

Anhalteweg-Berechnung von Schienenfahrzeugen mittels Zeitschrittintegration nach DIN EN 14531

Die europäische Norm DIN EN 14531 beschreibt den Berechnungsalgorithmus für die Auslegung von Bremsanlagen mit Reibungs- und dynamischen Bremsen für Zugverbände und Einzelfahrzeuge. Mit diesen Vorgaben wird ein erstelltes Simulationsprogramm vorgestellt, das für die Bewertung des Bremsvermögens in der Auslegungsphase bei unterschiedlichen Modi genutzt werden kann. Beispiele demonstrieren die Arbeitsweise des Programms. Bewertungsgrößen zur Charakterisierung des Bremsvermögens werden vorgestellt.



Motiv

Die bremstechnische Zulassung eines Zuges oder Einzelfahrzeuges auf dem europäischen Schienennetz erfordert Auslegungs- und Sicherheitsnachweise. Es sind die Forderungen europäischer und nationaler Regelwerke zum Bremsvermögen einzuhalten. Dazu gehört u. a. eine Bremsleistungsberechnung für die vorgesehene Zugkonfiguration bei der Schnellbremsung (Gefahrenbremsung). Der Anhalteweg nach den Vorgaben der Technischen Spezifikationen (TSI LOC & PAS) [1] und TSI Güterwagen [2] unter Beachtung der Einhaltung von vorgegebenen Grenzwerten des Kraftschlusses Rad/Schiene jedes Radsatzes ist auf theoretischem Wege zu bestimmen.

Nach TSI LOC & PAS sind Berechnungen für den Normalbetrieb, bei eingeschränkten Bedingungen bei Anforderung und zusätzlich bei erschwerten Bedingungen durchzuführen.

Zur Optimierung der zu projektierenden Bremsanlage sind eine Vielzahl von Vergleichsrechnungen notwendig.

Fahrzeuge des Reiseverkehrs werden mit unterschiedlichen Bremskonfigurationen ausgestattet. Sie wirken bei einer Schnellbremsung separat oder in einer Kombination.

Nach der Versuchsdurchführung mit dem Erprobungsträger ist die theoretische Bremsberechnung den Versuchsergebnissen durch weitere Berechnungen – falls erforderlich – anzupassen.

Auch Auswirkungen von Parameteränderungen an Bremsbauteilen beim Umbau von Fahrzeugen bedürfen erneuter Bremsberechnungen.

Diese Aufgaben erfordern eine nicht unerhebliche Anzahl von Nutzungsrechnungen. Handrechnungen sind dafür sehr zeitaufwendig.

Ein Simulationsprogramm ist ein geeignetes Hilfsmittel, den dafür erforderlichen Zeitaufwand zu reduzieren. Voraussetzung für die Akzeptanz eines Simulationsprogramms ist Bedienerfreundlichkeit für den Nutzer.

Europäische Normen

Die bremstechnische Auslegung von Schienenfahrzeugen mit vorgesehenen Bremsanlagen für alle Konfigurationen von Zugverbänden und Einzelfahrzeugen einschließlich Hochgeschwindigkeitszügen erfolgt nach der europäischen Norm DIN EN 14531 „Bahnanwendungen-Verfahren zur Berechnung der Anhalte- und Verzögerungsbremswege und der Feststellbremsung“. Sie besteht aus zwei Teilen.

Im Teil 1 [3] werden die mathematischen Beziehungen für die Berechnung der mittleren Bremskräfte mit den bei Schienenfahrzeugen üblichen Bremsen und der äußeren Kräfte (Neigungs-, Zugwiderstandskräfte) angegeben. Mit diesen Vorgaben können unter Beachtung der äquivalenten Entwicklungszeiten für den



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



Dipl.-Ing. Wenjun Cui
Ehemaliger Aufbaustudent an der TU Dresden
Vertiefung „Kraftfahrzeug- und Schienenfahrzeugtechnik“
believecuiwj@gmail.com

Bremskraftaufbau und der dynamischen Zugmassen die Anhaltewege und -zeiten berechnet werden.

Der Teil 2 [4] erläutert die Methodik der schrittweisen Berechnung der Anhalte- und Verzögerungsbremswege bei Verwendung der Zeitschrittintegration, ein numerisches Verfahren mit definierten Zeitabschnitten. Für die Berechnungen der momentanen Bremskräfte stehen mathematische Beziehungen der ausgewählten Bremsarbeitssysteme aus dem Teil 1 zur Verfügung.

Der Rechenalgorithmus für die schrittweise Berechnung des Anhalteweges ist in Bild A.1 der DIN EN 14531-2 dargelegt. Dieser bildet die Grundlage für die Erstellung des Simulationsprogramms.

Weiter stehen objektorientierte Normen zur Verfügung. Zu beachten sind besonders die DIN EN 16185 Triebzüge [5], DIN EN 15179 Reisezugwagen [6] und DIN EN 15734 Hochgeschwindigkeitszüge [7].

Die Norm DIN EN 16834 „Bremsvermögen“ [8] dient zur Bewertung der Bremsleistung bzw. des Bremsvermögens der Zugkonfiguration. In der zitierten Bremsberechnungsvorschrift werden dazu keine Angaben gemacht.

Das Bremsvermögen eines Zuges oder Einzelfahrzeuges wird durch den Anhalteweg und die -zeit bzw. durch Verzögerungen mit unterschiedlichen Definitionen z.B. momentane, mittlere oder Stufen-Verzögerungen bewertet.

Mathematisches Modell

Für die Bremsleistungsberechnung werden die Berechnungsgleichungen für die Bremskräfte der Bremsarbeitssysteme Klotz-, Scheiben- und elektrodynamischer – sowie der Magnetschienenbremse aus der DIN EN 14531 in das mathematische Modell übernommen. Gleiches gilt für die Fahrzeug- bzw. Zugwiderstandskräfte F_{ext} .

Diese werden nach der Polynomgleichung zweiten Grades berechnet:

$$F_{ext} = A + B \cdot v + C \cdot v^2 \quad (1)$$

Die Koeffizienten A, B, C sind zugsspezifische Größen.

Die theoretischen Berechnungen gehen von einer geraden ebenen Strecke und der Annahme aus, dass annähernd windstilles und trockenes Wetter vorhanden ist.

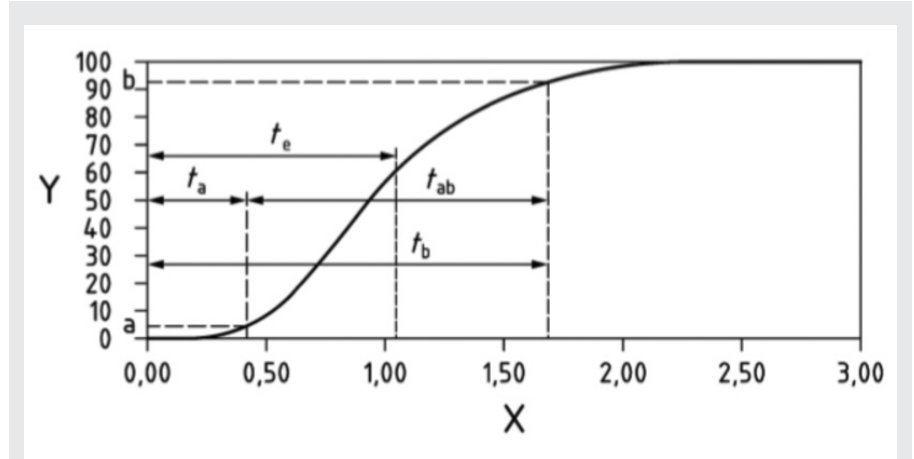
Mittels des Zeitschrittverfahrens werden die Leistungsmerkmale der Bremsanlagen für Zugverbände und Einzelfahrzeuge nach Vorgaben der DIN EN 14531-2 berechnet.

Mathematische Gleichungen für die Berechnung der momentanen Reibwerte der mechanischen Bremsen zur Ermittlung der momentanen Bremskräfte sind in der EN nicht angegeben.

Im erstellten Programm können mit den Berechnungsgleichungen für den momentanen Reibwert die Einflüsse Anpresskraft F_A , momentane Geschwindigkeit v und Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0 berücksichtigt werden.

$$\mu = f(F_A, v, v_0) \quad (2)$$

Die im Programm verwendeten Berechnungsgleichungen für die momentanen



1: Verzugs- und Entwicklungszeiten der Bremskräfte [3], Y – normierte Bremskraft, X – Zeit

Reibwerte der Bremspaarungen beruhen auf Angaben der Streubänder der prDIN EN 15328 (Bremsbeläge) [9] und der DIN EN 16452 (Bremsklötze) [10]. Die gewählten Reibwerte sind in der Bremsen-Dokumentation nach TSI LOC&PAS zu begründen.

Für die Berechnung der momentanen Reibwerte der Magnetschienenbremse wird die in der DIN EN 14531-1 vorhandene gebrochene rationale Funktion übernommen. Die darin enthaltenen Koeffizienten sind produktspezifisch festzulegen und sind ebenfalls wie bei der Klotz- und Scheibenbremse zu begründen.

Schienenfahrzeuge werden teilweise mit mehreren Bremsarbeitssystemen ausgestattet. Werden deren Bremskräfte über das Rad/Schiene System übertragen, ist das Blending-Verfahren z.B. für die Bremskombination Reibungs- und elektrodynamische Bremse anzuwenden [3].

Danach ist bei der zuvor genannten Bremskombination die momentane Summenbremskraft F_{Bd} aus vorgegebener momentaner Bremskraft der elektrodynamischen Bremse F_{BED} und der momentanen Bremskraft z.B. der Reibungsbremse F_B zu berechnen.

$$\sum F_{Bd} = F_{BED} + F_B \quad (3)$$

Die Summenbremskraft (Gesamtverzögerungskraft je Radsatz) $\sum F_{Bd}$ darf die max. zulässige Bremskraft $F_{B,max}$ je Radsatz nicht überschreiten. Zum Nachweis, dass diese bei der Bremsauslegung durch die Summenbremskraft nicht überschritten wird, ist auch diese zu berechnen.

$$F_{B,max} = \tau_a \cdot g \cdot (m_{st,ax} + m_{rot}) \quad (4)$$

Es bedeuten:

- τ_a max. vorgegebener Kraftschluss Rad/Schiene
- $m_{st,ax}$ statische Radsatzfahrmasse
- m_{rot} rotatorische Radsatzfahrmasse

Die momentane Fahrzeugverzögerung a oder die des Zuges ergibt sich aus dem Quotienten des Wirkens der momentanen Bremskräfte F_{Bd} aller eingesetzten Bremsen und der Zugwiderstandskräfte F_{ext} dividiert durch die dynamische Zugmasse m_{dyn} . Diese ergibt sich aus der Summe von $m_{st,ax}$ und m_{rot} .

$$a = \frac{\sum F_{Bd} + F_{ext}}{m_{dyn}} \quad (5)$$

Ein weiteres Kriterium der Bremsenauslegung ist die Nichtüberschreitung der Gesamtverzögerung des Fahrzeuges von $2,5 \text{ m/s}^2$.

Der Anhalteweg setzt sich aus dem Term des äquivalenten ungebremsten Wegs s_0 und dem schrittweise zu berechnenden Verzögerungsbremsweg Δs nach entwickelten Bremskräften des Zuges bzw. des Fahrzeuges zusammen.

$$s = s_0 + \sum \Delta s_i = v_0 \cdot t_e + \sum \Delta s_i \quad (6)$$

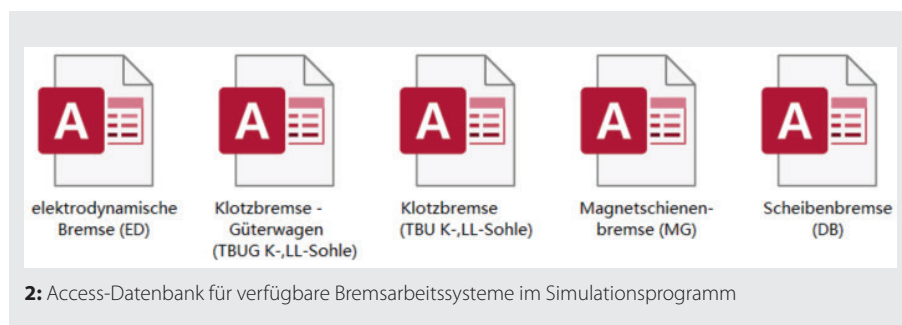
Dabei ergibt sich s_0 aus der äquivalenten Ansprechzeit t_e und der Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0 .

Grundlage für ihre Berechnung ist das Bild 1 [3].

Es bedeuten:

Y Faktor der Nennbremskraft, X Zeit

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für TU Dresden / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DW Media Group GmbH 2020



Danach lautet die Berechnungsgleichung

$$t_e = t_a + \frac{t_{ab}}{2} \quad (7)$$

Es bedeuten:

t_a Verzugszeit

t_{ab} Bremskraftentwicklungszeit

Die Zeit von der Einleitung der Bremsung bis 95 % der max. Bremskraft ist die Ansprechzeit t_b .

Sie ist von der Länge des Zuges und der Bauart der Bremsanlagen mit ihrer Ansteuerung abhängig.

Der Verzögerungsbremsweg ΔS_i eines Berechnungsschrittes ist

$$\Delta S_i = \frac{v_i^2 - v_{i+1}^2}{2a_i} \quad (8)$$

Die Anhaltezeit t ist die Zeit von der Einleitung der Bremsung durch eine Betätigungseinrichtung und dem Zeitpunkt, wenn der Zug zum Stillstand gekommen ist. Sie ergibt sich im Ergebnis der Zeitschrittintegration der momentanen Verzögerung des Zuges.

$$\Delta t_i = \frac{v_i - v_{i+1}}{a_i} \quad (9)$$

Simulationsprogramm

Für die Umsetzung des mathematischen Modells in ein Simulationsprogramm wurde eine leicht verfügbare Software gesucht. Es muss die Berechnungen mit der geforderten Rechengenauigkeit nach DIN EN 14531 ausführen und die Eingabeparameter sowie die Simulationsergebnisse in eine übersichtliche Darstellung auf dem Dialogfeld ermöglichen.

Die Software MATLAB Appdesigner erfüllt in Kombination mit einer MS-Access-Datenbank diese Forderungen.

Aus Bild 2 ist zu entnehmen, welche Bremsarbeitssysteme in der Datenbank für die Bremskonfiguration aufgenommen wurden.

Die Klotzbremse ist wegen der sehr unterschiedlichen Gestaltung des Bremsgestänges zweimal vertreten. Es wird zwischen Güterwagen und sonstigen Fahrzeugen unterschieden, die jeweils mit den Bremsmaterialien LL- oder K-Bremssohle ausgestattet werden können. Die dazu gehörigen momentanen Reibwert-Berechnungsgleichungen für diese Materialien berücksichtigen die in Gleichung (2) genannten Abhängigkeiten.

Die Software MATLAB importiert die Eingabedaten aus der Datenbank mittels des „Database Explorer“. Diese Daten werden dort unter zu definierenden Namen für jedes Bremsarbeitssystem gespeichert, die Berechnungen durchgeführt und die Ergebnisse grafisch auf dem Dialogfeld dokumentiert.

Im Simulationsprogramm stehen dafür drei Berechnungsstufen zur Verfügung.

1. Stufe Radsatz
Konfiguration der Bremsarbeitssysteme aus den bereitgestellten Daten, Berechnung der Bremskräfte an den Radsätzen
2. Stufe Wagen (Fahrzeuggruppen)
Addition der momentanen Radsatzbremskräfte des Fahrzeugs bzw. der Fahrzeuggruppe,
Berechnung der max. zulässigen Bremskräfte (Gleichung 4)
und der Bremsverzögerung a des Fahrzeugs bzw. der Fahrzeuggruppe (Gleichung 5).
Berechnung der Wagenmassen des Fahrzeugs aus den statischen und dynamischen Massen jeden Radsatzes
Die Radsatzmassen können für Variationsrechnungen (z.B. neue Vorgaben aus dem Massemanagement der Projektierung) auf dem Display direkt verändert werden. Mit diesen Werten wird die Bremsverzögerung des Fahrzeugs berechnet und im unteren Teil des Dialogfeldes auf dem Display dokumentiert.
3. Stufe Zug
Addition aller Bremskräfte der Fahrzeuggruppen des Zuges,

Berechnung Zugwiderstandskräfte und äquivalente Ansprechzeit, Berechnung Anhalteweg und -zeit sowie Verzögerung des Zuges.

Das Rechenprogramm ist nach Anhang A der in der DIN EN 14531-2 angegebenen Ablaufdiagramm mit diesen Stufen strukturiert aufgebaut. Die schrittweise Berechnung der gewünschten Bewertungsgrößen für den Bremsvorgang erfolgt mit dem Verfahren der Zeitschrittintegration. Die Eingabeparameter und Ergebnisse werden auf der grafischen Oberfläche des Dialogfeldes abgebildet.

Der in der EN geforderte Test der Prüfung der Genauigkeit des Rechenprogramms wurde ausgeführt. Die geforderte Rechengenauigkeit des Simulationsprogramms wird mit einer Schrittweite von 0,01 s eingehalten.

Die Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit verfügbaren Versuchsergebnissen hängt vor allem von den Genauigkeiten der einzugebenden Einflußparameter ab.

Die Zugbildung kann mit max. 9 Fahrzeuggruppen erfolgen. Also ein Zug kann aus 9 verschiedenen Fahrzeugtypen bestehen. Jeder Fahrzeuggruppe können mehrere Fahrzeuge gleichen Typs zugeordnet werden. Damit ist es möglich, nicht nur homogene, sondern auch heterogen zusammengesetzte Zugkonfigurationen in das Simulationsprogramm mit ihren Bremsparametern einzugeben, um den Anhalteweg und die -zeit zu berechnen.

Die Ansprechzeiten der Bremsarbeitssysteme können einfach variiert werden oder auch ausgeschlossen werden, um diesen Einfluss auf den Anhalteweg und -zeit zu erkunden.

Simulationsergebnisse

Drei Berechnungsbeispiele demonstrieren die Arbeitsweise des Rechenprogramms. Im ersten Beispiel wird von mittleren Bremskräften nach DIN EN 14531-1 ausgegangen. In den weiteren Beispielrechnungen werden momentane Bremskräfte nach DIN EN 14531-2 verwendet. Nähere Erläuterungen zur allgemeinen Arbeitsweise des Programms werden im zweiten Beispiel gemacht.

Triebzug mit zwei Fahrzeugen

Als erstes Beispiel wird das Berechnungsbeispiel des Anhanges D der DIN EN 14531-1 nachvollzogen.

Bild 3 zeigt den Triebzug mit den in der Norm gewählten Bremskonfigurationen an den 8 Radsätzen.

Für die Berechnungen wird in der Norm angenommen, dass an den Radsätzen 1, 2 und 7, 8 nur die ED Bremse wirkt. Die Magnetschienenbremse MG ist ausgeschaltet.

Das Ergebnis der Simulationsrechnungen für ein Fahrzeug des Triebzuges zeigt Bild 4. Die Bremskräfte der Scheibenbremse an den Radsätzen 3 und 4 sind über der Geschwindigkeit konstant. An den Radsätzen 1 und 2 sind im Gegensatz zur Norm keine mittleren Bremskräfte der ED Bremse angenommen worden, sondern momentane. Auch unter dieser Annahme besteht Übereinstimmung mit den in der Norm angegebenen Anhaltewegen von 840 m, wenn mit den aufgerundeten äquivalenten Verzögerungen gerechnet wird. Ferner ist im Bild 4 die max. mögliche übertragbare Bremskraft am Radsatz 3 $F_{B,max,Radsatz-3}$ der zur realisierenden Bremskraft $F_{B,Radsatz-3}$ gegenübergestellt. Eine Radblockierung dürfte damit bei Schnellbremsung nicht auftreten.

Triebzug mit drei Fahrzeugen

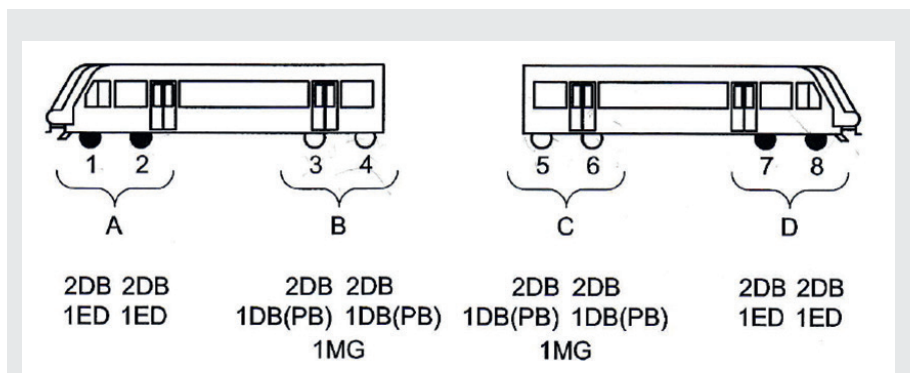
Die DIN EN 14531-2 Anhang B enthält ein Berechnungsbeispiel eines Triebzuges bestehend aus drei Fahrzeugen mit unterschiedlichen Bremsanlagen (Bild 5). Mit diesem Triebzug und den davon bekannten Eingabeparametern wird die Arbeitsweise des Rechenprogramms demonstriert.

Wie aus Bild 5 zu entnehmen ist, handelt es sich um Fahrzeuge mit vier Radsätzen, die im Programm mit den Buchstaben a, b, c und d gekennzeichnet werden. Der erste Radsatz a ist nach Bild 5 der Laufradsatz TA1 des Wagen 1 mit drei Scheibenbremsen 3DB, der Radsatz b ein Treibradsatz MA1 mit einer elektrodynamischen Bremse ED und zwei Scheibenbremsen 2DB. Nach dem gleichen Modus sind die Bremsenkonfigurationen der weiteren Radsätze des Wagens 1 bis 3 aufgebaut.

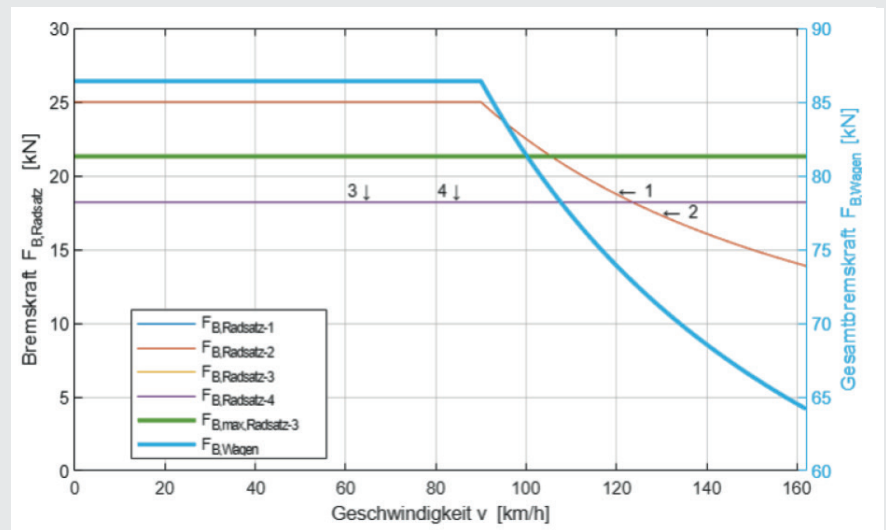
Für jeden Radsatz des Fahrzeugs a, b, c und d werden die Bremsparameter aus der Software „Appdesigner“ in das Rechenprogramm eingelesen.

Damit dieses erfolgen kann, sind zuvor die Bremsparameter mit ihren Konfigurationen in der Access Datenbank einzugeben bzw. wenn bereits schon vorhanden werden diese aus der Datenbank übernommen.

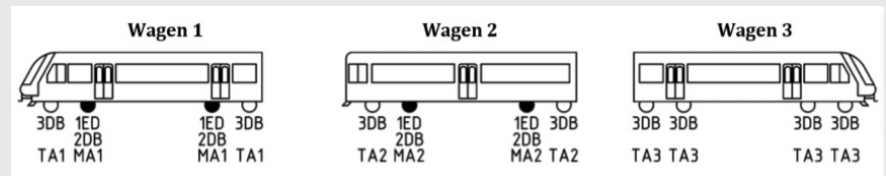
Diese geschilderte Eingabeprozedur für den ersten Wagen erfolgt für jeden



3: Konfiguration des Triebzuges nach Anhang D [3] DB Scheibenbremseinheit, ED elektrodynamische Bremse, DB(PB) Scheibenbremseinheit mit Federspeicherfeststellbremse, MG Magnetschienenbremse



4: Momentane Bremskräfte der ED - Bremse an den Radsätzen 1 und 2 sowie mittlere Bremskräfte der Scheibenbremse an den Radsätzen 3 und 4 des Fahrzeugs mit den Fahrwerken A und B nach Bild 3



5: Konfiguration des Triebzuges [4], TA Laufradsatz, MA Treibradsatz, ED elektrodynamische Bremse, DB Scheibenbremse

Radsatz jeder Gruppe. Dabei wird die gewünschte Bremskonfiguration des Radsatzes festgelegt.

Weiter sind die statischen $m_{st,ax}$ und rotatorischen m_{rot} Massen bezogen auf die Radsätze einzugeben, um die dynamischen Massen m_{dyn} bezogen auf jeden Radsatz berechnen zu können.

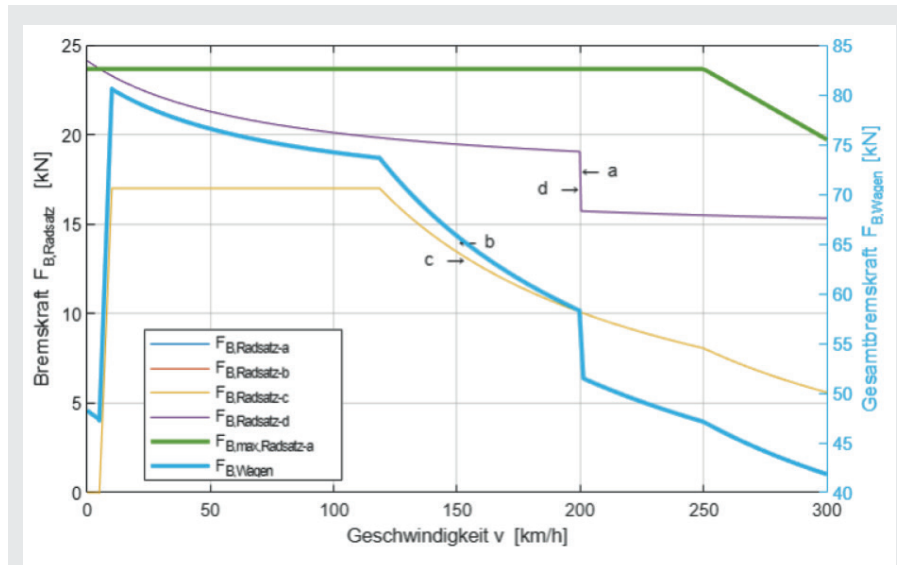
Die Stufung der Bremsausgangsgeschwindigkeiten sind entsprechend den technischen Normen festzulegen.

Die Berechnung der max. zulässigen Bremskraft $F_{B,max}$ je Radsatz nach Gleichung

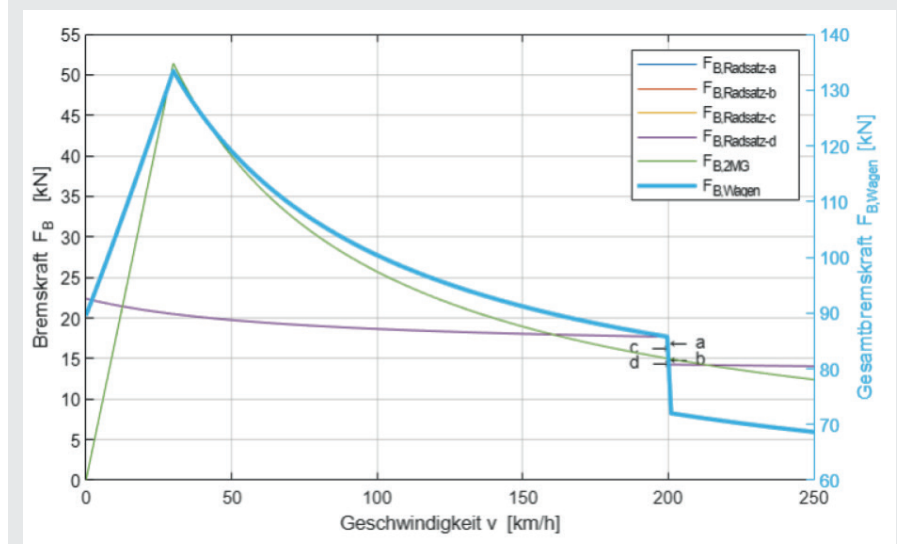
(4) ist durch Eingabe des max. zulässigen Kraftschlusses Rad/Schiene τ_s in das Programm möglich.

Nach Durchführung der Berechnungen werden die Ergebnisse auf dem Display grafisch dokumentiert.

Vor der Simulation kann auf dem Display eine zusätzlich diskrete momentane Geschwindigkeit für die Berechnung die momentane Bremskraft gewählt und eingegeben werden. Nach Simulation wird für die gewählte momentane Geschwindigkeit der momentane Reibwert und die dazuge-



6: Momentane Bremskräfte am Wagen 1 des Triebzugs, Scheibenbremse an den Radsätzen a und d, ED-Bremse an den Radsätzen b und c sowie die Gesamtbremskraft des Wagens $F_{B,Wagen}$



7: Momentane Bremskräfte am Wagen 3 des Triebzugs, Scheibenbremse an den Radsätzen a, b, c und d, Magnetschienbremse in einem Fahrwerk sowie Summenbremskraft des Wagens $F_{B,Wagen}$

hörige Bremskraft auf dem Display angezeigt. Dieses punktuelle Rechenergebnis dient dem Vergleich der Werte mit einer Handrechnung auf Übereinstimmung der Ergebnisse. Damit besteht bereits im ersten Rechenschritt eine Kontroll-Möglichkeit zur Überprüfung der Rechenergebnisse.

Beispielhaft sind im Bild 6 die momentanen Bremskräfte für den Wagen 1 an den Radsätzen a bis d aufgezeichnet. An den Radsätzen a und d wirken die Scheibenbremskräfte, die bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h gestuft werden, was durch Veränderung des Bremszylinderdruckes vorgenommen wird.

Die Radsätze b und c werden entsprechend der Norm mit der elektrodyn. Bremse (ED-Bremse) abgebremst. Im unteren Geschwindigkeitsbereich der ED-Bremse wird diese abgeregelt und bei $v = 5$ km/h ist sie abgeschaltet.

Die ED-Bremse kann je Treib-Radsatz allein oder in Kombination mit einer Reibungsbremse als Summenbremskraft (Blending-Verfahren) im Programm wirken. In dem Berechnungsbeispiel der DIN 14531-2 wird das Blendingverfahren nicht angewendet. Es wirkt nur die ED Bremse bei max. Ansteuerung an den Treibradsätzen MA1, MA2 (Bild 5). Diese

sind im Bild 5 mit der Farbe „schwarz“ markiert.

Für den Radsatz a ist im Bild 6 zusätzlich die max. zulässige Bremskraft $F_{B,max,Radsatz-3}$ (Grenzkraftschlusskraft) über der momentanen Geschwindigkeit dargestellt. Diese ist nach TSI LOC & PAS im Geschwindigkeitsbereich über 250 km/h zu vermindern. Der max. zulässige Kraftschluss Rad/Schiene ist von der Radsatzzahl des Zuges abhängig.

Die Gesamtbremskraft $F_{B,Wagen}$, also die Summe aller Radsatzbremskräfte des Wagens 1, ist ebenfalls im Bild 6 aufgezeichnet.

Der gewählte Basis-Triebzug nach Norm besitzt keine Magnetschienbremsen (MG-Bremse). Beispielhaft wird in einer weiteren Berechnung angenommen, dass im Wagen 3 am ersten Fahrwerk eine zusätzliche MG-Bremse zwischen den Radsätzen vorhanden ist. Die Bremsausgangsgeschwindigkeiten für die Berechnungen werden mit 200 und 250 km/h gewählt.

Bild 7 zeigt dazu die entsprechenden Bremskraftverläufe. Die Bremskraft der Magnetschienbremse nimmt mit abnehmender Geschwindigkeit bei der gewählten Reibpaarung stark zu. Bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h wird die MG-Bremse abgeschaltet und im Abklingvorgang fällt ihre Bremskraft linear bis zu einer Geschwindigkeit 0 km/h ab.

Nun wird im Bild 8 das Zusammenwirken der ED- mit der Scheibenbremse im Blending-Verfahren demonstriert. Bereits im Bild 6 wurde die Bremskennlinie der ED-Bremse am Wagen 1 Radsatz b und c dargestellt. Für die Ansteuerung des Blendingverfahrens ist die max. mögliche Differenzbremskraft ΔF_{BD} zu berechnen.

$$\Delta F_{BD} = F_{B,max} - F_{BED} \quad (10)$$

Bei Reibungsbremsen kann die momentane Differenzbremskraft ΔF_{BD} durch Regelung des Bremszylinderdruckes erzeugt werden. Das muss im Programm mittels einer Übertragungsfunktion $p_{Zyl} = f(\Delta F_{BD})$ zwischen Bremszylinderdruck p_{Zyl} und Differenzbremskraft ΔF_{BD} erfolgen.

Wenn eine weitgehende Annäherung der Summenbremskräfte aus ED- und Reibungsbremse an die max. mögliche Bremskraft gewünscht wird, muss die Übertragungsfunktion nichtlinear sein. Die Übertragungsfunktion ist also projektspezifisch den konkreten Bedingungen anzupassen. Im Bild 8 wurde eine Übertragungsfunktion gewählt, die eine max.

Ausnutzung der Kraftschlusskraft möglich macht. Dazu muss der Bremszylinderdruck geschwindigkeitsabhängig geregelt werden.

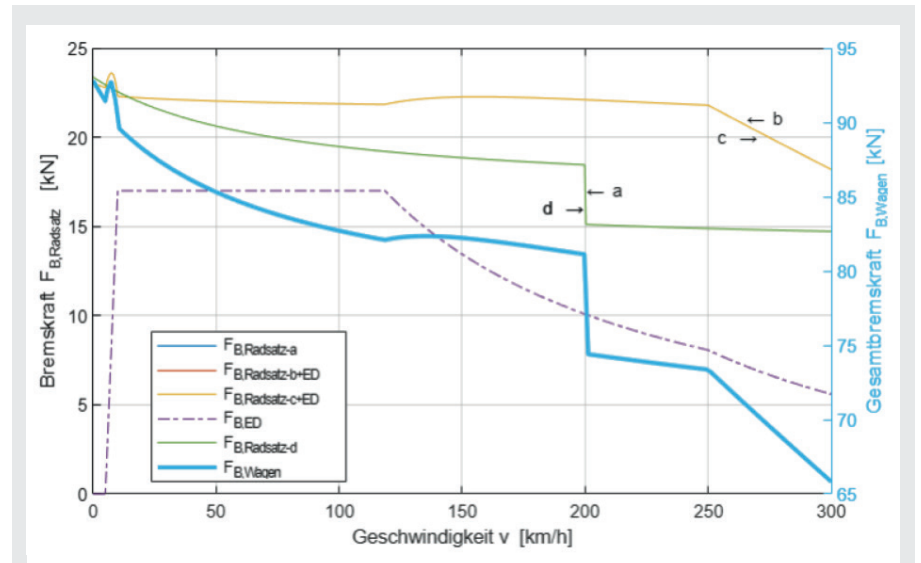
Es sollen nun einige Simulationsergebnisse der Anhaltewege und -zeiten in der Tabelle 1 für das ausgewählte Berechnungsbeispiel vorgestellt werden. Für den Vergleich mit den Werten der Norm wurden die Bremsausgangsgeschwindigkeit von 200, 250 und 300 km/h für die Schnellbremsungen übernommen.

In Zeile 2 der Tabelle 1 sind die Werte aus der Norm bei der Annahme eines konstanten Reibwertes für die Scheibenbremse und ohne Blending der angetriebenen Radsätze mit ED für den Basiszug aus der Norm eingetragen (s_{1-037}).

Die Zeile 3 beinhaltet die berechneten Ergebnisse unter gleichen Vorgaben im Simulationsprogramm (s_{2-037}). Bei allen drei Bremsausgangsgeschwindigkeiten besteht Übereinstimmung der Ergebnisse der Anhaltewege und -zeiten.

In einem weiteren Rechengang wurden die in der Norm verwendeten mittleren Reibwerte von $\mu_m = 0,37$ durch einen momentanen Reibwertverlauf der Scheibenbremse in dem gewählten Basiszug ersetzt. Der momentane Reibwertverlauf der Scheibenbremse wurde so angepasst, dass der Anhalteweg von 2760 m bei einer Bremsausgangsgeschwindigkeit von 250 km/h dem des Basiszuges entspricht (Zeile 4, $s_{2,f(v)}$).

Die Übernahme dieser angepassten momentanen Reibwertfunktion für Simulationen mit Bremsausgangsgeschwindigkeiten von 200 und 300 km/h führten zu Verkürzungen der Anhaltewege und -zeiten gegenüber denen aus Berechnungen mit angenommenen konstanten mittleren Reibwerten (Zeile 4). Die Variable des Einflusses der Bremsausgangsgeschwindigkeit auf den Reibwertverlauf wurde hierbei bewusst ausgeschaltet. Je nach Belagsorte ist diese unterschiedlich.



8: Momentane Bremskräfte am Wagen 2 des Triebzugs, Scheibenbremse an den Radsätzen a und d, mit dem Blendingverfahren an den Radsätzen b und c sowie die Gesamtbremskraft des Wagens $F_{B,Wagen}$

Bei zusätzlicher MG-Bremse im Fahrwerk des Wagens 3 verkürzen sich die Anhaltewege- und -zeiten um 8 bis 9% nach der Konfiguration des Zuges von Bild 5 (Zeile 5, $s_{3,2MG}$).

Zeile 6 zeigt schließlich das Ergebnis bei Nutzung des Blendingverfahrens bei den angetriebenen Radsätzen des Basiszuges. Dadurch verkürzt sich z.B. der

Anhalteweg gegenüber der Basisvariante ohne Blendingverfahren um 467 m bei einer Bremsausgangsgeschwindigkeit von 250 km/h.

Güterwagen als Einzelfahrzeug

Das Bremsvermögen von Neubaugüterwagen muss unter bestimmten Voraussetzungen empirisch bestimmt werden. Grundlage bildet wiederum eine Bremsberechnung. Als Beispiel wurde ein vierachsiger Güterwagen mit automatischer Lastabbremung gewählt. Die Radsätze sind beiderseitig mit Bremssohlen der

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für TU Dresden / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DW Media Group GmbH 2020



Bleiben Sie in der Spur!

Mit dem Newsletter von

Eurail press

Jetzt anmelden!

www.eurailpress.de/anmeldung

V ₀ km/h	200	250	300
s _{1_0,37} m	1656,68	2760,6	4118,54
s _{2_0,37} m	1656,85	2760,65	4121,84
s _{2_f(v)} m	1647,52	2760,80	4145,74
s _{3_2MG} m	1505,84	2538,87	
s _{4_Blen.} m	1437,69	2293,32	3348,84
t _{1_0,37} s	58	75	92
t _{2_0,37} s	58,12	75,40	92,92
t _{2_f(v)} s	56,29	73,72	91,55
t _{3_2MG} s	50,81	66,95	
t _{4_Blen.} s	49,40	62,72	76,23

Tabelle 1: Anhaltewege und -zeiten des 3-teiligen Triebzuges

s_{1-0,37}, t_{1-0,37} nach DIN EN 14531-2, s_{2-0,37}, t_{2-0,37} Berechnung mit konstantem Belag-Reibwert, s_{2-f(v)} t_{2-f(v)} mit momentanem Belag-Reibwert, s_{3-2MG}, t_{3-2MG} Berechnung mit zusätzlichen 2 MG im Wagen 3, s₄, t₄ Berechnung mit zusätzlich Blending im Wagen 1 und 2 bei Radsätzen MA1 und MA2

kräfte weniger als bei 58 t ausgenutzt werden. Der leere Wagen neigt damit leichter zum Blockieren als der voll beladene.

Weiter sind die momentanen Verzögerungen für den leeren Wagen und bei max. Zuladung im Bild 9 dargestellt. Es ergeben sich erhebliche momentane Verzögerungsunterschiede, die Auswirkungen auf die Zugdynamik bei der Bremsung haben.

Die Anhaltewege und die -zeiten des Güterwagens sind der Tabelle 2 für eine gewählte Bremsausgangsgeschwindigkeit von 120 km/h unter Beachtung der Einwirkung der Rotationsmasse der Radsätze als auch der Fahrzeugwiderstände des Einzelfahrzeugs, die nach Gleichung 1 berechnet werden, zu entnehmen. Die äquivalenten Ansprechzeiten sind in der Tabelle 2 angegeben.

Fazit

Das vorgestellte numerische Werkzeug für die bremstechnische Auslegung ist vielfältig nutzbar. Es kann in der Projektierungsphase von Einzelfahrzeugen und Zügen mit den dafür ausgewählten Bremskonfigurationen, bei der Korrektur nach dem Experiment und für die Untersuchung der Wirksamkeit von Parametern eingesetzt werden.

Es berechnet das Bremsvermögen der gewählten Bremskonfiguration mittels mathematischer Funktionen nach DIN EN 14531 mit den zu wählenden Modi entsprechend den Forderungen der TSI [1] [2] für die Schnell- und max. Betriebsbremsung.

Durch berechnete Verzögerungen und Anhaltewege als Funktion der Bremsausgangsgeschwindigkeit wird das Bremsvermögen charakterisiert. Sie werden aus momentanen Brems- und momentanen externen Kräften berechnet. Die jedem Radsatz zugeordneten Bremskräfte werden den zulässigen Bremskräften (max. zulässiger Kraftschlusskräfte) grafisch gegenübergestellt.

Das Simulationswerkzeug verwendet die mathematischen Beziehungen der DIN EN 14531 für Klotz-, Scheiben-, Magnetschienen- und elektrodynamische Bremsen.

Zugkonfigurationen können aus max. 9 Fahrzeuggruppen bestehen. Jede Gruppe wiederum kann aus einer Vielzahl von Einzelfahrzeugen gleichen Typs bestehen.

An drei gewählten Beispielen (2 Triebzügen und 1 Güterwagen) wird demonstriert, dass das Programm zu gleichen An-

m[t]	p_Zyl [bar]	t_e [s]	s [m]	t [s]
22,65	1,47	2,43	616,07	34,23
58,00	3,80	2,58	616,43	34,13
90,00	3,80	2,58	867,63	49,52

Tabelle 2: Anhaltewege s und -zeiten t für einen 4-achsigen Güterwagen für drei Radsatzlasten m

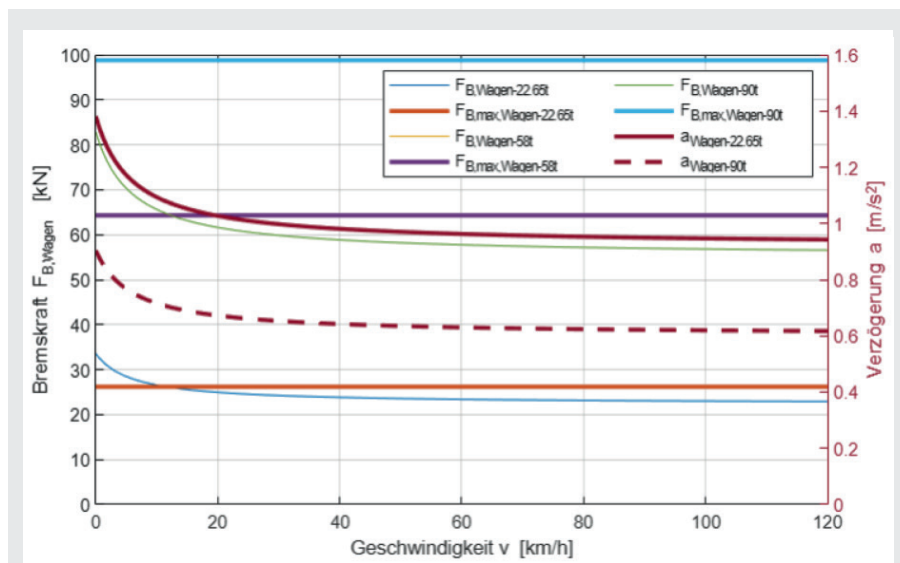
auf der Grundlage der max. ausnutzbaren Kraftschlusskräfte eingetragen.

Bei dem gewählten momentanen Reibwertverlauf der verwendeten Bremspaarung kommt es gegen Ende der Bremsung zu einem leichten Überschreiten der vorgegebenen max. Bremskraftgrenze, das beim Einsatz mit dem Bremssohlenmaterial Grauguss noch ausgeprägter ist.

Der Bremszylinderdruck steigt von der Eigenmasse des Fahrzeugs bis zu einer Masse von 58 t kontinuierlich an und bleibt danach mit max. Bremszylinderdruck konstant. Damit sind die Bremskräfte bei 58 t und 90 t identisch. Bild 9 verdeutlicht, dass bei der gewählten bremstechnischen Auslegung die max. ausnutzbaren Kraftschluss-

Bremsklotzbauf orm Bg mit dem Werkstoff K-Sohle ausgerüstet.

Bild 9 zeigt die momentanen Bremskräfte des Güterwagens für drei Lastzustände. Für den Vergleich sind die dazu gehörigen max. zulässigen Bremskräfte F_{Bmax,Wagen}



9: Momentane Bremskräfte und Bremsverzögerungen eines Güterwagens, Klotzbremse mit K-Bremssohlen für drei Lastzustände

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für TU Dresden / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt von DW Media Group GmbH 2020

haltewegen und -zeiten führt, wie die in der Norm angegebenen Werte.

Momentane Reibwerte der Bremsmaterialien können durch mathematische Funktionen den Vorgaben der Datenblätter für Reibmaterialien angepasst werden. Eine Anpassung der mathematischen Funktionen an die verwendete Bremspaarung ist möglich.

Die Übertragungsfunktion zwischen einzusteuernenden Bremszylinderdruck und den Bremskräften der Reibungsbremse ist den jeweiligen Anforderungen anzupassen.

Werden konstante momentane Verzögerungen für den Bahnbetrieb gewünscht, sind die Summenbremskräfte mittels Blending den max. zulässigen Bremskräften anzupassen.

Die auftretenden Längskräfte zwischen den Fahrzeuggruppen beim Bremsvorgang sind aus den berechneten Fahrzeugverzögerungen jeder Fahrzeuggruppe bestimmbar.

Literatur

[1] Verordnung Nr. 1302/2014 der Kommission vom 18. November 2014 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge-Lokomotiven und Personenwagen des Eisenbahnsystems in der europäischen Union“, Amtsblatt L356/228 vom 12.12. 2014

[2] Verordnung Nr. 321/2013 der Kommission vom 13.03.2013 über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Güterwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union, Amtsblatt L104/1 vom 12.04.2013

[3] DIN EN 14531 Bahnanwendungen – Verfahren zur Berechnung der Anhalte- und Verzögerungsbremswege und der Feststellbremsung
Teil 1: Allgemeine Algorithmen für Einzelfahrzeuge und Fahrzeugverbände unter Berücksichtigung von Durchschnittswerten, Mai 2019

[4] DIN EN 14531 Bahnanwendungen – Verfahren zur Berechnung der Anhalte- und Verzögerungsbremswege und der Feststellbremsung
Teil 2: Schrittweite Berechnungen für Zugverbände oder Einzelfahrzeuge, April 2016

[5] DIN EN 16185 -1 Bahnanwendungen- Bremssysteme für Triebzüge, März 2015

[6] DIN EN 15179 Bahnanwendungen – Bremsen – Anforderungen für die Bremsausrüstung von Reisezugwagen, Dez. 2010

[7] DIN EN 15734-1 Bahnanwendungen – Bremssystem für Hochgeschwindigkeitszüge, Sep. 2013

[8] DIN EN 16834 Bahnanwendungen Bremse – Bremsvermögen, Juli 2019

[9] pr DIN EN 15328 Bahnanwendungen – Bremse – Bremsbeläge, März 2019

[10] Bahnanwendungen – Bremse – Bremsklötze, Juni 2019

Summary

Stopping-distance calculation of rail vehicles using time step integration according to DIN EN14531

The European standard DIN EN14531 describes the calculus algorithm for the design of braking systems with friction and dynamic brakes of block trains and individual vehicles. By using these technical specifications, a simulation program is presented which may be used to evaluate the braking capacity in the design phase for different modes. Examples demonstrate how the program works. Evaluation parameter for characterizing the braking capacity of rails and individual vehicles are presented in pictures.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für TU Dresden /
Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten
genehmigt von DW Media Group GmbH 2020

29. September 2020
SIDE Hotel Hamburg

3. EURAILPRESS-FORUM

ALTERNATIVE ANTRIEBE

im SPNV

Jetzt anmelden unter:
www.eurailpress.de/veranstaltungen

Medienpartner: