

Vorlesung

Bremstechnik des Hochgeschwindigkeitsverkehr

3. Funktionale und technische Spezifikationen an Bremsen (Kompendium)

Dr. Dieter Jaenichen

Dresden, November 2020



„Bremstechnik des Hochgeschwindigkeitsverkehrs“

1. Einführung in die Thematik
2. Grundlagen zur Bremstechnik

3. Funktionale und technische Spezifikationen an Bremsen

4. Architektur der Bremsanlage
5. Scheibenbremse
6. Magnetschienenbremse
7. Wirbelstrombremse
8. Elektrodynamische Bremse
9. Hydrodynamische Bremse
10. Keramik-Bremse
11. Aerodynamische Bremse
12. ETCS Bremsbetrieb, Bremskurvenberechnung
13. ATO Bremstechnischer Abstand zwischen zwei Zügen



Regelwerke

- TSI LOC & PAS Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen
(VERORDNUNG (EU) Nr. 1302/2014 DER KOMMISSION vom 18. November 2014)
- DIN EN 15734-1 Bremssysteme für Hochgeschwindigkeitszüge – Teil 1. Anforderungen
(Sept. 2013)
- DIN EN 15734-1 Bremssysteme für Hochgeschwindigkeitszüge – Teil 2. Prüfverfahren
(April 2013)
- DIN EN 14198 Bremsen- Anforderungen an die Bremsausrüstung lokbespannter Züge
(Feb.2019)
- DIN EN 16185-1 Bremssysteme für Triebzüge , Teil 1 Anforderungen und Definitionen
(August 2020)
- DIN EN 15179 Bremsausrüstung von Reiszugwagen (Dezember 2010)

TSI LOC & PAS Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen

Auszug aus Amtsblatt der EU L 356 vom 12.2.2014 ($v_{\max} = 350$ km/h)

Aufgaben der Bremsen

- Reduzierung der Geschwindigkeit oder Konstanthaltung im Gefälle
- Einhaltung eines vorgegebenen Brems- bzw. Anhalteweges
- Sichern des Zuges gegen Wegrollen
- Realisierung der geforderten Bremsleistung
- Verfügbare Verzögerungsprofile mit äquivalenter Ansprechzeit
- Bremsweg kann aus Verzögerungsprofilen abgeleitet werden

Beachtung:

Erforderliches Bremsvermögen hängt vom Signalsystem, Höchstgeschwindigkeit, Neigungen der Strecken und der Bremswegreserve ab.

Hauptfunktionen der Bremsen

- Betriebs- und Schnellbremsungen
- Stillstands-Bremsungen bei zeitlich unbegrenzter Aufbringung der Bremskraft ohne fahrzeugseitige Energieversorgung

Eigenschaften der Bremsen

- durchgehende Steuerleitung durch den Zug
- Selbsttätige Aktivierung
- Unterbrechung muss zur Aktivierung der Bremse führen
- Ergänzung durch dynamische Bremsen muss möglich sein
- Keine Beschädigung der Bremskomponenten im normalen Betriebseinsatz
- Schaffung von Möglichkeiten der Überwachung der Bremsfunktionen



Weitere notwendige Eigenschaften der Bremsen

- Überwachung der Bremsfunktionen durch besondere Einrichtungen
- Ausreichende Energie-Zuführung entsprechend der Auslegung der Bremsen
- Unerschöpfbarkeit bei mehrfacher Bedienung
- bei unbeabsichtigter Trennung beider Zugteile Einleitung der Schnell-Bremmung
- Haltebremsung bei max. bremstechnischer Zuladung in einem Gefälle von 40 ‰ allein mit der Reibungsbremse mindestens 2 Stunden, dabei muss Zug in Stillstand bleiben
- Ruck muss über $v = 5 \text{ km/h}$ Fahrgeschwindigkeit kleiner als 4 m/s^3 sein



Auslegung der Bremse nach unterschiedlichen Modi für den freizügigen Fahrbetrieb:

- **Normalmodus:** kein Fehler im Bremssystem und Nenn-Reibungskoeffizienten (bei trockenen Bedingungen, ebene Strecke) (normaler Fahrbetrieb).
- **Eingeschränkter Modus:** Berücksichtigung mögliche Einzelfehler im Grenzmodus, die zu einer Verlängerung des Bremsweges um mehr als 5% führen. Eindeutige Identifizierung der Einzelfehler. Reibwerte entsprechen den Normalbedingungen.
- **erschwerte Bedingungen:** Bremsleistungsberechnung der Schnellbremse unter Berücksichtigung reduzierter Reibwerte, wobei Grenzwerte für Temperatur und Feuchtigkeit (DIN EN 14531-1 Anhaltewegberechnung) zu beachten sind.

siehe

- TSI LOC & PAS, Punkt 4.2.4 Bremsen
- DIN EN 14198 „Bremsausrüstung lokbespannter Züge“, Kap. 6.2

Notwendigkeit einer Risikoanalyse bei der Bremsen-Auslegung

Beachtung folgender betrieblicher Gefährdungen:

- trotz Bremsbefehl keine Bremskraft (bei Zugtrennung keine Wirkung, Nachlassen Bremskraft bei Feststellbremse)
- kein Bremsbefehl aber Bremskraft vorhanden (Zwangsbremmung wird nicht ausgelöst)
- Bremskräfte sind niedriger als die Vorgaben (Abschaltung Antrieb fehlt, Notbremskraft geringer)
- Bremskräfte sind größer als die Vorgaben (größerer Ruck, Blockiergefahr der Räder, höhere Lastannahmen)
- Versagen von Bremsbauteilen (Folge Entgleisung des Zuges)

Einzelfehler dürfen keine maßgeblichen Fehlfunktionen bei der Schnellbremsung nach sich ziehen!



3. Funktionale und technische Spezifikationen an Bremsen

Nummer des Ausfalls	Nach Aktivierung des	Schweregrad/ Folgen	Minimale zulässige Anzahl von Fehler - kombinationen
1	Schnellbremsbefehls: Keine Bremskraft, keine Verzögerung	Tödliche Unfälle	2 (keine einzige wird akzeptiert)
2	Schnellbremsbefehls: Fehler im Traktionssystem, Zugkraft \geq Bremskraft Keine Verzögerung	Tödliche Unfälle	2 (durch Einzelfehler nicht zu akzeptieren)
3	Schnellbremsbefehls: Ausfall(e) in der Bremsanlage Anhalteweg länger als im Nennmodus	Kategorie nicht anwendbar	Einzelfehler, Vergleich des Anhalteweges Normalmodus mit dem identifizierten Ausfall
4	Parkbremsbefehls: Keine Feststellbremskraft	Kategorie nicht anwendbar	2 (kein einziger wird akzeptiert)

Anforderungen Schnellbremsbefehl

- Zwei unabhängige Auslöseorgane für den Schnellbremsbefehl aus der normalen Fahrposition mit einer Hand durch eine einmalige Handlung
- Ein System ist der Schlagknopf mit Selbstverriegelung. Entriegelung durch eine bewußte Handlung
- Übertragung des Schnellbremsbefehls durch den ganzen Zug
- Abschaltung der Traktion in weniger als 2 sec.
- Sperrung aller Befehle oder Aktionen zum Lösen der Bremse

Ansteuerung elektrische Bremse

- Unterbindung der Rückspeisung muss möglich sein
- Zulässig ist, dass dynamische Bremse unabhängig von anderen Bremssystemen oder zusammen mit anderen Bremssystemen (Blending) wirken
- Begrenzung der max. Bremskraft bei Lokomotiven auf einen festgelegten Wert

Bremsvermögen

- Verzögerung auf ebenen Gleis
- Raddurchmesser neu, halb abgenutzt und abgenutzte Räder
- Ermittlung des erforderlichen Kraftschlusses Rad/Schiene
- Begründung der Reibungskoeffizienten
- Bremsberechnung für Schnellbremsung und max. Betriebsbremsung
- Bremsberechnung in der Auslegungsphase und dann Korrektur nach den Bremsversuchen überarbeiten
Bremsberechnung ist dann Bestandteil der technischen Dokumentation
- Max. mittlere Verzögerung kleiner als $2,5 \text{ m/s}^2$ sein.

Thermische Belastbarkeit

- Berechnungen für den Normalbetrieb, Referenzwerte müssen belegt werden (Erfahrungswerte)
- 2 Schnellbremsungen hintereinander bei max. bremstechnischer Zuladung
- Max. Streckengefälle für den Lastzustand "max. bremstechnische Zuladung" bei konstanter Geschwindigkeit
- **Referenzfall:** 80 km/h bei 21 ‰ über einen Weg von 46 km.
- Bei nichttrennbaren Einheiten mit $v > 250 \text{ km/h}$ bei Normalbetrieb und bei Lastzustand „max. Bremstechnische Zuladung“ bei einer Geschwindigkeit von 90% der max. Betriebsgeschwindigkeit bei einem max, zulässigen Gefälle von 25 ‰ auf 10 km Länge



Schnellbremsung

- Äquivalente Ansprechzeit 3s, auch 5s , Verzugszeit 2s.
- **Verzögerung:** Bestimmung des Verzögerungsprofils und Bremswege aus Schnellbremsungen für 30,100, 120,140,160,200, 230 und 300 km/h
- Berücksichtigung bei ETCS Lastzustände:
 - Minimale Zuladung "Auslegungsmasse , betriebsbereites Fahrzeug"
 - Normale Zuladung „Auslegungsmasse bei normaler Zuladung“
- Validierung der Bremsberechnungen durch Versuche
- Schnellbremsvermögen im Normalbetrieb bestimmen durch Anhaltewege mit den Vorgaben
 - 5360m bei 350 km/h,
 - 3650m bei 300 km/h,
 - 2430mfür 250 km/h,
 - 1500m für 200 km/h

Gleitschutzsystem

- Einheiten mit $v > 150$ km/h sind mit Gleitschutz auszurüsten
- Einheiten mit auf der Lauffläche der Räder wirkenden Bremsklötze mit einem Bremsvermögen, für die bei Geschwindigkeiten von > 30 km/h ein berechneter Rad/Schiene Kraftschluss von mehr als 0,12 vorgesehen ist, sind mit einem Gleitschutzsystem auszurüsten.
- Einheiten ohne auf die Lauffläche der Räder wirkenden Bremsklötze mit einer Bremsleistung, für die bei Geschwindigkeiten von > 30 km/h ein berechneter Rad/Schiene Kraftschluss von mehr als 0,11 vorgesehen ist, sind mit einem Gleitschutzsystem auszurüsten.

Rollüberwachung für Fahrgeschwindigkeiten $v > 250$ km/h

- Überwachung evtl. blockierter Radsätze

Kraftschluss-unabhängiges Bremssystem

- Sie muss von der Hauptbremssteuerleitung gesteuert werden
- Zusätzlich ist eine Sicherheitsanalyse erforderlich
- Einsatz Mg-Bremse bei Schnellbremsung bis 280 km/h möglich
- WB-Bremse, nicht festgelegt hinsichtlich der Auswirkungen auf die Erwärmung der Gleise und auf die vertikalen Kräfte

3. Funktionale und technische Spezifikationen an Bremsen

Rad-Schiene Kraftschluss

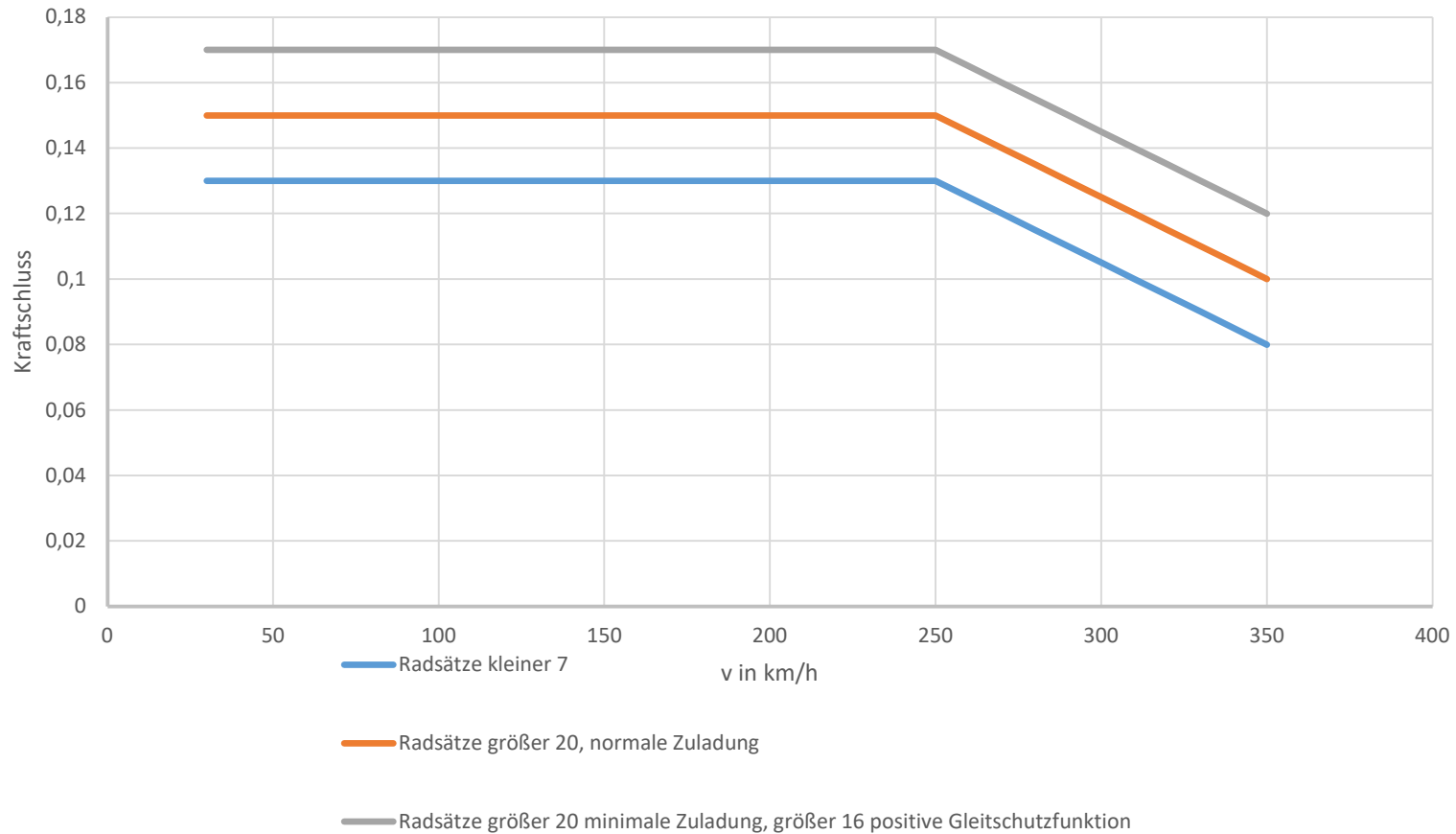
- Schnellbremsung (mit dynamische Bremse, wenn beim Bremsvermögen berücksichtigt) und
- Betriebsbremsung (ohne dynamische Bremse) im Geschwindigkeitsbereich größer 30 km/h und weniger als 250 km/h den Wert 0,15 nicht überschreiten darf.
- Ausnahmen:
 - max. sieben Radsätze, dann nur 0,13 zulässig
 - min. 20 Radsätze, darf für den Lastfall „minimale Zuladung“ mehr als 0,15 betragen, aber nicht höher als 0,17. Bei normaler Zuladung ist Grenzwert 0,15.
- Bei $v > 250$ km/h und 350 km/h sind die drei obengenannten Grenzwerte linear derart zu reduzieren, das sich bei 350 km/h eine Reduzierung um 0,05 ergibt.
- Bei Feststellbremse max. 0,12
- Berechnungen bei geringstem Raddurchmesser und der drei angegebenen Lastzuständen (betriebsbereites Fahrzeug, normale Zuladung und max. bremstechnische Zuladung)

Anforderungen an die Bremsen beim Abschleppen

- Müssen gelöst und abgesperrt werden können

3. Funktionale und technische Spezifikationen an Bremsen

Kraftschluss Rad/Schiene (TSI LOC&PAS)



DIN EN 15734-1 Bremssysteme für HGV –Züge, Teil 1: Anforderungen und Definitionen (Sept. 2013)

Grundsätzliche Architektur der HGV Bremsen

1. weitestgehend verschleißlos durch dynamische Bremsen

ausreichend dimensionierte elektrodynamische Bremsen, Fahrdraht ab- oder unabhängig, oder als Blending zwischen generativer und rheostatischer Betriebsart bei Schnellbremsung zur Absicherung der Betriebsbereitschaft, Lineare Wirbelstrombremse

2. Reibungsbremse (Klotz-, Scheibenbremse)

3. Mg-Bremse

Schnellbremskonzept

- Einleitung durch Triebfahrzeugführer
- Zugsicherungssystem, ausgelöst durch Infrastruktur und Signalsystem
- Andere Sicherheitseinrichtungen, ausgelöst durch dezentrale Einrichtungen im Zug

Auslösen der Schnellbremsung

- Durch Entlüften der HLL mit Magnetventilen, dabei in entlüfteter Grundstellung (de-energize to apply)
- Wenn neben der pneumatischen Bremse weitere Bremsen an der SB beteiligt sind, müssen diese entweder durch das Entlüften der HLL oder durch das Öffnen der Sicherheitsschleife aktiviert werden
- Ruck/Übergänge
Für Geschwindigkeiten über 10 km/h
 - bei Betriebsbremsungen max $0,6 \text{ m/s}^3$, $1,2 \text{ m/s}^2$ in 3s
 - bei Schnellbremsungen max. 1 m/s^3 , $1,8 \text{ m/s}^2$ in 3s

Bremsvermögen

- Bremsleistung wird auch für Ausfallsituationen festgelegt

Ausfallbetrieb umfasst eine Ansammlung von Störungen auf dem Zug und ungünstige Schienenzustände sowie Fehler im elektrodynamischen Bremssystem. Dabei muss nahezu dasselbe Bremsvermögen wie bei ungestörter Bremse erreicht werden.

- Bremsleistungen werden als Verzögerungswerte spezifiziert

Thermische Anforderungen

- Leistungsfähigkeit der Bremse muss im Betrieb des Zuges im max. Gefälle nach TSI HGVI Infrastruktur bei einer Mindestgeschwindigkeit von 90% der zulässigen betrieblichen Höchstgeschwindigkeit eine Bremsung ermöglichen
- Unter Beachtung dieser Bedingungen müssen zwei aufeinanderfolgende Schnellbremsungen vorgesehen werden
- Übereinstimmung mit der Anforderung muss mittels Berechnung nachgewiesen werden.

Kraftschluss

siehe TSI LOC&PAS, Werte müssen auf die zweite Stelle nach dem Komma gerundet werden.

DIN EN 15734-1 Bremssysteme für HGV –Züge, Teil 2: Prüfverfahren

- Festlegung der Regeln für Stand- und Fahrversuche
- Überprüfung, ob die Leistung und die Funktionen des Zugbremssystems mindestens die einzuhaltenden Anforderungen nach DIN EN 15734-1 erfüllt
- 3 Varianten der Prüfung:
 1. Variante Einzelfahrzeug
 2. Variante Zugeinheit
 3. Variante Mehrfachtraktion
- Einhaltung und Registrierung der Umweltbedingungen
- Festlegung der Prüf- und Messmittel
- Darlegung des Verfahrens zur Prüfung der Objekte
- Erstellung eines Prüfprogrammes
- Dokumentation in einem Prüfbericht

DIN EN 14198 Bremsen – Anforderungen an die Bremsausrüstung lokbespannter Züge

- Verwendung auch für Reisezüge als feste Zugverbände bis max. 300 km/h (S. 55), gilt auch im HGV diese Norm, siehe Pkt 5.4
- zugweite Bremssteuerung, Signalverteilung, lokale Bremssteuerung, Bremskraftherzeugung, Anzeige des Bremsstatus, Energieversorgung zur Bremskraftherzeugung
- Es ist zulässig, weitere Bremssignalleitungen, die automatisch reagieren und durchgehend sind, zu verwenden.
- Für Betriebsbremse ist es erlaubt, eine zusätzliche Bremssignalleitung zu verwenden, die nicht automatisch reagieren braucht.
- Forderung: Energiezuführung zur Bremssignalleitung (Lösen der Bremsen) und Energieabbruch zum Bremsengriff.
- Festhaltebremse mindestens 30 min für jede Zugart, mindestens 2h für Lokomotiven und Personenzüge, Erläuterung der ep-Bremse indirekter Bauart,
- Ruck $r = 0,6$ bis 1 m/s^3 (siehe auch EN 13452-1), Ruck bei Schnellbremsung $r = 2$ bis 4 m/s^3 ,
- Notwendigkeit des Einsatzes eines Gleitschutzes bei bestimmten betrieblichen Parametern

Berechnung des Bremsvermögens

- Normalbetrieb bis max. v bei definierten Lastzuständen, Anhaltewege, Verzögerungswerte, äquivalente Ansprechzeit für lokbespannte Züge 3s sowie Verzugszeit von 2s
- Eingeschränkter Modus bei Zugverbänden ein Einzelfehler Erschwerte Bedingungen bei Gamma-Zügen bei ETCS, bei Bewertung von Lambda Zügen nicht notwendig.
- Bremstechnische Höchstmasse: basiert auf die höchstens zu erwartende Dichte stehender Fahrgäste an Bord, zusätzlich zur Gesamtmasse und muss bei jedem Projekt bestimmt werden. (Beachtung der Sitzplatzreservierung)
- Wärmekapazität: Grundsatz jedes Fahrzeug bremst sich alleine ab, zwei Schnellbremsungen hintereinander, 21 Promille Gefälle bei 70 km/h über eine Strecke von 40 km, was einer Bremsleistung von 45 kW je Rad über 34 min. für einen Nenndurchmesser von 920 mm und einer Radsatzlast von 22,5 t bedeutet
- Kraftschluss : Wenn die v über 250 km/h liegt, muss der Kraftschluss zwischen Rad/Schiene bei einer v von 350 km/h von 0,15 auf 0,1 linear abfallen, bei Betriebsbremsung mit elektrodynamischer Bremse Grenzwert 0,2.

DIN EN 16185-1 Bremssysteme für Triebzüge , Teil 1 Anforderungen und Definitionen (August 2020)

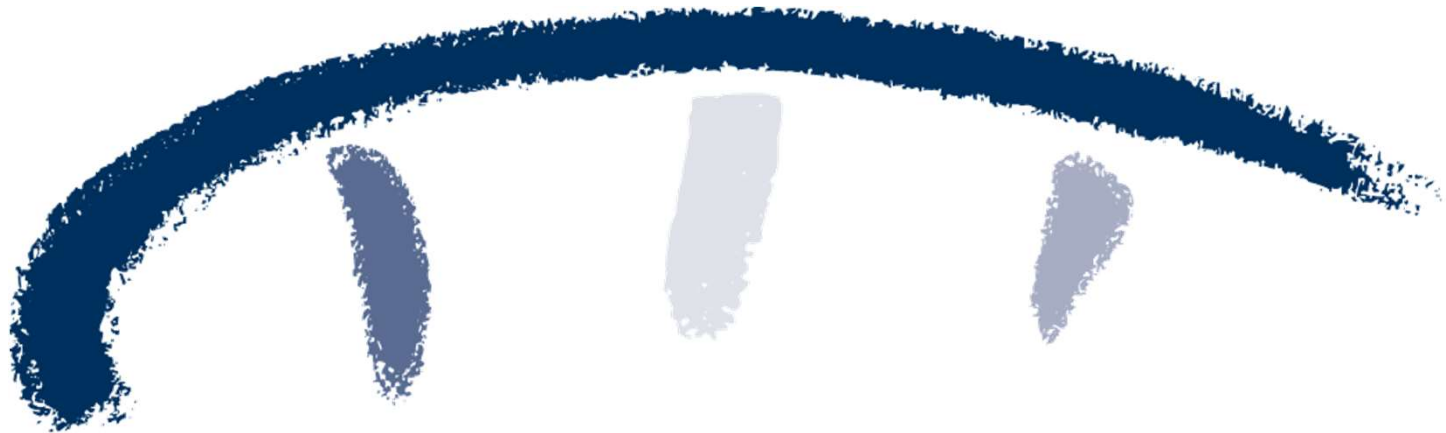
- Gilt für Triebzüge bis 200 km/h
- Gilt nicht für Hochgeschwindigkeitszüge(DIN EN 15734-1)
- Gilt nicht für lokbespannte Züge (DIN EN 14198)
- Enthält Gestaltungsgrundsätze für die Auslegung der Bremse,
- Wiederholt teilweise Anforderungen aus der TSI LOC & PAS noch einmal, teilweise aber eine Spezialisierung der Anforderungen Kraftschluss, Gleitschutz
- enthält Diagnosesystem und Bremsproben
- spricht von Bremsweg, nicht von Anhalteweg

Zusammenfassung

- das aus betrieblichen Gründen erforderliche Bremsvermögen muss betriebliche und ökonomische Anforderungen erfüllen.
- Verzögerungsstufen mit und ohne kraftschlussunabhängige Bremsen
- für $v \geq 30$ km/h darf Momentanverzögerung $1,5 \text{ m/s}^2$ nicht überschreiten
- Anhaltewege gelten ohne fahrdrahtabhängige Bremsen
- Beachtung verschiedener Szenarien Ausfallbetrieb
- Messungen zum Bremsweg und Verzögerung sind mit definierten Ausgangsgeschwindigkeiten auf definierten Strecken durchzuführen.
- Grundsätzlich sind die Versuche im Beladungszustand mit normaler Zuladung durchzuführen. Wenn in der Spezifikation gefordert, müssen Versuche auch in weiteren Beladungszuständen durchgeführt werden.
- Bremstechnische Höchstmasse: basiert auf die höchstens zu erwartende Dichte stehender Fahrgäste an Bord zusätzlich zur Gesamtmasse, muss bei jedem Projekt bestimmt werden. (Beachtung der Sitzplatzreservierung)
- Es wird ausdrücklich empfohlen, die Versuche in beiden Fahrtrichtungen durchzuführen.

Dieter Jaenichen

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



»Wissen schafft Brücken.«