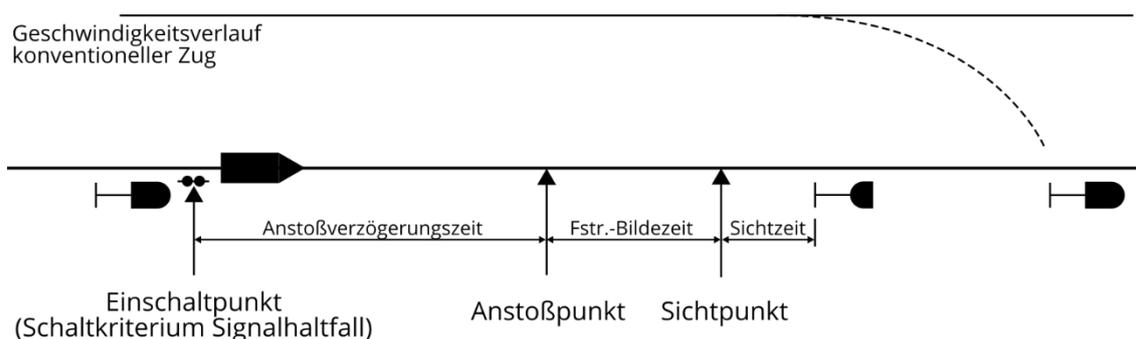
In diesem Kapitel erfolgt die Betrachtung der Einschaltstrecken der konventionellen Zuglenkung. Zunächst werden die Abläufe für die Verlängerung der Fahrterlaubnis bei einem konventionellen Zug und einem ETCS-geführten Zug miteinander verglichen. Daraus wird abgeleitet, unter welchen Bedingungen das Verfahren unter ETCS L2 aufgrund der längeren Bremswege zu betrieblichen Einschränkungen führt. Schließlich werden Anforderungen an Lösungen zur Vermeidung dieser Konflikte vorgeschlagen. Dieses Kapitel bezieht sich ausschließlich auf ETCS L2. Für ESG sind keine Einschränkungen zu erwarten.

### 7.1 Abläufe zur Verlängerung der Fahrterlaubnis

Nachfolgend werden kurz die Abläufe der Verlängerung der Fahrterlaubnis für konventionelle Züge sowie für ETCS-geführte Züge erläutert. Das grundsätzliche Funktionsprinzip der konventionellen ZL ist in Abschnitt 2.5 beschrieben.

#### 7.1.1 Konventioneller Zug

Abb. 54 stellt die wesentlichen Zeitkomponenten sowie den Geschwindigkeitsverlauf eines Zuges bei Nutzung der konventionellen ZL dar.



**Abb. 54:** Zuglenkung bei konventioneller Zugfahrt

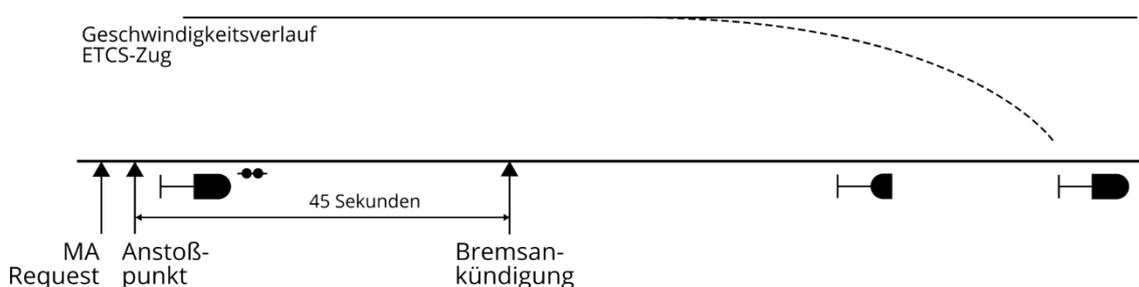
Nach Befahrung des Einschaltpunktes beginnt die für die Geschwindigkeitsklasse des Zuges projektierte Anstoßverzögerungszeit abzulaufen. Ist diese Zeit vorbei, wird durch die ZL der Fahrstraßeneinstellanstoß an das Stellwerk ausgegeben, woraufhin die Fahrstraße einläuft. Nach Ablauf der Fahrstraßenbildezeit befindet sich der Zug am Sichtpunkt des Vorsignals. Die Sichtzeit wird bei der ZL mit 15 s angenommen (vgl. [DB10]). Die Fahrstraßenbildezeit hängt von der Anzahl der in der Fahrstraße enthaltenen

Weichen ab. Zusätzlich wird die Schließzeit von BÜ berücksichtigt, sollten diese in die Fahrstraßenabhängigkeit mit eingebunden sein.

Die Höhe der Anstoßverzögerungszeit ist dabei für jede Geschwindigkeitsklasse anders. Für verschiedene Züge können dadurch unterschiedliche Einschaltpunkte resultieren, bei der die Anstoßverzögerungszeit beginnt. Als Einschaltkriterium der ZL wird bisher nur der Signalhaltfall ausgewertet. In Ausnahmefällen wird auch auf Informationen der Gleisfreimeldung zurückgegriffen (vgl. [DB07]).

### 7.1.2 ETCS-Zug

Der Ablauf für einen ETCS L2-Zug unterscheidet sich maßgeblich von dem eines konventionellen Zuges. Statt statisch aus dem Sichtpunkt wird der Anstoßpunkt dynamisch anhand der Zuggeschwindigkeit und dem Bremsvermögen berechnet (vgl. [DB07]).



**Abb. 55: Zuglenkung bei ETCS L2-Führung**

Das ETCS-Fahrzeug sendet in einem zeitlichen Abstand von  $T_{MAR}$  eine Anfrage für eine Verlängerung der Fahrterlaubnis an das RBC. Der Wert für  $T_{MAR}$  wird bei der DB pauschal derart projektiert, dass das RBC ca. 45 s, bevor der Zug die Bremsankündigungs-kurve erreicht, einen Selbststellbetriebsanstoß (SB-Anstoß) an das Stellwerk sendet (vgl. [DB16a]). Ist das zugehörige Signal als ZL-Signal projektiert, wird der SB-Anstoß an die ZL weitergeleitet. Diese ermittelt zunächst die Zugnummer, von welcher der Anstoß erfolgte. Anschließend wird direkt der Stellauftrag für die im Lenkplan für den Zug hinterlegte Fahrstraße ans Stellwerk ausgegeben (vgl. [DB10]). Als Rückfallebene existiert weiterhin auch das Verfahren der konventionellen ZL. Der Anstoß, der zuerst bei der ZL eingeht, wird ausgewertet, der nachfolgende verworfen (vgl. [DB07]).

### 7.1.3 Vergleich

Der Anstoßpunkt wird für beide Systeme unterschiedlich ermittelt. Während bei der konventionellen ZL der Anstoßpunkt für jede Geschwindigkeitsklasse statisch ermittelt wird, erfolgt dies bei ETCS dynamisch unter Berücksichtigung seines Bremsvermögens.

Aus den Erläuterungen aus Abschnitt 4.5.3 lässt sich schlussfolgern, dass die Bremsankündigung bei ETCS vor dem für PZB-Züge relevanten Sichtpunkt erfolgt. Daher muss auch der Anstoßpunkt bei ETCS früher liegen. Ein wesentlicher Unterschied ist, dass bei der konventionellen Berechnung der Anstoßverzögerungszeit die konkret vorhandene Fahrstraßenbildezeit für die jeweilige Fahrstraße einbezogen wird. Dies ist bei ETCS nicht der Fall. Hier wird ein pauschaler Wert von 45 s angenommen, innerhalb welcher der Prozess der Fahrstraßenbildung inklusive der Übermittlung der MA abgeschlossen sein muss.

Weiterhin wird bei ETCS für den Zeitpunkt der Anfrage an das RBC auf Verlängerung der MA angenommen, dass der Zug mit der Geschwindigkeit der Warnkurve fährt (vgl. [ERA16a]). Es wird nicht die tatsächlich gefahrene Ist-Geschwindigkeit verwendet, wie dies im LH der ZL erläutert ist. Diese Diskrepanz muss bereinigt werden.

### 7.1.4 Abhängigkeit zu Bahnübergängen der Überwachungsart Hp

Wie bereits erwähnt muss bei der Projektierung der ZL neben der Fahrstraßenbildezeit auch die Sicherheitszeit möglicher BÜ mitberücksichtigt werden. Bei der konventionellen ZL-Planung werden hierfür die Zeiten aus der BÜ-Planung verwendet. Für ETCS muss dagegen festgestellt werden, dass ein pauschaler Wert projiziert wird. Somit wird die Optimierung der Sperrzeit von BÜ schwierig. In einigen Fällen wird der BÜ sogar erst zu spät geschlossen und somit das Signal nicht rechtzeitig für eine behinderungsfreie Fahrt gestellt sein. Daher wird im LH ETCS gefordert, dass die Ausgabe des SB-Anstoßes an das Stellwerk für den jeweiligen BÜ angepasst werden muss. Inwieweit dies bisher durch die Signalbaufirmen umgesetzt werden kann, ist unklar.

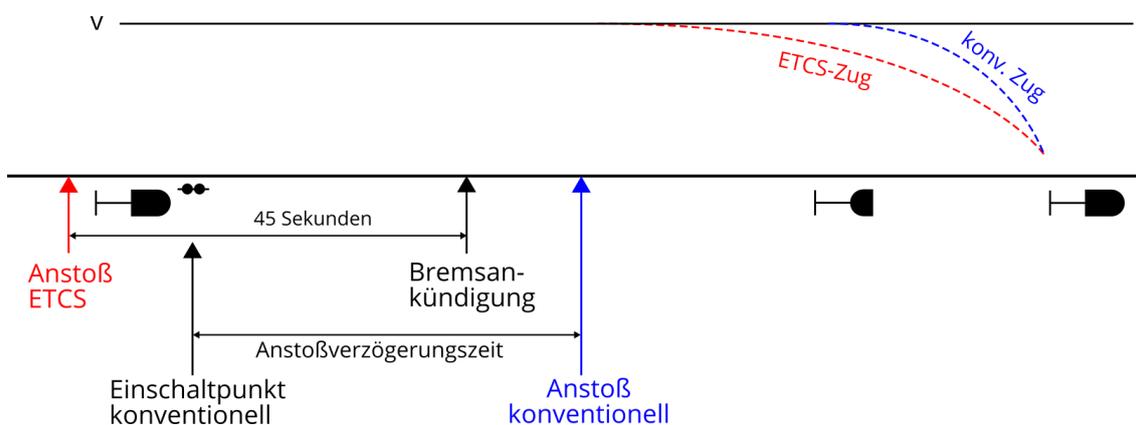
Generell wäre eine ZL-Signal-scharfe Projektierung der Zeit, wann das Fahrzeug einen MA Request senden soll, wünschenswert. Nur dann können variable Größen wie die Fahrstraßenbilde- oder die BÜ-Sicherheitszeit berücksichtigt und der BÜ zeitgerecht angesteuert werden.

## 7.2 Möglichkeit von betrieblichen Einschränkungen

Das bei ETCS verwendete Verfahren für die Verlängerung der Fahrterlaubnis ist ähnlich dem der LZB. Dort sind bisher keine betrieblichen Einschränkungen bekannt. Dies liegt zum einen daran, dass die Bremskurven deutlich flacher sind als die der PZB und der Anstoß somit früher benötigt wird. Hinzu kommt, dass die LZB in der Regel für Hochgeschwindigkeitsstrecken verwendet wird. Aufgrund der sehr langen Bremswege und Bremsvorankündigungswege erfolgt der Anstoß der LZB immer früher, als der jeweils zugehörige Einschaltzeitpunkt der konventionellen ZL befahren wird. Daher wird immer der Anstoß aus der LZB selbst maßgebend sein und nicht das Einschaltkriterium der Rückfallebene.

Bei ETCS L2 muss dies nicht immer so sein. Dies liegt daran, dass ETCS zukünftig vermehrt auch auf Mischverkehrsstrecken zum Einsatz kommt, auf denen ETCS dieselbe Geschwindigkeit überwacht, die auch für PZB-Züge gilt.

Abb. 56 veranschaulicht den für die LZB beschriebenen Zusammenhang, der auch auf ETCS übertragbar ist. Dies stellt Fall 1 der zwei möglichen Konstellationen dar.

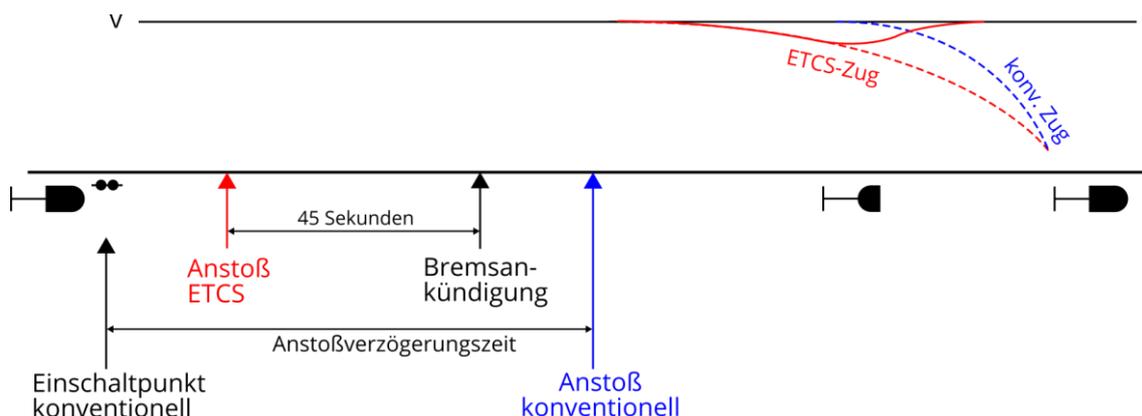


**Abb. 56: Vergleich der Anstoßpunkte für die ZL, Fall 1**

Der Anstoß durch ETCS erfolgt vor dem Einschaltzeitpunkt der konventionellen ZL, in diesem Fall die Rückfallebene für den ETCS-Zug. Die Einschaltung der ZL aus der Befahrung des Einschaltzeitpunktes wird somit ignoriert. Der ETCS-Zug erhält zeitgerecht seine Verlängerung der Fahrterlaubnis. Es kommt zu keinen betrieblichen Einschränkungen<sup>5</sup>.

Dies ist in Fall 2 anders, welcher in Abb. 57 dargestellt ist.

<sup>5</sup> Voraussetzung hierfür ist, dass die Summe aus Fahrstraßenbilde- und ggf. BÜ-Sicherungszeit kleiner als 45 s ist.



**Abb. 57: Vergleich der Anstoßpunkte für die ZL, Fall 2**

Da das maßgebende Signal, dessen Haltfall für die Aktivierung der ZL ausgewertet wird, sehr weit vom erforderlichen konventionellen Anstoßpunkt entfernt liegt, wird die Anstoßverzögerungszeit sehr groß. Der ETCS-Anstoß erfolgt jedoch weiterhin zeitoptimal und damit am selben Standort wie in Fall 1. Aus dieser Konstellation der sehr langen Anstoßverzögerungszeit ergibt sich, dass zuerst der Einschaltzeitpunkt der konventionellen ZL befahren wird und die lange Anstoßverzögerungszeit startet. Der nachfolgend eingehende, zeitgerechte Anstoß von ETCS wird ignoriert.

Dies führt dazu, dass der ETCS-geführte Zug seine Verlängerung der Fahrterlaubnis erst kurz hinter dem Sichtpunkt des Vorsignals für den konventionellen Zug erhält, da auch noch die Systemlaufzeit beachtet werden muss. Dieser Punkt ist jedoch in vielen Fällen hinter der Bremsankündigung und ggf. der Sollbremskurve von ETCS. Aus diesem Grund wird der ETCS-Zug bereits mit Bremsen anfangen müssen. Dies führt zu betrieblichen Einschränkungen, Energiemehrbedarf und zusätzlichem Bremsverschleiß und sollte daher vermieden werden.

### 7.3 Handlungsspielräume

Die Einschränkungen können vermieden werden, wenn die Höhe der Anstoßverzögerungszeit begrenzt wird. Wie groß die Verzögerungszeit maximal werden darf, bevor sich der ETCS-Anstoßpunkt zeitlich gesehen hinter den Einschaltzeitpunkt der konventionellen ZL verschiebt, hängt dabei stark von den auf der Strecke verkehrenden Zügen, deren Bremseigenschaften sowie der überwachten Höchstgeschwindigkeit ab und muss daher individuell untersucht werden.

Ist das Signal, dessen Haltfall bewertet wird, zu weit entfernt, muss die Einschaltung der konventionellen Zuglenkung über ein anderes Kriterium eingeschaltet werden. Hier können z. B. Informationen aus der Gleisfreimeldeanlage verwendet werden. Ob auch

ein zusätzlicher Schienenkontakt zulässig ist, kann dem LH ZL nicht entnommen werden. Im Zweifelsfall ist es möglich, ein Bk zur Unterteilung der „zu langen“ Blockabschnitte zu planen, dessen Haltfall gemäß [DB07] ebenfalls ausgewertet werden kann.

Eine weitere Möglichkeit ist es, die Zeit der Ausgabe des SB-Anstoßes und somit auch der Variablen  $T_{MAR}$  derart zu vergrößern, dass der Anstoß garantiert vor dem Befahren des Einschaltpunktes der ZL liegt. Für Fahrstraßen mit BÜ kann dieses Verfahren jedoch nicht verwendet werden, da sonst die Sperrzeit zu lang werden würde.

Mit steileren ETCS-Bremskurven würde der Konflikt eher verschärft werden, da die obere Grenze der Anstoßverzögerungszeit, bei der es noch keine Restriktion gibt, abnimmt.

Ein Hinweis auf die bei der Planung zu beachtende Problematik sollte in das Planungsregelwerk für die ZL aufgenommen werden.

## 7.4 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde untersucht, inwieweit die gegenüber der PZB deutlich flacheren Bremskurven von ETCS L2 betriebliche Einschränkungen in Zusammenhang mit der Zuglenkung hervorrufen. Es konnte festgestellt werden, dass in vielen Fällen aufgrund der deutlich längeren Bremswege der Anstoß der ZL durch ETCS zeitlich vor dem Befahren des Einschaltpunktes der konventionellen ZL liegt, was unkritisch ist. Gleichwohl sind aber auch Konstellationen denkbar, in denen der ETCS-Anstoß zu spät kommt und daher ignoriert wird. Dies führt zu Einschränkungen, die vermieden werden müssen.

Möglichkeiten zur Verhinderung dieses Effektes ist eine Begrenzung der Anstoßverzögerungszeit oder der Nutzung anderer Einschaltkriterien für die konventionelle ZL. Die Einbindung von BÜ muss dabei mitbetrachtet werden.

## 8 Ergebnisse und Diskussion

### 8.1 Auswirkung der ETCS-Bremskurven

In den Untersuchungen der Arbeit wurde analysiert, inwieweit die ETCS-Bremskurven auf zeitabhängige Streckenausrüstungen anwendbar sind. Dabei konnte festgestellt werden, dass zwischen ETCS signalgeführt sowie ETCS L2 unterschieden werden muss.

Auswirkungen wurden insbesondere bei Blocklängen der freien Strecke und der Ausrüstung mit ETCS L2 festgestellt. Werden keine Anpassungen vorgenommen, muss mit Leistungseinbußen gegenüber dem Betrieb mit PZB-Zügen gerechnet werden. Teilblocklängen der LZB können dagegen weitestgehend übernommen werden, da die Bremskurven der LZB sowie jene von ETCS L2 ähnliche Charakteristiken aufweisen.

Großer Anpassungsbedarf besteht vor allem bei den Einschaltstrecken von Bahnübergängen. Hierbei konnten die Überwachungsarten ÜS sowie Hp als kritisch insbesondere für ETCS L2 identifiziert werden. Betriebliche Einschränkungen entstehen durch ungewollte Zwangsbremungen und erzwungene Geschwindigkeitsverminderungen. Dies führt nicht nur zu verminderter Streckenleistungsfähigkeit, sondern auch zu erhöhtem Energiebedarf zur Wiederbeschleunigung sowie zu erhöhtem Bremsverschleiß.

Schließlich konnte bei der Untersuchung der Einschaltstrecken von Zuglenkungsanlagen festgestellt werden, dass in vielen Fällen keine betrieblichen Einschränkungen zu erwarten sind. Dennoch gibt es aber Konstellationen, in denen der Prozess der Verlängerung der Fahrerlaubnis unter ETCS mit dem der konventionellen Zuglenkung im Konflikt steht. Konkrete Werte konnten nicht ermittelt werden.

Gleichwohl muss angemerkt werden, dass sich alle Untersuchungen auf Musterzüge in Grenzsituationen bezogen haben. Die tatsächlichen Auswirkungen müssen in den konkreten Projekten individuell betrachtet werden.

### 8.2 Anpassungspotenzial der ETCS-Bremskurven

Der Infrastrukturbetreiber erhält bei ETCS die Möglichkeit, mittels selbst gewählter Korrekturfaktoren die Bremskurven an sein gewünschtes Sicherheitsniveau und das Infrastrukturlayout anzupassen. Daher wurde auch untersucht, inwieweit die ermittelten Restriktionen der ETCS-Bremskurven vermindert werden können, indem die Leistungsfähigkeit der Bremskurven selbst gesteigert wird.

Hierbei musste festgestellt werden, dass bei der Wahl der Korrekturfaktoren für Deutschland nur noch wenig Spielraum existiert. Gleichwohl gibt es noch Potenzial für Verbesserung insbesondere für Güterzüge bei ETCS signalgeführt.

Eine weitere Verbesserung der Leistungsfähigkeit kann mit der Nutzung des Gamma-Bremsmodells für feste Zugkompositionen erreicht werden. Hier gestaltete sich die Untersuchung jedoch schwierig, da die Eingangsparameter zur Ermittlung der Korrekturfaktoren für das Gamma-Modell sehr komplex sind und die Berechnungen daher nicht selbst durchgeführt werden konnten. Bereits ermittelte Korrekturfaktoren für Gamma-Züge liegen nur unzureichend vor.

### **8.3 Notwendige Regelwerksänderungen**

In der Arbeit konnten auch Vorschläge für Regelwerksänderungen erstellt werden. So sollten insbesondere die Einschaltstrecken von Bahnübergängen in beschränktem Maße vergrößert werden, um betriebliche Einschränkungen zu vermindern.

Die Blockteilung der freien Strecke sollte für ETCS L2 zudem mit Teilblöcken ausgerüstet werden, um eine verbesserte Leistungsfähigkeit gegenüber heutigen PZB-Strecken zu erreichen.

Bei Zuglenkungsanlagen besteht nur wenig Handlungsbedarf. Hier lassen sich keine pauschalen Dimensionierungsregeln ermitteln.

Generell muss durch die individuellen Bremskurven von ETCS verstärkt auf pauschale Aussagen verzichtet werden.

## 9 Fazit und Ausblick

Aus der Arbeit kann geschlussfolgert werden, dass in Zukunft die Berücksichtigung des individuellen Bremsvermögens der Züge eine größere Rolle spielt. Um betriebliche Einschränkungen zu vermeiden, konnten folgende Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt werden:

- Verringerung der Geschwindigkeit
- Erhöhung von Mindestbrems Hundertstel
- Anpassung der Korrekturfaktoren
- Anpassung/Verlängerung von Einschaltstrecken an das Bremsvermögen der Züge
- Nutzung des Gamma-Bremsmodells

Aufgrund der Komplexität des Themas war es nicht möglich, dieses bis ins letzte Detail zu bearbeiten. So gibt es noch viel Raum für weitere Untersuchungen. Insbesondere sollte der Einfluss der Ortungsungenauigkeit sowie der Streckenneigung betrachtet werden und Anforderungen an zusätzliche Standorte von Ortungsbalisen gestellt werden.

Weiterhin gilt es, die Bahnübergangsüberwachungsarten  $HP_{OE}$  sowie  $ÜS_{OE}$  zur Zulassung für ETCS zu bringen. Hier müssen Anforderungen an die Überwachungsarten definiert und offene Teilprobleme analysiert und gelöst werden. Die Bedeutung zur Verringerung der Sperrzeiten an BÜ und damit der Erhöhung der Sicherheit ist hoch. Ebenfalls sollte die Nutzung der standardisierten BÜ-Schnittstelle in die Betrachtungen einbezogen werden.

Aus fahrzeugtechnischer Sicht sind im weiteren Verlauf Anforderungen an die Bremsysteme von Zügen abzuleiten, um möglichst steile ETCS-Bremskurven im Gamma-Modell zu erhalten. Ziel muss die weitere Optimierung der Korrekturfaktoren sein.

In einem nächsten Schritt können die Ergebnisse dieser Arbeit auf Möglichkeiten des autonomen Fahrens übertragen und Anforderungen des automatischen Fahrbetriebs an die Bremskurven definiert werden. Hier besteht eine enge Abhängigkeit zueinander, sind doch die Bremskurven derzeit ein leistungsminderndes Element von ETCS.

## Abkürzungsverzeichnis

AFB	Automatische Fahr- und Bremssteuerung
BEP	Bremseinsatzpunkt
Bk	Blockkennzeichen
Brh	Bremshundertstel
BÜ	Bahnübergang
BÜSA	Bahnübergangssicherungsanlage
BZ	Betriebszentrale
CE	CIR-ELKE
CIR-ELKE	Computer Integrated Railroadng – Erhöhung der Leistungsfähigkeit im Kernnetz
DMI	Driver Machine Interface
DP	Datenpunkt
D-Weg	Durchrutschweg
EBCL	Emergency Brake Confidence Level – Schnellbremsvertrauensniveau
EBD	Emergency Brake Deceleration Curve – Schnellbremsablaufkurve
EBI	Emergency Brake Intervention Curve – Schnellbremseinsatzkurve
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
EBWU	Eisenbahnbetriebswissenschaftliche Untersuchung
EIU	Eisenbahninfrastrukturunternehmen
EOA	End Of Authority
ERA	European Railway Agency – Europäische Eisenbahnagentur
ESG	ETCS signalgeführt, Bezeichnung für dt. Ausprägung von ETCS L1LS
ESTW	Elektronisches Stellwerk
ETCS	European Train Control System
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
Fü	Fernüberwachung (BÜ-Überwachungsart)
HBL	Hochleistungsblock
Hp	Hauptsignalüberwachung (BÜ-Überwachungsart)
L1	Level 1
L1LS	Level 1 in der Betriebsart Limited Supervision
L2	Level 2

L2oS	Level 2 ohne Signale
LEU	Lineside Electronic Unit
LH	Lastenheft
LZB	Linienförmige Zugbeeinflussung
MA	Movement Authority – Fahrerlaubnis
MAR	Movement Authority Request
MZF	Mindestzugfolgezeit
OE	Optimierte Einschaltung
PBD	Permitted Braking Distance – zulässiger Bremsweg
PZB	Punktförmige Zugbeeinflussung
RBC	Radio Block Center – ETCS-Streckenzentrale
Ril	Richtlinie
SB	Selbststellbetrieb
SBD	Service Brake Deceleration Curve – Vollbremsablaufkurve
SBI	Service Brake Intervention Curve – Vollbremseinsatzkurve
Sifa	Sicherheitsfahrschaltung
SRS	System Requirements Specification
SvL	Supervised Location
Tf	Triebfahrzeugführer
UIC	International Union of Railways – Internationaler Eisenbahnverband
ÜS	Überwachungssignal
ZL	Zuglenkung
ZN	Zugnummernmeldeanlage

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Vorgehen beim Lösen der Teilprobleme	5
Abb. 2:	Beispiele für zeitabhängige Streckenausrüstungen	10
Abb. 3:	Übersicht über verschiedene Bremsarten nach [JAE16a]	11
Abb. 4:	Wartezeitfunktion [PAC13]	17
Abb. 5:	Sperrzeit eines Blockabschnittes	18
Abb. 6:	Modifiziertes Sperrzeitenmodell für ETCS L2	19
Abb. 7:	Überwachungsart FÜ	21
Abb. 8:	Überwachungsart ÜS	21
Abb. 9:	Überwachungsart ÜS <sub>OE</sub>	22
Abb. 10:	Überwachungsart Hp	24
Abb. 11:	Wirkungsweise der Zuglenkung	26
Abb. 12:	Ermittlung des Anstoßpunktes	27
Abb. 13:	Bremskurvenvisualisierung mit dem ERA-Bremskurventool	29
Abb. 14:	Bremshundertstel-Konvertierungsmodell	32
Abb. 15:	Bremsstellungs-Konvertierungsmodell	32
Abb. 16:	Korrekturfaktor $Kv_{int}$ für Reisezüge, bearb. nach [ERA16a]	35
Abb. 17:	Bestimmung der sicheren Verzögerung für Lambda-Züge, bearb. nach [ERA16b]	36
Abb. 18:	Bestimmung der sicheren Bremsaufbauzeit für Lambda-Züge	37
Abb. 19:	Ermittlung der Bremsbewertung für Gamma-Züge	38
Abb. 20:	Streuung der Schnellbremswege [ERA16b]	39
Abb. 21:	Bestimmung der sicheren Verzögerung für Gamma-Züge [ERA16b]	42
Abb. 22:	Grundsätzliches Überwachungsprinzip der PZB 90 [MAS18]	45
Abb. 23:	Darstellung der PZB-Überwachungskurven	46
Abb. 24:	Darstellung der LZB-Bremskurven	48
Abb. 25:	Vollständige und entzerrte Bremskurvenschar von ETCS	51
Abb. 26:	Ableitung der Bremskurven aus EBD, SBD und GUI	56
Abb. 27:	Abhängigkeit zwischen den Bremskurven [ERA16a]	56
Abb. 28:	Wirkung von $Kv_{int}$ auf die EBD	57
Abb. 29:	Wirkung von $Kt_{int}$ sowie der Zugbeschleunigung auf die EBI	59
Abb. 30:	Einfluss der D-Weg-Länge auf den Bremsweg	60
Abb. 31:	Überwachungskurve bei ESG	63
Abb. 32:	Vergleich der Bremskurven von PZB und ESG (Reisezug)	67
Abb. 33:	Vergleich der Bremskurven von PZB und ESG (Güterzug)	68

---

Abb. 34:	Vergleich der Bremskurven von LZB und ETCS L2 (Reisezug)	70
Abb. 35:	Vergleich der Bremskurven von LZB und ETCS L2 (Güterzug)	71
Abb. 36:	Vergleich der Bremskurven von PZB und ETCS L2 (Reisezug)	72
Abb. 37:	Vergleich der Bremskurven von PZB und ETCS L2 (Güterzug)	73
Abb. 38:	Vergleich der Bremskurven von PZB und ETCS L2 bei 1500 m Vorsignalabstand	74
Abb. 39:	Zusammenhang zwischen Mindestzugfolgezeit und Teilblocklänge	78
Abb. 40:	Ermittlung des Zugfolgeabstandes	79
Abb. 41:	Zusammenhang zwischen Mindestzugfolgezeit und Geschwindigkeit	80
Abb. 42:	ETCS-Systemlaufzeiten	81
Abb. 43:	Auswirkung der Verkürzung des D-Weges	82
Abb. 44:	Zugfolgeabstand bei unter-D-Weg-langen Teilblöcken	82
Abb. 45:	Einflussgrößen bei der Dimensionierung von Teilblocklängen	83
Abb. 46:	Vergleich zwischen LZB- und ETCS L2-Bremskurven bei Beschleunigung	89
Abb. 47:	ETCS L2-Planung für BÜ der Überwachungsart FÜ	94
Abb. 48:	ESG-Planung für BÜ der Überwachungsart ÜS	95
Abb. 49:	ESG-Bremskurve bei Überwachung der BÜ-TSR	96
Abb. 50:	ETCS L2-Planung für BÜ der Überwachungsart ÜS	98
Abb. 51:	Notwendige DP-Anordnung für ÜS-BÜ unter ETCS L2	102
Abb. 52:	Anordnung des Annäherungskontaktes bei Hp-BÜ für ETCS L2	105
Abb. 53:	Anordnung eines zusätzlichen Bk vor Hp-BÜ für ETCS L2	106
Abb. 54:	Zuglenkung bei konventioneller Zugfahrt	109
Abb. 55:	Zuglenkung bei ETCS L2-Führung	110
Abb. 56:	Vergleich der Anstoßpunkte für die ZL, Fall 1	112
Abb. 57:	Vergleich der Anstoßpunkte für die ZL, Fall 2	113

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Zusammenstellung der wichtigsten Literaturquellen	8
Tab. 2:	Korrekturfaktor $K_{v\_int}$ für ETCS L2 in Deutschland (vgl. [DB16a])	34
Tab. 3:	Weitere bremskurvenrelevante, nationale Variablen	43
Tab. 4:	Zugarten der PZB, bearb. nach [MAS18]	46
Tab. 5:	Vergleich der Charakteristiken verschiedener Überwachungskurven	64
Tab. 6:	Werte für die ETCS-Systemlaufzeiten	81
Tab. 7:	Vergleich der Sperrzeitanteile von PZB und ETCS L2	86
Tab. 8:	Auswirkung der ETCS-Bremskurven auf BÜ-Einschaltstrecken	107

## Formelverzeichnis

Formel 1:	Berechnung der Bremswertstufen	14
Formel 2:	Anstoßverzögerungszeit	27
Formel 3:	Schnellbremsaufbauzeit	33
Formel 4:	Betriebsbremsaufbauzeit	33
Formel 5:	Sichere Bremsverzögerung für Lambda-Züge	37
Formel 6:	Sichere Bremsaufbauzeit für Lambda-Züge	37
Formel 7:	Sichere Bremsverzögerung für Gamma-Züge	42
Formel 8:	Sichere Bremsaufbauzeit für Gamma-Züge	42

## Literaturverzeichnis

- [BAR03] Barz, Matthias: *Untersuchung von Abstandshalteverfahren am Beispiel des Schienenpersonennahverkehrs*. Technische Universität Dresden, Studienarbeit. Dresden, 2003
- [BÄR15] Bär, Matthias: *Bahnbetriebssteuerung und Leistungsuntersuchung: Kapitel 6 – Leistungsermittlung und Bemessung von Bahnanlagen*. Technische Universität Dresden, Vorlesungsskript. Dresden, 2015
- [BRA88] Braun, Alfred: *Aufstellen von Brems tafeln für Strecken mit Linienzugbeeinflussung*. In: *ZEV Glasers Annalen* (1988), Nr. 4, S. 108–118.
- [BRA91] Braun, Alfred: *Die LZB-Brems tafeln für Güterzüge*. In: *Eisenbahningenieurkalender* (1991), S. 275–282.
- [DB00] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 819.0508: LST-Anlagen planen – CIR-ELKE*. Stand: 01.12.2000.
- [DB07] DB Netz AG (Hrsg.): *Betriebliches und technisches Lastenheft für eine Zuglenkung*. Stand: 30.03.2007.
- [DB08a] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 405.0304: Untersuchung von Strecken – Bemessung zweigleisiger Strecken*. Stand: 01.01.2008.
- [DB08b] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 819.0203: Signale für Zug- und Rangierfahrten – Vorsignale*. Stand: 17.11.2008.
- [DB09a] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 815.0033: Bahnübergangsanlagen planen und instand halten – Technische Sicherungen an Bahnübergängen berechnen*. Stand: 01.09.2009.
- [DB09b] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 457.0401A02: Maßgebende Neigungen, Streckenbrems tafeln und Sägelinien ermitteln und aufstellen – Grundbrems tafeln*. Stand: 13.12.2009.
- [DB09c] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 405: Fahrwegkapazität*. Stand: 13.02.2009.
- [DB10] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 819.0732: Leittechnische Einrichtungen planen – Zuglenkung planen*. Stand: 01.11.2010.

- 
- [DB12a] DB Netz AG (Hrsg.): *Lastenheft für das Elektronische Stellwerk (ESTW) – Funktionsbedingungen der Stellwerkslogik und der in das ESTW integrierten Techniken: Teilheft F8: Hochleistungsblock CIR-ELKE*. Stand: 26.07.2012.
- [DB12b] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 819.0202: Signale für Zug- und Rangierfahrten – Hauptsignale*. Stand: 01.10.2012.
- [DB12c] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 819.0731: LST-Anlagen planen – Zugnummernmeldeanlagen planen*. Stand: 01.06.2012.
- [DB14] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 819.1100: Planungsgrundsätze für selbsttätige Gleisfreimeldeanlagen mit Achszähltechnik*. Stand: 01.12.2014.
- [DB15a] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 408.0561: Züge fahren – Verminderter Reibwert*. Stand: 13.12.2015.
- [DB15b] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 915.0107A01: Bremsen im Betrieb bedienen und prüfen – Gefahr der Bremswegverlängerung bei vermindertem Reibwert zwischen Rad und Schiene*. Stand: 13.12.2015.
- [DB15c] DB Netz AG (Hrsg.): *Korrekturfaktoren für ETCS auf Strecken der DB Netz AG*. Interner Bericht. Stand: 24.07.2015
- [DB16a] DB Netz AG (Hrsg.): *Lastenheft ETCS: Betrieblich-technische Systemfunktionen für ETCS SRS Baseline 3*. Stand: 07.03.2016.
- [DB16b] DB Netz AG (Hrsg.): *Lastenheft ETCS signalgeführt*. Stand: 28.11.2016.
- [DB16c] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 915.0101: Bremsen im Betrieb bedienen und prüfen – Grundsätze*. Stand: 11.12.2016.
- [DB17a] DB Netz AG (Hrsg.): *Lastenheft für das Elektronische Stellwerk (ESTW) – Funktionsbedingungen der Stellwerkslogik und der in das ESTW integrierten Techniken: Teilheft F8, Zusatz 01: Hochleistungsblock ETCS L2*. Stand: 28.03.2017.
- [DB17b] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 819.1344 V0.87: LST-Anlagen planen – Grundsätze zur Erstellung der Ausführungsplanung PT1 für ETCS Level 2*. Entwurf vom 03.04.2017.
- [DB17c] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 408.0641: Züge fahren – Sonstige Unregelmäßigkeiten an technischen Einrichtungen*. Stand: 10.12.2017.
- [DB17d] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 301: Signalbuch*. Stand: 10.12.2017.
-

- [DB17e] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 819.1348: LST-Anlagen planen – Grundsätze zur Erstellung der Ausführungsplanung für ETCS signalgeführt*. Entwurf vom 31.03.2017.
- [DB18] DB Netz AG (Hrsg.): *Richtlinie 819.1310: LST-Anlagen planen – Punktformige Zugbeeinflussung: Grundsätze für das Ausrüsten von Strecken*. Stand: 01.01.2018.
- [DEB92] Debuschewitz, Peter: *Das Projekt CIR-ELKE*. In: *Die Deutsche Bahn* (1992), Nr. 7, S. 717–722.
- [DEU93] Deutsche Reichsbahn; Deutsche Bundesbahn (Hrsg.): *CIR-ELKE (HBL): Planungsgrundsätze*. Mainz: Oktober 1993.
- [EBO17] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Hrsg.): *Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)*. Stand: 26.07.2017.
- [EIC05] Eichenberger, Peter; Gröpler, Olaf: *ETCS-Bremskurven in Europa*. In: *ZEVrail - Sonderheft zur 36. Tagung Moderne Schienenfahrzeuge an der TU Graz* (Nov. 2005), S. 266–274.
- [ERA14] European Railway Agency (Hrsg.): *ERTMS/ETCS: SUBSET 026 – System Requirements Specification*. Version 3.4.0 vom 12.05.2014.
- [ERA16a] European Railway Agency (Hrsg.): *ERTMS/ETCS: SUBSET 026 – System Requirements Specification*. Version 3.6.0 vom 13.05.2016.
- [ERA16b] European Railway Agency (Hrsg.): *Introduction to ETCS Braking Curves*. Version 1.4 vom 14.06.2016.
- [ERA18a] European Railway Agency (Hrsg.): *ERA Braking Curves Simulation Tool*. Excel-basiertes Softwaretool. Version 4.2, 2018. [https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/era\\_braking\\_curves\\_simulation\\_tool\\_en.xls](https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/era_braking_curves_simulation_tool_en.xls) (aufgerufen am 13.12.2018).
- [ERA18b] European Railway Agency (Hrsg.): *ERA Braking Curves Tool Handbook*. Stand: 07.08.2018. [https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/era\\_braking\\_curves\\_tool\\_handbook\\_en.doc](https://www.era.europa.eu/sites/default/files/activities/docs/era_braking_curves_tool_handbook_en.doc) (aufgerufen am 13.12.2018).
- [FEL17] Feltz, André; Nießen, Nils; Walke, Tobias; Jacobs, Jürgen: *Analyse und Optimierung von ETCS-Parametern im Luxemburger Eisenbahnnetz*. In: *Signal+ Draht* (2017), Nr. 3, S. 6–17.

- 
- [FRA03] Frank, Manfred: *Erweiterung des LZB-Systems für die Strecke Köln-Rhein/Main*. In: *Signal+Draht* (2003), Nr. 10, S. 31–33.
- [GRÖ03] Gröpler, Olaf; Jaenichen, Dieter: *Bremsbewertungssysteme zum sicheren Fahren von Zügen mit verschiedenen Zugsicherungssystemen*. In: *Dresden Rad Schiene - Tagungsband zur 6. Internationalen Schienenfahrzeugtagung in Dresden (Okt. 2003)*, S. 22–24.
- [GRÖ08] Gröpler, Olaf: *Bremswege und Bremswegsicherheit bei ETCS*. In: *ZEVrail* (2008), Nr. 1/2, S. 31–39.
- [GRÖ14] Gröpler, Olaf: *ETCS-Bremskurven: Eine kleine Einführung*. München, 23.04.2014
- [HOR17] Horn, Stephan; Pavlović, Olivera: *Chancen und Möglichkeiten der Monte-Carlo-Methode bei der Bestimmung der ETCS-Bremskurven*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (2017), Nr. 9, S. 50–55.
- [JAE16a] Jaenichen, Dieter: *Bremstechnik und -betrieb: Einführung*. Technische Universität Dresden, Vorlesungsmitschrift. Dresden, 13.04.2016
- [JAN00] Janicki, Jürgen: *Fahrzeugtechnik Teil 1: Bremseinrichtungen, Güter- und Reisezugwagen*. Heidelberg Mainz: Eisenbahn-Fachverlag, 2000.
- [JAN16] Janicki, Jürgen: *Systemwissen Eisenbahn*. 2. Auflage. Berlin: Bahn Fachverlag, 2016.
- [KIR15] Kirschbauer, Fabian: *Einbindung von Bahnübergängen auf ETCS-Strecken*. Technische Universität Dresden, Studienarbeit. Dresden, 06.11.2015
- [KOL07] Kolling, Dirk: *Kostenoptimierung durch die Überwachungsart ÜSoe im Cluster*. In: *Signal+Draht* (2007), Nr. 10, S. 18–20.
- [KOL86] Kollmannsberger, Florian: *Die Zugbeeinflussung als Instrument zur Erhöhung der Geschwindigkeit*. In: *Eisenbahntechnische Rundschau* (1986), Nr. 11, S. 717–724.
- [MAS18] Maschek, Ulrich: *Sicherung des Schienenverkehrs*. 4. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [MIN07] Minde, Frank: *Grundlagen der Eisenbahnbremstechnik*. Vorlesungsskript für Trainees der DB. Minden (Westf.), 2007.

- 
- [MUR91] Murr, Eduard: *Systembeschreibung der Linienzugbeeinflussung (LZB) der Deutschen Bundesbahn*. In: *Eisenbahningenieurkalender* (1991), S. 285–317.
- [NEU14] Neuberg, Niels: *Der Einsatz von ETCS Level 1 Limited Supervision bei der Deutschen Bahn AG*. In: *Signal+Draht* (2014), Nr. 12, S. 12–18.
- [NEU16] Neufert, Sven-Orlev: *Schieneinsatz: Systemvor- und -nachteile*. Technische Universität Dresden, Vorlesungsfolien. Dresden, 2016
- [PAC13] Pachl, Jörn: *Systemtechnik des Schienenverkehrs: Bahnbetrieb planen, steuern und sichern*. 7. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [SCH00] Schürmans, Peter; Henning, Steffen: *Hpoe – Intelligente Schnittstelle zwischen ESTW und BÜ für die BZ*. In: *Signal+Draht* (2000), Nr. 11, S. 20–23.
- [SCH18] Schaarschmidt, Volker: *Experteninterview zu Bahnübergängen*. September 2018
- [STA11] Stanley, Peter (Hrsg.): *ETCS for Engineers*. 1. Auflage. Hamburg: DVV Media Group GmbH | Eurailpress, 2011.
- [SUI18] Suiter, Markus: *Workshop zu Regelwerksanpassungen*. September 2018
- [UIC08a] Internationaler Eisenbahnverband UIC (Hrsg.): *Influence of ETCS on line capacity: Generic study*. Paris, 2008
- [UIC10] Internationaler Eisenbahnverband UIC (Hrsg.): *Einfluss des European Train Control System (ETCS) auf die Leistungsfähigkeit von Knoten*. Paris, 2010
- [UIC14b] Internationaler Eisenbahnverband UIC (Hrsg.): *UIC-Kodex 544-1: Bremse – Bremsleistung*. 6. Ausgabe, Oktober 2014.
- [UNI15c] UNISIG (Hrsg.): *ERTMS/ETCS: SUBSET 041 – Performance Requirements for Interoperability*. Version 3.2.0 vom 17.12.2015.
- [VDV14] Verband deutscher Verkehrsunternehmen (Hrsg.): *VDV-Schrift BRW.4701A01: Regelungen zum Vorbereiten von Zügen und Rangierfahrten – Bilden der Züge – Zulässige Geschwindigkeit für Güterwagen*. Stand: 17.10.2014.

- [WIN09] Winter, Peter; UIC (Hrsg.): *Compendium on ERTMS*. 1. Auflage. Hamburg: DVV Media Group GmbH | Eurailpress, 2009.
- [WSP18c] WSP Infrastructure Engineering GmbH (Hrsg.): *Untersuchung zur Einführung von ETCS im Kernnetz der S-Bahn Stuttgart – Abschlussbericht*. Frankfurt am Main, Version 1.0 vom 20.11.2018

## Erklärung

Hierdurch erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage eingereichte Diplomarbeit selbstständig verfasst und andere als die angegebenen Hilfsmittel nicht benutzt habe.

Der Verfasser erteilt der Technischen Universität an den Ergebnissen seiner Diplomarbeit ein nichtausschließliches, nichtübertragbares, zeitlich unbegrenztes, kostenloses und unwiderrufliches Nutzungsrecht.

Dresden, den 18.12.2018

.....

Unterschrift des Studenten

## Anhangsverzeichnis

Dieser Arbeit liegen folgende Anhänge bei:

- Anhang A      Gesprächsprotokolle
- Anhang B      Eingangsparameter für die Berechnungen mit dem ETCS-Bremskurventool
- Anhang C      Übersicht über die Variablen des ETCS-Bremsmodells
- Anhang D      Schaubilder zu den Parametern der ETCS-Bremskurven
- Anhang E      Weitere Vergleiche der Bremskurven verschiedener Zugbeeinflussungssysteme
- Anhang F      Berechnungen zu Teilblocklängen von S-Bahn-Stammstrecken

Anhang F befindet sich in elektronischer Form auf der beigelegten CD.

## **Anhang A: Gesprächsprotokolle**

Während der Bearbeitung wurden mit einigen Personen Experteninterviews geführt. In den Gesprächsprotokollen erfolgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse. Auf diese wird an gegebener Stelle dieser Arbeit verwiesen. Die entsprechend verwendeten Kurzbelege sind ebenfalls im Literaturverzeichnis aufgenommen.

### **[SCH18] Experteninterview mit Volker Schaarschmidt, BÜ-Planer, DB Engineering&Consulting, am 07. September in Dresden**

Wesentliche Aussagen:

- Die Verarbeitungszeit der LEU wurde auf der Strecke Berlin – Rostock mit 2,5 s angenommen

### **[SUI18] Experteninterview mit Markus Suiter, Regelwerksautor, DB Netz, am 26. September in Frankfurt**

Wesentliche Aussagen:

- $\ddot{U}_{SoE}$ -BÜ sind für ETCS noch nicht sicherheitlich betrachtet und können daher nicht verwendet werden
- BÜ-BÜ-Ketten werden neu nicht mehr geplant

## Anhang B: Eingangsparameter für die Berechnungen mit dem ETCS-Bremskurventool

Es werden nur die für die Berechnung relevanten Werte angegeben. Eingangsgrößen, die die konkrete Berechnung nicht beeinflussen, werden nicht erwähnt.

### Allgemeine Werte

Nachfolgende Tabelle enthält die Eingangsparameter für das Bremskurventool, welche für alle Berechnungen identisch verwendet wurden.

Tab.-Blatt	Variable	Wert
Train (main)	Service Brake Interface	Nein
	Special/additional brake independent from wheel/track adhesion	Nein
	Speed inaccuracy	Subset 041
	Position inaccuracy	Abs.+Rel. Wert: 0/0
	Nominal rotating mass	10
	Distance antenna - train front	5
Track	Release speed	Fester Wert: 0
	Track condition brake inhibition profile	Nicht verwendet
	Reduced adhesion profile	Nicht verwendet
	Relocation balises Distance from origin	Keine Ortungsbalisen
	Gradient profile	Nicht verwendet (ebenes Gleis)
National values	Maximum deceleration value under reduced adhesion conditions 1/2/3 [m/s <sup>2</sup> ]	2,05
Gradient correction factors	Correction factors for gradient on normal service deceleration	0 für alle Werte

Tab. B-1: Allgemeine Eingangsparameter für das ETCS-Bremskurventool

## Spezielle Werte

Nachfolgende Tabellen enthalten die jeweiligen Werte der Eingangsparameter, die in den einzelnen Berechnungen unterschiedlich verwendet wurden.

### Nr. 1

Tab.-Blatt	Parameter	Wert							
Train (m)	Train type	Lambda							
	Brake position	Passenger P							
	T_traction_cut_off [s]	2							
	Traction cut off interface	Nein							
	Service Brake Interface	Ja							
	Train length [m]	250							
	Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	0							
Track	Target type	EOA							
	Dist. origin/target [m]	775							
	Initial speed [km/h]	70							
	Distance EOA/SvL [m]	135							
National values	Q_NVSBTSMPerm	Ja							
	Q_NVGUIPerm	Ja							
	Q_NVINHSMICPerm	Ja							
Brake parameters (lambda)	Brake percentage for EB	135							
	A_SB01 / A_SB12 [m/s <sup>2</sup> ]	1,2 / 1,3							
	A_brake_normal_service_0	V	0	35	160				
		AD	0,5	0,31					
Integrated correction factors	Kv_int (V)	0,7 für alle V							
	Kr_int (L)	1,0 für alle L							
	Kt_int	1,1							

Tab. B-2: Entzerrung der Bremskurven

**Nr. 2**

<b>Tab.-Blatt</b>	<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	
<b>Train (m)</b>	Train type	Lambda	
	Brake position	Passenger P	
	T_traction_cut_off [s]	2	
	Traction cut off interface	Nein	
	Service Brake Interface	Ja	
	Train length [m]	200	
	Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	0	
<b>Track</b>	Target type	EOA	
	Dist. origin/target [m]	1500	
	Initial speed [km/h]	120	
	Distance EOA/SvL [m]	0	
<b>National values</b>	Q_NVSBTSMPerm	Ja	
	Q_NVGUIPerm	Nein	
	Q_NVINHSMICPerm	Ja	
<b>Brake parameters (lambda)</b>	Brake percentage for EB	140	
	A_SB01 / A_SB12 [m/s <sup>2</sup> ]	-	
	A_brake_normal_service_0	V	-
		AD	-
<b>Integrated correction factors</b>	Kv_int (V)	1,0 für alle V	
	Kr_int (L)	1,0 für alle L	
	Kt_int	1,0	

**Tab. B-3: Grund-EBD und EBI, kein D-Weg**

**Nr. 3**

<b>Tab.-Blatt</b>	<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	
<b>Train (m)</b>	Train type	Lambda	
	Brake position	Passenger P	
	T_traction_cut_off [s]	2	
	Traction cut off interface	Nein	
	Service Brake Interface	Ja	
	Train length [m]	200	
	Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	0	
<b>Track</b>	Target type	EOA	
	Dist. origin/target [m]	1500	
	Initial speed [km/h]	120	
	Distance EOA/SvL [m]	0	
<b>National values</b>	Q_NVSBTSMPerm	Ja	
	Q_NVGUIPerm	Nein	
	Q_NVINHSMICPerm	Ja	
<b>Brake parameters (lambda)</b>	Brake percentage for EB	140	
	A_SB01 / A_SB12 [m/s <sup>2</sup> ]	-	
	A_brake_normal_service_0	V	-
		AD	-
<b>Integrated correction factors</b>	Kv_int (V)	0,5 von 0-40 km/h, 2,54 von 40-80 km/h, 1,0 für über 80 km/h	
	Kr_int (L)	1,0 für alle L	
	Kt_int	1,0	

**Tab. B-4: Mit Kv\_int angepasste EBD**

**Nr. 4**

<b>Tab.-Blatt</b>	<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	
<b>Train (m)</b>	Train type	Lambda	
	Brake position	Passenger P	
	T_traction_cut_off [s]	2	
	Traction cut off interface	Nein	
	Service Brake Interface	Ja	
	Train length [m]	200	
	Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	0	
<b>Track</b>	Target type	EOA	
	Dist. origin/target [m]	1500	
	Initial speed [km/h]	120	
	Distance EOA/SvL [m]	0	
<b>National values</b>	Q_NVSBTSMPerm	Ja	
	Q_NVGUIPerm	Nein	
	Q_NVINHSMICPerm	Ja	
<b>Brake parameters (lambda)</b>	Brake percentage for EB	140	
	A_SB01 / A_SB12 [m/s <sup>2</sup> ]	-	
	A_brake_normal_service_0	V	-
		AD	-
<b>Integrated correction factors</b>	Kv_int (V)	1,0 für alle V	
	Kr_int (L)	1,0 für alle L	
	Kt_int	1,4	

**Tab. B-5: Mit Kt\_int angepasste EBI**

**Nr. 5**

<b>Tab.-Blatt</b>	<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	
<b>Train (m)</b>	Train type	Lambda	
	Brake position	Passenger P	
	T_traction_cut_off [s]	2	
	Traction cut off interface	Nein	
	Service Brake Interface	Ja	
	Train length [m]	200	
	Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	1,1	
<b>Track</b>	Target type	EOA	
	Dist. origin/target [m]	1500	
	Initial speed [km/h]	120	
	Distance EOA/SvL [m]	0	
<b>National values</b>	Q_NVSBTSMPerm	Ja	
	Q_NVGUIPerm	Nein	
	Q_NVINHSMICPerm	Ja	
<b>Brake parameters (lambda)</b>	Brake percentage for EB	140	
	A_SB01 / A_SB12 [m/s <sup>2</sup> ]	-	
	A_brake_normal_service_0	V	-
		AD	-
<b>Integrated correction factors</b>	Kv_int (V)	1,0 für alle V	
	Kr_int (L)	1,0 für alle L	
	Kt_int	1,0	

**Tab. B-6: Einfluss der Zugbeschleunigung auf die EBI**

**Nr. 6**

<b>Tab.-Blatt</b>	<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	
<b>Train (m)</b>	Train type	Lambda	
	Brake position	Passenger P	
	T_traction_cut_off [s]	2	
	Traction cut off interface	Nein	
	Service Brake Interface	Nein	
	Train length [m]	200	
	Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	0	
<b>Track</b>	Target type	EOA	
	Dist. origin/target [m]	1500	
	Initial speed [km/h]	120	
	Distance EOA/SvL [m]	0	
<b>National values</b>	Q_NVSBTSMPerm	Nein	
	Q_NVGUIPerm	Nein	
	Q_NVINHSMICPerm	Ja	
<b>Brake parameters (lambda)</b>	Brake percentage for EB	142	
	A_SB01 / A_SB12 [m/s <sup>2</sup> ]	-	
	A_brake_normal_service_0	V	-
		AD	-
<b>Integrated correction factors</b>	Kv_int (V)	Siehe nationale Werte aus [DB16a]	
	Kr_int (L)	1,0 für alle L	
	Kt_int	1,15	

**Tab. B-7: S-Bahn ohne D-Weg**

**Nr. 7**

<b>Tab.-Blatt</b>	<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	
<b>Train (m)</b>	Train type	Lambda	
	Brake position	Passenger P	
	T_traction_cut_off [s]	2	
	Traction cut off interface	Nein	
	Service Brake Interface	Nein	
	Train length [m]	200	
	Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	0	
<b>Track</b>	Target type	EOA	
	Dist. origin/target [m]	1500	
	Initial speed [km/h]	120	
	Distance EOA/SvL [m]	200	
<b>National values</b>	Q_NVSBTSMPerm	Nein	
	Q_NVGUIPerm	Nein	
	Q_NVINHSMICPerm	Ja	
<b>Brake parameters (lambda)</b>	Brake percentage for EB	142	
	A_SB01 / A_SB12 [m/s <sup>2</sup> ]	-	
	A_brake_normal_service_0	V	-
		AD	-
<b>Integrated correction factors</b>	Kv_int (V)	Siehe nationale Werte aus [DB16a]	
	Kr_int (L)	1,0 für alle L	
	Kt_int	1,15	

**Tab. B-8: S-Bahn mit D-Weg**

**Nr. 8**

Tab.-Blatt	Parameter	Wert							
<b>Train (m)</b>	Train type	Lambda; bei über 200 km/h Gamma							
	Brake position	siehe jeweilige Grafik							
	T_traction_cut_off [s]	2							
	Traction cut off interface	Nein							
	Service Brake Interface	Nein							
	Train length [m]	siehe jeweilige Grafik							
	Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	0							
<b>Track</b>	Target type	EOA; bei ESG zur Ermittlung der PBD-Zielgeschwindigkeit LOA							
	Dist. origin/target [m]	6000							
	Initial speed [km/h]	siehe jeweilige Grafik							
	Distance EOA/SvL [m]	50							
<b>National values</b>	Q_NVSBTSMPerm	Nein							
	Q_NVGUIPerm	Nein							
	Q_NVINHSMICPerm	Ja							
<b>Brake parameters (lambda)</b>	Brake percentage for EB	siehe jeweilige Grafik							
	A_SB01 / A_SB12 [m/s <sup>2</sup> ]	siehe nationale Werte der jeweiligen LH							
	A_brake_normal_service_0	V	-						
		AD	-						
<b>Integrated correction factors</b>	Kv_int (V)	siehe nationale Werte der jeweiligen LH							
	Kr_int (L)	siehe nationale Werte der jeweiligen LH							
	Kt_int	siehe nationale Werte der jeweiligen LH							
<b>Brake parameters (gamma)</b>	A_brake_emergency	V	0	50	80	160	220	300	350
		AD	1,4	1,7	1,8	1,2	1,15	1,15	1,15
	EBCL	7							
	T_brake_emergency	2,5							
	T_brake_service	4							
	A_brake_normal_service	V	0	150		280		300	
		AD	0,7	0,7		0,7		0,7	

<b>Correction factor Kdry_rst</b>	EBCL -> 1-10E-7	V	50	80	160	220	300	350
		Kdry_rst	0,8	0,822	0,823	0,822	0,828	0,828

**Tab. B-9: Berechnungen zum Vergleich der Bremsweglängen**

**Nr. 9**

Tab.-Blatt	Parameter	Wert	
<b>Train (m)</b>	Train type	Lambda	
	Brake position	Freight G	
	T_traction_cut_off [s]	2	
	Traction cut off interface	Nein	
	Service Brake Interface	Nein	
	Train length [m]	740	
	Acceleration [m/s <sup>2</sup> ]	0	
<b>Track</b>	Target type	EOA	
	Dist. origin/target [m]	4000	
	Initial speed [km/h]	120	
	Distance EOA/SvL [m]	0	
<b>National values</b>	Q_NVSBTSMPerm	Nein	
	Q_NVGUIPerm	Nein	
	Q_NVINHSMICPerm	Ja	
<b>Brake parameters (lambda)</b>	Brake percentage for EB	60	
	A_SB01 / A_SB12 [m/s <sup>2</sup> ]	-	
	A_brake_normal_service_0	V	-
		AD	-
<b>Integrated correction factors</b>	Kv_int (V)	Siehe nationale Werte aus [DB16a]	
	Kr_int (L)	Siehe nationale Werte aus [DB16a]	
	Kt_int	Siehe nationaler Wert aus [DB16a]	

**Tab. B-10: Zug mit dem längsten anzunehmenden Bremsweg auf BÜ-Strecken**

## Anhang C: Übersicht über die Variablen des ETCS-Bremssmodells

A_brake_emergency	Schnellbremsverzögerung
A_brake_safe	Sichere Schnellbremsverzögerung
A_brake_service	Betriebsvollbremsverzögerung
A_NVP12	untere Grenze der max. Schnellbremsverzögerung
A_NVP23	obere Grenze der max. Schnellbremsverzögerung
Emergency Brake Confidence Level (EBCL)	Schnellbremsvertrauensniveau
Kdry_rst (EBCL,v)	Korrekturfaktor für Gamma-Züge
Kr_int (l)	Zuglängenabhängiger Korrekturfaktor
Kt_int	Korrekturfaktor für die Bremsaufbauzeit
Kv_int (v)	Geschwindigkeitsabhängiger Korrekturfaktor
Kwet_rst (v)	Korrekturfaktor für Gamma-Züge
$\lambda$	Bremshundertstel
T_be	Sichere Bremsaufbauzeit
T_brake_emergency	Schnellbremsaufbauzeit
T_brake_service	Betriebsbremsaufbauzeit
T_driver	Reaktionszeit des Tf

**Tab. C-1: Wichtige Variablen der ETCS-Bremssmodelle**

## Anhang D: Schaubilder zu den Parametern der ETCS-Bremskurven

Nachfolgende Grafiken stellen nach dem Bottom-Up-Prinzip die Einflussparameter der ETCS-Bremskurven anschaulich dar. So ist schnell erkenntlich, welche Werte in die Berechnung der jeweiligen Bremskurven einfließen. In der obersten Ebene stehen die Grundwerte, deren Größe entweder ein fester (ETCS-)Wert ist, zugindividuell auf dem Fahrzeuggerät gespeichert ist oder durch den Infrastrukturbetreiber selbst gewählt werden kann. Somit kann anhand der Schaubilder einfach analysiert werden, welche Stell-schrauben bei jeder Bremskurve dem Infrastrukturbetreiber bzw. Eisenbahnverkehrs-unternehmen zur Verfügung stehen, um die Steilheit der ETCS-Bremskurven zu beein-flussen. Teilweise bestehende Unterschiede zwischen Gamma- und Lambda-Zügen sind zu beachten.

### Schnellbremsablaufkurve (EBD)

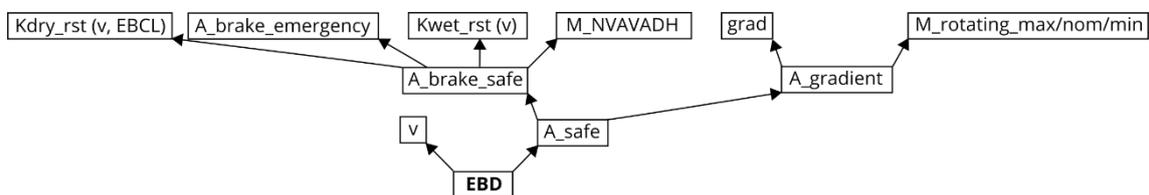


Abb. D-1: Parameter der EBD (Gamma)

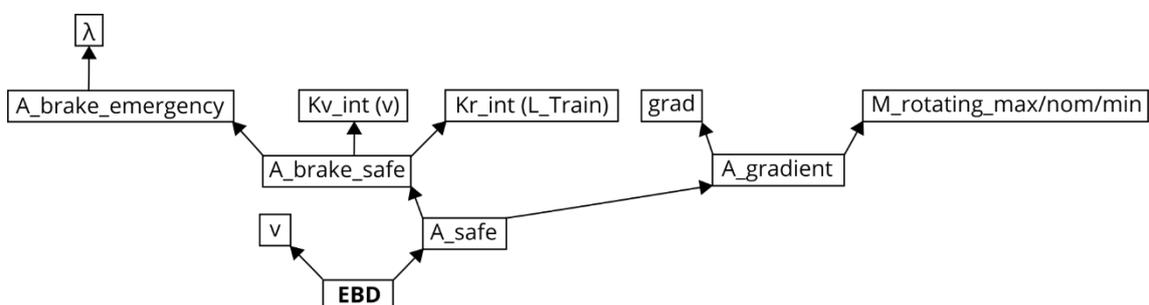


Abb. D-2: Parameter der EBD (Lambda)



### Vollbremsablaufkurve (SBD)

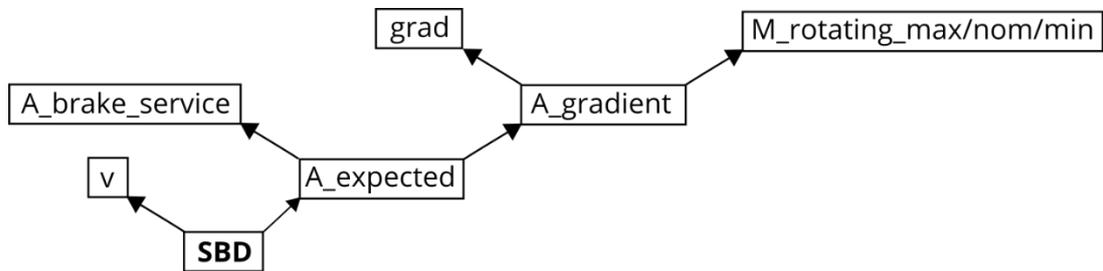


Abb. D-5: Parameter der SBD (Gamma)

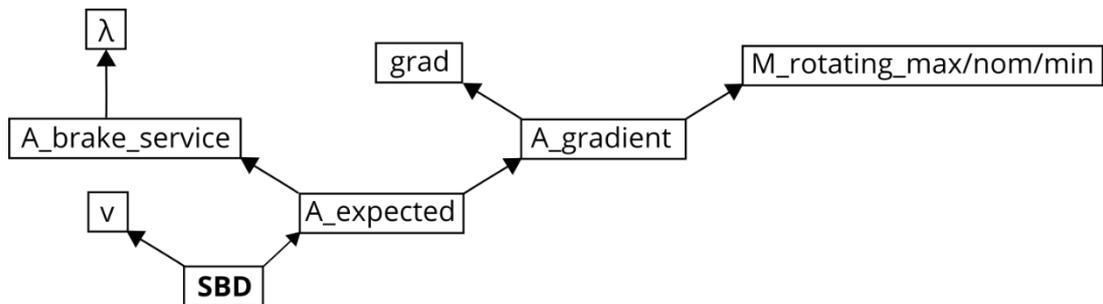


Abb. D-6: Parameter der SBD (Lambda)

### Vollbremseinsatzkurve 1 (SBI1)

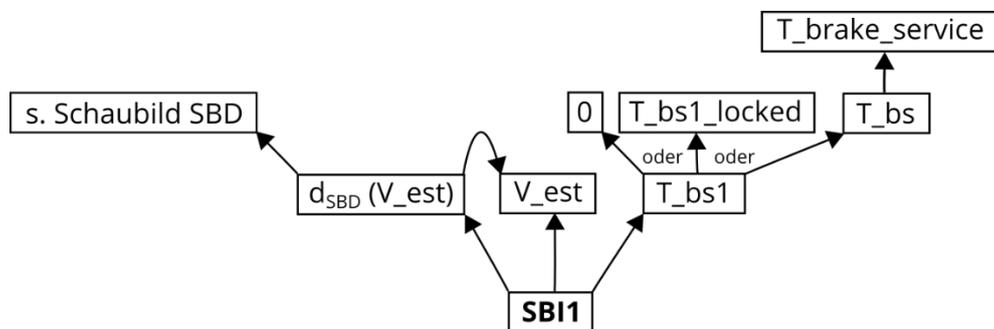


Abb. D-7: Parameter der SBI1 (Gamma)

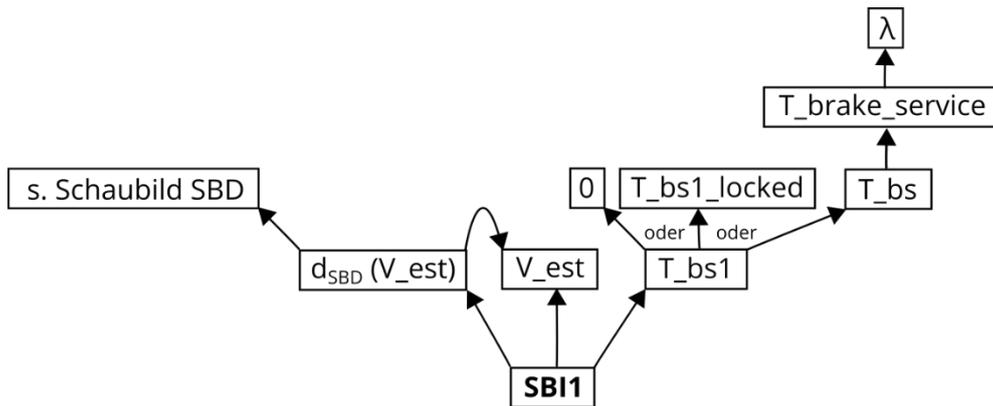


Abb. D-8: Parameter der SBI1 (Lambda)

### Vollbremseinsatzkurve 2 (SBI2)

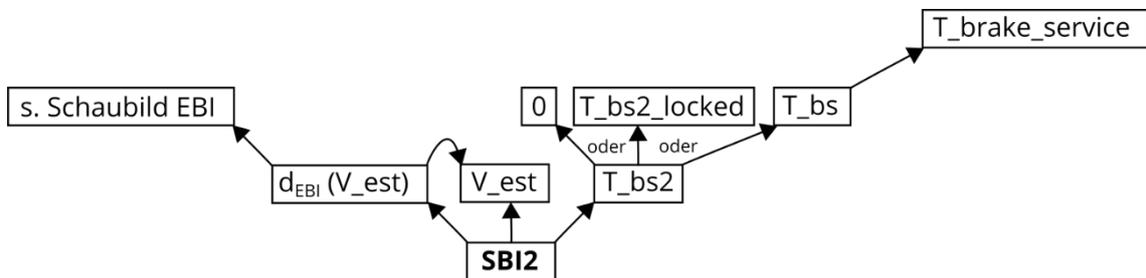


Abb. D-9: Parameter der SBI2 (Gamma)

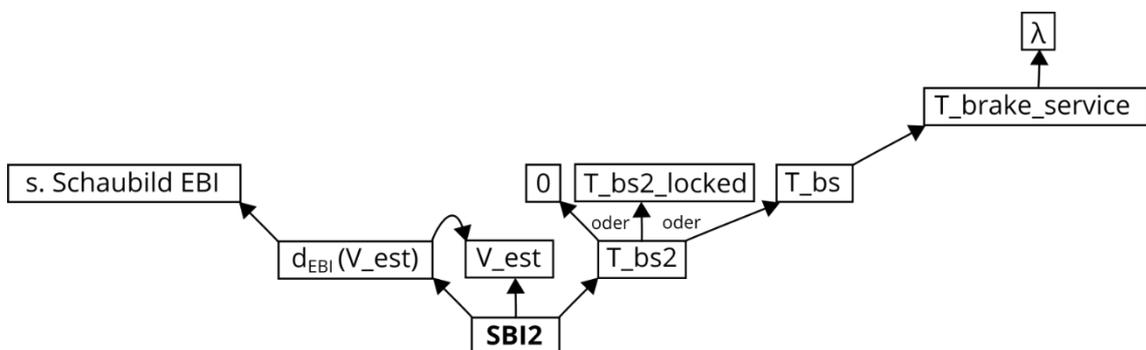


Abb. D-10: Parameter der SBI2 (Lambda)

### Vollbremseinsatzkurve (SBI)

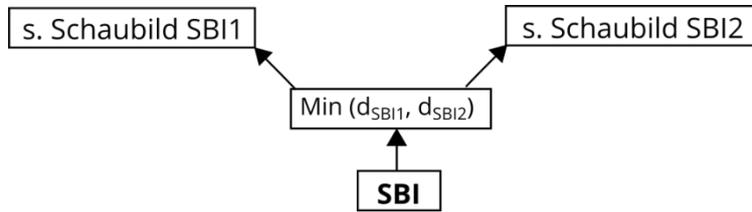


Abb. D-11: Parameter der SBI (Gamma und Lambda)

### Warnkurve (W)

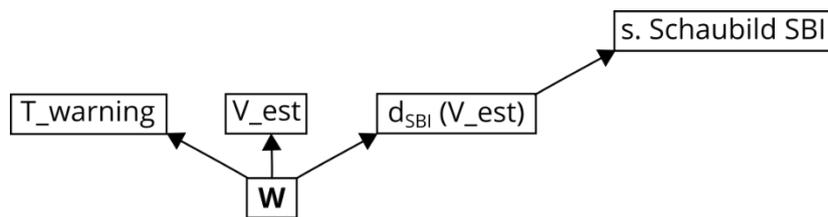


Abb. D-12: Parameter der Warning Curve (Gamma und Lambda)

### Sollkurve (P)

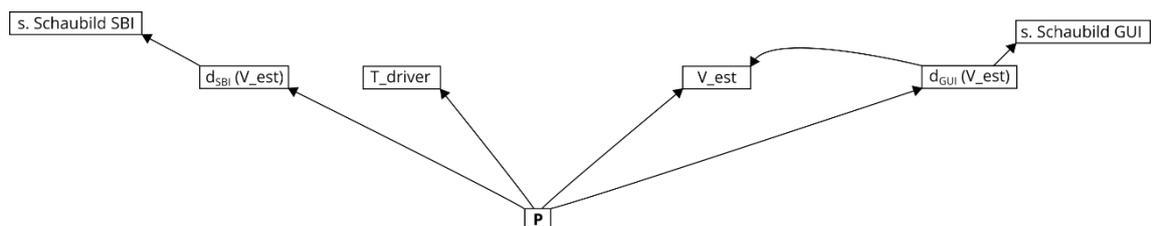


Abb. D-13: Parameter der Permitted Curve (Gamma und Lambda)

## Führungskurve (GUI)

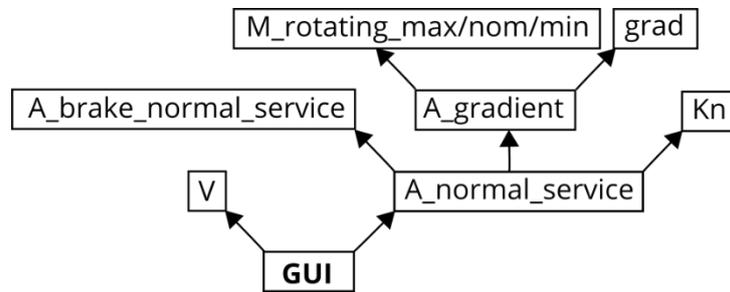


Abb. D-14: Parameter der GUI (Gamma)

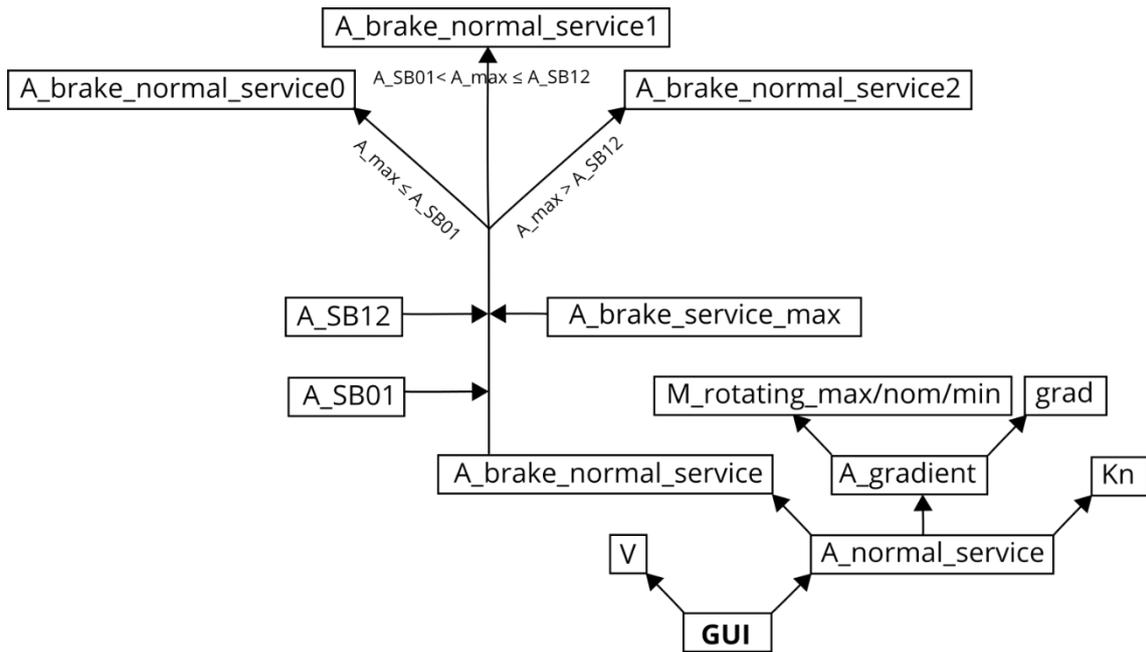


Abb. D-15: Parameter der GUI (Lambda)

## Bremsankündigungskurve (I)

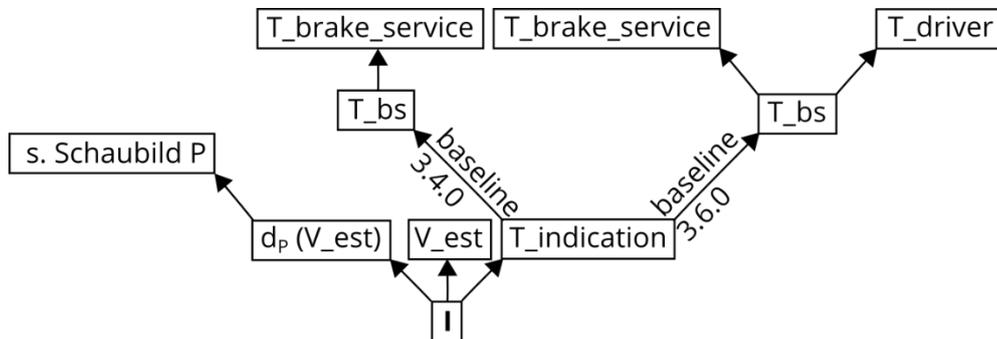


Abb. D-16: Parameter der Indication (Gamma)

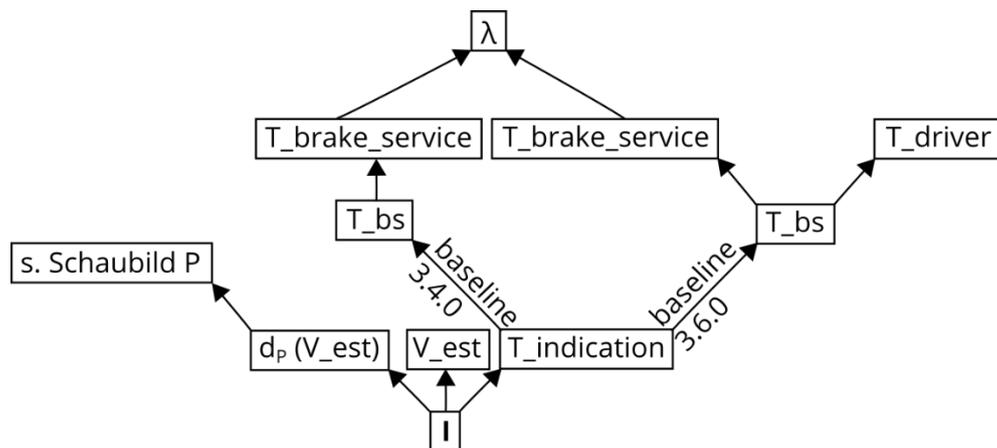


Abb. D-17: Parameter der Indication (Lambda)

## Anhang E: Weitere Vergleiche der Bremskurven verschiedener Zugbeeinflussungssysteme

Nachfolgende Abbildungen sind den Berechnungen aus Abschnitt 4.5 zuzuordnen. Es wurden verschiedene Musterzüge definiert, die meist einen Grenzfall darstellen und nur selten so vorkommen werden. Sie stellen somit die worst-case Szenarien dar. Es wurde Zugart, Bremsstellung, Bremshundertstel bzw. Bremsausgangsgeschwindigkeit variiert. Es werden nur die jeweils relevanten Kurven dargestellt. Für die Berechnung der ETCS-Bremskurven gelten die Eingangsparameter aus Anhang B, Tab. B-9

### Reisezug, 300 km/h, 240 Brh

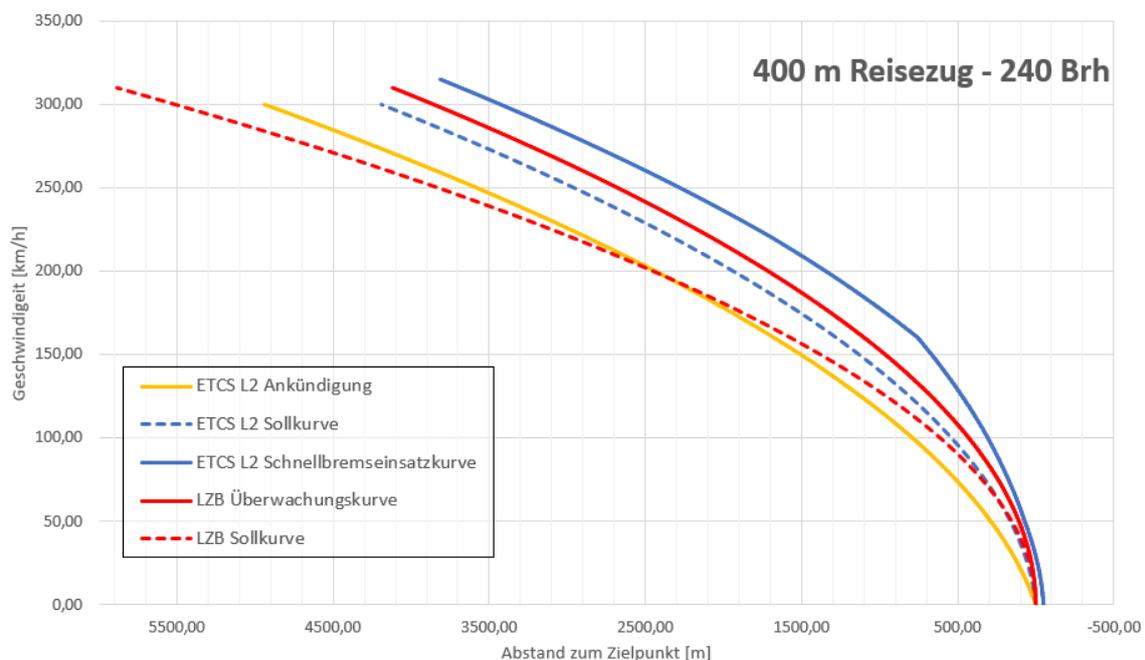


Abb. E-1: Vergleich LZB - ETCS L2: 400 m Reisezug mit 240 Brh, 300 km/h

### Reisezug, 200 km/h, 220 Brh

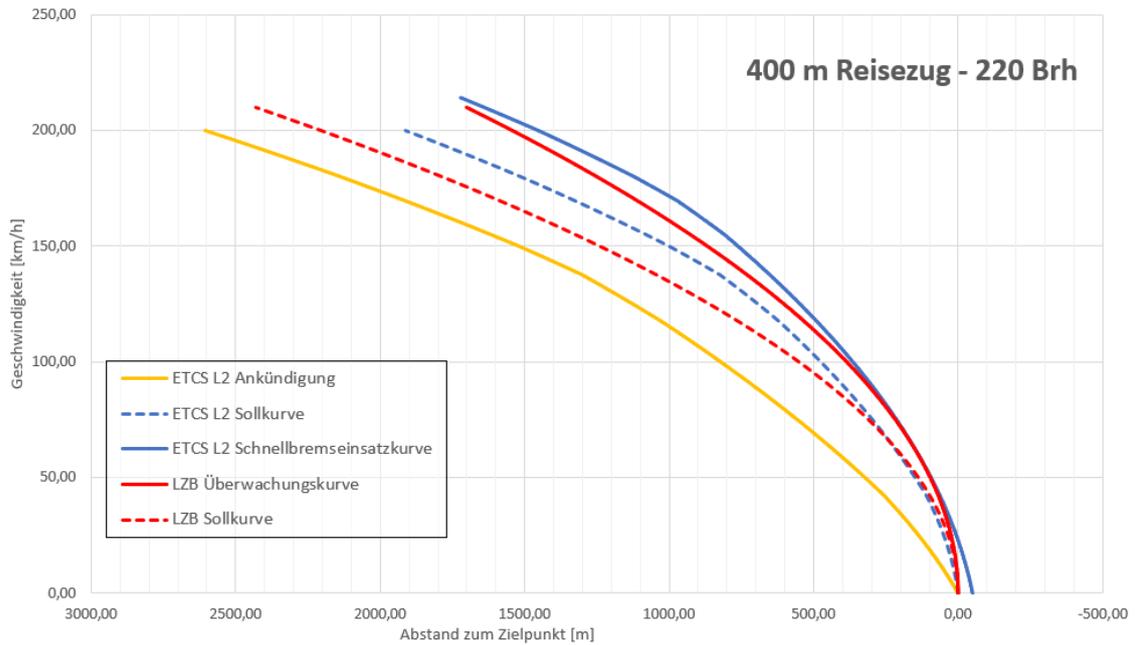


Abb. E-2: Vergleich LZB - ETCS L2: 400 m Reisezug mit 220 Brh, 200 km/h

### Reisezug, 160 km/h, 190 Brh

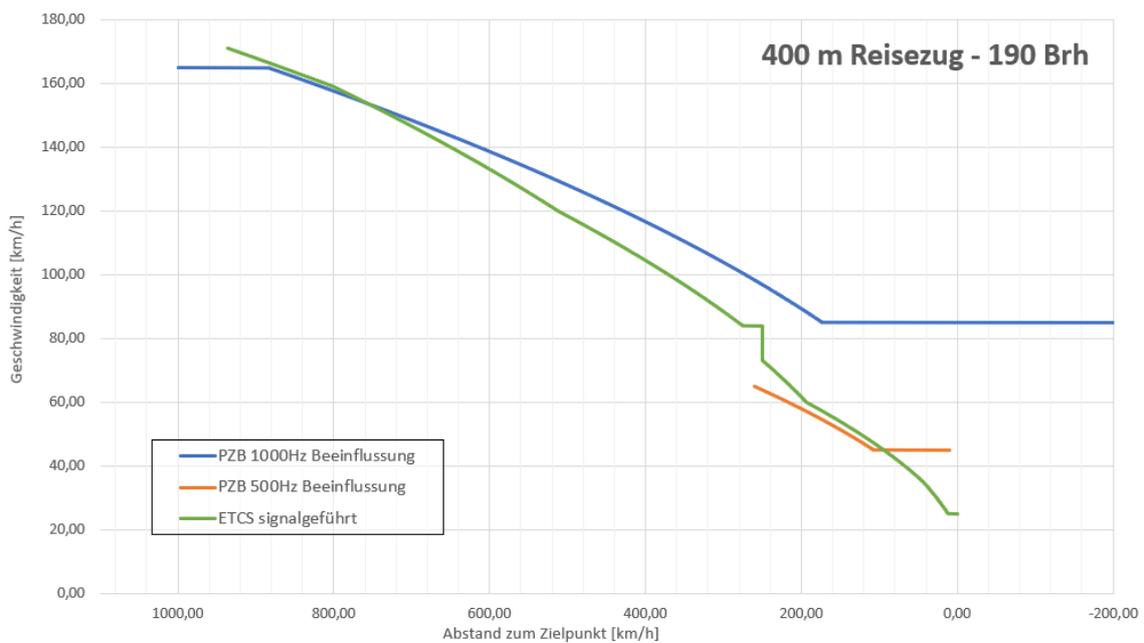


Abb. E-3: Vergleich PZB - ESG: 400 m Reisezug mit 190 Brh, 160 km/h

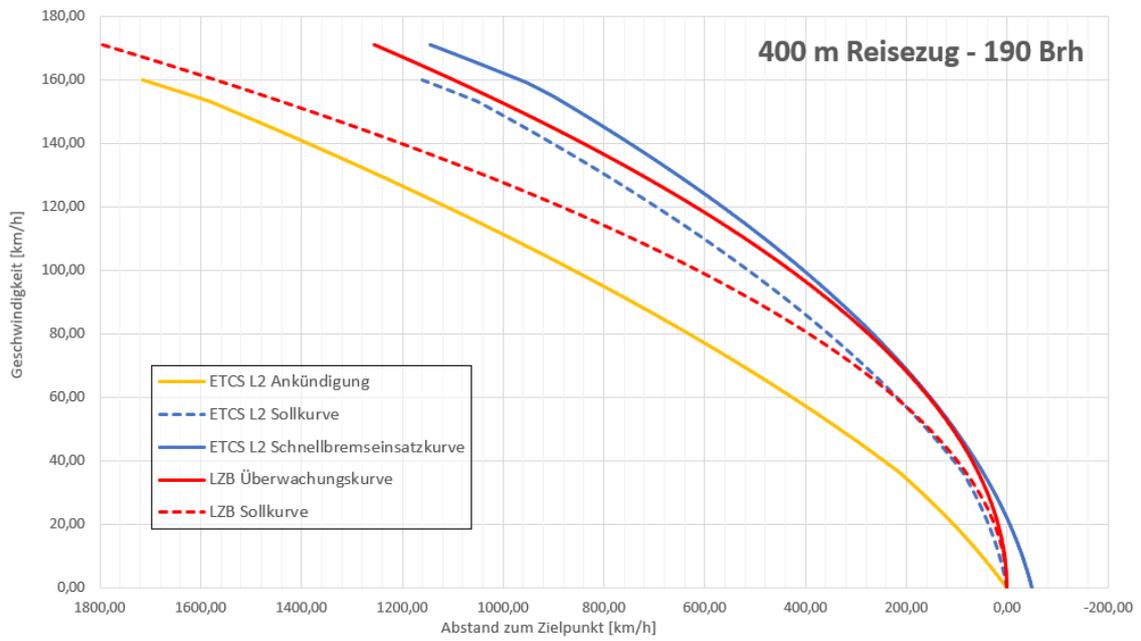


Abb. E-4: Vergleich LZB – ETCS L2: 400 m Reisezug mit 190 Brh, 160 km/h

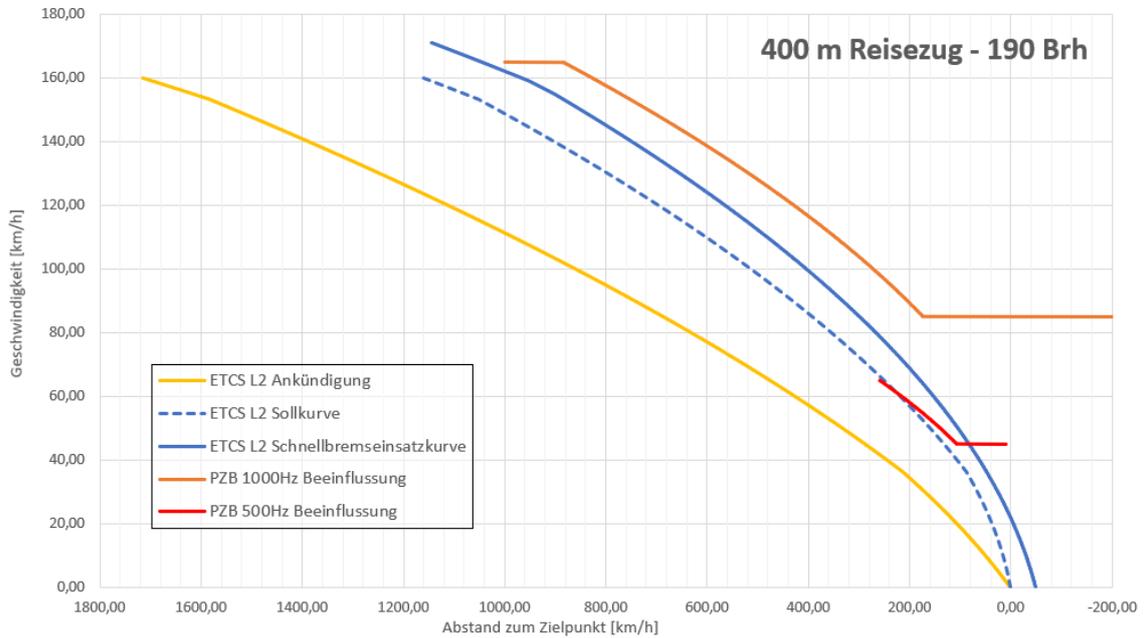


Abb. E-5: Vergleich PZB – ETCS L2: 400 m Reisezug mit 190 Brh, 160 km/h

### Reisezug, 160 km/h, 220 Brh

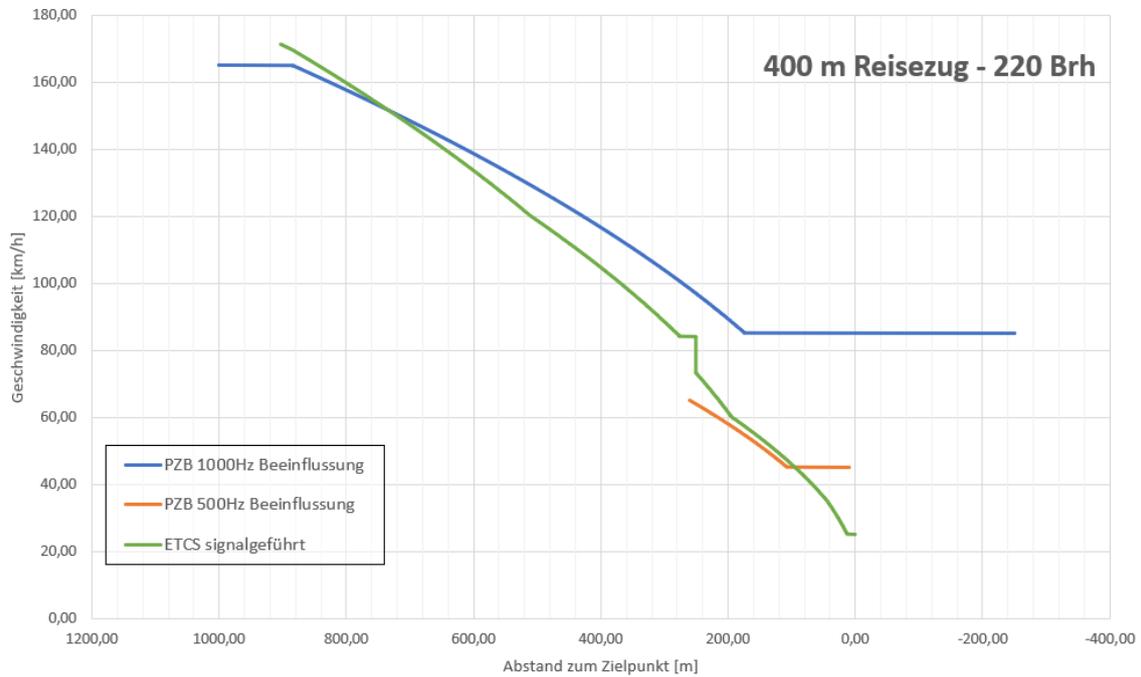


Abb. E-6: Vergleich PZB – ESG: 400 m Reisezug mit 220 Brh, 160 km/h

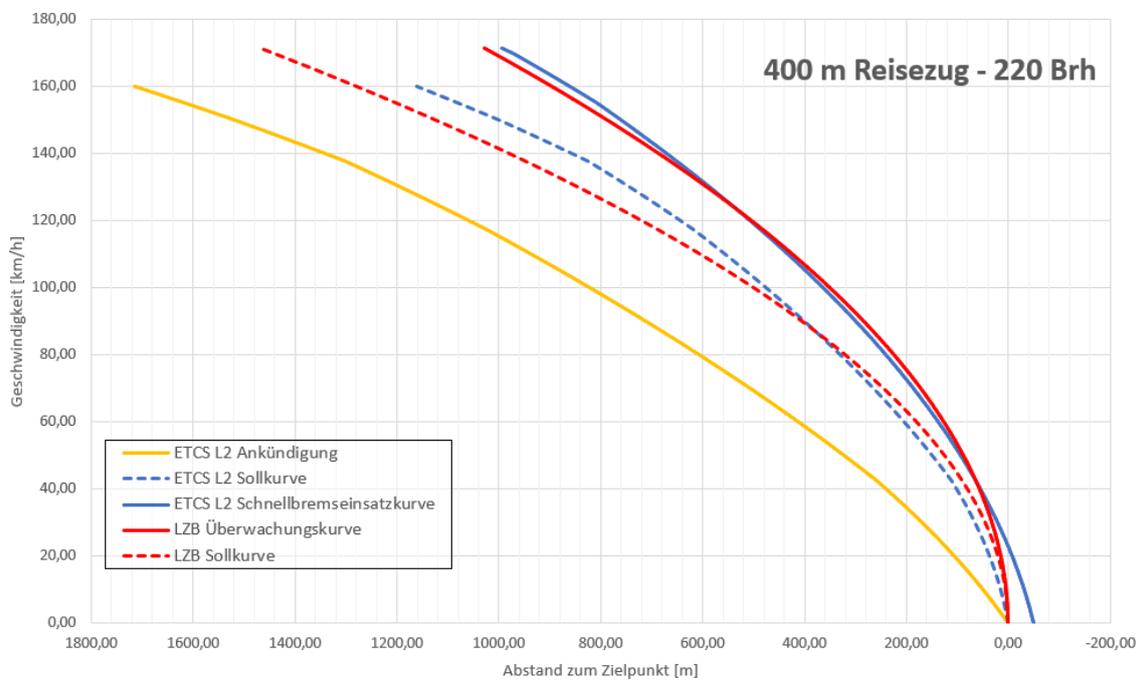


Abb. E-7: Vergleich LZB – ETCS L2: 400 m Reisezug, 220 Brh, 160 km/h

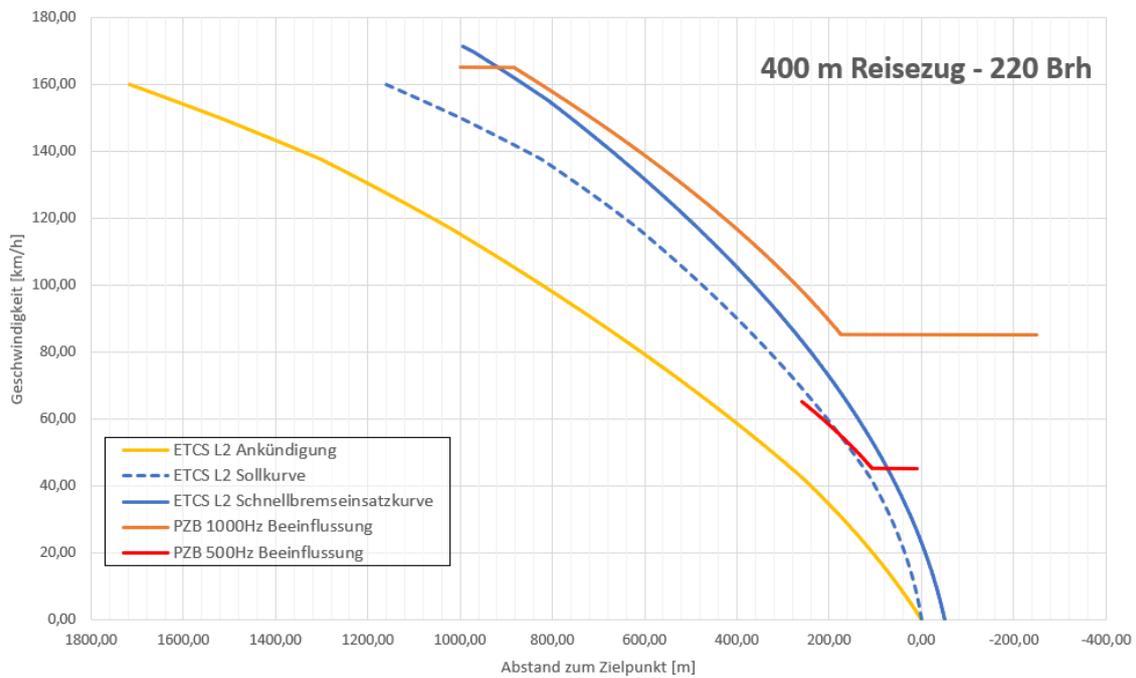


Abb. E-8: Vergleich PZB – ETCS L2: 400 m Reisezug mit 220 Brh, 160 km/h

**Reisezug, 120 km/h, 90 Brh**

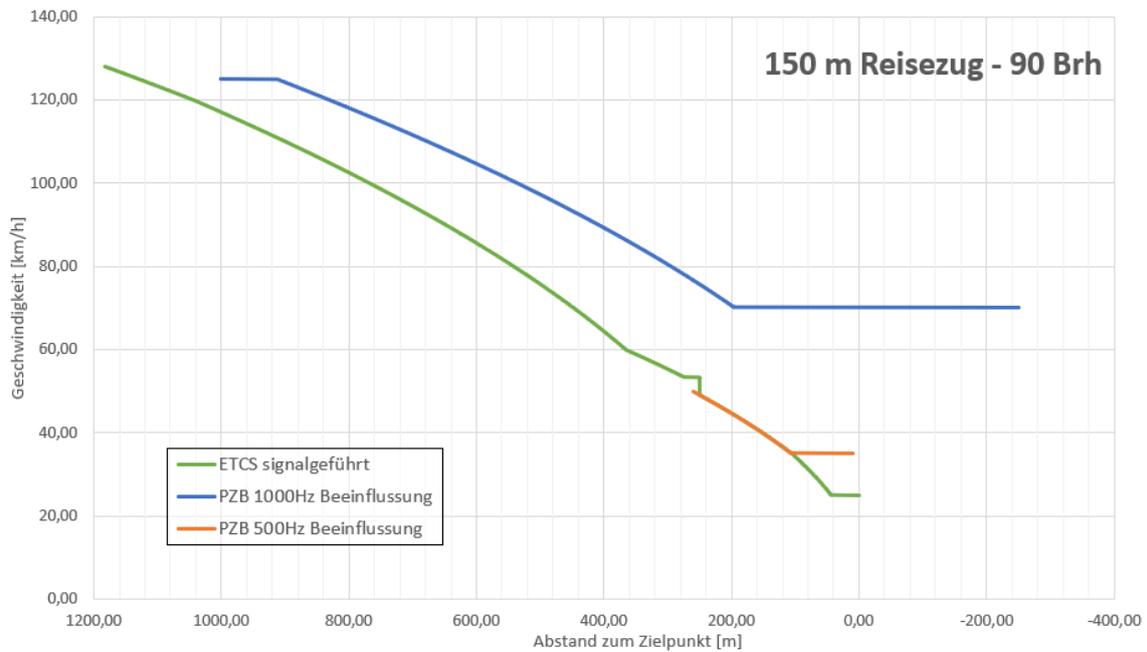


Abb. E-9: Vergleich PZB – ESG: 150 m Reisezug mit 90 Brh, 120 km/h

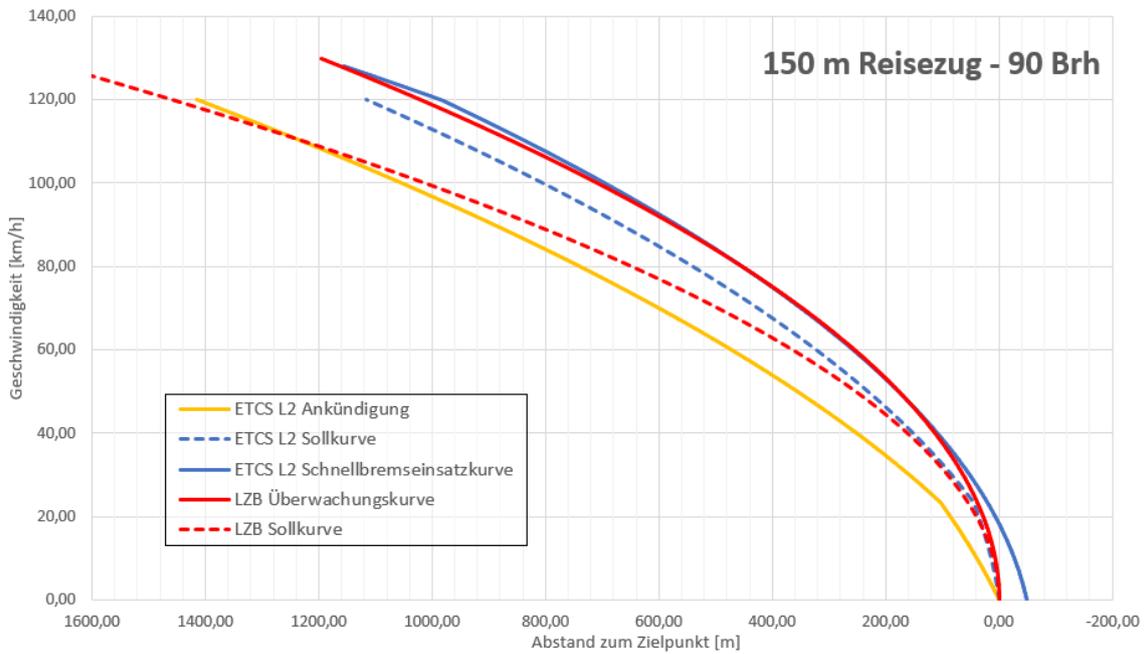


Abb. E-10: Vergleich LZB – ETCS L2: 150 m Reisezug mit 90 Brh, 120 km/h

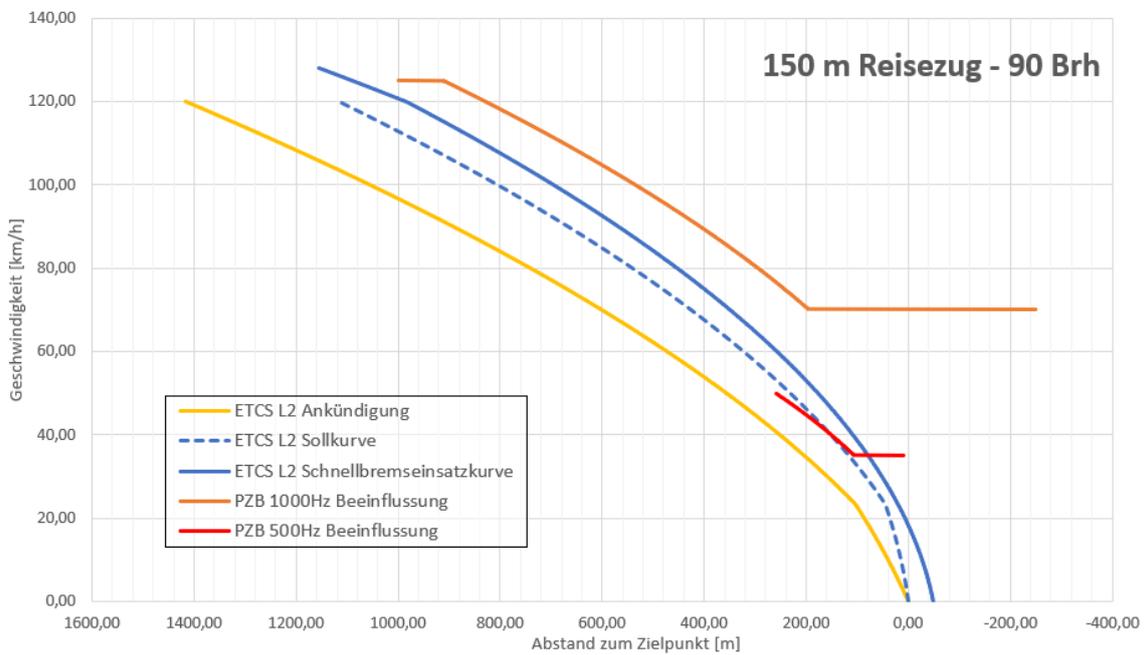


Abb. E-11: Vergleich PZB – ETCS L2: 150 m Reisezug mit 90 Brh, 120 km/h

### Reisezug, 120 km/h, 135 Brh

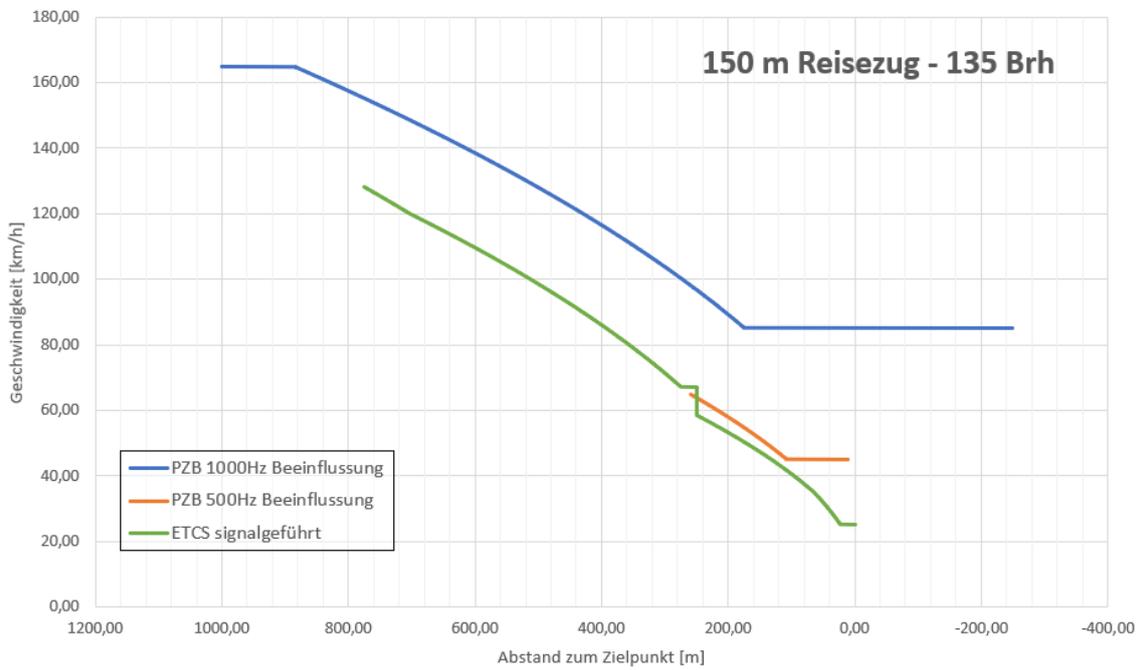


Abb. E-12: Vergleich PZB – ESG: 150 m Reisezug mit 135 Brh, 120 km/h

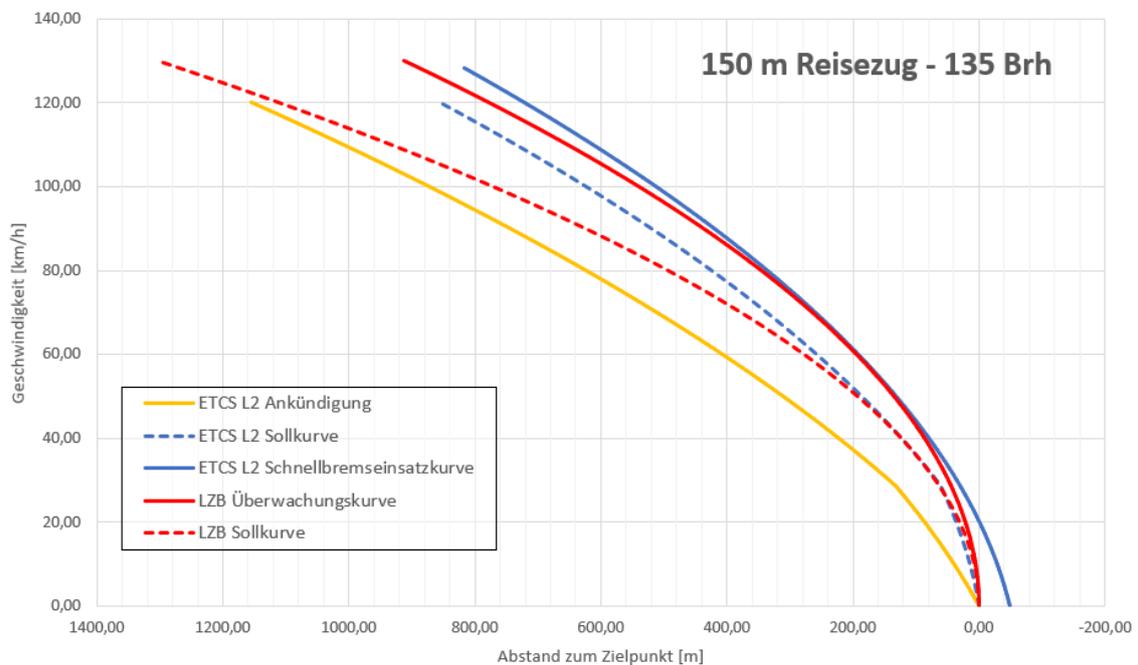


Abb. E-13: Vergleich LZB – ETCS L2: 150 m Reisezug mit 135 Brh, 120 km/h

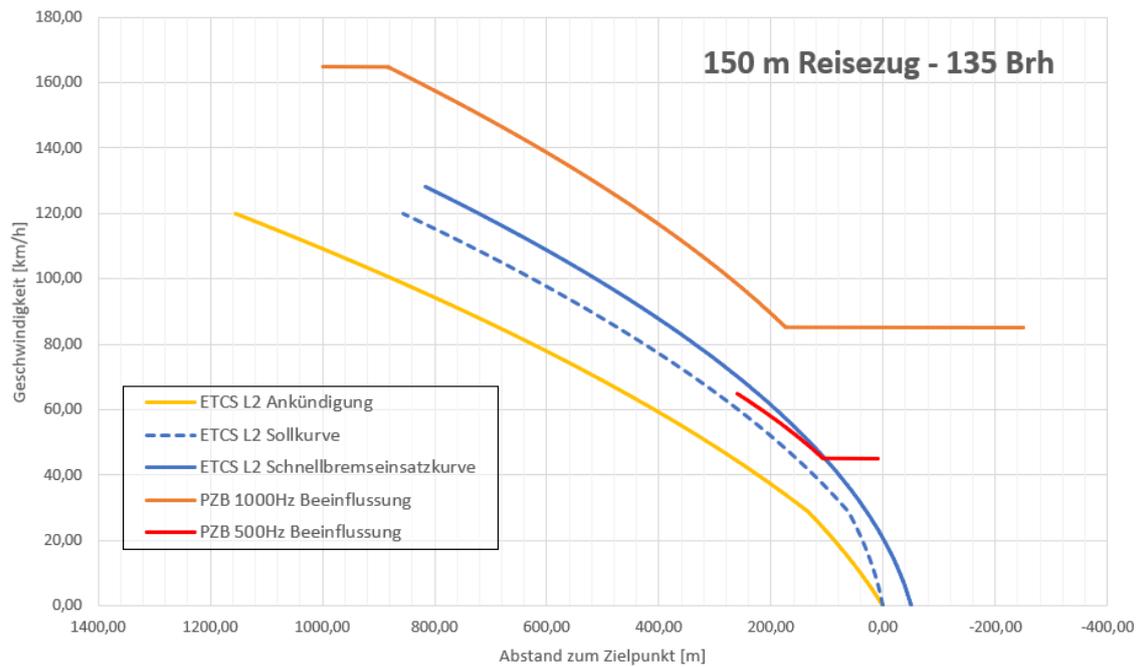


Abb. E-14: Vergleich PZB – ETCS L2: 150 m Reisezug mit 135 Brh, 120 km/h

**Güterzug (P), 120 km/h, 90 Brh**

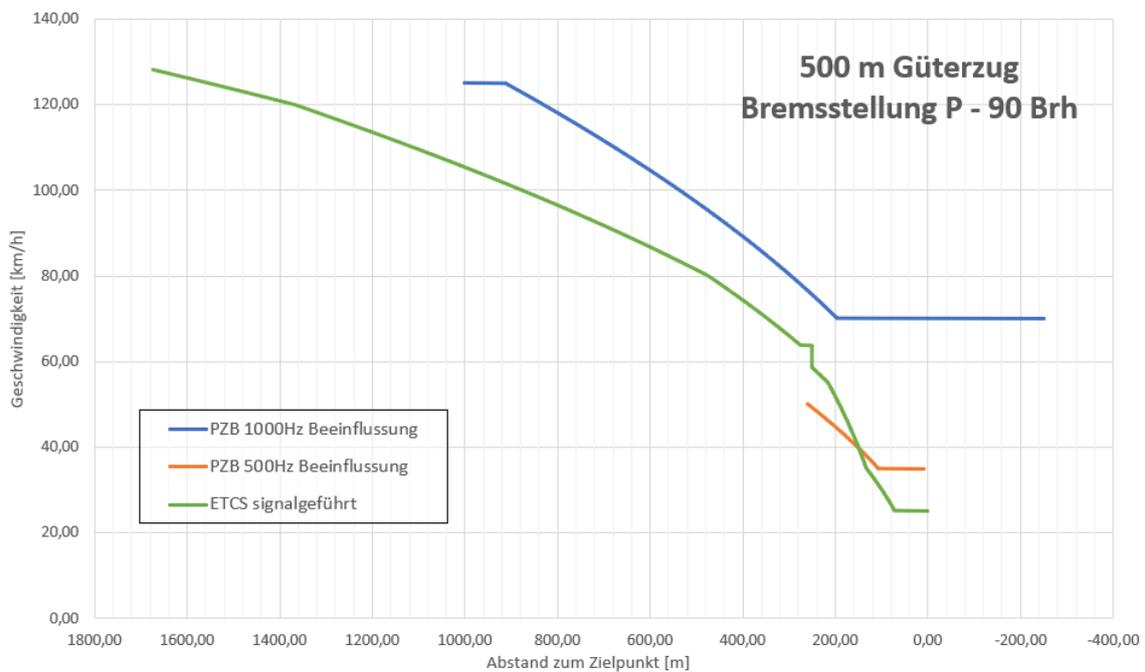


Abb. E-15: Vergleich PZB – ESG: 500 m Güterzug (P) mit 90 Brh, 120 km/h

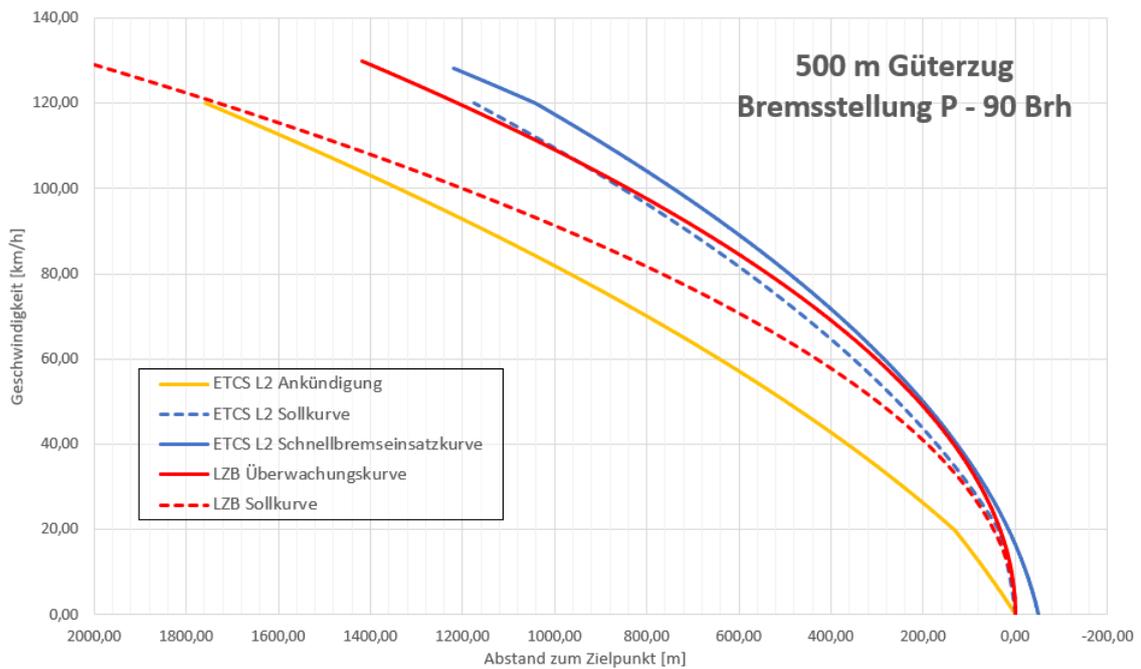


Abb. E-16: Vergleich LZB – ETCS L2: 500 m Güterzug (P) mit 90 Brh, 120 km/h

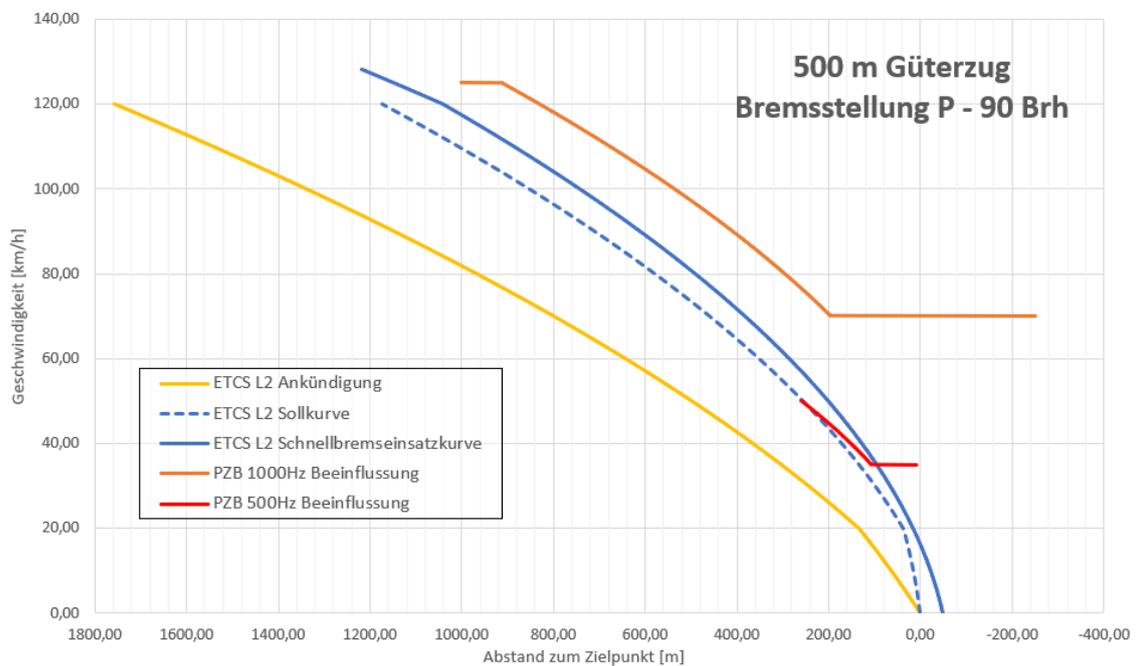


Abb. E-17: Vergleich PZB – ETCS L2: 500 m Güterzug (P) mit 90 Brh, 120 km/h

### Güterzug (P), 120 km/h, 110 Brh

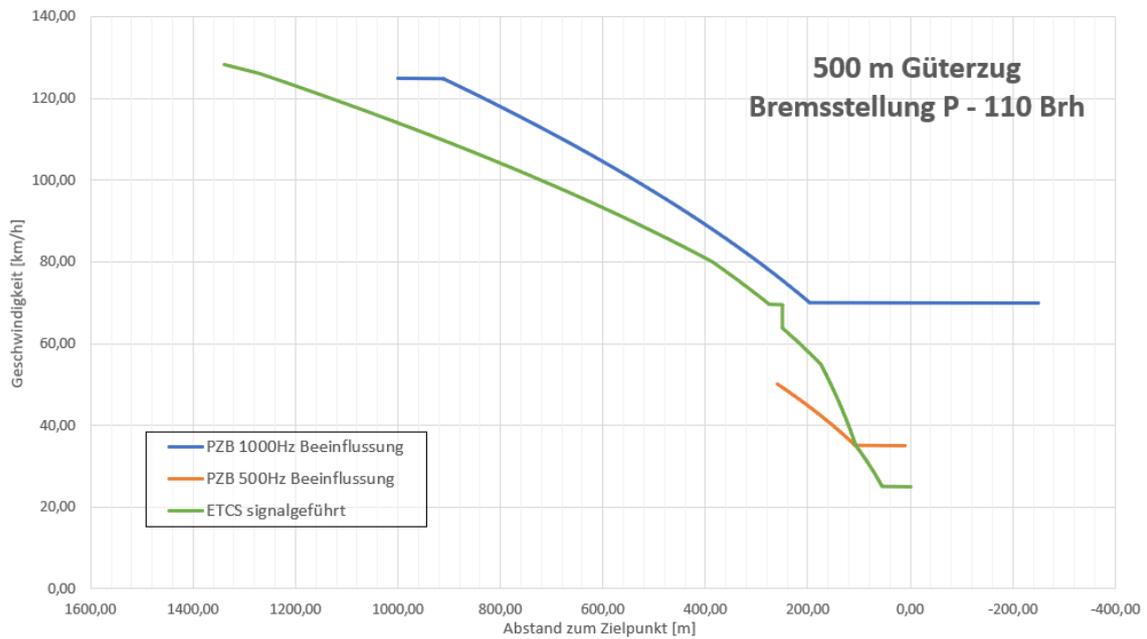


Abb. E-18: Vergleich PZB – ESG: 500 m Güterzug (P) mit 110 Brh, 120 km/h

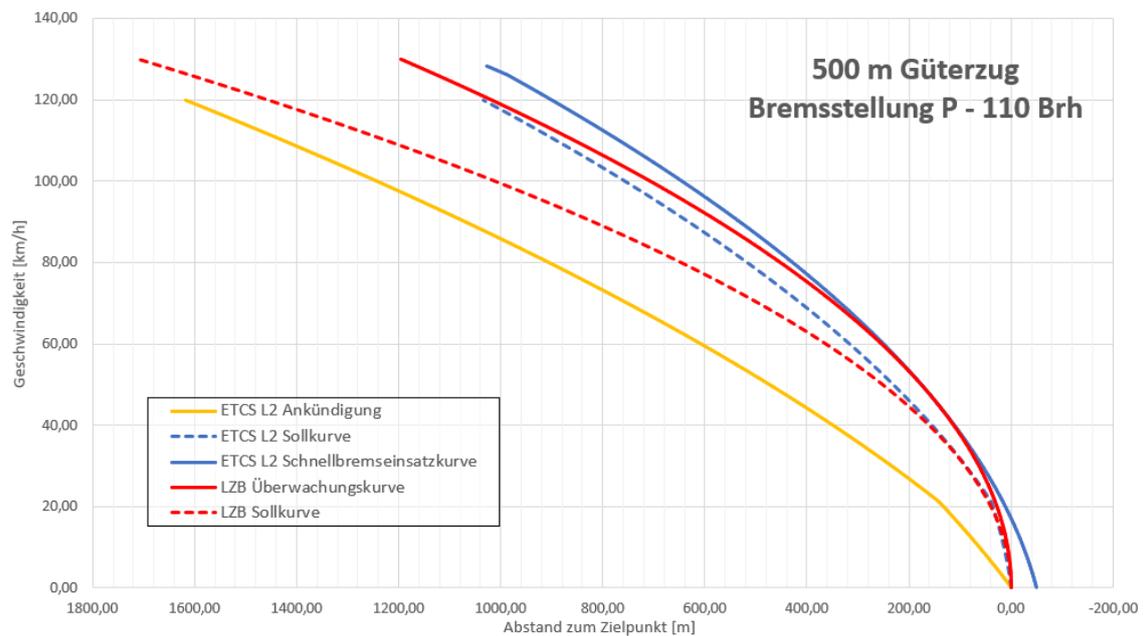


Abb. E-19: Vergleich LZB – ETCS L2: 500 m Güterzug (P) mit 110 Brh, 120 km/h

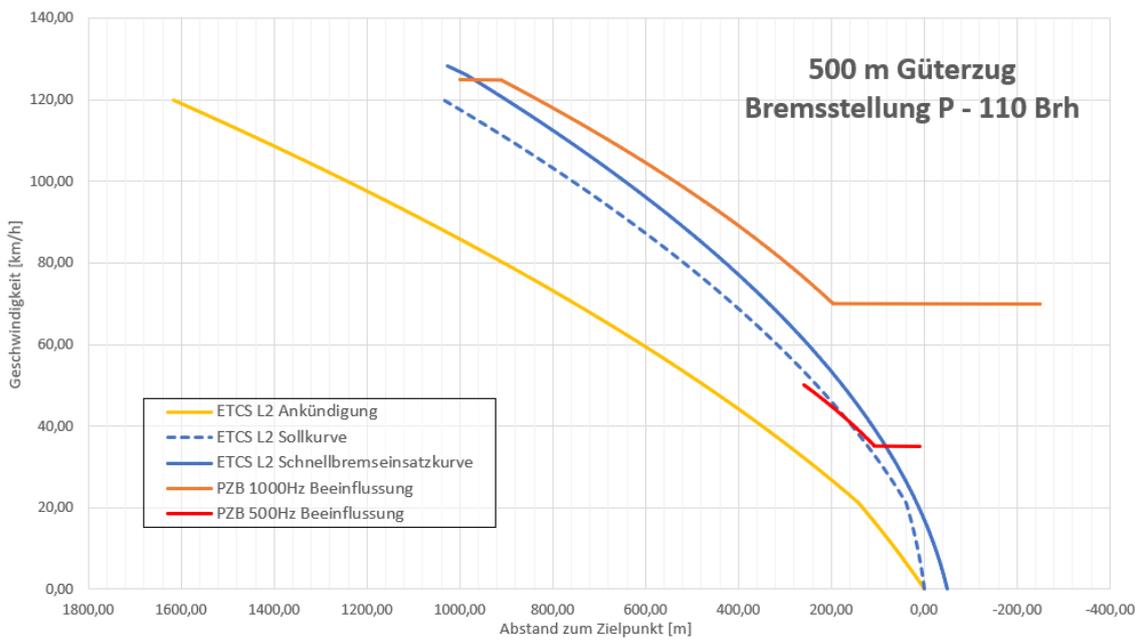


Abb. E-20: Vergleich PZB – ETCS L2: 500 m Güterzug (P) mit 110 Brh, 120 km/h

**Güterzug (P), 100 km/h, 60 Brh**

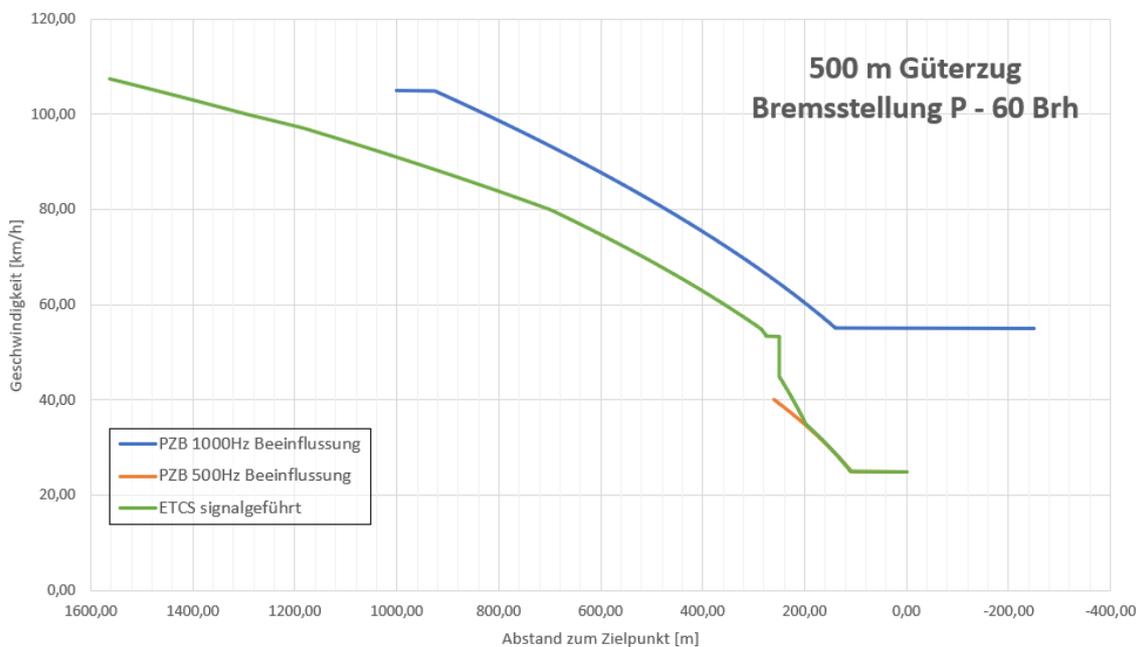


Abb. E-21: Vergleich PZB – ESG: 500 m Güterzug (P) mit 60 Brh, 100 km/h

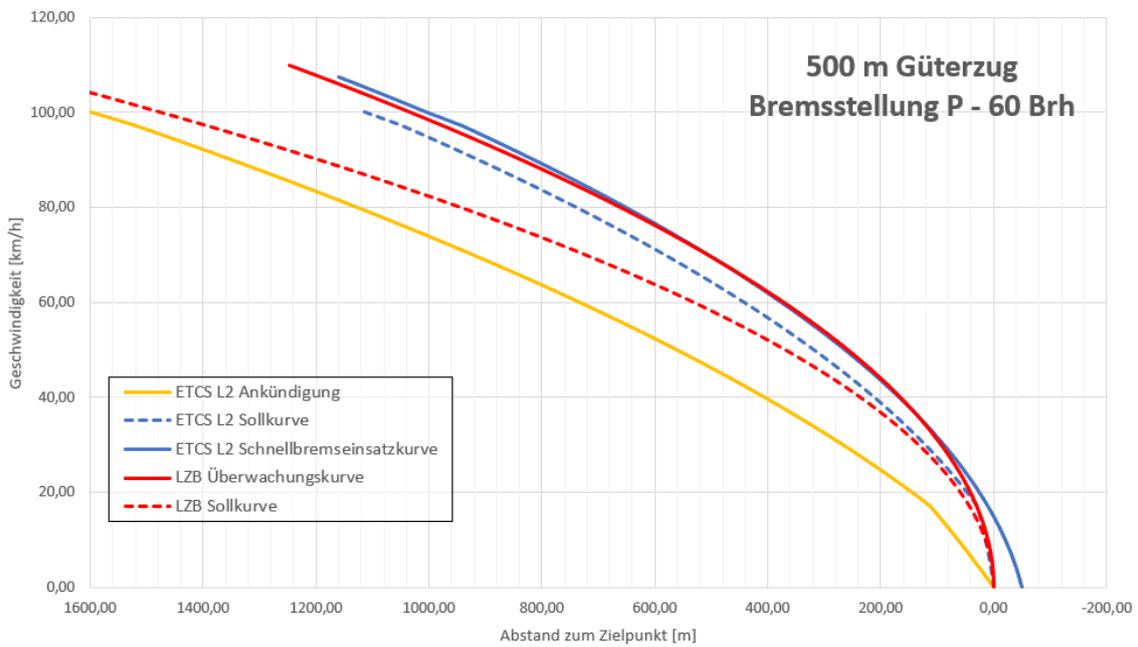


Abb. E-22: Vergleich LZW - ETCS L2: 500 m Güterzug (P) mit 60 Brh, 100 km/h

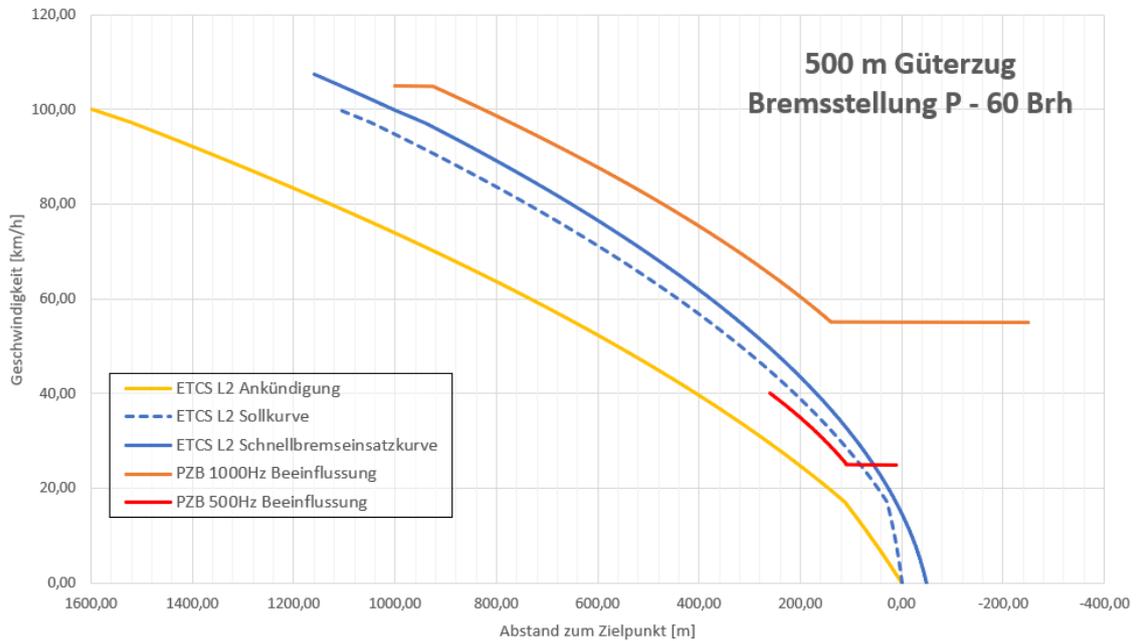


Abb. E-23: Vergleich PZB - ETCS L2: 500 m Güterzug (P) mit 60 Brh, 100 km/h

### Güterzug, (P), 100 km/h, 110 Brh

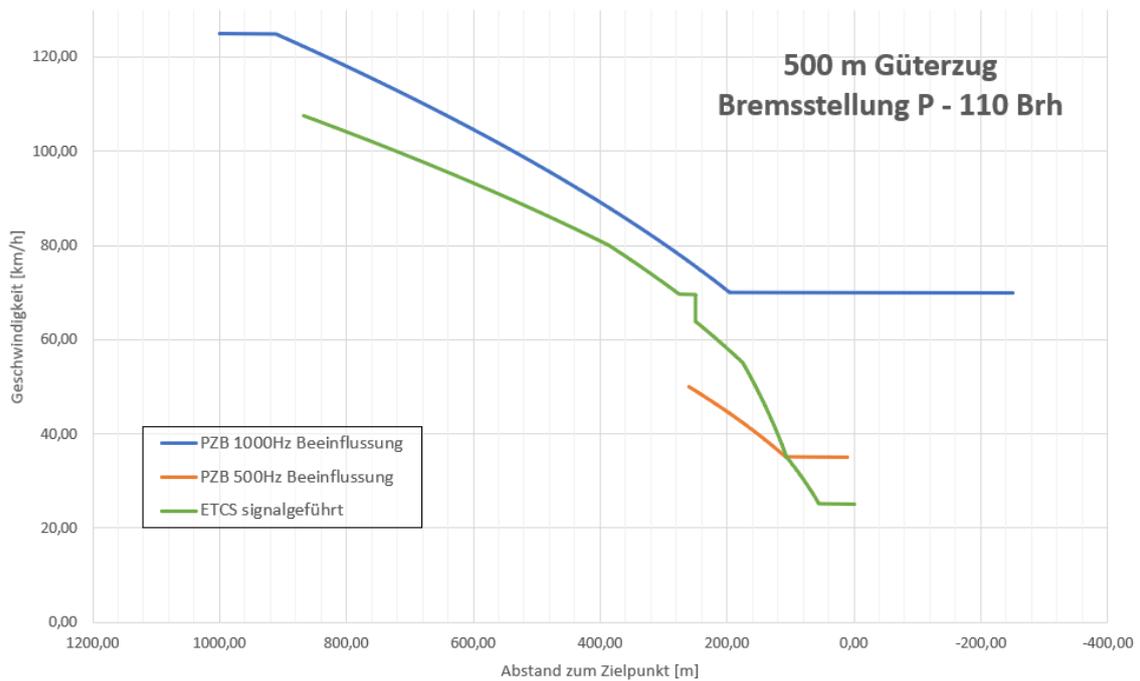


Abb. E-24: Vergleich PZB – ESG: 500 m Güterzug (P) mit 110 Brh, 100 km/h

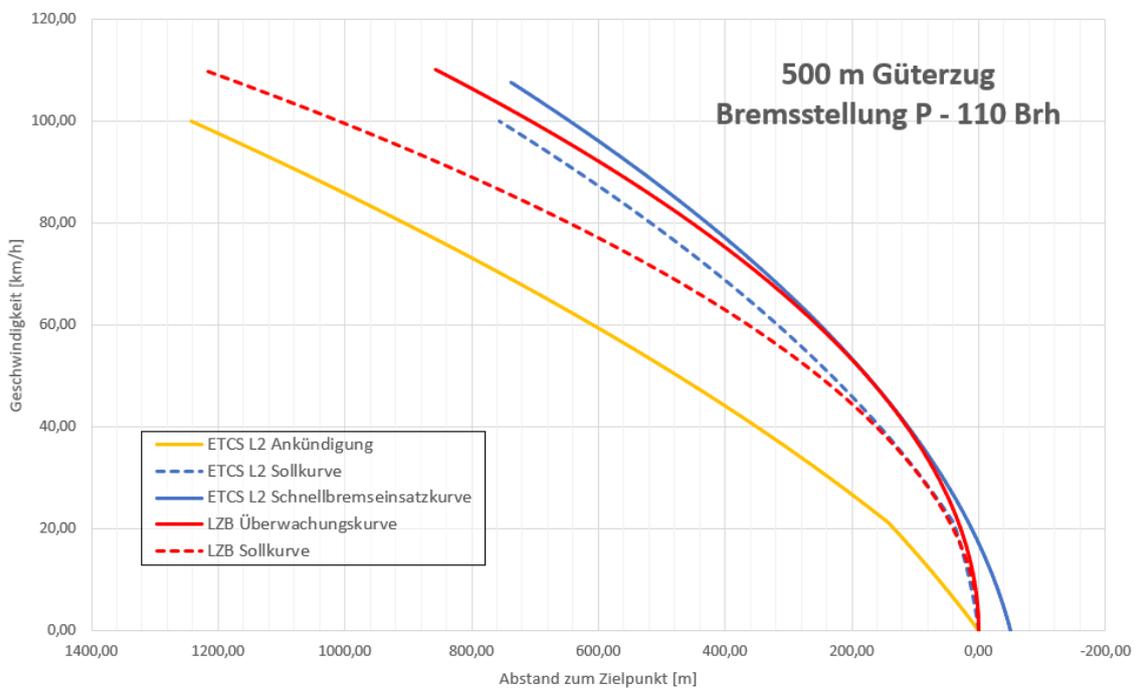


Abb. E-25: Vergleich LZW – ETCS L2: 500 m Güterzug (P) mit 110 Brh, 100 km/h

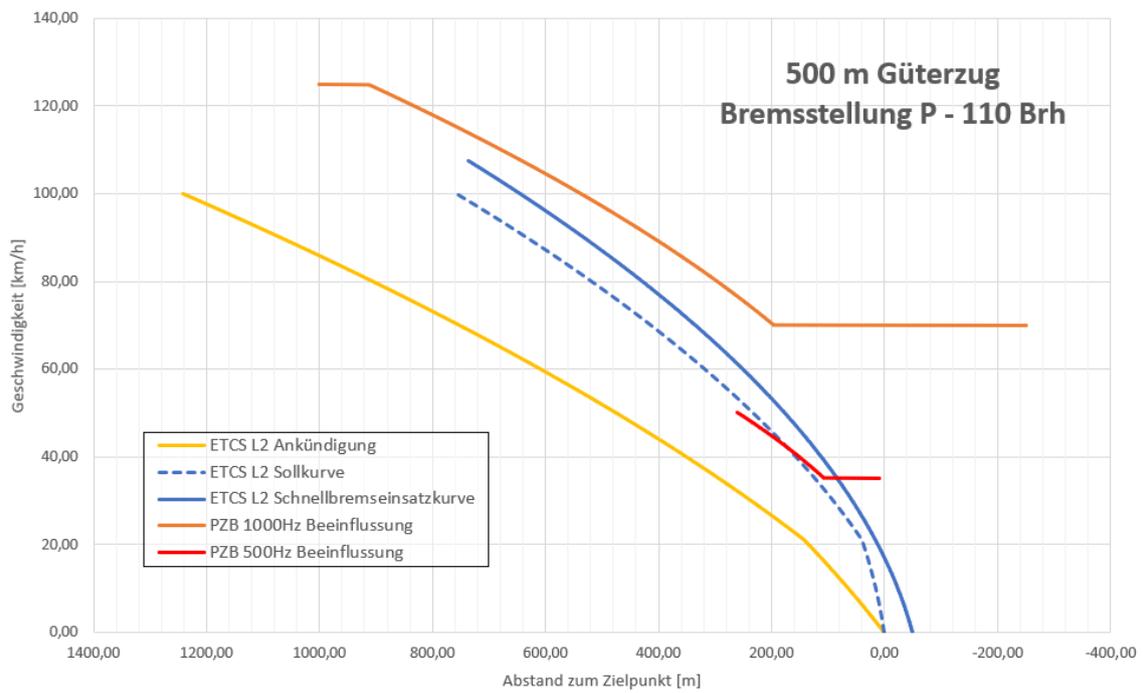


Abb. E-26: Vergleich PZB – ETCS L2: 500 m Güterzug (P) mit 110 Brh, 100 km/h

**Güterzug (G), 100 km/h, 80 Brh**

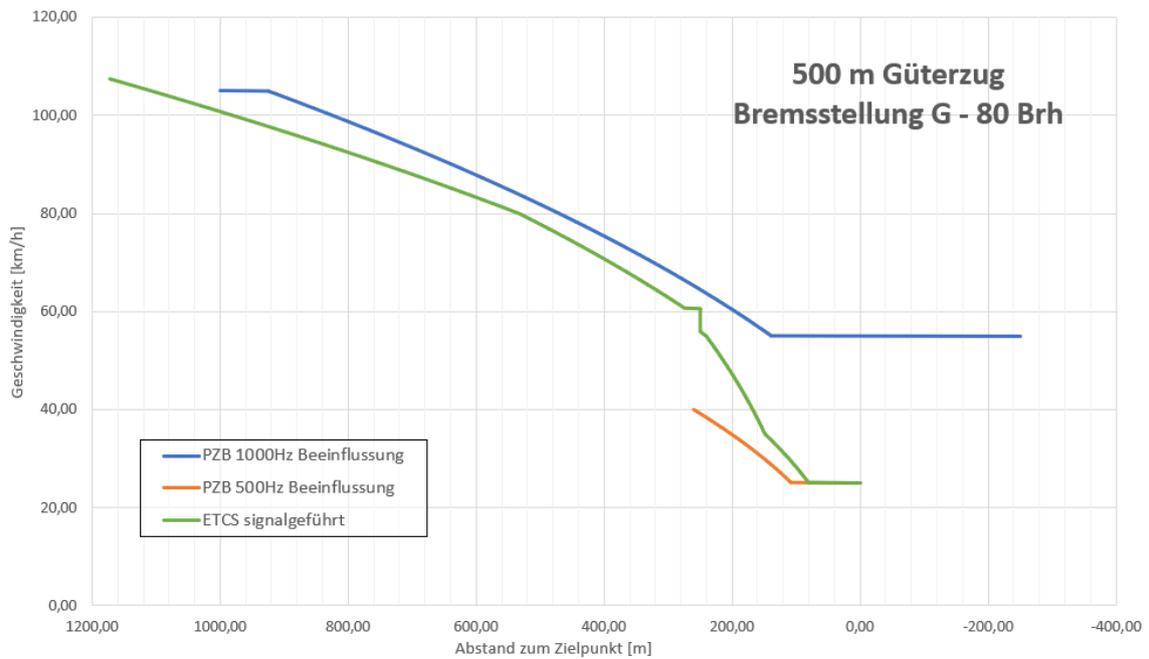


Abb. E-27: Vergleich PZB – ESG: 500 m Güterzug (G) mit 80 Brh, 100 km/h

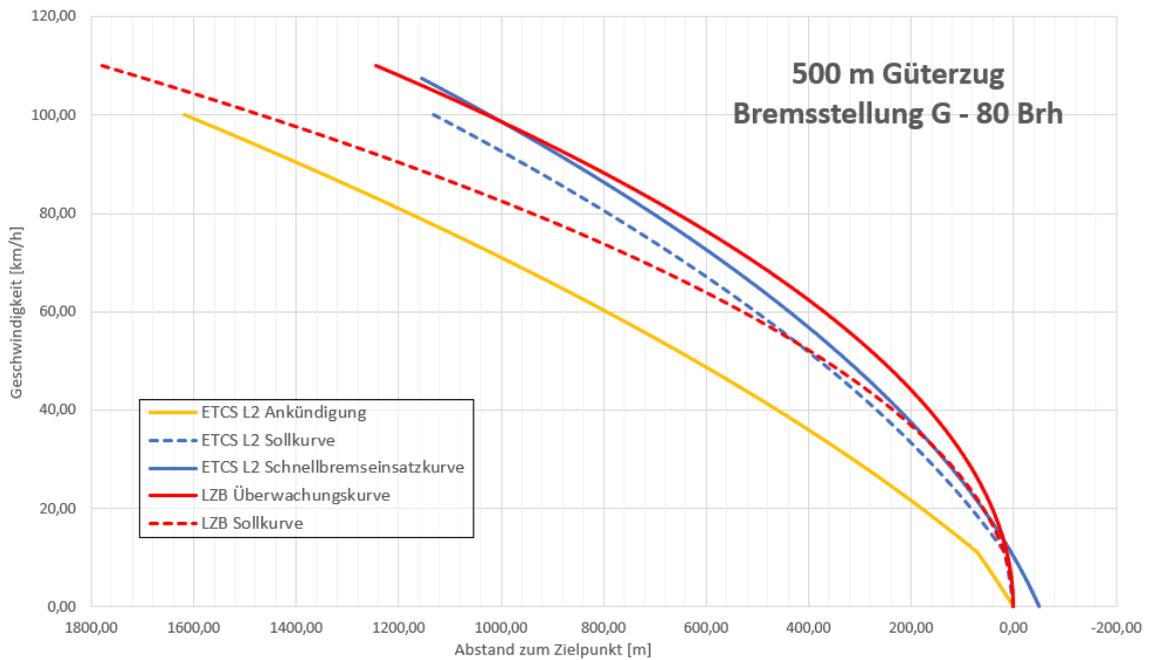


Abb. E-28: Vergleich LZB – ETCS L2: 500 m Güterzug (G) mit 80 Brh, 100 km/h

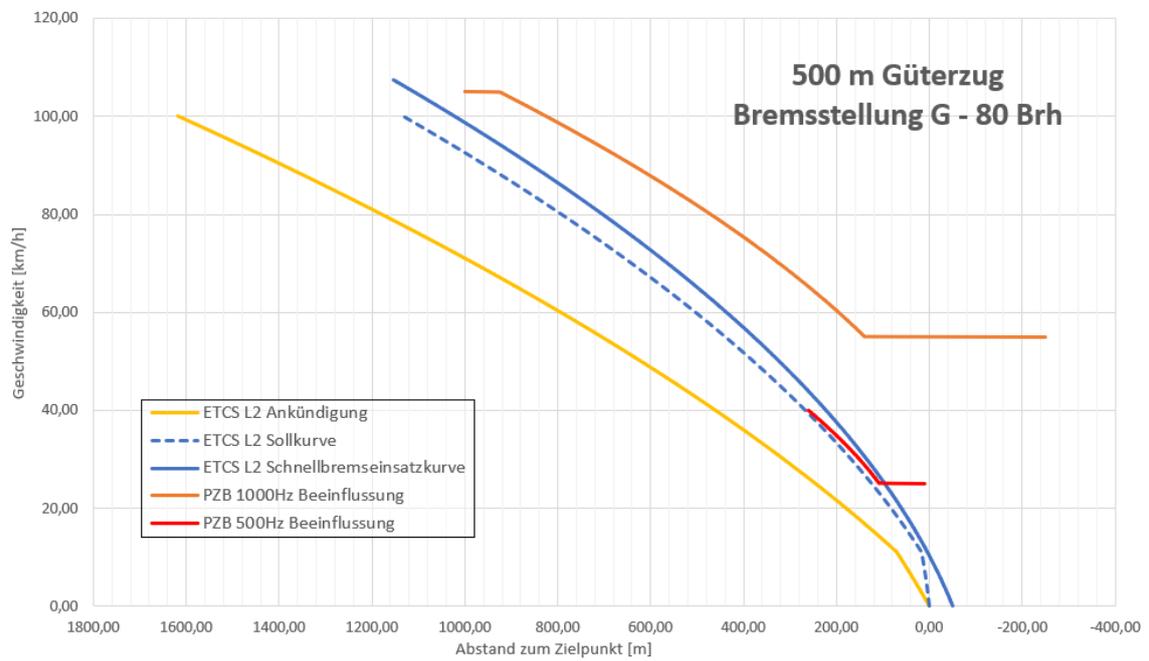


Abb. E-29: Vergleich PZB – ETCS L2: 500 m Güterzug (G) mit 80 Brh, 100 km/h

### Güterzug (G), 100 km/h, 100 Brh

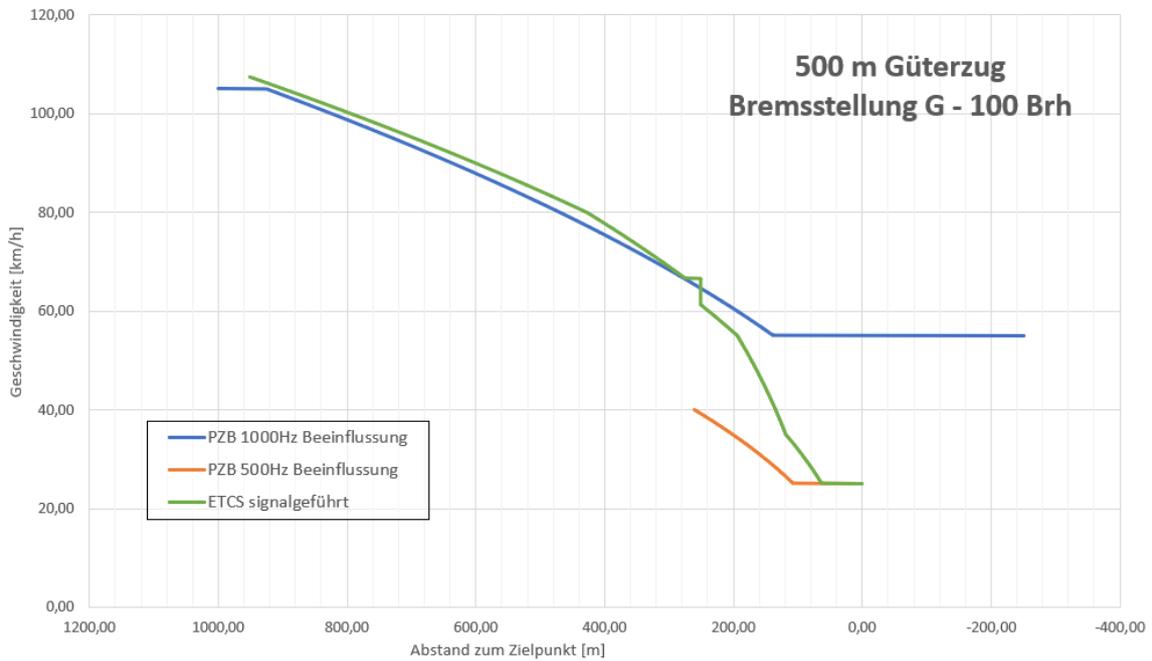


Abb. E-30: Vergleich PZB – ESG: 500 m Güterzug (G) mit 100 Brh, 100 km/h

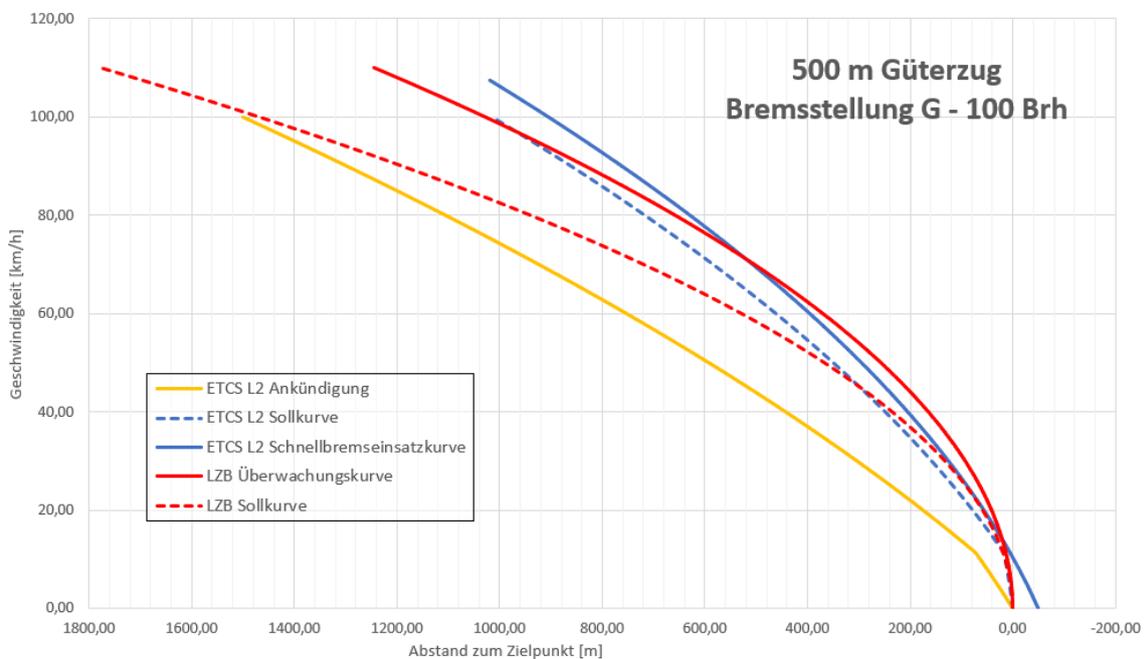


Abb. E-31: Vergleich LZB – ETCS L2: 500 m Güterzug (G) mit 100 Brh, 100 km/h

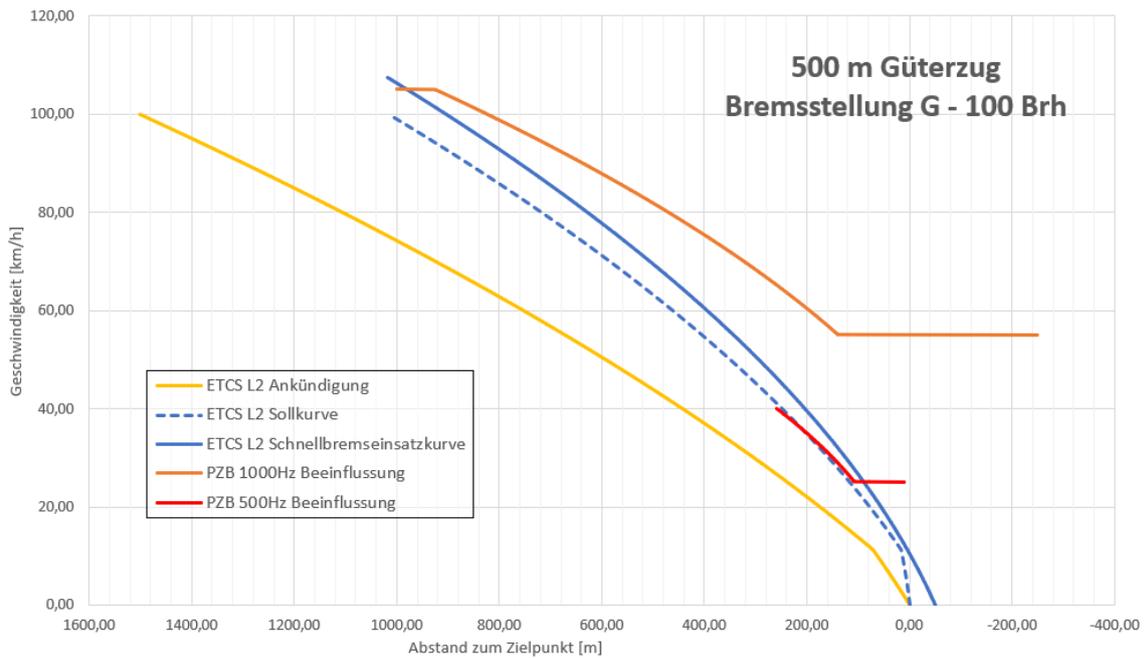


Abb. E-32: Vergleich PZB – ETCS L2: 500 m Güterzug (G) mit 100 Brh, 100 km/h

**Güterzug (P), 80 km/h, 50 Brh**

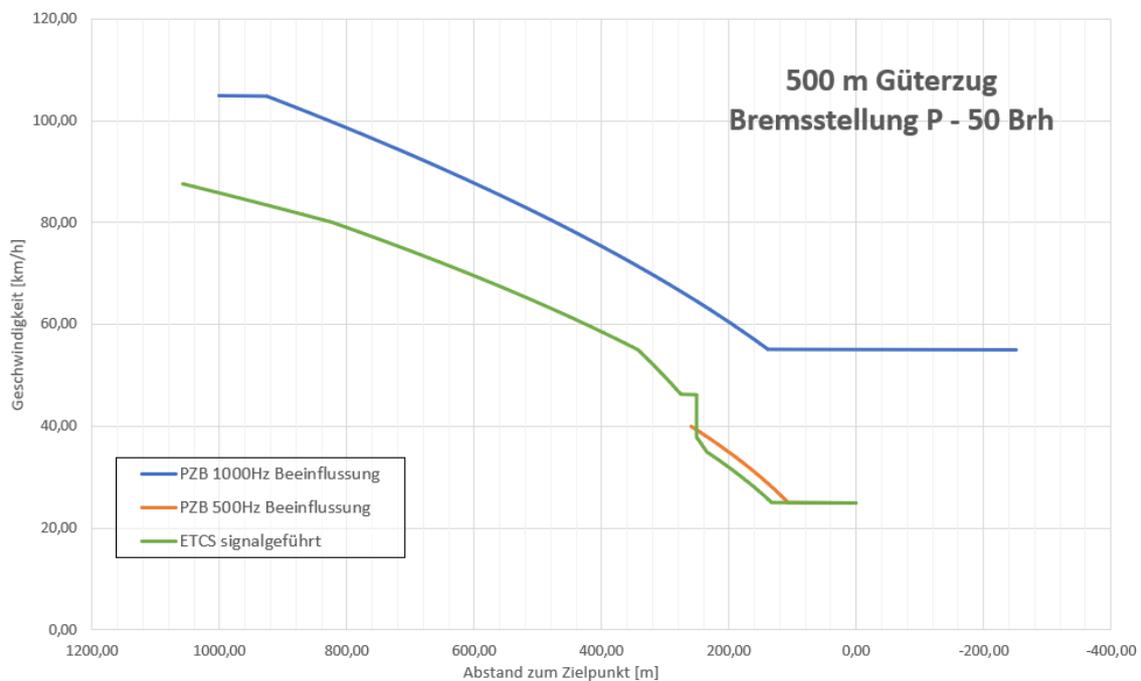


Abb. E-33: Vergleich PZB – ESG: 500 m Güterzug (P und G) mit 50 Brh, 80 km/h

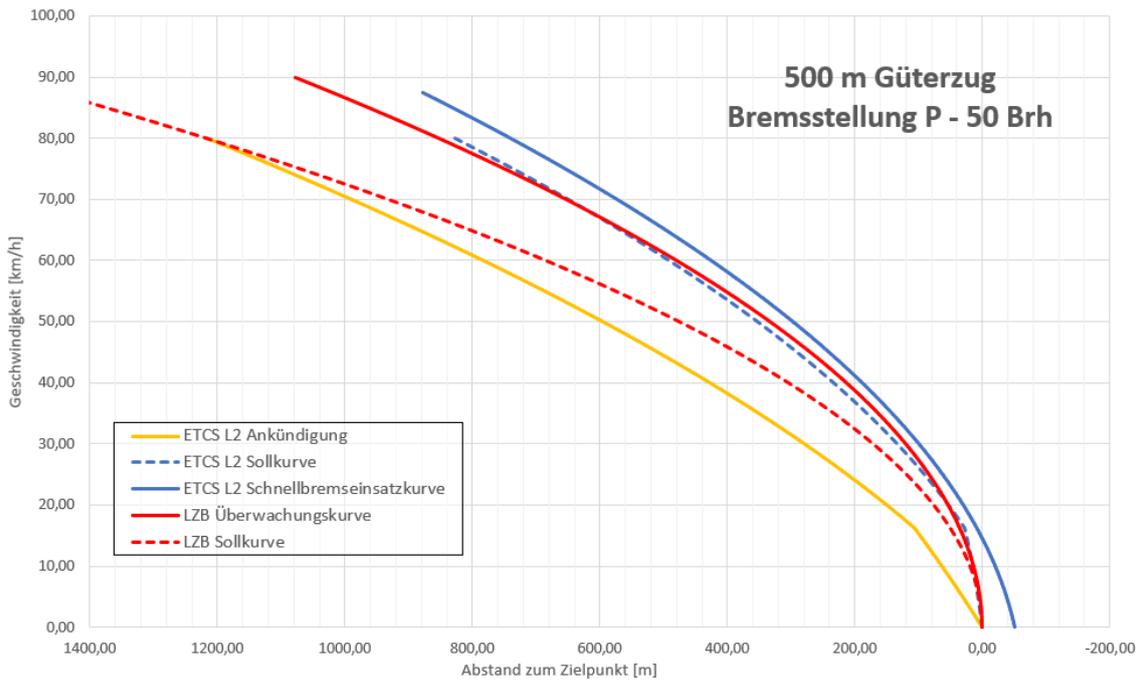


Abb. E-34: Vergleich L2B – ETCS L2: 500 m Güterzug (P) mit 50 Brh, 80 km/h

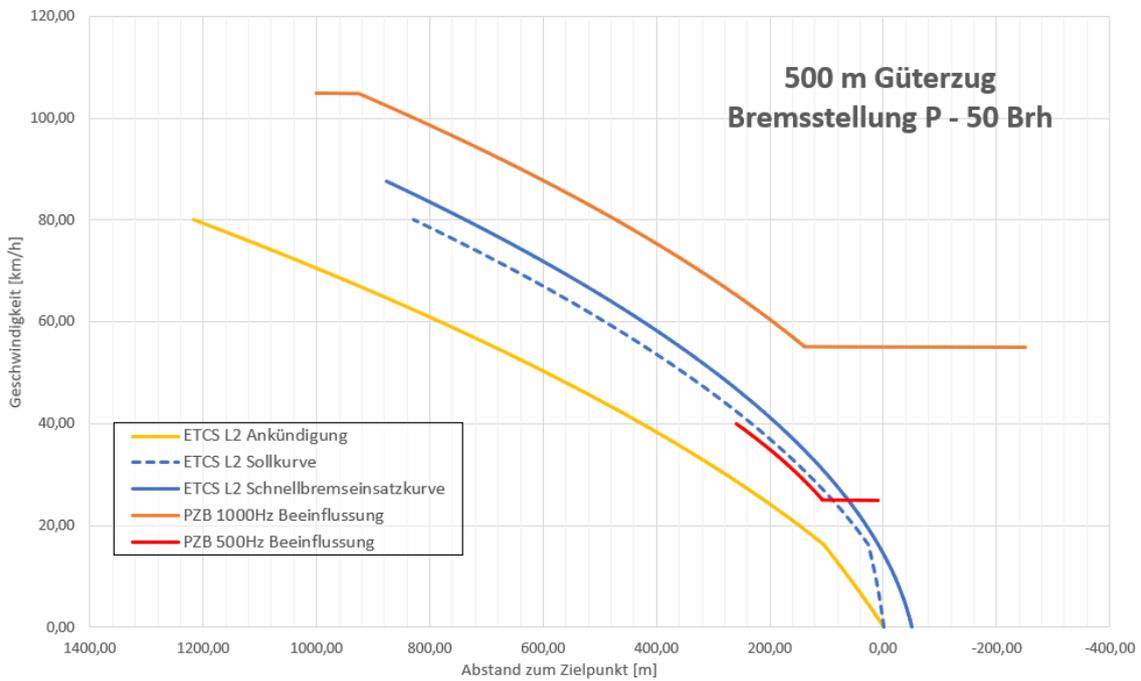


Abb. E-35: Vergleich PZB – ETCS L2: 500 m Güterzug (P) mit 50 Brh, 80 km/h

### Güterzug (G), 80 km/h, 50 Brh

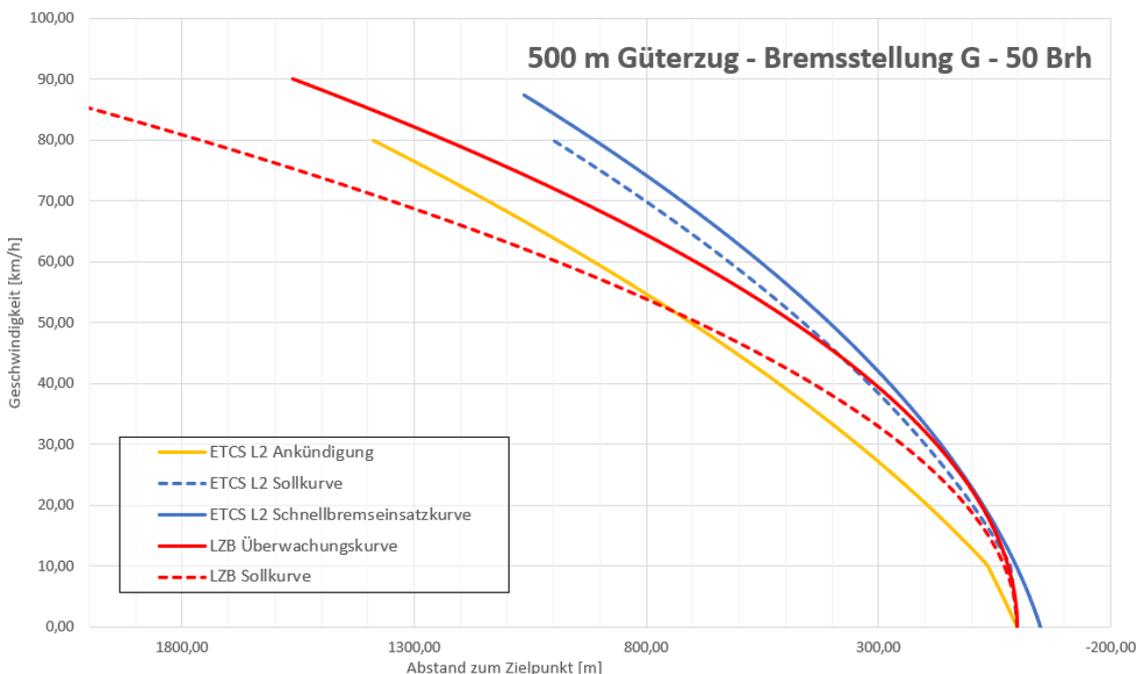


Abb. E-36: Vergleich LZB - ETCS L2: 500 m Güterzug (G) mit 50 Brh, 80 km/h

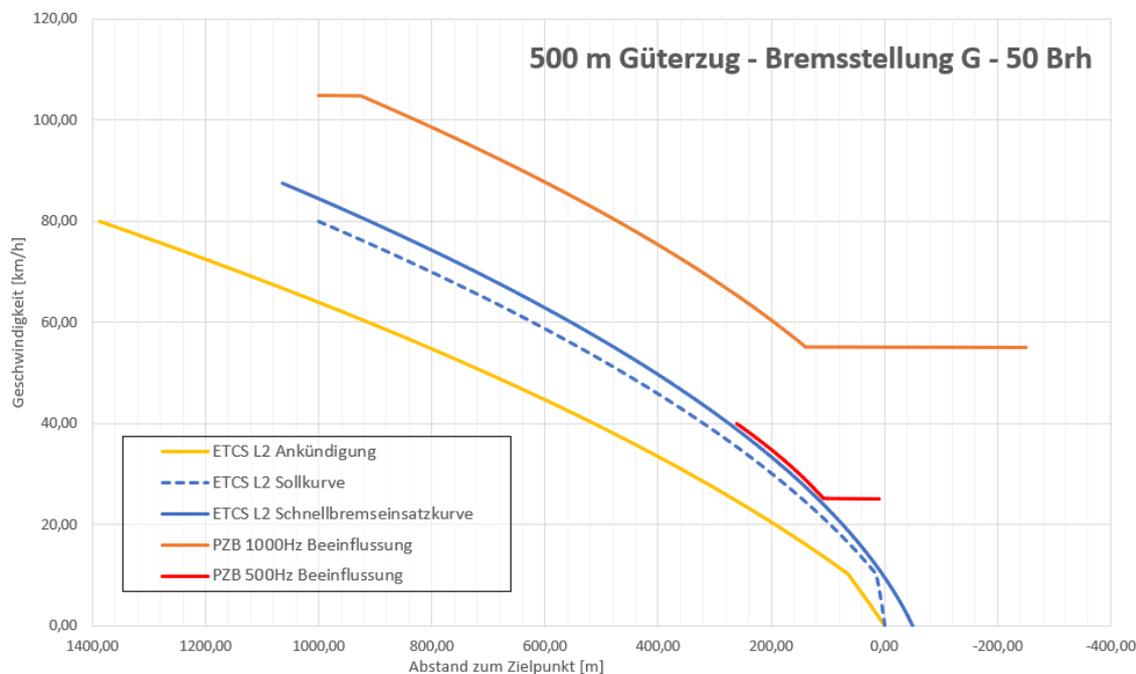


Abb. E-37: Vergleich PZB - ETCS L2: 500 m Güterzug (G) mit 50 Brh, 80 km/h

## Anlage

CD mit elektronischer Version sowie Anlage F.