

Aufbauend auf Kapitel 5 des Fahrdynamik-Buchs (Bremsen) habe ich 2005 einen Artikel zur überschläglichen Rekonstruktion der Zugbewegung bei einer unfallbedingten Schnellbremsung im Weg-Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm erarbeitet. Grundlage ist das dreiteilige Bremsablaufmodell und die Bremsweggleichung von Sauthoff, die auf die geänderte DB-Bremsbewertung umgestellt wurde und in die auch seit der Formelveröffentlichung neu entwickelte Bremstechnik einbezogen wurde. Der Artikel wurde von der Zeitschrift „Eisenbahntechnische Rundschau“ nicht veröffentlicht. Deshalb stelle ich das Manuskript auf diesem Weg als Ergänzung zum Fahrdynamik-Buch zur Verfügung.

Überschlägliche Bremsablaufberechnung für Züge

1. Einleitung

Die Aufklärung eines Unfalls beinhaltet häufig die Notwendigkeit, technische Details in der Weg-Zeit-Abhängigkeit zu bewerten. Dafür wird zweckmäßigerweise das Weg-Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm der Unfallrekonstruktion benutzt. Grundlage sind im Regelfall die Daten des Zugfahrtschreibers. Stehen diese nicht zur Verfügung, ist man auf die Berechnung des Bremsablaufs angewiesen. Rechenprogramme, mit denen der Bremsablauf ermittelt werden kann, erfordern die Eingabe einer größeren Anzahl von Daten, die im Regelfall nicht bekannt sind. Die Mindener Bremsweggleichung von *Sauthoff* /4/ liefert nur den zur Bremsanfangsgeschwindigkeit v_0 gehörenden Bremsweg s_B , aber nicht die momentanen Zeit- und Wegwerte des Ablaufs. Mittels eines speziellen kinematischen Lösungsansatzes ist es möglich, die momentanen Variablen Zeit, Weg, Geschwindigkeit und Verzögerung aus der Mindener Bremsweggleichung zu ermitteln /5/ /6/.

2. Dreiteiliges Bremsablaufmodell

Für die Ermittlung der momentanen Variablen des Bremsablaufs aus Anfangsgeschwindigkeit v_0 und Bremsweg s_B einer Schnellbremsung, berechnet mit der Mindener Bremsweggleichung, wird das dreiteilige Bremsablaufmodell mit Vereinfachungen benutzt.

Anlage 1 enthält die Mindener Bremsweggleichung einschließlich einzusetzender Beiwerte. Der Beiwert ψ der Bremsstellung „R“ (Scheibenbremse) wurde neueren Versuchsergebnissen angepasst. Der Beiwert ψ der Bremsstellung „R+Mg“ ist aus Versuchsergebnissen unter Benutzung der Bewertungslinie für 140 km/h abgeleitet worden [1]. Die Abhängigkeit der Beiwerte ψ und c_2 von der Anfangsgeschwindigkeit v_0 wurde außerdem durch statistische Gleichungen ausgedrückt, die in Rechenprogrammen vorteilhaft verwendet werden können.

Mit der Mindener Bremsweggleichung wird der Bremsweg s_B zur gegebenen Anfangsgeschwindigkeit v_0 , bezeichnet als $P_2 (s_{B2}; v_{02})$, und zu einer weiteren zu wählenden kleineren Geschwindigkeit, die nicht zum Halt im Schwellabschnitt führen darf, bezeichnet als $P_1 (s_{B1}; v_{01})$, berechnet (Bild 1). Bei Halt im Schwellabschnitt entfällt P_1 .

Anlage 2 enthält die Gleichungen des dreiteiligen Bremsablaufmodells mit Vereinfachungen. Das Modell setzt sich aus den Abschnitten Ansprechen, Schwellen und entwickeltes Bremsen zusammen. Die Vereinfachungen bestehen in der Annahme der gleichförmigen Bewegung für Ansprechen, der linearen Zunahme der Verzögerung beim Schwellen und einer konstanten Verzögerung des entwickelten Abschnitts b_E sowie in der Voraussetzung, dass die Bestandteile Widerstands- und Neigungskraft der Verzögerung im Schwellabschnitt der Zeitabhängigkeit und im entwickelten Abschnitt der Geschwindigkeitsabhängigkeit entsprechend der Bremskraft unterliegen. Diese vereinfachenden Annahmen sind mit Fehlern verbunden, die bis auf die konstante Verzögerung im entwickelten Abschnitt für überschlägliche Werte vernachlässigbar sind.

Die Gleichungen der Schwellendgeschwindigkeit v_S und des Schwellwegs s_S , Gl. (2/5) und (2/6), erhält man durch Integration der Geradengleichung $b(t) = b_E/t_S \cdot t$. Die Gleichung der entwickelten Verzögerung b_E geht aus der Umstellung von Gl. (2/5) und (2/6) nach b_E hervor.

Die Ansprechzeit ist zu $t_A = 1,5$ s und die Schwellzeit in den Bremsstellungen „R“ und „R+Mg“ zu $t_S = 4,0$ s zu wählen. In den Bremsstellung „G“, „P“ und „R ohne Schnellentlüftungsventil (SEV)“ gilt:

$$t_S = t_{S0} + \frac{L_Z}{v_E} \quad (1)$$

Der Schwellzeitgrundwert beträgt in „P“ und in „R ohne SEV“ $t_{S0} = 4,0$ s und in „G“ $t_{S0} = 24,0$ s. Für L_Z ist die Zuglänge in m einzusetzen. Die Entlüftungskonstante der Hauptluftleitung beträgt $v_E = 150$ m/s.

Bei Beginn der Berechnungen ist zu prüfen, ob der Zughalt im entwickelten Abschnitt oder bereits im Schwellabschnitt eintritt. Für das Prüfen wird angenommen, dass die Schwellzeit t_S unbegrenzt ist und kein entwickelter Abschnitt vorliegt. Auf dieser Grundlage erhält man für die zum Halt führenden Schwellzeit t_{HS} :

$$t_{HS} = \frac{3}{2} \left(\frac{s_B}{v_0} - t_A \right) \quad (2)$$

Für den Bremsweg s_B und für die Anfangsgeschwindigkeit v_0 (hier in m/s) sind die aus der Mindener Bremsweggleichung hervorgegangenen Werte einzusetzen. Halt im entwickelten Abschnitt liegt vor, wenn t_{HS} die gegebene Schwellzeit t_S überschreitet. Der Halt im Schwellabschnitt ist gegeben, wenn t_{HS} die gegebene Schwellzeit t_S nicht erreicht. Der Halt im Schwellabschnitt ist in der Bremsstellung „G“ häufig, in „P“ und in „R ohne SEV“ selten und in „R“ und „R+Mg“ nicht zu verzeichnen.

Zu den beiden Stützstellen P_1 und P_2 werden mit den Gleichungen der Anlage 2 die entwickelte Verzögerung b_E und die Schwellendgeschwindigkeit v_S berechnet. Man erhält die Stützstellen P_1 (v_{S1} ; b_{E1}) und P_2 (v_{S2} ; b_{E2}). Bei Halt im Schwellabschnitt erfolgt die Berechnung von b_{EH} im Augenblick des Halts und der Zeit t_H und des Wegs s_H bis zum Schwellhalt. Die Geschwindigkeit ist in m/s zu verwenden.

Die entwickelte Verzögerung b_E ist ein aus Geschwindigkeit v_S und entwickeltem Bremsweg s_E berechneter Mittelwert. Der Mittelwert b_E ist von der Geschwindigkeit abhängig, d.h. $b_E = f(v_S)$. Damit ist im entwickelten Abschnitt auch eine geschwindigkeitsabhängige Momentanverzögerung $b(v)$ vorhanden. Das bedeutet, dass die entwickelte Zeit t_E nicht mit b_E berechnet werden darf. Sie ist durch Integration der momentanen Verzögerung $b(v)$ zu bestimmen.

Die Kurve $b_E(v_S)$ stimmt allgemein mit der e-Funktion überein. Die Konstanten der e-Funktion c_0 und b_{E0} sind unter Benutzung der beiden Stützstellen P_1 (v_{S1} ; b_{E1}) und P_2 (v_{S2} ; b_{E2}) zu berechnen. Der Ersatz von b_E in Gl. (2/7) und (2/8) durch Gl. (3/1), das Berechnen der Differentialquotienten dt/dv und ds/dv und das Einsetzen in die Differentialquotienten der Translation $b = dv/dt$ und $b = v \cdot dv/ds$ ergibt für die momentane Verzögerung bei Schwellende b_S die Gl. (3/4) und (3/5). Man erhält die beiden Stützstellen P_1 (v_{S1} ; b_{S1}) und P_2 (v_{S2} ; b_{S2}), mit denen die Konstanten c_{00} und b_0 der e-Funktion der momentanen Verzögerung $b(v)$ zu berechnen sind. Anlage 3 enthält die entsprechenden Gleichungen.

Die entwickelte Verzögerung b_E ist aus der wegbezogenen Mittelung hervorgegangen. Deshalb ist für die Berechnung der momentanen Schwellendverzögerung b_S die wegbezogene Gl. (3/4) zugrunde zu legen.

Anlage 3 enthält die Gleichungen zur Berechnung der entwickelten Bremszeit t_E und des entwickelten Bremswegs s_E , Gl. (3/10) bis (3/12). Sie ergeben sich aus den Bewegungsintegralen der Translation:

$$t_E = \int_0^{v_S} \frac{dv}{b(v)} \quad (3)$$

$$s_E = \int_0^{v_S} \frac{v dv}{b(v)} \quad (4)$$

Das Summieren aller Einzelwerte ergibt die Gesamtwerte von Bremszeit t_B und Bremsweg s_B .

Halt im entwickelten Abschnitt:

$$t_B = t_A + t_S + t_E \quad (5)$$

$$s_B = s_A + s_S + s_E \quad (6)$$

Halt im Schwellabschnitt:

$$t_B = t_A + t_H \quad (7)$$

$$s_B = s_A + t_H \quad (8)$$

Das Summieren aller berechneten Teilwege muss den bereits bekannten Bremsweg s_B ergeben (Kontrolle).

Berechnungsbeispiel 1

Für einen Reisezug, 40 Wagenachsen, Zuglänge $L_Z = 300$ m, Scheibenbremse, Bremsstellung P und verfügbare Bremsleistung $\lambda_Z = 100$ %, sind zur Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 100$ km/h (27,778 m/s) Bremsweg s_B und Bremszeit t_B der waagerechten Strecke ($i_m = 0$ ‰) zu berechnen.

Aus den Tabellen 1, 2 und 3 erhält man $\Psi = 0,99$, $c_1 = 1,05$ und $c_2 = 0,90$. Das Einsetzen in Gl. (1/3), (1/4) und (1/1) ergibt $\lambda_{\text{korrt}} = 105$ %, $i_{\text{korrt}} = 0$ und $s_B = 554,4$ m.

Für die gewählte Hilfsstützstelle $v_0 = 30$ km/h (8,334 m/s) erhält man $\Psi = 0,73$ und $s_B = 67,7$ m.

Die Stützstelle $v_0 = 30$ km/h ist auf Halt im Schwellabschnitt zu überprüfen. Das Einsetzen von $L_Z = 300$ m in Gl. (1) ergibt die Schwellzeit $t_S = 6,0$ s. Die Ansprechzeit beträgt $t_A = 1,5$ s. Das Einsetzen in Gl. (2) ergibt $t_{HS} = 9,935$ s. Wegen $t_{HS} > t_S$ liegt Halt im entwickelten Abschnitt vor.

Für die Berechnungen mit dem dreiteiligen Bremsablaufmodell (Anlage 2) werden die Stützstellen P_1 (8,334 m/s; 67,7 m) und P_2 (27,778 m/s; 554,4 m) benutzt. Aus Gl. (2/4), (2/5) und (2/6) erhält man zu P_1 $k = 60,4$ m, $b_E = 1,0908$ m/s² und $v_S = 5,062$ m/s und zu P_2 $k = 858,8$ m, $b_E = 0,8957$ m/s² und $v_S = 25,091$ m/s.

Der entwickelte Abschnitt (Anlage 3) wird unter Benutzung von P_1 (5,062 m/s; 1,0908 m/s²) und P_2 (25,091 m/s; 0,8957 m/s²) berechnet. Zur e-Funktion $b_E(v)$, Gl. (3/1), erhält man mit Gl. (3/2) und (3/3) die Konstanten $c_0 = 101,64$ m/s und $b_{E0} = 1,1465$ m/s². Die momentanen Schwellendverzögerungen

werden mit Gl. (3/4) zu $b_{S1} = 1,0643 \text{ m/s}^2$ und $b_{S2} = 0,7973 \text{ m/s}^2$ berechnet. Das Einsetzen der Stützstellenwerte $P_1 (5,062 \text{ m/s; } 1,0643 \text{ m/s}^2)$ und $P_2 (25,091 \text{ m/s; } 0,7973 \text{ m/s}^2)$ in Gl. (3/7) und (3/9) ergibt für die Konstanten der e-Funktion $b(v)$, Gl. (3/6), $c_{00} = 69,343 \text{ m/s}$ und $b_0 = 1,1465 \text{ m/s}^2$.

Die entwickelte Bremszeit wird mit Gl. (3/10) für P_2 zu $t_E = 26,368 \text{ s}$ berechnet. Das Summieren von t_A , t_S und t_E ergibt $t_B = 33,9 \text{ s}$. Zur Kontrolle wird mit Gl. (2/11) $s_A = 41,7 \text{ m}$, mit Gl. (2/6) $s_S = 161,3 \text{ m}$, mit Gl. (3/12) $s_E = 350,7 \text{ m}$ und mit Gl. (6) $s_B = 554 \text{ m}$ berechnet (Übereinstimmung mit gegebenem Wert).

Berechnungsbeispiel 2

Für einen Güterzug, 120 Wagenachsen, Zuglänge $L_Z = 600 \text{ m}$, Bremsstellung G und verfügbare Brems-hundertstel $\lambda_Z = 80 \text{ ‰}$, sind zur Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 50 \text{ km/h}$ ($13,889 \text{ m/s}$) Bremsweg s_B und Bremszeit t_B der waagerechten Strecke ($i_m = 0 \text{ ‰}$) zu berechnen.

Aus Tabelle 1/1, 1/2 und 1/3 erhält man $\Psi = 0,92$, $c_1 = 0,95$ und $c_2 = 0,68$. Das Einsetzen in Gl. (1/3), (1/4) und (1/1) ergibt $\lambda_{\text{korrt}} = 73,6 \text{ ‰}$, $i_{\text{korrt}} = 0$ und $s_B = 247,7 \text{ m}$.

Die Prüfung auf Halt im Schwellabschnitt ist vorzunehmen. Das Einsetzen von $L_Z = 600 \text{ m}$ in Gl. (1) ergibt die Schwellzeit $t_S = 28,0 \text{ s}$. Die Ansprechzeit beträgt $t_A = 1,5 \text{ s}$. Das Einsetzen in Gl. (2) ergibt $t_{HS} = 24,5 \text{ s}$. Wegen $t_{HS} < t_S$ liegt Halt im Schwellabschnitt vor.

Das Einsetzen von t_A und $t_H = t_{HS}$ in Gl. (7) ergibt die Bremszeit $t_B = 26,0 \text{ s}$. Zur Kontrolle wird mit Gl. (2/11) $s_A = 20,8 \text{ m}$, mit Gl. (2/12) $b_{EH} = 1,1338 \text{ m/s}^2$, mit Gl. (2/15) $s_H = 226,9 \text{ m}$ und mit Gl. (8) $s_B = 247,7 \text{ m}$ berechnet. Es besteht Übereinstimmung mit dem gegebenen Bremsweg.

3. Momentane Variable des Bremsablaufs

Aus dem dreiteiligen Bremsablaufmodell sind zum Schwellabschnitt die Verzögerungsfunktion $b(t)$ und zum entwickelten Abschnitt die Verzögerungsfunktion $b(v)$ hervorgegangen. Die Verzögerungsfunktion $b(t)$ ist durch Gl. (4/1) und (4/4) und die Verzögerungsfunktion $b(v)$ durch Gl. (3/6) gegeben. Die Integration von $b(t)$ ergibt die Gleichungen $v(t)$ und $s(t)$ des Schwellabschnitts der Anlage 4. Die Integration von $b(v)$ mit Gl. (3) und (4) liefert die Gleichungen $t(v)$ und $s(v)$ der Anlage 5. Die Momentanwerte $s(t)$ des Ansprechabschnitts erhält man mit Gl. (2/11).

Die Momentanwerte sind zu den 3 Abschnitten zu berechnen und zu Gesamtwerten zu addieren. Für die Kennliniendarstellung ist eine der drei Variablen v , t oder s als unabhängige Variable festzulegen. Die sich zu Beispiel 1 ergebenden Kennlinien der entwickelten und der momentanen Verzögerung $b_E(v)$ und $b(v)$ sind in Bild 4 dargestellt. Bild 5 zeigt die Kennlinien der Momentanwerte $v(s)$ und $t(s)$.

Für Unfalluntersuchungen ist das Anhalten relevant, das mit der Reaktionsaufforderung beginnt. Der Reaktionsabschnitt mit der Reaktionszeit t_R und dem Reaktionsweg $s_R = v_0 t_R$ ist dem Bremsen vorangestellt. Die Reaktionszeit ist von zahlreichen Faktoren abhängig. Sie beträgt bei Aufmerksamkeitszuwendung überschlägig $t_R = 1 \text{ s}$. Bei Ablenkung durch Bedienhandlungen ist mit bis zu 3 s zu rechnen. Da das Führerbremsventil stets griffbereit ist, entfällt die Zeit für die Herstellung der Bremsbereitschaft. Zur Reaktionszeit im Straßenverkehr sind umfangreiche Forschungsergebnisse bekannt, z. B. in Lit. [2], die aber nur bedingt auf den Schienenverkehr übertragbar sind.

Anhaltezeit t_{Anh} und Anhalteweg s_{Anh} betragen:

$$t_{\text{Anh}} = t_R + t_B \quad (9)$$

$$s_{\text{Anh}} = v_0 t_R + s_B \quad (10)$$

In der Unfallrekonstruktion werden v , t und s stets vom Anhaltepunkt des Zugs aus rückwärts gerechnet. Deshalb wurden in den Anlagen 4 und 5 auch die Gleichungen der Rückwärtsrechnung angegeben.

4. Weg-Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm der Unfallrekonstruktion

Zur Aufklärung der Vorgeschichte von Kollisionen zweier Unfallpartner ist das Weg-Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm der Unfallrekonstruktion ein wichtiges Hilfsmittel. Zur Darstellung müssen die Variablen des Bewegungsablaufs beider Unfallpartner bekannt sein. Bild 6 zeigt das auf Beispiel 1 beruhende Diagramm. Für den zweiten Partner wurde ein Lkw gewählt, der sich dem Kollisionsort mit der konstanten Geschwindigkeit 50 km/h nähert (Vereinfachung).

Das Weg-Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm der Unfallrekonstruktion ist ein Vier-Felder-Diagramm. Als Koordinatenursprung P_0 ($s = 0$; $t = 0$) sind Ort und Zeitpunkt der Kollision zu wählen. Die Zeiten und Wege der Rückwärtsrechnung sind auf diese Koordinaten umzurechnen. Die Umrechnung ist mit dem Abstand zwischen Kollisionsort und Endlage des Anstoßpunktes an den Zug s_{KA} vorzunehmen. Die zu s_{KA} gehörende Zeit t_{KA} und die Geschwindigkeit des Zugs im Augenblick der Kollision v_K ist mit den Gleichungen der Anlagen 4 und 5 in Rückwärtsrechnung zu bestimmen.

Die negativen Werte der Weg- und der Zeitachse kennzeichnen die Situation vor der Kollision und die positiven Werte die Situation nach der Kollision.

Liegt der Anstoßpunkt nicht an der Zugspitze, sind die Wegwerte mit dem Abstand zwischen Zugspitze und Anstoßpunkt an der Zuglängsseite auf die Zugspitze zu transformieren.

Das erste Feld des Diagramms enthält die Geschwindigkeitslinie $v(s)$ des Kollisionspartners (hier Lkw), das zweite Feld die Geschwindigkeitslinie $v(s)$ des Zugs, das dritte Feld die Zeitkennlinie $t(s)$ des Zugs und das vierte Feld die Zeitkennlinie $t(s)$ des Kollisionspartners.

Durch Eintragung von Verbindungslinien markanter Ereignisse wird das Verhalten beider Unfallpartner im gemeinsamen Zeit- und Wegraster erkennbar. Man sieht z. B., ob ein Reaktionsverzug vorgelegen hat oder nicht. Bei Abweichungen kann das Weg-Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm für die Vermeidbarkeitsbetrachtung außerdem mit den Sollwerten für Reaktion und Geschwindigkeit mit dem Ziel aufgestellt werden, kenntlich zu machen, welchen Einfluss die von der Norm abweichende Variable auf das Unfallgeschehen hatte. In Bild 6 wurden als markante Ereignisse der Beginn von Anhalten, Bremsen, Schwellen und entwickeltes Bremsen gewählt.

Zur Erleichterung der Konstruktion des Weg-Zeit-Geschwindigkeits-Diagramms der Unfallrekonstruktion können die Gleichungen des Bremsablaufs in ein Rechenprogramm eingefügt werden, dessen Ergebnisse anschließend in das Excelprogramm zu überspielen sind.

Berechnungsbeispiel 3

Für den in Beispiel 1 untersuchten Zug ist beim Unfall der Restweg des Anstoßpunktes $s_{KA} = 150$ m gemessen worden. Die Nullpunkt-Koordinaten des Weg-Zeit-Geschwindigkeits-Diagramms sind zu ermitteln.

Da mit den Gleichungen der Anlage 5 die zu s_{KA} gehörende Zeit t_{KA} und die Kollisionsgeschwindigkeit des Zugs v_K nicht direkt zu berechnen sind, muss die Methode der Variation gewählt werden. Die Gl. (5/5) und (5/7) wird in einen Rechner eingegeben. Die Geschwindigkeit v wird solange variiert, bis $s_{KA} = 150$ m erreicht ist. Man erhält $t_{KA} = 16,896$ s und $v_K = 17,083$ m/s (61,5 km/h).

Mit $t_R = 1$ s erhält man aus Gl. (9) und (10) die Anhaltezeit $t_{Anh} = 34,9$ s und den Anhalteweg $s_{Anh} = 582$ m. Die Subtraktion von t_{KA} und s_{KA} ergibt, dass die Reaktionsaufforderung 18,0 s bzw. 432 m vor dem Kollisionsort gelegen hat.

5. Zusammenfassung

Ausgehend von der Mindener Bremsweggleichung, die um neuere Beiwerte zur Scheibenbremse und um Beiwerte zur Bremsstellung „R+Mg“ ergänzt wird, sowie vom dreiteiligen Bremsablaufmodell mit Vereinfachungen, wird ein Verfahren zur überschläglichen Berechnung von Zeit, Weg und Geschwindigkeit des Bremsablaufs dargestellt. Die Benutzung der Rechenergebnisse zur Aufstellung des Weg-Zeit-Geschwindigkeits-Diagramms der Unfallrekonstruktion wird beschrieben. Die theoretischen Ausführungen werden durch Berechnungsbeispiele ergänzt.

Schrifttum

- [1] Berichte über Bremsversuche mit Schienenfahrzeugen und Eisenbahnzügen. Deutsche Bundesbahn, Versuchsanstalt Minden, Abteilung Bremstechnik.
- [2] Burckhardt, M.: Zur Analyse und Synthese von Reaktionszeiten. In: Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 18. Jg. (1980) H. 7/8, S. 161...168
- [3] Gralla, D.: Eisenbahnbremstechnik. Werner Verlag, Düsseldorf 1999.
- [4] Sauthoff, F.: Über die Möglichkeiten zur Berechnung der Bremswege von Eisenbahnzügen. In: Glasers Annalen 85. Jg. (1961) H. 2, S. 48...61
- [5] Wende, D.: Fahrdynamische Bewertung innovativer Bremstechnik. In: ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 50. Jg. (2001) H. 11, S. 685...691 und H. 12, S. 753...758.
- [6] Wende, D.: Fahrdynamik des Schienenverkehrs. Verlag B. G. Teubner, Wiesbaden 2003.

Verzeichnis der Anlagen / Tabellen / Bilder

Anlage 1: Erweiterte Mindener Bremsweggleichung

Tabelle 1: Beiwert Ψ

Tabelle 2: Beiwert c_1

Tabelle 3: Beiwert c_2

Tabelle 4: Konstanten zur Gleichung des Beiwerts Ψ

Tabelle 5: Konstanten zur korrigierten Neigung i_{kor}

Anlage 2: Gleichungen des vereinfachten dreiteiligen Bremsablaufmodells

Bild 1: Verzögerung des dreiteiligen Bremsablaufmodells bei Halt im entwickelten Abschnitt

Bild 2: Verzögerung des dreiteiligen Bremsablaufmodells bei Halt im Schwellabschnitt

Anlage 3: Gleichungen des entwickelten Bremsabschnitts

Bild 3: Bremskurve zu Beispiel 1

Bild 4: Verzögerungskurven zu Beispiel 1

Anlage 4: Gleichungen der Momentanwerte des Schwellabschnitts

Anlage 5: Gleichungen der Momentanwerte des entwickelten Abschnitts

Bild 5: Kennlinien der momentanen Variablen $v(s)$ und $t(s)$ zur Bremsung des Beispiels 1

Bild 6: Weg-Zeit-Geschwindigkeitsdiagramm der Unfallrekonstruktion zu Beispiel 3

A Anhaltebeginn B Bremsbeginn S Schwellbeginn E Beginn entwickeltes Bremsen

H Haltepunkt K Kollisionspunkt

Anlage 1: Erweiterte Mindener Bremsweggleichung

Bremsstellungen P und R

$$s_B = \frac{3,85 v_0^2}{6,1 \psi (1 + \lambda_{\text{kor}} / 10) + i_{\text{kor}}} \quad (1/1)$$

Bremsstellung G

$$s_B = \frac{3,85 v_0^2}{5,1 \psi \sqrt{\lambda_{\text{kor}} - 5} + i_{\text{kor}}} \quad (1/2)$$

Korrigierte Bremswert

$$\lambda_{\text{kor}} = c_1 \lambda_Z \quad (1/3)$$

Korrigierte Längsneigung

$$i_{\text{kor}} = c_2 i_m \quad (1/4)$$

Beiwert ψ

$$\psi = \psi_0 + \psi_1 \varphi + \psi_2 \varphi^2 + \psi_3 \varphi^3 \quad (1/5)$$

Beiwert c_2

$$c_2 = k_0 + k_1 \varphi + k_2 \varphi^2 \quad (1/6)$$

mit $\varphi = v_0 / v_{00}$

v_0 km/h	Klotzbremse Stellung P		Klotzbremse Stellung R		Scheiben- bremse P, R*, R	Stellung G	v_0 km/h	Stellung R+Mg
	E	D	E	D				
10	0,75	0,50	0,63	0,40	0,51	0,41	70	0,76
20	1,04	0,73	0,87	0,60	0,63	0,61	80	0,81
30	1,17	0,87	1,00	0,69	0,73	0,75	90	0,85
40	1,23	0,97	1,09	0,74	0,81	0,85	100	0,89
50	1,25	1,02	1,14	0,76	0,87	0,92	110	0,91
60	1,24	1,05	1,15	0,77	0,91	0,97	120	0,93
70	1,21	1,06	1,15	0,92	0,95	1,00	130	0,95
80	1,17	1,05	1,14	0,96	0,97	1,02	140	0,95
90	1,13	1,04	1,11	0,98	0,98	1,02	150	0,95
100	1,09	1,03	1,08	1,00	0,99	–	160	0,95
110	1,04	1,02	1,04	1,00	1,00	–	170	0,94
120	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	–	180	0,93
130	0,96	0,98	0,96	0,99	1,00	–	190	0,92
140	–	–	0,92	0,98	1,00	–	200	0,91
150	–	–	–	0,96	1,02	–	210	0,89
160	–	–	–	0,93	1,03	–	220	0,88

v_0 Anfangsgeschwindigkeit in km/h

s_B Bremsweg in m

λ_Z verfügbare Bremswert

i_m mittlere Bremswertneigung in ‰

(Steigung positiv, Gefälle negativ)

v_{00} Konstante, $v_{00} = 100$ km/h

Tabelle 1:
Beiwert ψ

E Einfachklotz
D Doppelklotz
R* Stellung R
ohne
Schnellent-
lüftungs-
ventil

Tabelle 2: Beiwert c_1

Stellung P, R*		Stellung G	
Achsen	c_1	Achsen	c_1
0...24	1,10	0...40	1,12
25...48	1,05	41...80	1,06
49...60	1,00	81...100	1,00
61...80	0,97	101...120	0,95
81...100	0,92	121...150	0,90

Für R und für R+Mg ist

$c_1 = 1$ (konstant)

Für P, R, R+Mg ist bei $v_0 > 90$ km/h
in Gl. (1/6) $c_2 = 0,90$ zu setzen.

Tabelle 3: Beiwert c_2

v_0 km/h	Stellung P/R(Mg)	Stellung G
10	0,60	0,60
20	0,66	0,62
30	0,72	0,64
40	0,77	0,66
50	0,81	0,68
60	0,84	0,70
70	0,87	0,72
80	0,89	0,74
90	0,90	0,75
100	0,90	–
110...	0,90	–

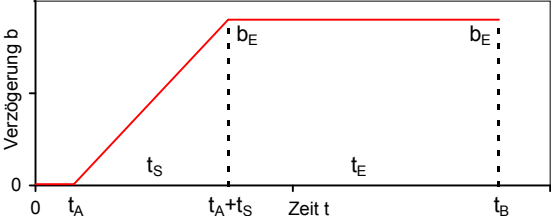
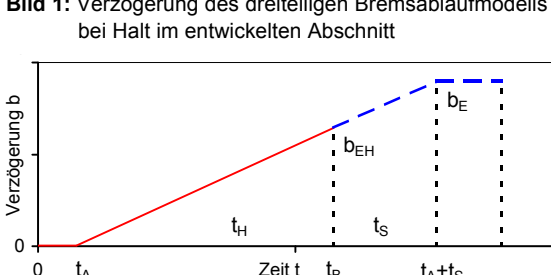
Tabelle 4: Konstanten zur Gleichung des Beiwerts ψ

Variante	ψ_0	ψ_1	ψ_2	ψ_3
P, Einfachklotz	0,6960	2,348	– 3,030	1,0660
P, Doppelklotz	0,3470	2,446	– 2,650	0,8830
R, Einfachklotz	0,5160	2,268	– 2,447	0,7400
R, Doppelklotz	0,4000	1,106	– 0,556	0,04441
P, R*, R, Scheibe	0,3683	1,5521	– 1,2952	0,3668
Stellung R+Mg	0,09756	1,3944	– 0,7128	0,10904
Stellung G	0,1710	2,715	– 2,979	1,1280

Tabelle 5: Konstanten zur korrigierten Neigung i_{kor}

Bremsstellung	k_0	k_1	k_2
Stellung P, R (Mg)	0,5265	0,7578	– 0,3826
Stellung G	0,58	0,2	0

Anlage 2: Gleichungen des vereinfachten dreiteiligen Bremsablaufmodell

 Bild 1: Verzögerung des dreiteiligen Bremsablaufmodells bei Halt im entwickelten Abschnitt	Halt im entwickelten Abschnitt Gesamtwerte $t_B = t_A + t_S + t_E \quad (2/1)$ $s_B = s_A + s_S + s_E \quad (2/2)$ Ansprechen ($v_0 = \text{konstant}$) $s_A = v_0 t_A \quad (2/3)$ Schwellen ($v_S > 0$) $b_E = 6 \frac{k}{t_S^2} \left[\sqrt{1 + \frac{v_0^2 t_S^2}{3k^2}} - 1 \right] \quad (2/4)$ $v_S = v_0 - \frac{1}{2} b_E t_S \quad (2/5)$ $s_S = v_0 t_S - \frac{1}{6} b_E t_S^2 \quad (2/6)$ $k = 2 s_B - v_0 (2 t_A + t_S) \quad (2/7)$ Entwickeltes Bremsen $t_E = \frac{v_S}{b_E} \quad (2/7)$ $s_E = \frac{v_S^2}{2 b_E} \quad (2/8)$	Halt im Schwellenabschnitt Gesamtwerte $t_B = t_A + t_H \quad (2/9)$ $s_B = s_A + s_H \quad (2/10)$ Ansprechen ($v_0 = \text{konstant}$) $s_A = v_0 t_A \quad (2/11)$ Schwellen ($v_S = 0$) $b_{EH} = 2 \frac{v_0}{t_H} \quad (2/12)$ $b_E = b_{EH} \frac{t_S}{t_H} \quad (2/13)$ $t_H = \frac{3}{2} \left(\frac{s_B}{v_0} - t_A \right) \quad (2/14)$ $s_H = v_0 t_H - \frac{1}{6} b_{EH} t_H^2 \quad (2/15)$ Bewertungskriterium Gl.(2/14) $t_H \leq t_S$ Halt beim Schwellen $t_H > t_S$ Halt beim entwickelten Bremsen
 Bild 2: Verzögerung des dreiteiligen Bremsablaufmodells bei Halt im Schwellenabschnitt t_B Bremszeit t_A Ansprechzeit t_S Schwellzeit t_E entwickelte Bremszeit t_H Haltzeit beim Schwellen v_0 Anfangsgeschwindigkeit b_E entwickelte Verzögerung s_B Bremsweg s_A Ansprechweg s_S Schwellweg s_E entwickelter Bremsweg s_H Haltweg beim Schwellen v_S Schwellendgeschwindigkeit b_{EH} Schwellhalt-Verzögerung		

Anlage 3: Gleichungen des entwickelten Bremsabschnitt

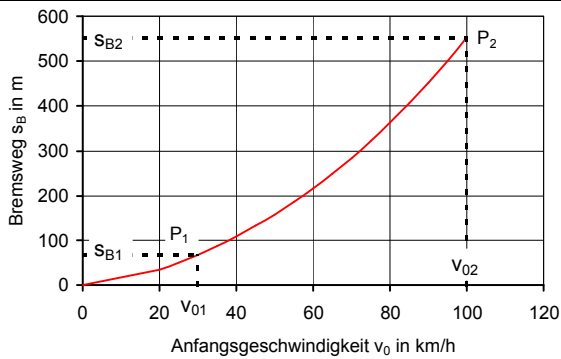


Bild 3: Bremswegkurve zu Beispiel 1

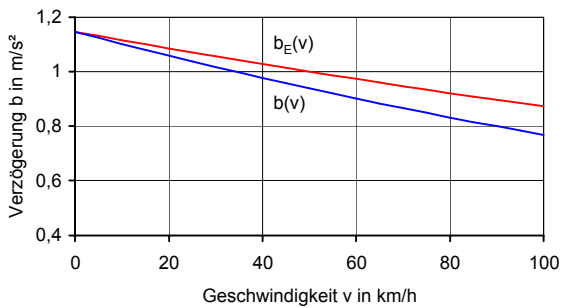


Bild 4: Verzögerungskurven zu Beispiel 1

Hinweis:
Für die Berechnung von b_S ist Gl. (3/4) zu benutzen.

Entwickelte Verzögerung b_E

e-Funktion für $b_E(v)$

$$b_E = b_{E0} e^{-v/c_0} \quad (3/1)$$

Exponentenkonstante c_0

$$c_0 = \frac{v_{S2} - v_{S1}}{\ln(b_{E1}/b_{E2})} \quad (3/2)$$

Für v_0 , v_S , c_0 und c_{00} gilt die Maßeinheit m/s

Anfangskonstante b_{E0}

$$\ln b_{E0} = \ln b_{E1} + \frac{v_{S1}}{c_0} \quad (3/3)$$

$$b_{E0} = e^{\ln b_{E0}}$$

Momentane Schwellendverzögerung b_S für

– b_E wegbezogen

$$b_S = \frac{b_E}{1 + 0,5 v_S / c_0} \quad (3/4)$$

– b_E zeitbezogen

$$b_S = \frac{b_E}{1 + v_S / c_0} \quad (3/5)$$

Momentane Verzögerung b

e-Funktion für $b(v)$

$$b = b_0 e^{-v/c_{00}} \quad (3/6)$$

Exponentenkonstante c_{00}

$$c_{00} = \frac{v_{S2} - v_{S1}}{\ln(b_{S1}/b_{S2})} \quad (3/7)$$

$$c_{00} = c_0 \frac{\ln(b_{E1}/b_{E2})}{\ln(b_{S1}/b_{S2})} \quad (3/8)$$

Anfangskonstante b_0

$$\ln b_0 = \ln b_{S1} + \frac{v_{S1}}{c_{00}} \quad (3/9)$$

$$b_0 = e^{\ln b_0}$$

$$b_0 = b_{E0}$$

Integration

$$t_E = \frac{c_{00}}{b_0} (e^{v_S/c_{00}} - 1) \quad (3/10)$$

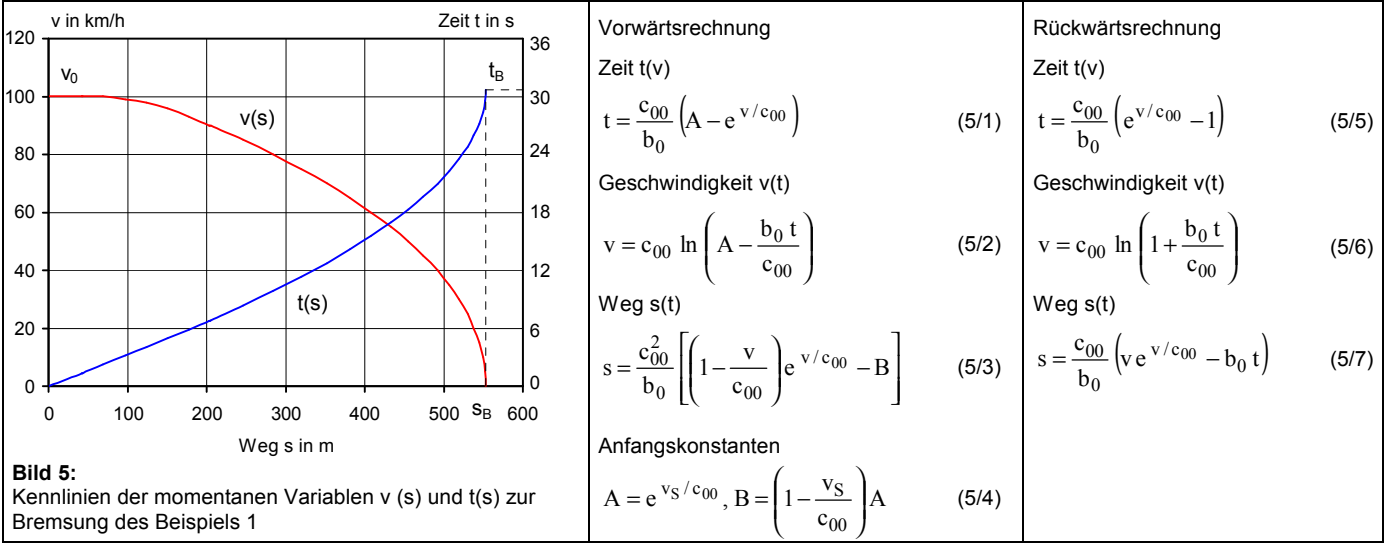
$$v_S = c_{00} \ln \left(1 + \frac{b_0 t_E}{c_{00}} \right) \quad (3/11)$$

$$s_E = \frac{c_{00}}{b_0} (v_S e^{v_S/c_{00}} - b_0 t_E) \quad (3/12)$$

Anlage 4: Gleichungen der Momentanwerte des Schwellabschnitts

Halt im entwickelten Abschnitt		Halt im Schwellabschnitt	
Vorwärtsrechnung	Rückwärtsrechnung	Vorwärtsrechnung	Rückwärtsrechnung
Verzögerung $b(t)$	Verzögerung $b(t)$	Verzögerung $b(t)$	Verzögerung $b(t)$
$b = b_E \frac{t}{t_S} \quad (4/1)$	$b = b_E \left(1 - \frac{t}{t_S}\right) \quad (4/4)$	$b = b_{EH} \frac{t}{t_H} \quad (4/7)$	$b = b_{EH} \left(1 - \frac{t}{t_H}\right) \quad (4/10)$
Geschwindigkeit $v(t)$	Geschwindigkeit $v(t)$	Geschwindigkeit $v(t)$	Geschwindigkeit $v(t)$
$v = v_0 - \frac{1}{2} b_E \frac{t}{t_S} t \quad (4/2)$	$v = v_S + b_E \left(1 - \frac{1}{2} \frac{t}{t_S}\right) t \quad (4/5)$	$v = v_0 - \frac{1}{2} b_{EH} \frac{t}{t_H} t \quad (4/8)$	$v = b_{EH} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{t}{t_H}\right) t \quad (4/11)$
Weg $s(t)$	Weg $s(t)$	Weg $s(t)$	Weg $s(t)$
$s = v_0 t - \frac{b_E}{6} \frac{t}{t_S} t^2 \quad (4/3)$	$s = v_S t + \frac{b_E}{2} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{t}{t_S}\right) t^2 \quad (4/6)$	$s = v_0 t - \frac{1}{6} b_{EH} \frac{t}{t_H} t^2 \quad (4/9)$	$s = \frac{b_{EH}}{2} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{t}{t_H}\right) t^2 \quad (4/12)$

Anlage 5: Gleichungen der Momentanwerte des entwickelten Abschnitts



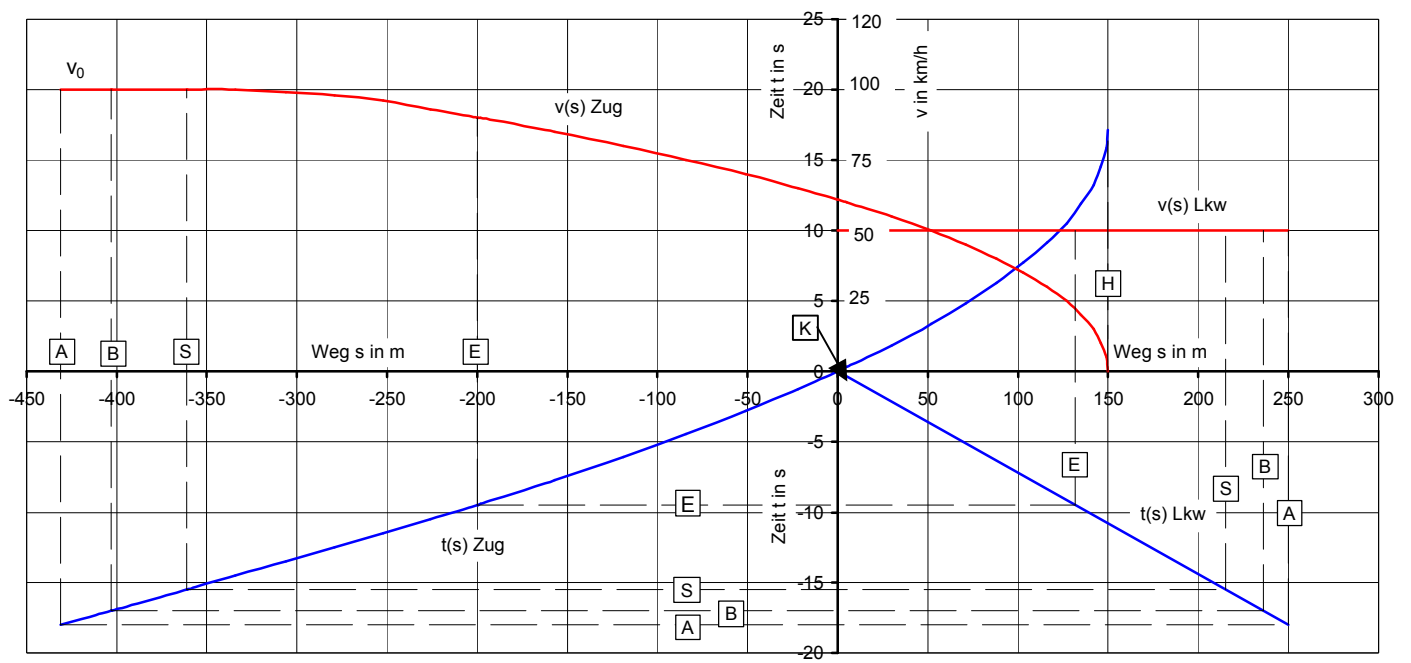


Bild 6:

Weg-Zeit-Geschwindigkeits-Diagramm der Unfallrekonstruktion zu Beispiel 3

A Anhaltebeginn B Bremsbeginn S Schwellbeginn E Beginn entwickeltes Bremsen H Haltepunkt K Kollisionspunkt



<http://www.springer.com/978-3-519-00419-6>

Fahrdynamik des Schienenverkehrs

Wende, D.

2003, X, 358 S., Softcover

ISBN: 978-3-519-00419-6