

Vorlesung Bremstechnik des Hochgeschwindigkeitsverkehrs

Pkt 2 Grundlagen der Bremstechnik (Kompendium)

Dr. Dieter Jaenichen

Dresden, 2. und 9. November 2020



2. Grundlagen der Bremstechnik

2.1 Allgemeines (02.11.2020)

2.2 Algorithmen der Bremsberechnung (bremstechnische
Auslegung)(02.11.2020)

2.3 Experimentelle Methoden der Bremsbewertung (09.11.2020)



CR 400
Hochgeschwindigkeitszug
für 350 km/h
für Einsatzbereich -25 °C bis
+40°C
Radsatzlast ≤ 17t

Anforderungen an die Bremstechnik:

Bereitstellung des erforderlichen **Bremsvermögens** für die Zugfahrt und den Zugstillstand.

Bewertungsgrößen für das Bremsvermögen (Leistungsfähigkeit der Bremsen):

- Momentane und mittlere Anhalte- und Bremsverzögerungen des Zuges a
- Verzögerungs- und Anhalteweg s
- Bremsgewicht B (empirisches Bewertungsverfahren für konventionelle Signaltechnik)

Methoden zur Bestimmung des Bremsvermögens:

- auf mathematisch-physikalischer Grundlage, Algorithmen der Bremsberechnung
- auf experimenteller Grundlage

Verwendung der Brems-Wertungsgrößen im Bahnbetrieb:

- **Verzögerungen a** als physikalische Größe für ETCS, ATO
- **Anhaltewege s** für ETCS, ATO
- **Bremsgewicht B** für herkömmliche Signaltechnik mit betrieblicher Bewertungsgröße **Bremshundertstel λ** auf konventionellen Strecken

Berechnungsgrundlagen:

-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)

Teil 2: Schrittweise Berechnung für Zugverbände oder Einzelfahrzeugen (April 2016)

- DIN EN 16834 Bahnanwendungen –Brems- Bremsvermögen (Juli 2019)

1. Möglichkeit

momentane Kräfte

Momentane Bremskräfte $F_B(v)$ für Klotz-, Scheiben-, Magnetschienen-, und der dynamischen Bremsen werden nach den Gleichungen der DIN EN 14531-1 berechnet.

Daraus ist die Summenbremskraft je Radsatz, die Fahrzeugbremskraft und schließlich die Zugbremskraft F_B zu berechnen.

$$F_B = f(\text{Bremsarbeitssysteme}, v)$$

Hinzu kommen **externe momentane Kräfte** F_{ext} des Zuges

Fahrwiderstandskräfte F_{Ra}

$$F_{\text{Ra}} = A + B \cdot v + C \cdot v^2$$

momentane Bremsverzögerung

$$a_B = F_B(v) / m_{\text{dyn}} \quad \text{mit } m_{\text{dyn}} = \sum(m_{\text{st}} + m_{\text{rot}})$$

2.2 Algorithmen der Bremsberechnung

Damit kann der **Bremsweg s** mit den **momentanen Brems- und Fahrzeugwiderstandskräften** berechnet werden.

Das erfolgt im Zeitschrittverfahren nach DIN EN 14531-2.

$$\text{Geschwindigkeit zum Zeitpunkt } t_{j+1}: \quad v_{j+1} = v_j - a_j \cdot \Delta t$$

$$\text{Weg zum Zeitpunkt } t_{j+1}: \quad s_{j+1} = s_j + v_j \cdot \Delta t - \frac{1}{2} \cdot a_j \cdot \Delta t^2$$

$$\text{Verzögerung zum Zeitpunkt } t_{j+1}: \quad a_{j+1} = \frac{(\sum F_{B,i} + \sum F_{\text{ext}})_{j+1}}{m_{\text{dyn}}}$$

$$\text{Nächster Zeitschritt:} \quad t_{j+1} = t_j + \Delta t$$

Dabei ist

a_j	Fahrzeugverzögerung zum Zeitpunkt t_j , in m/s^2 ;
$F_{B,i}$	Bremskraft der Bremseinrichtung i als Funktion von $f(t,v,s)$, in N;
F_{ext}	externe Kraft, in N (bei einer verzögernden Kraft positiver Wert, bei ein beschleunigenden Kraft negativer Wert);
j	Zählnummer des Integrationsschritts;
m_{dyn}	dynamische Masse ($= m_{\text{st.}} + m_{\text{rot}}$), in kg;
s_j	Wegstrecke zum Zeitpunkt t_j , in m;
Δt	der Zeitschritt, in s;

Momentane Verzögerungen zu einem Zeitschritt

$$a_{j+1} = \frac{(\sum F_{B,i} + \sum F_{\text{ext}})_{j+1}}{m_{\text{dyn}}}$$

2. Möglichkeit

mit mittleren Kräften

mittlere Bremskräfte $\overline{F}_{B,i}$

$$\overline{F}_{B,i} = \frac{v_0^2 - v_{\text{fin}}^2}{2} \cdot 1 / \int_{v_{\text{fin}}}^{v_0} \frac{v}{F_{B,i}} dv$$

mittlere Bremsverzögerung \overline{a}_i

$$\overline{a}_i = \frac{\overline{F}_{B,i}}{m_{\text{dyn}}}$$

mittlere Zugwiderstandskraft

$$\overline{F}_{\text{Ra}} = A + 2/3 \cdot B \cdot \frac{v_0^2 + v_0 \cdot v_{\text{fin}} + v_{\text{fin}}^2}{v_0 + v_{\text{fin}}} + 1/2 \cdot C \cdot (v_0^2 + v_{\text{fin}}^2)$$

Hangabtriebskraft F_g

$$F_g = m_{st} \cdot g \cdot i \quad i \text{ Neigung}$$

Äquivalente Verzögerung mit mittleren Kräften a_e

$$a_e = \frac{\sum \overline{F_{B,i}} + \sum \overline{F_{ext}}}{m_{dyn}}$$

Bremsweg aus einer äquivalenten Verzögerung

$$s = \frac{v_0^2 - v_{fin}^2}{2 \cdot a_e}$$

Bremsweg aus mehreren äquivalenten Verzögerungen $a_{e,j}$

$$s = \frac{v_0^2 - v_j^2}{2 \cdot a_{e,j}} + \frac{v_j^2 - v_{j+1}^2}{2 \cdot a_{e,j+1}} + \dots + \frac{v_{n-1}^2 - v_n^2}{2 \cdot a_{e,n}}$$

3. Ungebremster Weg s_0

umfasst die Wegstrecke, die während der Verzugszeit (Totzeit und halber Bremsaufbauzeit) bei Einleitung der Schnellbremsung zurückgelegt wird.

Äquivalenter ungebremster Weg s_0

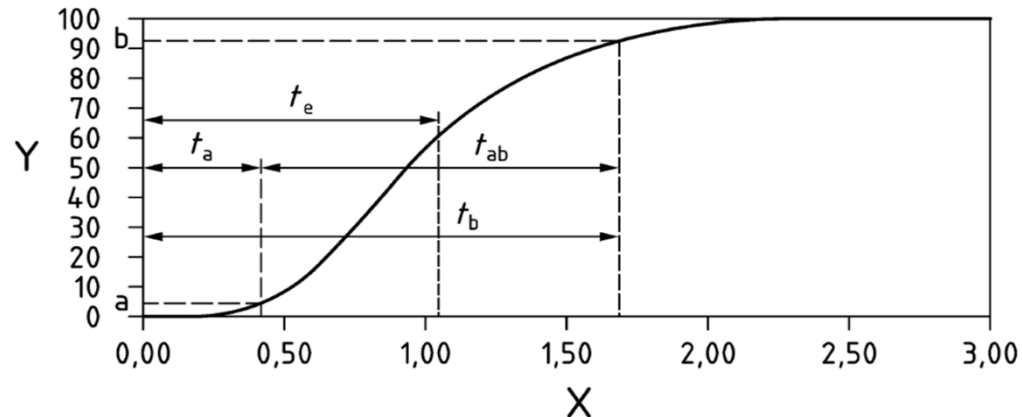
Diese Zeit wird als **äquivalente Ansprechzeit** bezeichnet.

$$s_0 = v_0 \cdot t_e$$

Gesamter Anhalteweg aus äquivalenten Werten

$$s = v_0 \cdot t_e + \frac{v_0^2 - v_{\text{fin}}^2}{2 \cdot a_e}$$

Äquivalente Ansprechzeit $t_{e,i}$ der Bremse i



- der erste Zeitanteil entspricht einer Freilaufzeit, wobei die theoretische Kraft gleich null ist;
- der zweite Zeitanteil entspricht einer Fahrt mit voller Kraft.

$$t_{e,i} = t_{a,i} + \frac{t_{ab,i}}{2}$$

Anhalteweg

umfasst die Wegstrecke, die während der Verzugszeit (Totzeit und halber Bremsaufbauzeit) bei Einleitung der Schnellbremsung zurückgelegt wird.

Gesamter Anhalteweg aus äquivalenten Werten

$$s = v_0 \cdot t_e + \frac{v_0^2 - v_{\text{fin}}^2}{2 \cdot a_e}$$

Gesamter Anhalteweg in Verzögerungsstufen

$$s = v_0 \cdot t_e + \frac{v_0^2 - v_j^2}{2 \cdot a_{e,j}} + \frac{v_j^2 - v_{j+1}^2}{2 \cdot a_{e,j+1}} + \dots + \frac{v_{n-1}^2 - v_n^2}{2 \cdot a_{e,n}}$$

- **Momentane Bremsenergie**

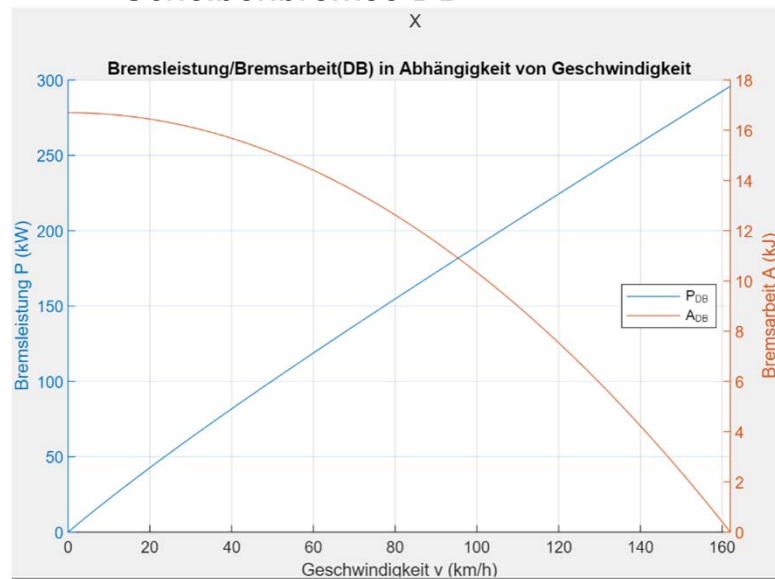
$$W_{B,i} = \int_{s_0}^{s_2} F_{B,i}(s) \cdot ds$$

- **Maximale Bremsleistung jeder Bremse**

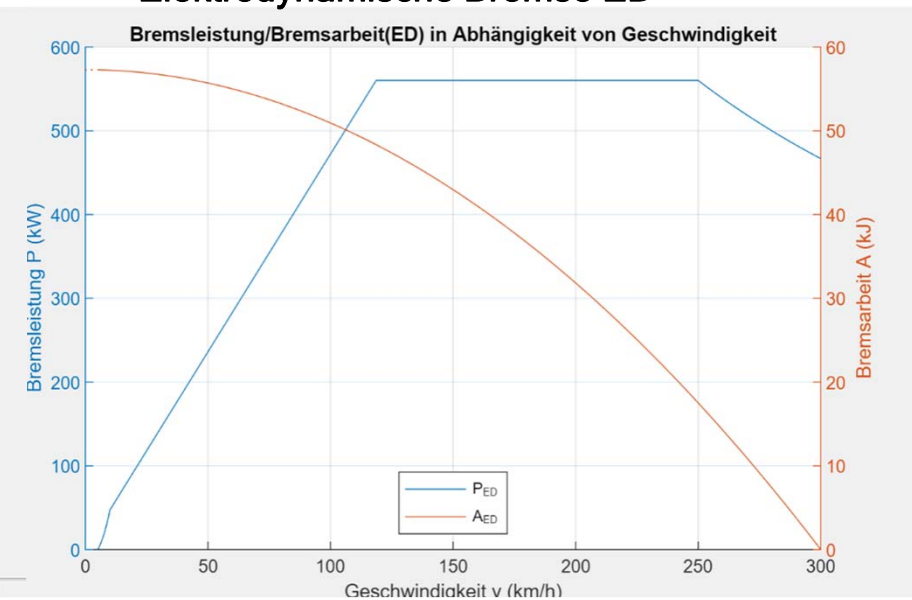
$$P_{\max,i} = \max (F_{B,i} \cdot v)$$

Beispielrechnungen mit MATLAB

Scheibenbremse DB



Elektrodynamische Bremse ED



2.2 Algorithmen der Bremsberechnung

Flachstelle auf der Radlauffläche
(Blockiertes Rad)



Bild Jaenichen

Kraftschlussmodell $m_y = f(s)$

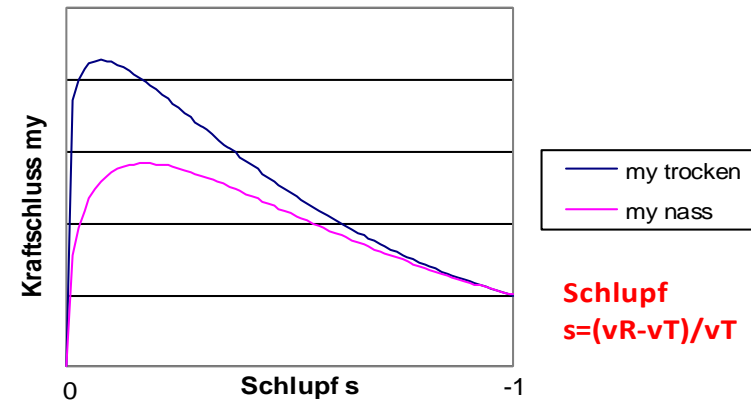
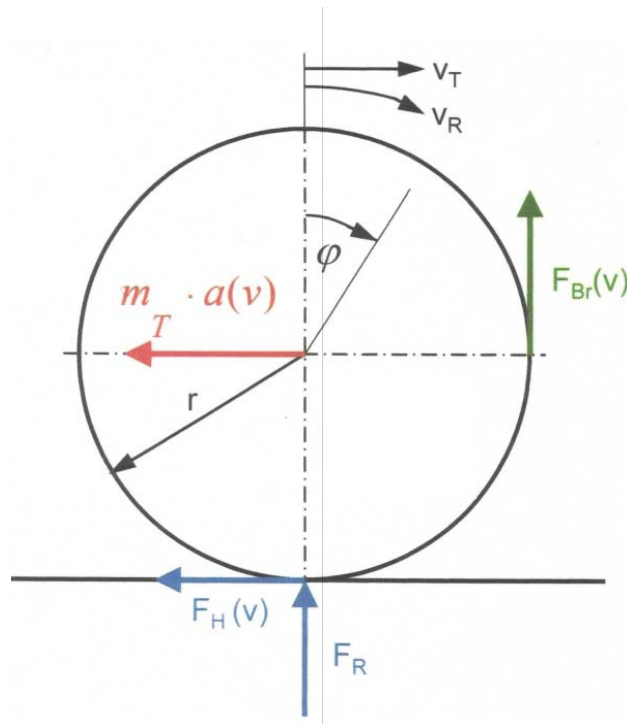


Bild KNORR-Bremse

Das rollende gebremste Rad

Abbremsung der Translationsmasse eines Rades



$$M_{Br} = 0$$

$$F_{Br}(v) \cdot r \leq F_H(v) \cdot r$$

$$F_{Br}(v) \leq F_H(v)$$

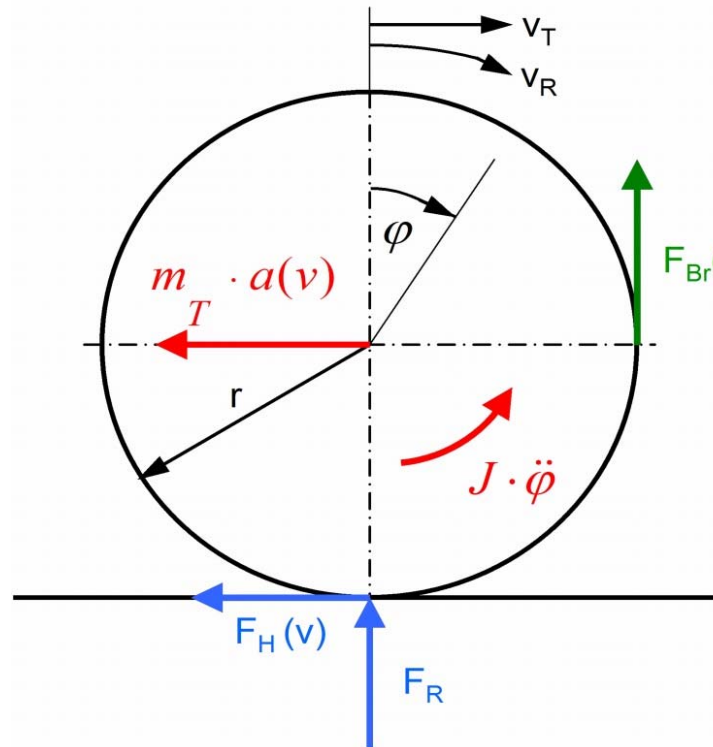
Bremskraft

$$F_{Br}(v) \leq F_R \cdot \mu_H(v)$$

$\mu_H(v)$ - Kraftschluss Rad/Schiene

Das rollende gebremste Rad

Abbremsung der Translations- und Rotationsmasse eines Rades



Bremskraft

$$F_{Br}(v) \leq F_R \cdot \mu_H + J \cdot \ddot{\varphi} / r$$

J Massenträgheitsmoment
 $\ddot{\varphi}$ Winkelbeschleunigung

Erforderlicher Kraftschluss

$$\mu_H = (F_{Br} - J \cdot \ddot{\varphi} / r) / m_T$$

Max übertragbare Bremskraft ohne Gleiten der Räder

$$F_{B,max,ax} = m_{dyn,ax} \cdot \tau_a \cdot g_n \quad \tau_a = \mu_H$$

Erforderlicher mittlerer Kraftschluss je Radsatz

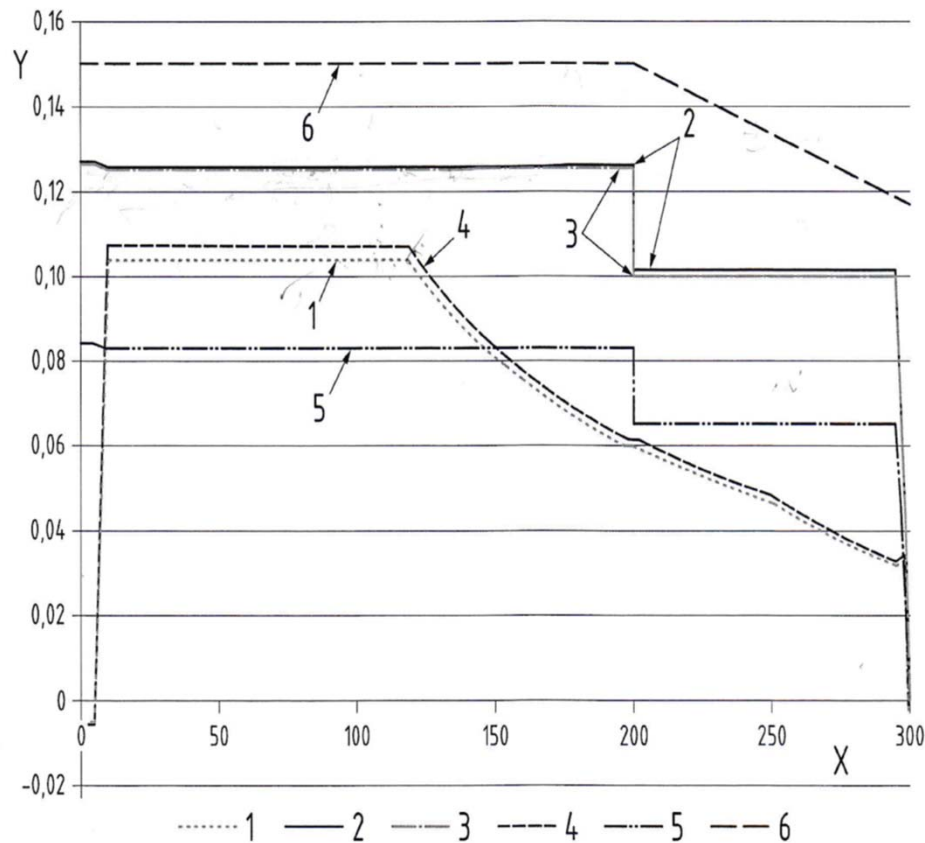
$$\bar{\tau}_{req,ax} = \frac{(\sum_{ax} \bar{F}_{B,i} - m_{rot,ax} \cdot a_e)}{m_{st,ax} \cdot g_n} \cdot \sqrt{1 + i^2}$$

Erforderlicher momentaner Kraftschluss je Radsatz

$$\tau_{req,ax} = \frac{(\sum_{ax} F_{B,i} - m_{rot,ax} \cdot a)}{m_{st,ax} \cdot g_n} \cdot \sqrt{1 + i^2}$$

Beispiel

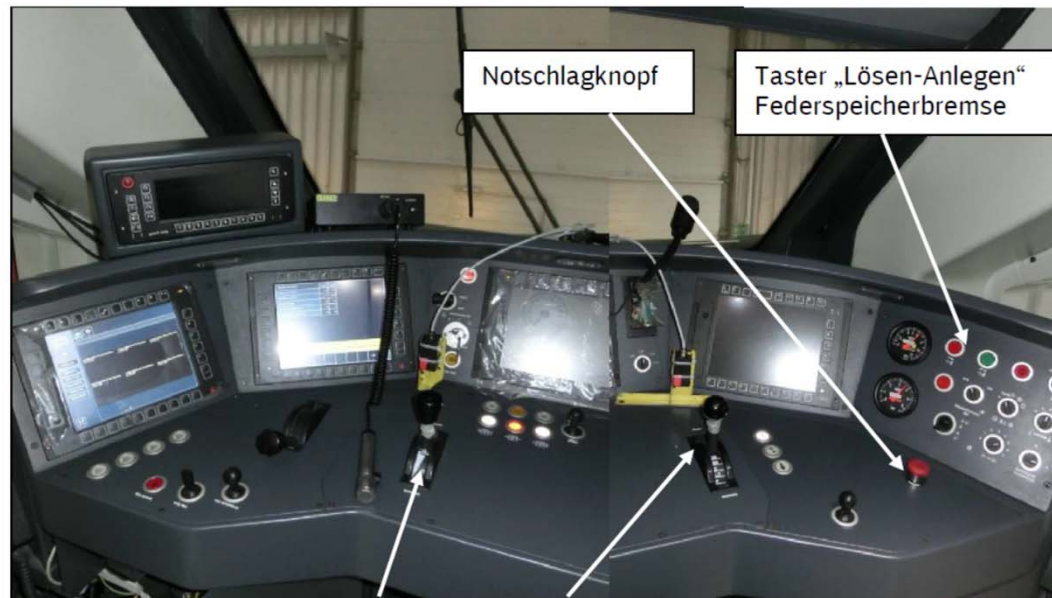
Kraftschluss Rad/Schiene als Funktion von v und Radsatztyp DIN EN 14531-2



- 1 erforderlicher Kraftschluss für Treibradsatztyp MA1
 - 2 erforderlicher Kraftschluss für Laufradsatztyp TA1
 - 3 erforderlicher Kraftschluss für Laufradsatztyp TA2
 - 4 erforderlicher Kraftschluss für Treibradsatztyp MA2
 - 5 erforderlicher Kraftschluss für Laufradsatztyp TA3
 - 6 Kraftschlussgrenzwert $\tau_{TSI,max}$ — Richtlinie 2008/57/EG
- X Geschwindigkeit, in km/h
 Y Kraftschluss Rad/Schiene

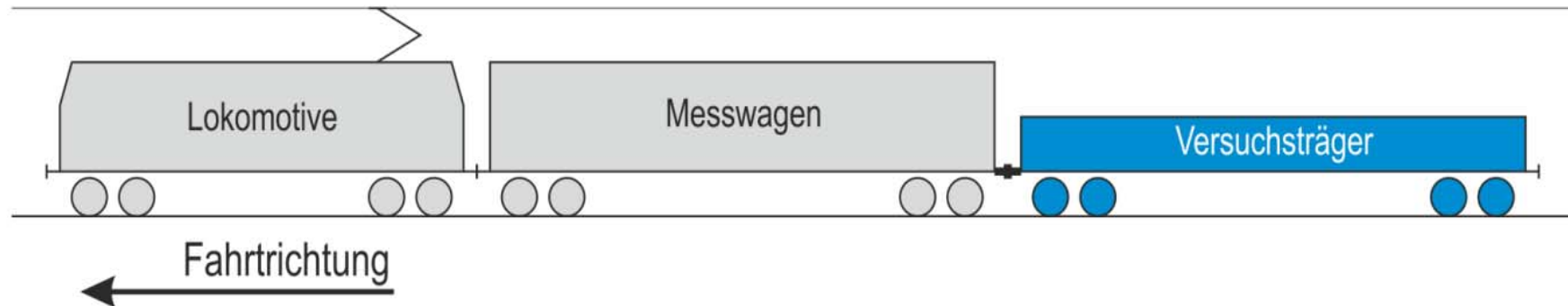
Streckenversuche:

- Aufnahme des Verzögerungsprofils des Versuchs-Zuges bei einer Anzahl von Schnellbremsungen und vorgegebenen Versuchsbedingungen nach EN 16834 (Bremsvermögen) mittels Verzögerungssensor oder alternativ als Ableitung des Geschwindigkeitsverlaufs



2.3 Experimentelle Methode der Bremsbewertung

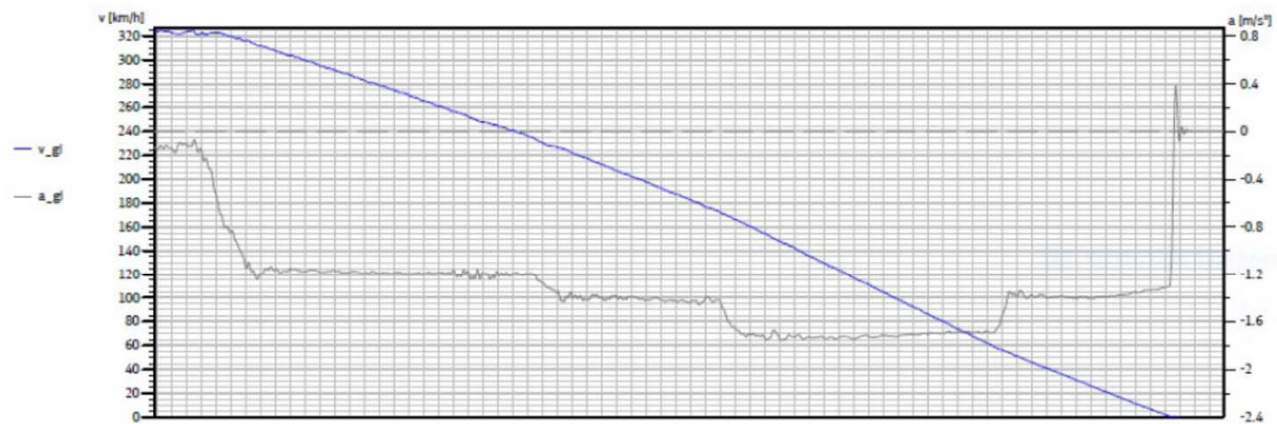
Experimentelle Methode: Einzelfahrzeug-Abhängeversuche bis 160 km/h
Bildung eines Versuchszuges für die experimentelle Ermittlung der Anhaltewege s bei Schnellbremsung



Versuchsablauf:

1. Beschleunigung des Versuchszuges auf eine definierte Bremsausgangsgeschwindigkeit
2. Abhängen des Versuchsträgers und gleichzeitig Einleitung einer Schnellbremsung beim Versuchsträger
3. Ermittlung des Schnell-Anhalteweges des Versuchsträgers
4. Eingabe des Anhalteweges in ein UIC-Bewertungsblatt und Ablesen der Brems Hundertstel oder durch UIC-Berechnungsgleichung

Messschrieb: v- und a-Verlauf über der Zeit eines HGV-Zuges bei einer Schnellbremsung aus einer Ausgangsgeschwindigkeit von 320 km/h



DIN EN 16834 besagt:

- Erzeugung von Stufenfunktionen aus den Messschrieben
- max. 7 Stufenfunktionen
- keine individuelle mathematische Funktion der Bremsverzögerung
- Verzögerungsprofil ist durch äquivalente Ansprechzeit und Stufenfunktionen (Geschwindigkeitsintervalle mit konstanter Verzögerung) anzunähern
- Verzögerungen beziehen sich in der Regel auf die Auslegungsmasse des Fahrzeugs **bei normaler Zuladung**.

- Erstellung von Stufenverzögerungen $a_{b,i}$

$$a_{bi} = \frac{v_{i-1}^2 - v_i^2}{2 \times s_i}$$

- Die erste Stufe ist gesondert zu bewerten.

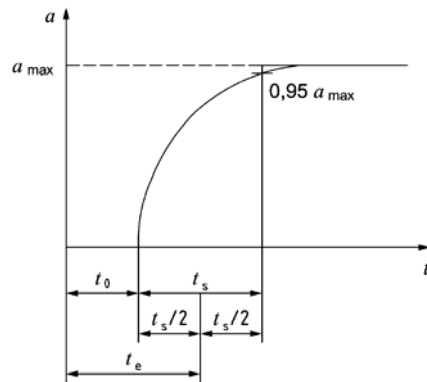
$$|a_{b1}| = \frac{v_p^2 - v_1^2}{2 \times s_p}$$

Dabei ist

s_i der mittlere Bremsweg (über drei Versuche) zwischen v_{i-1} und v_i , der der Summe der Bremswege für jeweils 1 km/h entspricht, in m;

s_p die zwischen v_p und v_1 zurückgelegte Wegstrecke, in m.

Äquivalente Ansprechzeit (auch als Entwicklungszeit bezeichnet) t_e wird aus dem Messschrieb von bremstechnischen Versuchsfahrten, wo die Verzögerung über der Zeit aufgetragen ist, ermittelt. Der Wert wird definitionsgemäß direkt nach **DIN EN 16834** berechnet:



$$t_e = t_0 + \frac{t_s}{2}$$

Abb1: Verzögerungsverlauf eines Fahrzeugs nach Einleitung einer Schnellbremsung über der Zeit

Der Anhalteweg s ergibt sich durch Aufsummierung der Teilbremswege der Verzögerungsstufen.

$$s = s_e + s_1 + s_2 + s_3$$

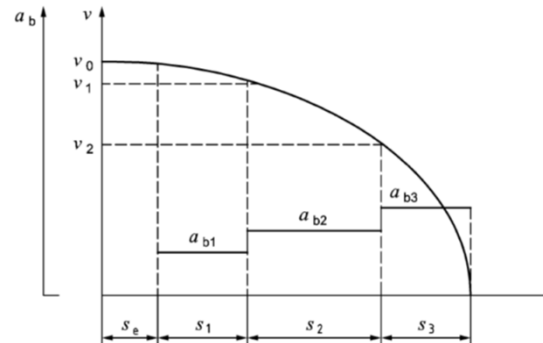
$$s = v_0 \times t_e + \frac{v_0^2 - v_1^2}{2 \times a_{b1}} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \times a_{b2}} + \frac{v_2^2}{2 \times a_{b3}}$$

Dabei ist

- s_e die während der äquivalenten Ansprechzeit zurückgelegte Strecke, in m;
- s_1 bis s_3 die Abschnitte des Bremswegs, in m;
- a_{b1} bis a_{b3} die konstante Verzögerung, anwendbar zwischen den Geschwindigkeitsbereichen v_i bis v_{i+1} ; $v_0 - v_1$; $v_1 - v_2$; $v_2 - v_3$, in m/s^2 ;
- v_0 bis v_2 die Geschwindigkeit am Anfang des Bereichs, in m/s ;
- t_e die äquivalente Ansprechzeit, in s.

s_e beinhaltet in der Regel keine Verzögerung

Das ermittelte Verzögerungs-Stufenprofil der Schnellbremsung wird im Vital-Computer der HGV-Züge für die Zugsicherung ETCS und ATO installiert.



Anwendung ETCS-Bremskurvenberechnung

Nennwerte der Schnellbremsung des HGV-Zuges sind aus Versuchen bekannt:

-Stufenverzögerungen a_{ab} und Ansprechzeit t_e

In der Sprache von ETCS:

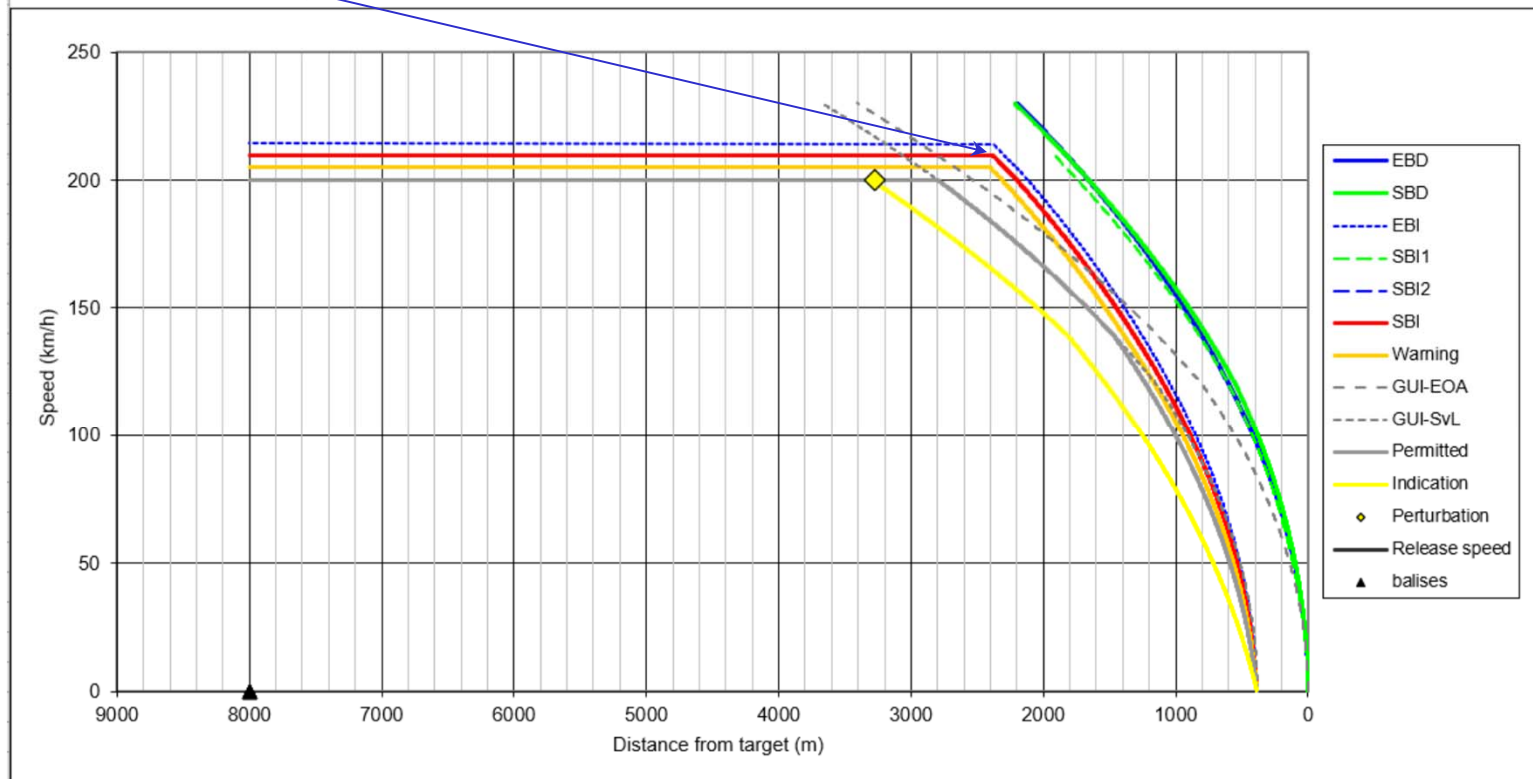
$A_{brake_emergency}$ und $T_{brake_emergency}$

Daraus Berechnung der sicheren Verzögerung und sicheren Ansprechzeit

- $A_{brake_safe}(V,d) = A_{brake_emergency}(V,d) \cdot K_{dry_rst}(V,M_{NVEBCL}) \cdot (K_{wet_rst}(V) + M_{NVAVADH} \cdot (1 - K_{wet_rst}(V)))$ (Faktoren siehe Punkt 12 der Vorlesung)
- $T_{be} = T_{brake_emergency}$

2.3 Experimentelle Methode der Bremsbewertung

EBD Schnellbremsablaufkurve berechnet aus A_brake emergency



Initial speed (km/h)	Distance from target (m)							Release speed
	Perturbation	Indication	Permitted	Warning	SBI	EBI	StartRSM	
200.00	3272.41	3272.41	2796.21	2310.65	2199.54	2116.21	N/A	0

Weiteres siehe PKt. 12 der Vorlesung

Dieter Jaenichen

- Tel.: +49 (0)351 463 36583
- Email : dieter.jaenichen@tu-dresden.de



»Wissen schafft Brücken.«