

Der stochastische Anhalteweg bei Schnellbremsung unter Beachtung der Anzahl der Fahrzeuge des Zuges

Anhaltewege von Zügen oder Fahrzeugen werden nach DIN EN 14531 auf determinierter Grundlage berechnet. Doch diese streuen in der Praxis. Das erstellte Excel-Simulationswerkzeug berechnet Anhaltewege mit Wahrscheinlichkeitsaussage, was an zwei Fahrzeugtypen demonstriert wird. Verteilungsfunktionen des Anhalteweges geben theoretische Aussagen zur Genauigkeit der Einhaltung des Zielpunktes.

1. EINFÜHRUNG

Der theoretische Leistungsnachweis des Bremsvermögens von Zügen ist nach DIN EN 14531 zu erbringen [1]. Dazu werden Anhaltewege für ausgewählte Betriebsparameter berechnet. Das erfolgt mit determinierten Eingabewerten (Mittelwerte der Einflussparameter). Der Genauigkeitsgrad der Eingabeparameter bleibt dabei unbekannt.

Der experimentelle Leistungsnachweis des Bremsvermögens von Einzelfahrzeugen und Zügen bei Schnellbremsung führt zu einer Streuung des Anhalteweges. Aus einer festgelegten Stichprobe wird deshalb nach Merkblatt UIC 544-1 der Erwartungswert und die Standardabweichung des Anhalteweges ermittelt [2].

Die Streuung des Anhalteweges wird im konventionellen Eisenbahnbetrieb durch Zugabe eines Sicherheitszuschlages in den Bremsbewertungsvorschriften berücksichtigt.

ETCS (Europäisches Zugbeeinflussungssystem) schenkt der Streuung des Anhalteweges ebenfalls eine besondere Beachtung. Über erste Berechnungen zu Verteilungsfunktionen des Anhalteweges für Hochgeschwindigkeitszüge wird in [3] [4] berichtet. Zur Anwendung kommt dabei die Monte Carlo Methode.

Das stochastische Verhalten des Anhalteweges kann simuliert werden. Erforderlich sind dazu Kenntnisse zur Streuung der Einflussparameter auf den Anhalteweg. Der Bremsvorgang ist damit ein Zufallsprozess der statistischen Physik. Die Eingabeparameter sind damit Zufallsvariablen.

Aus einer Vielzahl von theoretischen Berechnungen (Realisierungen) auf der Grundlage ausgewählter Zufallszahlenfelder der Eingabeparameter kann der stochastische Anhalteweg als Verteilungsfunktion dargestellt werden.

2. MODELLESTRUKTUR

Nach DIN EN 14531-1 setzt sich die Berechnungsgleichung für den Anhalteweg aus zwei Termen zusammen. Der erste Term ist der ungebremste Weg und der zweite der Bremsweg nach entwickelter Bremskraft.

$$s_{\text{Anhalten}} = v_0 \cdot t_e + \frac{v_0^2}{2 \cdot a_m} \quad (1)$$

Streuungsbehaftet sind die Einflussparameter Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0 , äquivalente Bremsentwicklungszeit t_e und die mittlere äquivalente Gesamtverzögerung a_m . Diese Parameter sind von einer determinierten in eine statistische Größe zu überführen. Dazu bedarf es der Kenntnis der Häufigkeitsverteilungen der Einflussparameter. Häufigkeitsverteilungen aus Versuchsergebnissen stehen in ausreichender Zahl dafür i. d. R. nicht zur Verfügung. Ausgewählt wird die Normalverteilung, die durch den Erwartungswert \bar{x} und der Standardabweichung σ charakterisiert wird [5]. Sind die Standardabweichungen unbekannt, sind diese aus der praktischen Erfahrung z. B. aus Toleranzangaben abzuschätzen.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Anhalteweges können mit Grenzen (Z-Wert) definiert werden. Sie werden als Vertrauensintervall oder auch Konfidenzintervall bezeichnet.

Untere Grenze des Vertrauensniveaus

$$UG = \bar{x} - Z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_{\text{Mittelwert}} \quad (2)$$

Obere Grenze des Vertrauensniveaus

$$OG = \bar{x} + Z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_{\text{Mittelwert}} \quad (3)$$

Zur Berechnung des Anhalteweges werden folgende Angaben für die genannten Einflussparameter verwendet.



Dr.-Ing. Dieter Jaenichen
Professur für Technik spurgeführter Fahrzeuge, TU Dresden
Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik
dieter.jaenichen@tu-dresden.de



Tobias Krönert
Voith Turbo Lokomotivtechnik, eine Zweigniederlassung der Voith Turbo GmbH & Co. KG, Ehemaliger Student der Schienenfahrzeugtechnik der TU Dresden
Tobias.Kroenert@voith.com

Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0

Die Europäische Eisenbahnagentur (ERA) hat für ETCS die Messunsicherheit der Fahrgeschwindigkeit im Subset-041 Baseline 3 [6] von ± 2 km/h für $v \leq 30$ km/h und einer linearen Zunahme bis auf ± 12 km/h bei 500 km/h festgelegt. Die Werte der daraus approximierten Berechnungsgleichung werden als 3σ -Bereich angenommen:

$$\Delta v = \frac{1}{47} \cdot v + \frac{64}{47} \quad (4)$$

Daraus wird die Standardabweichung berechnet.

Äquivalente Bremsentwicklungszeit t_e

Die Berechnungsgleichung ist dem UIC Merkblatt 544-1 Anhang G [2] und dem Subset 026 der ETCS Baseline 3 [7] für Bremsstellung P bis zu einer Wagenzuglänge L von 900 m zu entnehmen.

$$t_{e\text{Wagenzug}} = a + b \cdot \frac{L}{100} + c \cdot \left(\frac{L}{100}\right)^2 \quad (4)$$

Einzusetzen sind die Zahlenwerte für $a = 2,3$, für $b = 0$ und für $c = 0,17$.

Mittlere Gesamtverzögerung a_m

Die mittlere Gesamtverzögerung a_m ist ein Ergebnisparameter. Sie ergibt sich aus dem Wirken primärer Einflussparameter. Das sind die mittleren Bremskräfte der Bremsanlage F_{Brm} , die Fahrzeugwiderstandskräfte F_{Wm} und die Streckenkräfte F_{Sm} . m_{dyn} ist die Summe aus translatorischer und rotatorischer Masse des Fahrzeugs oder Wagenzuges.

$$a_m = \frac{F_{Brm} + F_{Wm} + F_{SM}}{m_{dyn}} \quad (5)$$

Die Bremskraft-Einflussfaktoren sind aus der Bremskraftberechnung nach DIN EN 14531 zu entnehmen. Ausgewählt werden dabei die Parameter, die einen wesentlichen Einfluss auf die Bremsverzögerung haben. Für jedes Bremsarbeitssystem sind diese unter Beachtung der Reibpaarungen n_{Reib} gesondert festzulegen.

Die Widerstandskräfte F_{Wm} werden üblicherweise nach einer empirischen Polynomgleichung 2. Grades berechnet oder Versuchsberichten entnommen [1], [2].

Die Streuung von F_{Wm} bleibt unberücksichtigt. Die Berechnungen der Schnellbremsungen sind nur in der Ebene vorgesehen. Damit entfällt dieser Term in Gleichung 5.

Einflussparameter gleicher Art wirken am Fahrzeug unterschiedlich häufig. Dies hängt von der Konstruktion der Bremsanlage ab. Das Bauteil Bremszylinder am Fahrzeug kann beispielsweise ein- oder mehrmals vorhanden sein. Dies wird bei der Anhaltewegberechnung durch den Standardfehler des Erwartungswertes des Einflussparameters $\sigma_{Mittelwert}$ ohne Vorgabe einer statistischen Sicherheit P berücksichtigt.

$$\sigma_{Mittelwert} = \frac{\sigma}{\sqrt{n_{Wied Zug}}} \quad (6)$$

$n_{Wied Zug}$ sind jeweils die Anzahl der Wirkungsorte jedes Einflussparameters in einem Zug, wobei der Zug auch nur aus einem Fahrzeug bestehen kann. Es handelt sich also um die Anzahl der Wiederholungen mit dem gleichen Einflussparameter im Wagenzug.

$$n_{Wiedzug} = n_{Wirk/Fahrzeug} \cdot n_{Fahrzeug} \quad (7)$$

Die weiteren Berechnungsgrößen sind fahrzeughängig aus zu wählen.

3. PARAMETER FÜR GÜTERWAGEN MIT KLOTZBREMSE

Ausgewählt wird ein vierachsiger Güterwagen der Gattung Rns mit herkömmlichem Bremsgestänge, dessen Räder mit K-Bremssohlen beidseitig abgebremst werden (Bild 1) [9].

Die mittlere Bremskraft F_{Brm} eines Fahr-

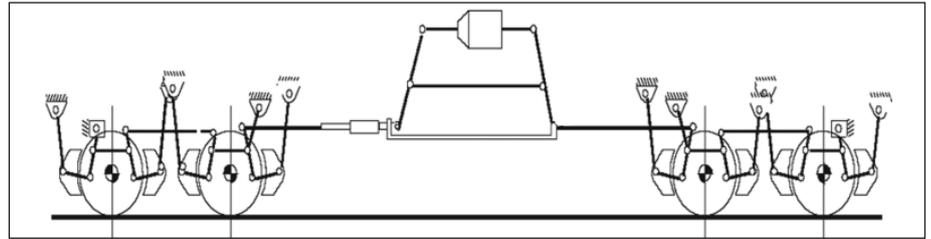


BILD 1: Klotzbremse des Güterwagens der Bauart Rns

zeugs ist das Produkt aus den Einzelklotzkräften und dem mittleren Reibwert der K-Bremssohlen μ_{Km} .

$$F_{Brm} = \Sigma F_{KE} \cdot \mu_{Km} \quad (8)$$

Die Summen-Klotzkraft ist von den Variablen Zylinderkraft F_{Zyl} , Übersetzungsverhältnis i und dem Gestängewirkungsgrad η abhängig.

$$\Sigma F_{KE} = F_{Zyl} \cdot i \cdot \eta - F_G \quad (9)$$

Mit dem in der Bremsberechnung angegebenen Bremszylinderdruck p_{Zyl} für den jeweiligen Ladezustand wird die Zylinderkraft F_{Zyl} bei bekannter Kolbenfläche A_{Zyl} und Federkräften F_F berechnet.

$$F_{Zyl} = p_{Zyl} \cdot A_{Zyl} - F_F \quad (10)$$

Die stochastische Bremskraft ergibt sich aus den nun gewählten stochastischen Größen Bremszylinderdruck, Bremsgestängewirkungsgrad und dem mittleren Reibwert der Reibpaarung. Für eine Simulationsrechnung wird für p_{Zyl} und η nur eine Zufallszahl je Fahrzeug benötigt. Sie wirken am Fahrzeug nur einmal.

Die Reibpaarungen sind jedoch am Fahrzeug mehrmals vorhanden. Das bedarf im ersten Schritt einer statistischen Aufbereitung des mittleren Reibwertes entsprechend der Anzahl der Reibpaarungen am Fahrzeug. Die Toleranzbereiche des mittleren

Reibwertes für eine Radpaarung beidseitig abgebremst für die Konfiguration 2 Bg in Abhängigkeit von den Klotzkräften und der Bremsausgangsgeschwindigkeit sind in der Tabelle C.5 der DIN EN 16452 für den trockenen Zustand zu finden [9]. Die in der Norm angegebenen Grenzwerte werden als $2\sigma_\mu$ Grenze des mittleren Reibwertes für die doppelte Abbremmung jedes Rades angenommen, um auch den Einfluss der Nässe zu berücksichtigen.

Die Anzahl der Rad-Reibpaarungen n_{Reib} je Fahrzeug ist aus der Bremsanlage zu entnehmen (hier 8 Rad-Reibpaarungen). Der statistisch gesehene Standardfehler des mittleren Reibwertes des Wagenzuges ergibt sich damit aus der Anzahl der Räder eines Fahrzeugs multipliziert mit der Anzahl der Fahrzeuge des Wagenzuges $n_{Fahrzeug}$.

$$\sigma_{\mu \text{ Wagenzug}} = \frac{\sigma_\mu}{\sqrt{n_{Räder/Fahrzeug} \cdot n_{Fahrzeug}}} \quad (11)$$

Diese Gleichung gilt für Bremssohlen gleicher Charge oder gleicher Sohlentypen. Aber im Betriebseinsatz können je Achse unterschiedliche Sohlentypen an einem Fahrzeug eingebaut sein. Jede Sohlentypen kann damit eine andere Reibwertcharakteristik innerhalb des UIC-Streubandes besitzen. Das ist durch zwei unterschiedliche Normalverteilungen im folgenden mathematischen Ansatz zu berücksichtigen.

Der Mittelwert des mittleren Reibwertes $\bar{\mu}_{ges}$ ergibt sich aus den prozentualen Anteilen „a“ und „b“ von zwei Reibmaterialtypen. »

TABELLE 1: Statistische Eingabewerte für einen Güterwagen Bauart Rns

Parameter	Erwartungswert x	Standardabweichung σ
v_0 [km/h]	100	1,16
t_e [s] Fahrzeug Wagenzug	2,3 = f(L)	0,1 = 0,04 · t_{eWagen}
p_{Zyl} [kPa] leer beladen	144 380	1,25 3,35
η	0,83	0,015
μ_{Km} leer beladen	0,28 0,25	0,01 0,01
m_{dyn} [t] leer beladen	23,3 92,3	0,25 0,25

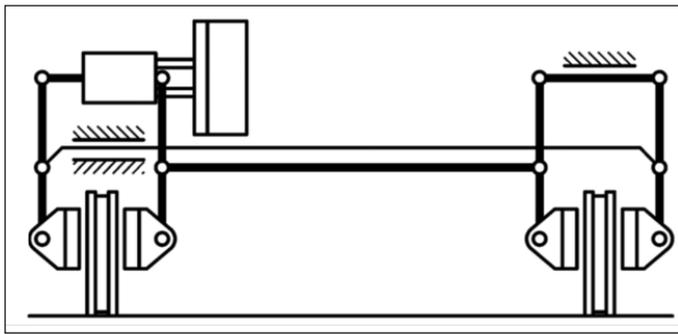


BILD 2: Scheibenbremseinheit am Reisezugwagen [1]

$$\bar{\mu}_{ges} = a \cdot \bar{\mu}_1 + b \cdot \bar{\mu}_2 \quad (12)$$

Die Standardabweichung σ_{ges} ist unter Beachtung der zwei verschiedenen Bremssohlentypen

$$\sigma_{ges} = \sqrt{a^2 \cdot \sigma_1^2 + b^2 \cdot \sigma_2^2} \quad (13)$$

In Tabelle 1 sind die für die stochastischen Berechnungen angenommenen Eingabewerte für die ausgewählten Einflussparameter zusammengefasst.

4. PARAMETER FÜR REISEZUGWAGEN MIT SCHEIBEN- UND MAGNETSCHIENENBREMSE

Der ausgewählte vierachsige Reisezugwagen ist mit Scheiben- und zusätzlich mit Magnetschienenbremse ausgestattet. Jedem Radsatz mit zwei Brems scheiben ist ein Bremszylinder, der Kräfte über ein Bremsgestänge überträgt, zugeordnet (Bild 2).

Die Zylinderkraft F_{Zyl} wird nach der Berechnungsvorschrift DIN EN 14531-1 be-

rechnet. Die Summe der Belaganpreßkräfte ΣF_B ergibt sich aus der Zylinderkraft F_{Zyl} der Gestängeübersetzung i und dem Übertragungswirkungsgrad η je Bremseinheit.

$$\Sigma F_B = F_{Zyl} \cdot i \cdot \eta \quad (14)$$

Der Bremszylinderdruck wird wiederum eine stochastische Größe und sein Standardfehler wird in Abhängigkeit von der Wagenzahl berechnet:

$$\sigma_{pZyl,Zug} = \frac{\sigma_{pZyl}}{\sqrt{n_{Zyl/Fahrzeug} \cdot n_{Fahrzeug}}} \quad (15)$$

Der Bremsgestängewirkungsgrad wird analog dazu berechnet. Die Übersetzung i wird streuungsfrei angenommen.

Die Grenzwerte des mittleren Reibwertes für den organischen Scheibenbremsbelag bezogen auf eine Brems scheibe werden dem Merkblatt UIC 541-3 Anlage C entnommen [10].

Der Streubereich des Mittelwertes des mittleren Reibwertes eines Fahrzeugs bzw. Zuges ergibt aus dem Standardfehler einer Reibpaarung $\sigma_{\mu m}$ geteilt Wurzel aus der

Anzahl der Scheiben je Zylinder $n_{Scheibe \text{ je Zyl}}$ multipliziert mit der Anzahl der Bremszylinder n_{Zyl} und der Anzahl der Fahrzeuge $n_{Fahrzeug}$.

$$\sigma_{\mu m,Zug} = \frac{\sigma_{\mu m}}{\sqrt{n_{Scheibe \text{ je Zyl}} \cdot n_{Zyl} \cdot n_{Fahrzeug}}} \quad (16)$$

Mit den Erwartungswerten nach UIC 541-3 und ihren Streubereichen wird schließlich die stochastische Bremskraft der Scheibenbremse berechnet.

$$F_{Brm} = \Sigma F_B \cdot \mu_m \cdot \frac{r_s}{D/2} \quad (17)$$

Der Bremsradius r_s und der Raddurchmesser D sind keine stochastischen Parameter.

Die mittlere Bremskraft der Magnetschienenbremse F_{BMGm} ist das Produkt aus Anpresskraft des Magneten F_{AMG} und dem mittleren Reibwert der gewählten Reibpaarung. Diese wird in DIN EN 14531-1 durch eine mathematische Funktion nachgebildet.

$$F_{BMGm} = F_{AMG} \cdot \frac{v_0^2 - v_A^2}{2/3 \cdot a_1 \cdot (v_0^3 - v_A^3) + a_0 \cdot (v_0^2 - v_A^2)} \quad (18)$$

Dabei sind v_A die Abschaltgeschwindigkeit und a_1 und a_0 bauartspezifische konstante Material-Koeffizienten der Reibpaarung Polschuh/Schienenkopf der Mg-Bremse.

Wirken beide genannten Bremsarbeitsysteme, berechnet sich die mittlere Gesamtverzögerung a_{mMg} zu

$$a_{mMg} = \frac{\Sigma F_{Brm} + \Sigma F_{BMGm} + F_{Wm} + F_{SM}}{m_{dyn}} \quad (19)$$

und der Anhalteweg ist

$$s_{Anhalten} = v_0 \cdot t_e + \frac{v_0^2 - v_A^2}{2 \cdot a_{mMg}} + \frac{v_A^2}{2 \cdot a_m} \quad (20)$$

		Wert	
Anzahl der Simulationsschritte	$n_{Realisierungen}$	10000	
Bremszylinderquerschnitt	$A_{Zyl} [m^2]$	0,0706	
Bremsgestängeübersetzung	i	11,76	
Bremsgestängerückzugsfederkraft	$F_F [kN]$	1,40	
Gegenkräfte im Bremsgestänge	$F_G [kN]$	13,28	
Anzahl der Reibstellen pro Wagen	$n_{Räder}$	8	
Anzahl der Wagen	n_{Wagen}	1	
Wagenlänge	$L [m]$	22,35	
Fahrzeugwiderstand des Wagenzugs	$F_W [kN]$	6,01	
		Mittelwert \bar{x}	Standardabweichung σ
Bremszylinderdruck	$p_{Zyl} [kPa]$	380	3,35
Bremsgestängewirkungsgrad	η	0,83	0,015
Ausgangsgeschwindigkeit	$v_0 [km/h]$	100	1,16
mittlerer Reibwert Bremsklotz/Rad Fahrzeug	μ_{km}	0,25	0,010
mittlerer Reibwert Bremsklotz/Rad Charge 1	μ_{km1}	0,25	0,010
mittlerer Reibwert Bremsklotz/Rad Charge 2	μ_{km2}	0,25	0,010
dynamische Wagenmasse	$m_{dyn} [t]$	92,3	0,25
Äquivalente Bremsaufbauzeit	$t_e [s]$	2,31	0,1
		Simulationsergebnisse	
Einzelbremsklotzkraft	$F_{KE} [kN]$	14,68	0,32
Bremskraft pro Reibpaarung	$F_{BKE} [kN]$	3,67	0,09
Mittlere Verzögerung	$a_m [m/s^2]$	0,70	0,02
Anhalteweg	$s_{Anhalten} [m]$	614,51	18,88
		Konfidenzintervall für α	
Irrtumswahrscheinlichkeit α		2,70E-03	557,88

Anteil an Reibpaarungen eines Wagens	
100,00%	0,00%

BILD 3: Excel-Tabellenblatt „Berechnung“ für die Klotzbremse

Gewählte Erwartungswerte und Standardabweichungen sind in der Tabelle 2 angegeben.

5. RECHENPROGRAMM

Das erstellte Excel-Programm besteht aus mehreren Tabellenblättern und einem hinterlegten VBA-Makro. Für die Klotzbremse und für die Scheiben-/Magnetschienenbremse bestehen gesonderte Excel-Tabellen.

Im ersten Tabellenblatt „Berechnung“ (Bild 3) für den Güterwagen mit Klotzbremse sind die Eingabefelder gelb hinterlegt. Sie sind vom Nutzer auszufüllen. Abgefragt werden zuerst Werte aus der Bremsleistungsbeziehung. Ferner sind die Anzahl der Reibstellen und die Anzahl der Fahrzeuge sowie die Anzahl der stochastischen Berechnungen einzugeben. Anschließend werden die Erwartungswerte und die dazugehörigen Standardabweichungen der ausgewählten streuenden Parameter abgefragt. Blau gefüllte Felder geben eine berechnete Größe aus. Die Standardabweichung für die Ausgangsgeschwindigkeit wird direkt aus deren Mittelwert berechnet. Die Eingabe des mittleren Reibwertes Bremsklotz/Rad für zwei verschiedene Chargen oder Materialtypen, ist vorgesehen.

Mit dem Button „Berechnen“ wird die Berechnung gestartet.

Im zweiten Teil des Tabellenblattes (Bild 3) werden in den blauen Feldern berechnete Werte ausgegeben. Das sind die Erwartungswerte und Standardabweichungen für die Einzelbremsklotzkraft, Bremskraft pro Reibpaarung und die mittlere Verzögerung. Der Anhalteweg wird unter Berücksichtigung einer einzugebenden Irrtumswahrscheinlichkeit α berechnet. Die dazugehörigen Konfidenzintervalle des Anhalteweges werden im Excel-Blatt angegeben.

Ein Makro berechnet die Zufallszahlenfelder für die Einflussparameter.

Das hier nicht dargestellte Tabellenblatt des Excel-Programms für Reisezüge enthält Eingabeparameter zur Berechnung der Bremskräfte für die Scheiben- und Magnetschienenbremse. Zusätzlich werden die Verteilungen für die Bremskraft der Magnete F_{BMGm} und die Verzögerungen a_{mMg} und Anhaltewege $s_{Anhalten}$ bei zugeschalteten Magneten berechnet und grafisch dargestellt.

6. STOCHASTISCHE ANHALTEWEGE

mit Güterwagen Rns

Der Einfluss des Reibwertverhaltens auf den Anhalteweg bei Einhaltung des UIC-Tole-

Parameter	Erwartungswerte x	Standardabweichung δ
v_0 [km/h]	160	1,59
t_e [s] Fahrzeug Wagenzug	2,3 = f(L)	0,1 = 0,04 · t_e
p_{zyl} [kPa]	300	2,60
η	0,95	0,01
μ_m	0,34	0,02
m_{dyn} [t]	35,2	0,94
F_{BMG} [kN]	= f(F_{AMG})	= 0,05 · F_{BMG}

TABELLE 2: Statistische Eingabeparameter für einen Reisezugwagen

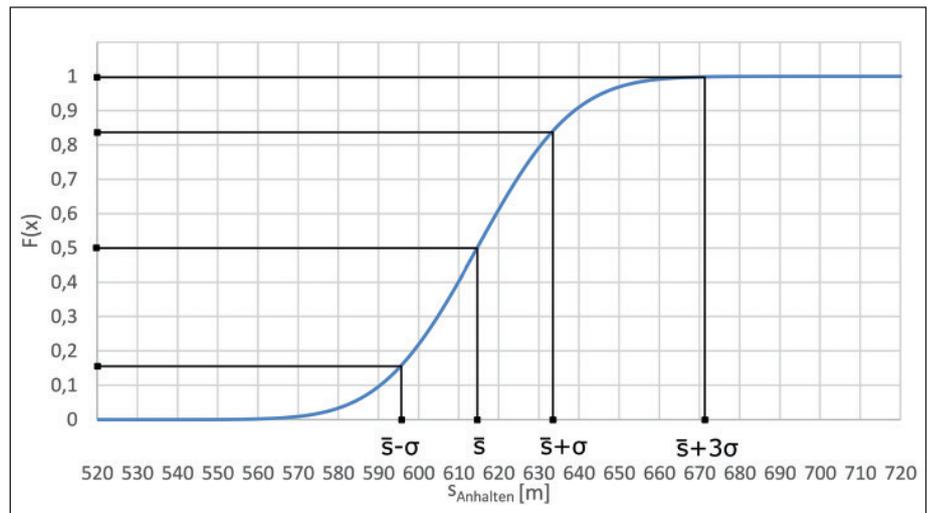


BILD 4: Verteilungsfunktion des Anhalteweges eines beladenen Rns-Wagens (90 t), $v_0 = 100$ km/h mit Standardabweichungen des Anhalteweges

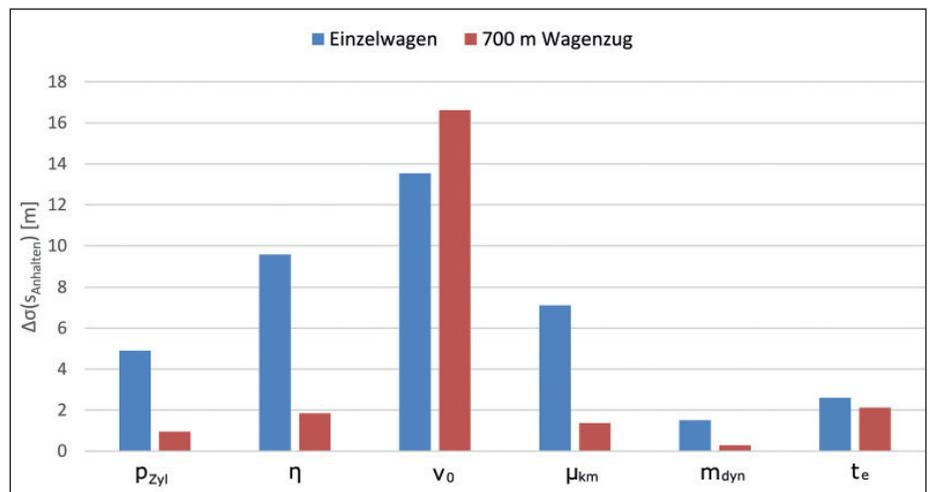


BILD 5: Standardabweichungen des Anhalteweges streuender Einflussparameter eines Güterwagens im Vergleich mit einem 700 m-Wagenzug (Einflussgrößenwertigkeit)

ranzfeldes unterschiedlicher Bremssohlentypen ist mit dem Programm interpretierbar. Beispielhaft wurden die Anhaltewege und ihre Standardabweichungen mit den Reibwertangaben der Tabelle 1 für den Güterwagen Rns bei einer Gesamtmasse von 90 t und im zweiten Fall unter sonst gleichen Voraussetzungen mit 2 Bremssohlentypen mit jeweils 50% Anteil ($\mu_{km1} = 0,245$,

$\sigma_1 = 0,0075$; $\mu_{km2} = 0,240$, $\sigma_2 = 0,005$) unter der Annahme gleicher Klotzkräfte berechnet. Die Reibwert-Unterschiede zwischen beiden Sohlentypen wurden hinsichtlich Mittelwert und Standardabweichung bewusst gering gewählt, um zu zeigen, welchen Einfluss geringfügige Änderungen im Reibwertverhalten auf die mittlere Bremsverzögerung und den Anhalteweg haben. »

	1 Reibpaarungstypen je Wagen		2 Reibpaarungstypen jeWagen	
	Mittelwert x	Standardabw. σ	Mittelwert x	Standardabw. σ
F_{KE} (kN)	14,68	0,31	14,68	0,31
F_{BrE} (kN)	3,67	0,09	3,56	0,08
a_m (m/s ²)	0,70	0,02	0,68	0,01
$S_{Anhalten}$ (m)	614,58	18,90	629,94	18,26

TAB. 3: Bremstechnische Werte bei Variation der Reibpaarungstypen je Wagen

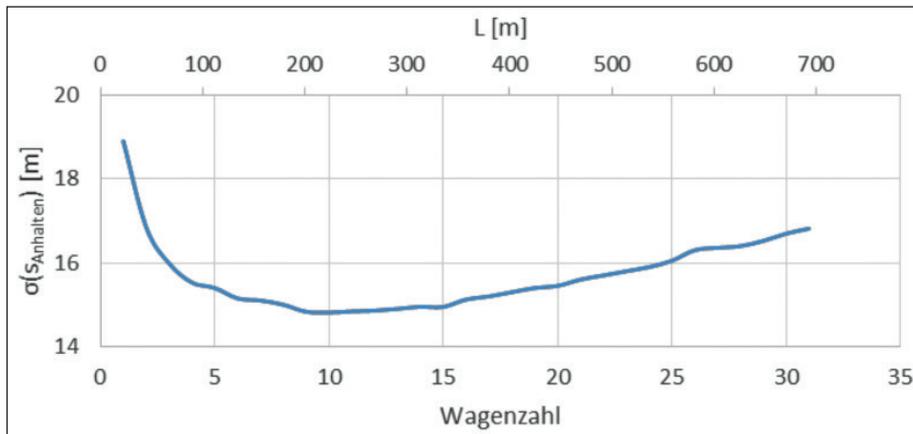


BILD 6: Standardabweichungen des Anhalteweges eines Güterwagenzuges bis 693 m Länge

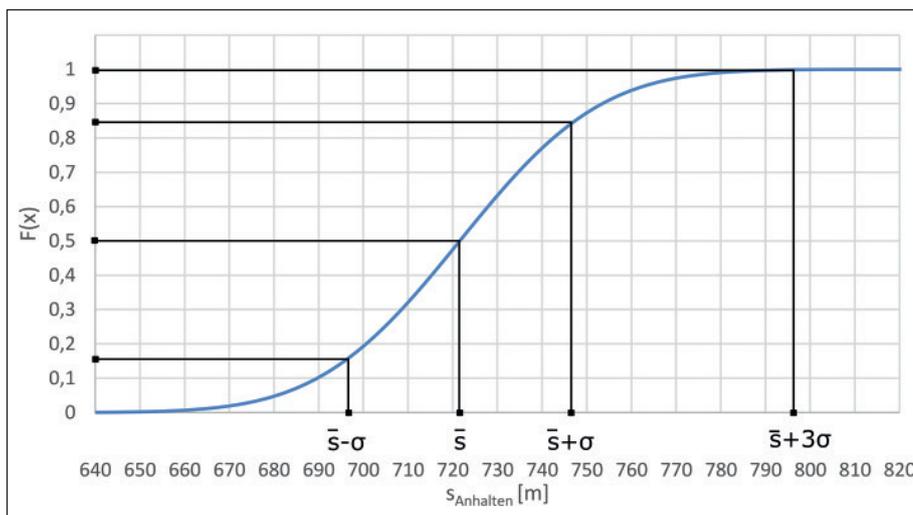


BILD 7: Verteilungsfunktion des Anhalteweges eines Reisezugwagens (Scheiben- und Magnetschienenbremse) mit Standardabweichungen

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 3 dargestellt.

Weiter wurden mit den in der Tabelle 1 angegebenen Werten für 10000 Realisierungen die Anhaltewege des ausgewählten Güterwagens berechnet. Das Ergebnis ist in Bild 4 als Verteilungsfunktion des Anhalteweges mit einem Erwartungswert von 615 m mit eingezeichneten Standardabweichungen dargestellt (siehe Tabelle 3). Interessant für die Sicherheitsbewertung ist z.B. die Beachtung der positiven 3 σ -Grenze. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,73% wird ein Anhalteweg von 672 m nicht überschritten.

Die Wirksamkeit ausgewählter Einflussparameter auf den Anhalteweg wird in Bild 5 durch eine Parametervariation dokumentiert, wobei gleichzeitig eine Gegenüberstellung zwischen Einzelwagen und einem 700 m Wagenzug vorgenommen wird (Rns-Wagen 90 t). Besteht der Wagenzug aus 31 Fahrzeugen, erhöht sich der Erwartungswert des Anhalteweges auf 859,9 m.

Den größten Einfluss auf die Streuung des Anhalteweges vom Erwartungswert hat nach den gewählten Vorgaben gemäß Subset 041 die Ungenauigkeit der Bremsausgangsgeschwindigkeit bei der Einleitung der Schnellbremsung. Ursachen dafür sind der

quadratische Einfluss der Bremsausgangsgeschwindigkeit und die Verwendung nur einer Zufallszahl für jede Realisierung. Die Fahrzeuganzahl des Wagenzuges vermindert erheblich die Standardabweichungen der bremstechnischen Fahrzeugparameter.

Weiter wurden mit den in der Tabelle 1 angegebenen Eingabewerten die Standardabweichungen des Anhalteweges in Abhängigkeit von der Wagenzahl berechnet und in Bild 6 dargestellt. Beim Einzelfahrzeug bedingen die bremstechnischen Parameter des Fahrzeugs das Ergebnis wesentlich. Ihre Bedeutung nimmt mit Anzahl der Wagen ab. Der ungebremste Weg nimmt bei gleicher Bremsausgangsgeschwindigkeit mit der Anzahl der Wagen zu, was Auswirkungen auf die Standardabweichungen des Anhalteweges hat. Geringere Standardabweichungen des Anhalteweges erhält man, wenn geringere Standardabweichungen oder kleinere Toleranzgrenzen für die Einzelparameter nachweislich vorhanden sind.

mit Reisezugwagen

Mit den in Tabelle 2 angegebenen stochastischen Parametern wurden die Anhalte-Erwartungswerte mit ihren Streubereichen berechnet. Zuerst wurde der Anhalteweg ohne die Bremskraft der Magnetschienenbremse bestimmt. Es ergibt sich ein mittlerer Anhalteweg $\bar{s}_{Anhalten} = 1066$ m mit einer Standardabweichung $\sigma = 41$ m. Wird die Magnetschienenbremse dazu geschaltet, beträgt der Anhalteweg für den Reisezugwagen $s_{Anhalten} = 722$ m und die Standardabweichung ist $\sigma = 25$ m. Somit liegt der berechnete Anhalteweg mit dem 3 σ -Bereich innerhalb des vorgegebenen Signalabstandes (Bild 7).

Auch für einen Reisezug wurde die Streuung des Erwartungswertes des Anhalteweges für verschiedene Zuglängen ermittelt. Mit 15 Fahrzeugen der ausgewählten Wagentypen ergibt sich eine Zuglänge von 396 m. Auch in diesem Fall sinkt die Standardabweichung für den Erwartungswert des Anhalteweges über die ersten fünf Wagen und beginnt danach leicht wieder zu steigen (Bild 8).

7. SCHLUSSBETRACHTUNGEN

Der determinierte Weg für die Berechnung des Anhalteweges ist in DIN EN 14531-1 vorgegeben. Diese standardisierte Berechnungsmethode wird auf ein stochastisches Modell erweitert. In der EN 14531-1 fehlt ein Berechnungsmodus für den stochastischen Anhalteweg von Fahrzeugen und homogenen Zügen.

Mit dem entwickelten Excel-Programm und

einem eingebundenen Makro-Baustein werden die Dichte- und Verteilungsfunktionen der Anhaltewege sowie die Streubereiche des Erwartungswertes der Anhaltewege mit einer Wahrscheinlichkeitsaussage berechnet.

Grundlage der Berechnungen bilden normalverteilte Häufigkeitsverteilungen der Einflussparameter. Sie stellen Abschätzungen dar. Eine statistische Aufbereitung von Versuchsergebnissen von Einflussparametern qualifiziert die Verteilungsform der Eingabegrößen.

Die Validierung des vorgestellten Simulationsprogrammes erfolgte durch Vergleich der Ergebnisse mit zwei anderen mathematischen Modellen, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Die Ergebnisse sind vergleichbar.

Das vorgestellte Rechenmodell ist ein erster Schritt für eine einfache, übersichtliche Berechnung des stochastischen Anhalteweges von homogenen Wagenzügen. Der Rechenaufwand ist mit diesem Modell für die Ermittlung der statistischen Größen gering. Ohne Einarbeitungszeit können unmittelbar Berechnungen zur Verteilungsfunktion des Anhalteweges durchgeführt werden.

Für den Projektanten der Bremse und auch für eine Prüfstelle für Schienenfahrzeuge ist dieses Simulations-Werkzeug ein sinnvolles Rechenhilfsmittel zur Bewertung der Toleranzen der Bremsparameter und weiterer betrieblicher Größen und natürlich der Streuung des Anhalteweges. Genauigkeitsforderungen an Toleranzen für Bauteile können durch Vergleichsrechnungen abgeleitet werden.

Mit dem vorgestellten Modell können Aussagen zur Einhaltung der Genauigkeit des Zielpunktes einer Schnellbremsung getroffen werden. Für die Automatisierung des Zugverkehrs sind Kenntnisse zum Er-

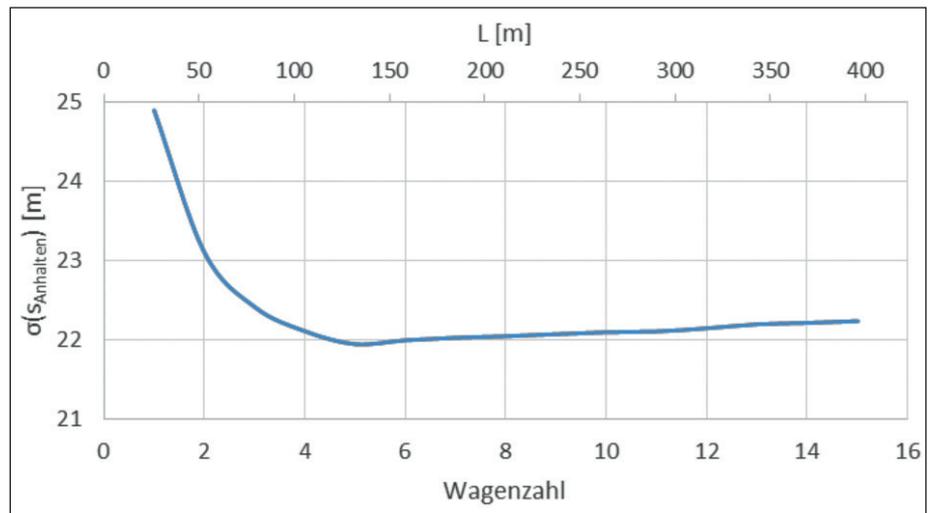


BILD 8: Standardabweichungen des Anhalteweges eines Reisewagenzuges bis 396 m Länge

wartungswert und dem Streubereich des Anhalteweges von Zügen eine wichtige Voraussetzung. ◀

Literatur

- [1] DIN EN 14531-1 Bahnwendungen-Verfahren zur Berechnung der Anhalte- und Verzögerungsbremswege und der Feststellbremsung, Ausgabe Mai 2016
- [2] UIC Kodex 544-1 Bremse – Bremsleistung, 6. Ausgabe, Okt. 2014
- [3] Malvezzi, M.; Presciani, P.; Allotta, B.; Toni, P., „Probabilistic analysis of braking performance in railways“, Journal of Rail and Rapid Transport, Nr. Mai 2003.
- [4] Pavlovic, O.; Gröpler, O.; 14. Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden Tagungssektion 21, Dresden, 2015.
- [5] Kühlmeyer, M.; Statistische Auswertungsmethoden für Ingenieure, Gifhorn: Springer-Verlag, 2001.
- [6] UNISIG, SUBSET-041 Performance Requirements for Interoperability, 3.1.0, 2012
- [7] ERTMS/ETCS, SUBSET-026-3, 2014.
- [8] Bremsberechnung für einen Rns-Wagen, Traktala-AD Sm 310.09.00.00.21
- [9] DIN EN 16452, Bahnwendungen – Bremse- Bremsklotzsohlen, Nov. 2015
- [10] UIC Kodex 541-3 Bremse-Scheibenbremse und ihre Anwendung – Allgemeine Bedingungen für die Zulassung von Bremsbelägen, 7. Ausgabe 2010

► SUMMARY

Stochastic stopping distances for emergency braking considering the number of vehicles making up a train

The stopping distances of trains and vehicles are calculated on a deterministic basis by applying DIN EN 14531. There is, however, considerable scatter in practice. The authors present a simulation tool produced with Excel for calculating stopping distances, which is demonstrated on two types of vehicle. Distribution functions of the stopping distance produce theoretical statements as regards the accuracy of coming to a standstill on the target point.

CCExpo®
Critical Communications Expo

Für zuverlässige Information
und Kommunikation!



3. und 4. Mai 2017 in Frankfurt a. M., Messe Frankfurt, Congress Center
Schirmherr: Staatsminister Peter Beuth, Hessischer Minister des Innern und für Sport

Unabhängige Plattform für sicherheitskritische Information und Kommunikation, professionellen Mobilfunk (PMR) und Leitstellen in allen Bereichen Kritischer Infrastrukturen.

☛ Fachmesse namhafter Anbieter

☛ Kommunikationskongress

☛ 14. Offizieller Leitstellenkongress

www.CCExpo.de

EMW Exhibition & Media Wehrstedt GmbH · Hagenbreite 9 · 06463 Falkenstein/Harz · E-Mail: info@ccexpo.de

EMW
EXHIBITION & MEDIA WEHRSTEDT