

# Ein Algorithmus zur Berechnung von Bremskurven in ERTMS-Zugschutzsystemen

B. Friman

*Friman Datakonsult AB und Uppsala University,*

*Mensch-Computer-Interaktion, Abteilung Informationstechnologie, Schweden*

## Abstrakt

Der europäische Standard für Eisenbahnverkehrsmanagementsysteme für den Zugschutz, ETCS, enthält mehrere erweiterte Funktionen zur Vorhersage der sicheren Geschwindigkeit von einer Reihe von Zielorten vor dem Zug. Das Bremssystem kann in verschiedenen Geschwindigkeitssegmenten unterschiedliche Bremsfähigkeiten aufweisen. Der Bereich vor dem Zug kann eine Reihe von Zielen mit unterschiedlichen Ziel- und Freigabegeschwindigkeiten enthalten. Der Bereich davor ist ebenfalls unabhängig von den Zielen nach den Gradienten segmentiert. Die Variablen, die in den Bremskurvenalgorithmus eingegeben werden sollen, haben daher drei Dimensionen. Da die zulässige Geschwindigkeit anstelle der Zeit bis zum Eingriff berechnet werden soll, werden für die Berechnungen Quadratwurzeln benötigt, die eine gewisse Rechenleistung erfordern. Der Artikel schlägt einen Algorithmus vor, bei dem die Gradienten und die Ziele in einer Tabelle kombiniert werden. Dies macht den Bereich der Eingangsvariablen zweidimensional statt dreidimensional, was die Berechnungen vereinfacht und die erforderliche Anzahl von Quadratwurzelberechnungen reduziert.

*Schlüsselwörter: ETCS, ERTMS, Bremskurve, ATP.*

## 1. Einleitung

Das Europäische Zugsicherungssystem - die neue europäische Norm für den automatischen Zugschutz - verwendet grundsätzlich einen dreidimensionalen Datensatz als Eingabe für die Überwachungsalgorithmen. Die drei Dimensionen sind: eine Tabelle mit Geschwindigkeitsbeschränkungen, eine Tabelle mit Gradientenabschnitten und eine Tabelle mit Verzögerungsfähigkeiten in Bezug auf die Geschwindigkeit. Die Ausgabe der Algorithmen wird in Form von Geschwindigkeitswerten ausgedrückt.

zB welches ist die höchstmögliche Geschwindigkeit, die der Zug fahren kann, um in der Lage zu sein



alle Geschwindigkeitsbeschränkungen auf der Strecke vor dem Zug einhalten? Die drei Dimensionen der Dateneingabe erfordern möglicherweise eine große Anzahl von Berechnungen. Die Anforderung, dass die Ausgabe in Form einer Geschwindigkeit ausgedrückt werden muss, erfordert die Verwendung von Quadratwurzeln, was für jede Berechnung eine vergleichsweise große Rechenleistung erfordert, insbesondere da Echtzeit-CPU's normalerweise nicht mit dedizierten Gleitkommaprozessoren ausgestattet sind.

Es muss genügend Rechenleistung bereitgestellt werden, um die maximal mögliche Anzahl von Einschränkungen, Steigungen und Verzögerungssegmenten sowie einen ausreichenden Sicherheitsspielraum überwachen zu können, um die Sicherheitsanforderungen eines Zugschutzsystems zu erfüllen. Alle Berechnungen sind entsprechend den Änderungen der Eingabedaten wie Zugposition, Zuggeschwindigkeit und Verfügbarkeit von Informationen über neue Geschwindigkeitsbeschränkungen zu wiederholen.

In diesem Artikel wird ein Algorithmus beschrieben, der einen zweidimensionalen Ansatz zur Berechnung der Ausgangsgeschwindigkeitswerte verwendet.

In Abschnitt 2 werden die grundlegenden Anforderungen für die Überwachung der Zuggeschwindigkeit in ETCS beschrieben. In Abschnitt 3 werden der zweidimensionale Ansatz und der Algorithmus beschrieben. In Abschnitt 4 werden Ergänzungen zu diesem Algorithmus beschrieben, um verschiedene spezielle ETCS-Anforderungen erfüllen zu können. Abschließend werden in Abschnitt 5 die Schlussfolgerungen dieser Arbeit zusammengefasst.

## 2 Grundvoraussetzungen für die Überwachung der Zuggeschwindigkeit in ETCS

Das Folgende ist eine vereinfachte Beschreibung der Anforderungen für die Überwachung der Zuggeschwindigkeit in ETCS. Neben den folgenden Anforderungen gibt es auch andere Anforderungen wie eine separate Überwachung von Service und Notbremse, die Berücksichtigung der Unsicherheit der Positionsmessung und zahlreiche andere Anforderungen, die in ETCS erforderlich sind, jedoch nicht zur Beschreibung des grundlegenden Algorithmus für die Überwachung vor uns liegender Ziele erforderlich sind des Zuges. Mögliche algorithmische Lösungen für einige der detaillierteren Anforderungen werden jedoch später in diesem Artikel erörtert.

### 2.1 Geschwindigkeitsbegrenzungstabelle

Die Geschwindigkeitsbeschränkungstabelle kann bis zu 31 Einschränkungen vor dem Zug enthalten (30 statische Geschwindigkeitsbeschränkungen und eine Geschwindigkeitsbeschränkung für entfernte Signale). (Siehe `n_iter` in Paket 12 und Paket 27, in Teilmenge-026, Kapitel 7 und in Teilmenge-58.) Die Begrenzungsgeschwindigkeiten können in Schritten von 5 km / h zwischen 0 km / h und 600 km / h variieren. (Siehe Variable `v_static` und `v_loa` in den Paketen 12 und 27 in Teilmenge 026, Kapitel 7 und in Teilmenge 058).

### 2.2 Gradientenschnitttabelle

Die Tabelle mit den Steigungsabschnitten kann bis zu 31 Abschnitte enthalten, die die Steigungen auf dem Gleis vor dem Zug definieren. Der Gradient in einem Abschnitt kann in Schritten von 0,1% zwischen -25,4 und + 25,4% liegen (siehe Variable `g_a` im Paket 21 in Teilmenge-026, Kapitel 7 und Teilmenge-058).

### 2.3 Tabelle der Verzögerungsfähigkeiten

Die Verzögerungstabelle beschreibt die Bremsfähigkeit der Züge als Funktion der Geschwindigkeit. Die Verwendung eines solchen Tisches ermöglicht es, in bestimmten Situationen später zu bremsen, da die bekannten Unterschiede in der Bremsfähigkeit in Bezug auf die Geschwindigkeit ausgenutzt werden. Die Tabelle darf nicht länger als 31 Geschwindigkeitssegmente sein. Jedes Geschwindigkeitssegment definiert die Bremsfähigkeit der Züge in einem bestimmten Geschwindigkeitsbereich. Die Bremsfähigkeit kann in Schritten von  $0,01 \text{ m/s}^2$  zwischen  $0$  und  $2,55 \text{ m/s}^2$  liegen.

### 2.4 Bremsverzögerungszeit

Zwei Modelle für die Bremsverzögerung sind zulässig. Man nimmt an, dass die Bremsfähigkeit während der Bremsverzögerung Null und nach der Bremsverzögerung 100% ist. Das andere Modell verwendet zwei Verzögerungsintervalle. Die Bremsfähigkeit wird während des ersten Intervalls als Null angenommen. Während des zweiten Intervalls wird angenommen, dass die Bremsfähigkeit allmählich auf 100% ansteigt. Der in diesem Dokument beschriebene Algorithmus verwendet das erste, einfachere Bremsverzögerungsmodell.

## 3 Ein zweidimensionaler Ansatz- und Überwachungsalgorithmus

Der Überwachungsalgorithmus berechnet aus den Eingabedaten eine Palette von Geschwindigkeiten für verschiedene Zwecke in Form von Geschwindigkeitsbeschränkungen, Gradientenabschnitten, Verzögerungstabelle und Bremsverzögerungszeit. Diese Palette enthält:

- Eingriffsgeschwindigkeit der Betriebsbremse SBI: Welches ist die höchste Geschwindigkeit, mit der der Zug fahren kann und die dennoch alle Geschwindigkeitsbeschränkungen vor dem Zug nur mit der Betriebsbremse einhalten kann?
- Eingriffsgeschwindigkeit der Notbremse EBI: Welche Geschwindigkeit kann der Zug mit der Notbremse (die eine erheblich kürzere Bremsverzögerungszeit aufweist) am höchsten fahren und dennoch alle Geschwindigkeitsbeschränkungen vor dem Zug einhalten?
- Warngeschwindigkeit W: Dies ist die höchste Geschwindigkeit, die der Zug fahren kann, und der Fahrer hat noch einige Sekunden Zeit, bevor die SBI-Geschwindigkeit überschritten wird (wenn man bedenkt, dass die SBI-Geschwindigkeit immer niedriger wird, wenn sich der Zug dem Beginn einer Geschwindigkeitsbeschränkung nähert)?
- Zulässige Geschwindigkeit P: Dies ist die höchste Geschwindigkeit, die der Zug fahren kann, und der Fahrer hat noch einige Sekunden Zeit, bevor die W-Geschwindigkeit überschritten wird (wenn man bedenkt, dass die W-Geschwindigkeit immer niedriger wird, wenn sich der Zug dem Beginn einer Geschwindigkeitsbeschränkung nähert)?

In diesem Artikel wird ein Algorithmus beschrieben, mit dem eine der oben genannten Maßnahmen berechnet werden kann, je nachdem, welche Bremsverzögerungszeit verwendet wird, welche Positionsunsicherheit hinzugefügt wird und welche Einschränkungsspannen ausgewählt werden. Eine plausible Strategie wäre, zuerst den EBI zu berechnen und dann denselben Algorithmus erneut zu verwenden, um SBI, W und P zu berechnen, wobei der Schwerpunkt auf der Einschränkung liegt, die sich für den EBI als am restriktivsten erwiesen hat. Die Berechnung von SBI, W und P kann in einem Durchgang erfolgen, so dass dann insgesamt zwei Durchgänge erforderlich wären, wobei im zweiten Durchgang nur eine Einschränkung berücksichtigt würde.

### 3.1 Grundlegende Schritte im Algorithmus

Bei der Berechnung der Bremsfähigkeit des Zuges in Richtung einer Einschränkung sind nur die zulässige Geschwindigkeit und der Startpunkt der Einschränkung von Interesse. Diese werden im Folgenden als Ziele bezeichnet. Ein Ziel ist somit eine Kombination aus einer Position und einer zulässigen Geschwindigkeit (beginnend an dieser Position). Dies bedeutet, dass die Beschränkungstabelle als Tabelle der Geschwindigkeitsziele angesehen wird, zu denen der Zug bremsen muss.

Der erste offensichtliche Schritt im Algorithmus besteht darin, alle Ziele zu entfernen, die möglicherweise nicht das restriktivste Ziel sein können. Dies ist der Fall, wenn ein weiter entferntes Ziel dieselbe oder eine höhere Geschwindigkeit zulässt als ein näheres Ziel. Nach diesem ersten Schritt enthält die Ziel- / Einschränkungstabelle eine Treppe mit Gefälle, bei der jedes weiter entfernte Ziel eine niedrigere zulässige Geschwindigkeit als das vorherige hat. Der erste Schritt liegt auf der Hand und wird in diesem Artikel nicht weiter behandelt.

Der zweite Schritt des Algorithmus besteht darin, die Ziel- / Einschränkungstabelle und die Gradiententabelle in einer Tabelle zusammenzuführen, die sowohl Zielgeschwindigkeiten als auch Positionen in der Spur enthält, an denen sich der Gradient ändert.

Der dritte Schritt des Algorithmus besteht darin, die Bremsverzögerungsstrecke zu berechnen, dh wie lange der Zug ohne Bremsen fahren würde, wenn man die Zuggeschwindigkeit und die Bremsverzögerung berücksichtigt. Später in diesem Artikel werde ich argumentieren, warum nicht die tatsächliche Geschwindigkeit des Zuges zur Berechnung des Bremsverzögerungsabstands verwendet werden soll, sondern das vorherige Ergebnis der Verwendung des Algorithmus (die höchstmögliche Geschwindigkeit, die es ermöglichen würde, alle Ziele zu erreichen vor dem Zug).

Der vierte Schritt des Algorithmus besteht darin, die zulässige Geschwindigkeit an allen Positionen in der Ziel- / Gradiententabelle zu berechnen, beginnend mit der letzten Position und schrittweise rückwärts in Richtung der Position des Zuges. Bei jedem Schritt wird eine Berechnung der Zielgeschwindigkeit zur aktuell zulässigen Geschwindigkeit durchgeführt. Bei dieser Berechnung wird der Gradient (der die Bremsfähigkeit des Zuges beeinflusst) festgelegt, da alle Gradientenänderungspositionen in der Tabelle enthalten sind. Die Bremsfähigkeit des Zuges in Bezug auf die Geschwindigkeit kann jedoch nicht festgelegt sein. Die Verzögerungsfähigkeit der Züge bei der Ergebnissgeschwindigkeit kann von der Fähigkeit bei der Zielgeschwindigkeit abweichen. Daher ist diese Berechnung an sich in Schritte unterteilt, einen für jedes betroffene Segment in der Verzögerungsfähigkeitstabelle. Die resultierende zulässige Geschwindigkeit ist mit der Zielgeschwindigkeit an der neuen Position zu vergleichen, wenn an dieser Position eine und die niedrigste von beiden als zulässige Geschwindigkeit ausgewählt ist. Wenn an der neuen Position keine Zielgeschwindigkeit vorhanden ist (die neue Position stellt eine Gradientenänderung dar), wird das Ergebnis der Berechnung als zulässige Geschwindigkeit an der neuen Position verwendet.

Der fünfte Schritt besteht darin, die Berechnungen zu unterbrechen, wenn die Position näher am Zug als der Bremsverzögerungsabstand ist, da hier angenommen wird, dass die Bremsfähigkeit des Zuges Null ist. Ziele auf der Strecke, bei denen die Bremsfähigkeit Null ist, werden stattdessen direkt mit der berechneten zulässigen Geschwindigkeit verglichen und der niedrigste Wert ausgewählt.

### 3.2 Schritt 2: Zusammenführen der Ziel- / Einschränkungs- und Verlaufstabellen

Das Zusammenführen der Ziel- / Restriktions- und Gradiententabellen kann anhand des folgenden Beispiels veranschaulicht werden:



Tabelle 1: Beispiel einer Ziel- / Einschränkungstabelle.

Position	Zulässige Geschwindigkeit
500 m	100 km / h
1000 m	50 km / h
1500 m	0 km / h

Tabelle 2: Beispiel einer Verlaufstabelle.

Position	Gefälle bis zu dieser Position 0%
700 m	
1200 m	- 1,0%
1700 m	- 2,0%

Tisch 3: Beispiel einer zusammengeführten Ziel- / Restriktions- + Gradiententabelle.

Position	Art	Zulässige Geschwindigkeit	Gefälle bis zu dieser Position
500 m	Beschränkung	100 km / h	--
700 m	Gradientenänderung	--	0%
1000 m	Beschränkung	50 km / h	--
1200 m	Gradientenänderung	--	- 1,0%
1500 m	Beschränkung	0 km / h	--
1700 m	Gradientenänderung	--	- 2,0%

### 3.3 Schritt 3: Berechnung der Bremsverzögerungsstrecke

Es wird angenommen, dass die Bremsfähigkeit 100% näher an den Zielen liegt. Vor einer bestimmten Position wird jedoch angenommen, dass die Bremsfähigkeit Null ist. Diese Position berechnet sich aus der aktuellen Position plus der Bremsverzögerung multipliziert mit der Zuggeschwindigkeit:

$$pos_{delayend} = pos_{Zug} + gebremste\ Verzögerung \cdot v \quad (1)$$

Um zu wissen, wann eine automatische ATP-Bremse ausgegeben werden muss, kann die tatsächliche Zuggeschwindigkeit in diesem Algorithmus verwendet werden. Wenn jedoch das Geschwindigkeitsergebnis aus der Berechnung auch als Information für den Fahrer verwendet werden soll, müssen wir die aus der Berechnung resultierende Geschwindigkeit bei der Berechnung des Bremsverzögerungsabstands verwenden. Eine größere Zuggeschwindigkeit führt zu einer größeren Bremsverzögerungsstrecke, was wiederum zu einer niedrigeren zulässigen Geschwindigkeit des Algorithmus führt. Dies bedeutet, dass der Algorithmus eine zirkuläre Abhängigkeit aufweist. Ist das ein Problem? Angenommen, die zulässige Geschwindigkeit wird regelmäßig berechnet, wenn der Zug auf der Strecke fährt. Wenn sich der Zug einem Ziel nähert, nimmt die zulässige Geschwindigkeit allmählich ab. Wenn der Algorithmus das Ergebnis der vorherigen Berechnung bei der Berechnung des Bremsverzögerungsabstands verwendet hat, dann kann die Abhängigkeit von früheren Zyklen in diesem Fall zu einer geringfügigen Unterschätzung der zulässigen Geschwindigkeit führen, die dem Fahrer angezeigt wird. Der Fehler kann als Bremsfähigkeit des Zuges während der Zeit zwischen zwei Berechnungen angenähert werden. Wenn beispielsweise die Bremsfähigkeit 0,8 m / s beträgt und die Berechnungen in Intervallen von 0,25 s durchgeführt werden, beträgt der Fehler 0,7 km / h und liegt in der sicheren Richtung. Wenn zum Beispiel plötzlich eine zukünftige Einschränkung

verschwindet, zum Beispiel weil sich ein Signal vor dem Zug von Halt zu Löschen ändert, dann wäre die berechnete zulässige Geschwindigkeit jedoch zu hoch, weil sie auf einer zu kurzen Bremsverzögerungsstrecke basieren würde und der Fehler ziemlich groß sein könnte. Dieses Problem kann jedoch gelöst werden, indem begrenzt wird, um wie viel die zulässige Geschwindigkeit von einer Berechnung zur nächsten ansteigen kann, oder indem die Anzeige der neuen Informationen verzögert wird, bis die Berechnung zweimal durchgeführt wurde (dies könnte beispielsweise zu einer Verzögerung von führen die erhöhte Geschwindigkeitsanzeige um

0,25 s).

### 3.4 Schritt 4: Berechnung der zulässigen Geschwindigkeit an allen Positionen in der Tabelle

Die Grundformel zur Berechnung des Bremsweges aus einer Geschwindigkeit  $v_1$  zu einer niedrigeren Geschwindigkeit  $v_2$  ist:

$$dbr = \frac{v_1^2}{2 \cdot dez} - \frac{v_2^2}{2 \cdot dec} \quad (2)$$

Dabei ist dec die Verzögerungsfähigkeit der Züge in  $m/s^2$ .

Wenn dbr, dec und  $v_2$  verfügbar sind,  $v_1$  kann berechnet werden als:

$$v_1 = 2 \cdot \sqrt{dbr \cdot dec + v_2^2} \quad (3)$$

Wenn also die zulässige Geschwindigkeit an Position p bekannt ist, kann die zulässige Geschwindigkeit an Position p-1 wie folgt berechnet werden:

$$v_{p-1} = 2 \cdot \sqrt{pos_p - pos_{p-1} \cdot dec + v_p^2} \quad (4)$$

Die Verzögerung der Züge ist abhängig von der Steigung und der Zuggeschwindigkeit. Wir wissen jedoch, dass der Gradient über die Entfernung fest und als nächste Gradientenänderung in der Tabelle verfügbar ist (in tablerow (p) oder höher).

Die Beziehung zwischen Gradient und Verzögerung wird durch die folgende Formel definiert:

$$dec = dec_0 + g \cdot \frac{grad}{100} \quad (5)$$

wo  $dec_0$  ist die Nullgradientenverzögerung,  $g \approx 9,8186 m/s^2$  (Beschleunigung des freien Falls) und Gradient Grad wird in % ausgedrückt. Die Formel kann leicht sein verstanden, wenn wir den Fall betrachten, wenn der  $dec_0$  ist Null und die Steigung ist 100%. Die Verzögerung würde dann  $-9,8186 m/s^2$  betragen, was den freien Fall darstellt Beschleunigung.

Wie bereits erwähnt,  $dec_0$  ist abhängig von der Geschwindigkeit der Züge gemäß der Tabelle der Verzögerungsfähigkeiten. Wenn wir annehmen, dass es eine Funktion f gibt  $v_{todec}$  verfügbar, die die Tabelle nachschlägt und die Dez. zurückgibt  $v_{todec}$  Verzögerung als Funktion der Zuggeschwindigkeit, dann wissen wir, dass die  $dec_0$  ist gleich  $f(v_{todec}(v_p))$  an Position p.  $dec_0$  an Position p-1 ist im Moment jedoch unbekannt, aber wir nehmen vorläufig an dass es das gleiche wie an Position p ist und dann dec als berechnen kann

$$dec = f(v_{todec}(v_2)) + G \cdot \frac{grad_p}{100} \quad (6)$$

Mit  $dec$  oben,  $v_1$  wird nun vorläufig berechnet. Wenn  $v_1$  hat die gleiche Verzögerung  $dec$  als  $v_2$ , dann  $v_1$  ist richtig. Um dies zu überprüfen, nehmen wir an, dass es eine gibt Funktion  $f_{Reichweite\ hoch}$ . Dies schlägt erneut die Verzögerungsfähigkeitstabelle nach und gibt die höchste Geschwindigkeit zurück, die dieselbe Verzögerung wie das Argument hat. Die Bedingung für  $v_1$  gültig zu sein ist:

$$f_{Reichweite\ hoch}(V_2) \geq v_1 \quad (7)$$

Ist dies nicht der Fall, wird der gültige Prozess schrittweise berechnet

$v_1$ . Zuerst berechnen wir die Position, an der die zulässige Geschwindigkeit  $= v_2$  ist  $pos_2 = f_{Reichweite\ hoch}(V_2)$  unter Verwendung der grundlegenden Bremswegformel (2) oben:

$$pos_{v_2} := pos_p + \frac{v_2^2 - v_2'^2}{2 \cdot dec_2} \quad (8)$$

wobei  $dec$  gemäß der obigen Formel (6) berechnet wird. Wir kennen jetzt die

zulässige Geschwindigkeit an Position  $pos_2$ . Wir können dann eine neue vorläufige Berechnung von  $v$  durchführen, wieder unter Verwendung von Gleichung (4), aber jetzt durch Ersetzen von  $v_2$  von  $v_2'$  und  $pos_p$  von  $pos_2$ .

Der neue vorläufige  $v_1$  wird dann mit dem neuen (höheren)  $f_{Reichweite\ hoch}(V_2)$  verglichen. Der Prozess wird fortgesetzt, bis wir einen Wert  $v$  erreichen, das ist  $\leq f_{Reichweite\ hoch}(V_2)$ . Sobald die gültige  $v_1$  berechnet wird, soll es mit der Zielgeschwindigkeit an der neuen Position verglichen werden  $pos_{p-1}$ , wenn es gibt eine. Der niedrigste Wert gilt als zulässige Geschwindigkeit bei  $pos_{p-1}$ . Der Prozess geht weiter in Richtung Zug und wird am Ende des Zuges unterbrochen. Bremsverzögerungsabstand ist erreicht.

### 3.5 Schritt 5: Unterbrechen der Geschwindigkeitsberechnung, wenn das Ende der Bremsverzögerungsstrecke erreicht ist

Da die Bremsfähigkeit über die Bremsverzögerungsstrecke Null ist, ist die Berechnung der zulässigen Geschwindigkeit zu unterbrechen, wenn das Ende der Bremsverzögerungsstrecke erreicht ist

erreicht, was an Position  $pos_{Endverzögerung}$  wie in Gleichung (1) oben definiert. Dies bedeutet, dass wenn  $pos_{p-1} < pos_{Endverzögerung}$ ,

dann  $pos_{Endverzögerung}$  soll anstelle von  $pos$  verwendet werden  $pos_{p-1}$

in der letzten Berechnung gemäß Schritt 4. Wenn die zulässige Geschwindigkeit bei  $pos_{Endverzögerung}$  berechnet wird, wird dies nicht mehr aktualisiert, außer dass es ersetzt wird, wenn es gibt eine niedrigere Zielgeschwindigkeit (zwischen Zug und  $pos_{Endverzögerung}$ ).

## 4 Ergänzungen zum Algorithmus, um verschiedene verarbeiten zu können spezielle ETCS-Anforderungen

In Kapitel 3 wird ein grundlegender Algorithmus zur Berechnung der höchstmöglichen Geschwindigkeit beschrieben, mit der ein Zug fahren kann, während die Geschwindigkeitsbeschränkungen in der Beschränkungstabelle eingehalten werden und die Auswirkungen von Steigungen (Steigungstabelle) und Geschwindigkeit (Bremsfähigkeitstabelle) berücksichtigt werden die Zugverzögerung. In ETCS und jedem anderen ATP-System gibt es viele andere Anforderungen, die erfüllt werden müssen, z

- Das System muss in der Lage sein, die zulässige Geschwindigkeit sowohl für die Betriebsbremse als auch für die Notbremse zu berechnen, wobei die Notbremse eine minimale Verzögerungssicherung darstellt, falls die Betriebsbremse ausfällt

- Zu Informationszwecken sollen auch verschiedene Geschwindigkeiten wie die zulässige Geschwindigkeit P und die Warngeschwindigkeit W berechnet werden können
- Ziele können Geschwindigkeitsabstände für verschiedene Zwecke aufweisen (z. B. für Eingriffe in die Betriebsbremse und Eingriffe in die Notbremse), und die Überwachung muss unterbrochen werden, wenn die Zielgeschwindigkeit + Geschwindigkeitsabstand erreicht ist.
- Einer Stoppsignalposition vor dem Zug kann eine Freigabegeschwindigkeit zugeordnet sein, damit der Zug die Position erreichen kann, an der neue Signalinformationen (möglicherweise klar) verfügbar werden. Dies ist der Fall, wenn Transponder verwendet werden, um die Signalisierungsinformationen vom Gleis zum Zug zu übertragen.

#### 4.1 Zulässige Geschwindigkeit für Betriebsbremse und Notbremse

Betriebsbremse und Notbremse haben unterschiedliche Bremsverzögerungen und ihre eigenen Verzögerungsfähigkeitstabellen. Die zulässige Geschwindigkeit zur Vermeidung von Betriebsbremse und Notbremse kann berechnet werden, indem der obige Algorithmus zweimal ausgeführt wird, einmal mit der Tabelle für die Verzögerung und Verzögerung der Betriebsbremse und einmal mit der Tabelle für die Verzögerung der Notbremse. Eine andere Methode, die weniger Berechnungen erfordert, besteht darin, zuerst die zulässige Geschwindigkeit zu berechnen, um eine Notbremse zu vermeiden, und dann alle Einschränkungen zu deaktivieren, mit Ausnahme derjenigen, die für die Notbremse als am restriktivsten befunden wurde, bevor der Algorithmus erneut für die Betriebsbremse verwendet wird. Wenn jedoch ein Stoppsignal zwischen den Zielen vorhanden ist, sollte dieses immer in die Betriebsbremsberechnungen einbezogen werden, auch wenn es nicht das restriktivste Notbremsziel ist. da ein solches Ziel für Betriebsbremsberechnungen wesentlich näher positioniert sein kann als für Notbremsberechnungen (zumindest in ETCS). Dies ist notwendig, um sicherzustellen, dass der Zug vor dem Stoppsignal hält, auch wenn sich hinter dem Signal ein großer Sicherheitsabstand befindet.

#### 4.2 Verschiedene Geschwindigkeiten zu Informationszwecken

In ETCS muss der Fahrer zwei Geschwindigkeitsbegrenzungen überschreiten, bevor eine automatische Betriebsbremse ausgelöst wird. Die erste Grenze ist die zulässige Geschwindigkeit P, die dem Fahrer während des normalen Betriebs angezeigt wird. Solange der Fahrer den Zug unterhalb der P-Geschwindigkeit fährt, hat er mindestens 5 Sekunden Vorsprung, bevor ETCS eine automatische Bremse auslöst. Wenn der Fahrer die P-Geschwindigkeit mit einem bestimmten Abstand überschreitet, gibt das ETCS-System eine sichtbare und hörbare Warnung an den Fahrer aus. Wenn ETCS die Warnung auslöst, hat der Fahrer noch 3 Sekunden Zeit, um zu reagieren und mit dem Bremsen zu beginnen, bevor ETCS eine automatische Bremse auslöst. Da W und P in Verzögerungseinheiten definiert sind, können sie berechnet werden, indem die W- und P-Ränder zur Bremsverzögerungszeit addiert werden, bevor der Algorithmus ausgeführt wird. Dazu werden zwei zusätzliche fiktive Verzögerungsendpositionen berechnet, eine für W und eine für P:

$$pos_{enddelayw} = pos_{Endverzögerung} + 3 \text{ s} \cdot v$$

$$pos_{enddelayp} = pos_{enddelayw} + 2 \text{ s} \cdot v$$

Dabei ist v die gleiche Geschwindigkeit wie in Kapitel 3.3 beschrieben. Die Berechnungen werden in einem Durchgang durchgeführt, aber an verschiedenen Stellen für die unterbrochen



Berechnung von  $W$  und  $P$  als für die zulässige Geschwindigkeit, um eine Betriebsbremse zu vermeiden. Dies führt dazu, dass  $W$  niedriger als die „zulässige Geschwindigkeit“ und  $P$  niedriger als  $W$  ist, und führt zu den gewünschten Zeitspannen, in denen der Fahrer reagieren kann.

#### 4.3 Geschwindigkeitsränder und Freigabegeschwindigkeiten

Bei einer Signalgeschwindigkeits- oder statischen Geschwindigkeitsbegrenzung gibt es einen Abstand zwischen der Nenndrehzahl und der Drehzahl, wenn ein automatischer Eingriff der Betriebsbremse ausgegeben wird. Es gibt also einen Spielraum zwischen Eingriff der Betriebsbremse und Eingriff der Notbremse. Ein unnötiger Eingriff der Betriebsbremse wird dadurch vermieden, solange der Fahrer nahe an der Nenndrehzahl fährt, und eine unnötige Notbremse wird vermieden, wenn die Betriebsbremse ausreicht, um die Arbeit zu erledigen.

Wenn sich der Zug einer Begrenzung nähert, die einen Spielraum hat, ist es nicht erforderlich, den Zug auf die Nenngeschwindigkeit abzubremesen - es reicht aus, ihn auf die Nenngeschwindigkeit plus Spielraum abzubremesen. Die Freigabegeschwindigkeiten ähneln den Geschwindigkeitsabständen - die Abgabegeschwindigkeit ist ein Geschwindigkeitsabstand über Null, der es dem Zug ermöglichte, sich dem Transponder nahe dem Hauptsignal zu nähern.

Geschwindigkeitsmargen und Freigabegeschwindigkeiten werden behandelt, indem eine Position vor dem tatsächlichen Ziel berechnet wird, bei der die zulässige Geschwindigkeit gleich der Zielgeschwindigkeit plus Marge (oder gleich der Freigabegeschwindigkeit) ist. Die Margin-Ziele werden in den Berechnungen anstelle der realen Ziele verwendet.

### 5. Schlussfolgerung

Die ETCS-Anforderungen, dass Steigungen und Ziele unabhängig voneinander getrennt werden müssen und dass die Zugverzögerung in Geschwindigkeitstabellen definiert werden muss, führen zu einer erheblichen Komplexität der erforderlichen Überwachungsalgorithmen. Dieser Artikel schlägt eine Methode zum Kombinieren der Gradienten- und Zieltabellen vor, um diese Komplexität zu beherrschen und die erforderliche Anzahl von Quadratwurzelberechnungen zu begrenzen. Die zulässige Geschwindigkeit wird vom entferntesten Ziel und rückwärts in Richtung der Position des Zuges berechnet. Fiktive Zugverspätungszeiten werden verwendet, um die verschiedenen Geschwindigkeiten zu erzeugen, die zu Informationszwecken erforderlich sind.

### Verweise

- [1] Alcatel, Alstom,..., ERTMS / ETCS-Systemanforderungsspezifikation der Klasse 1, Kapitel 7 ERTMS / ETCS-Sprache. SUBSET-026-7, Ausgabe 2.2.2, Datum 020201.
- [2] Alcatel, Alstom,..., ERTMS / ETCS Klasse 1 Systemanforderungsspezifikation, FFFIS STM-Anwendungsschicht. SUBSET-058, Ausgabe 2.1.1, Datum 19-11-03.

