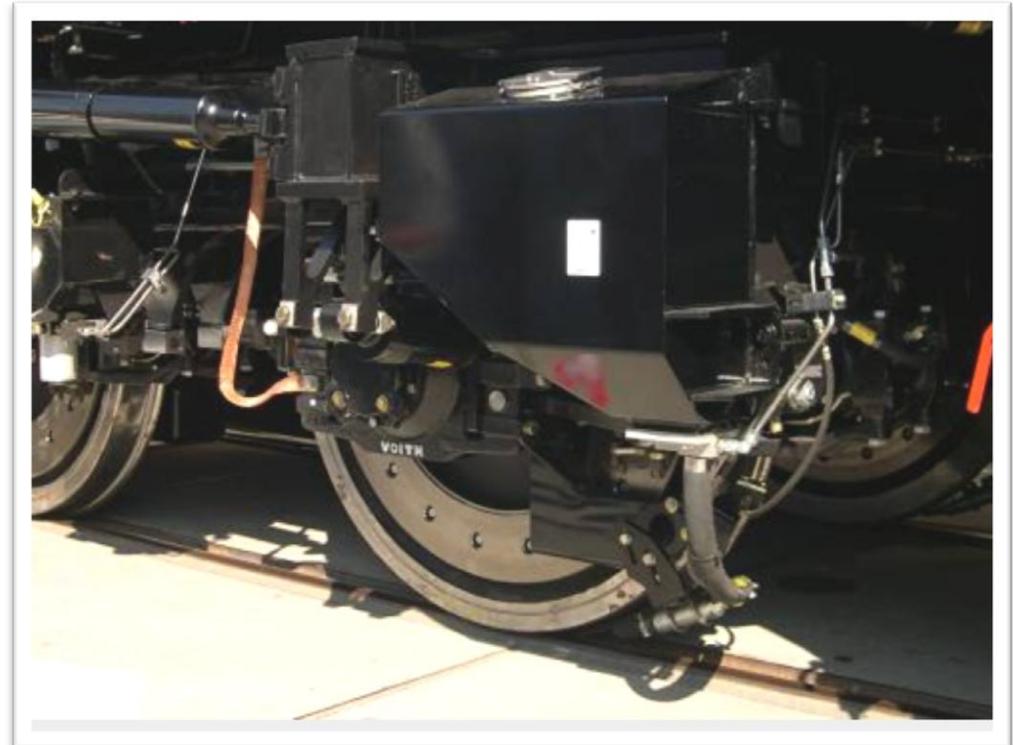


## 41. Tagung „Moderne Schienenfahrzeuge“ – Graz 07. – 10.04.2013

### Die Besonderheiten der Kraftschlussausnutzung zwischen Rad und Schiene beim Bremsen

Dipl.-Ing. Frank Minde  
DB Systemtechnik GmbH

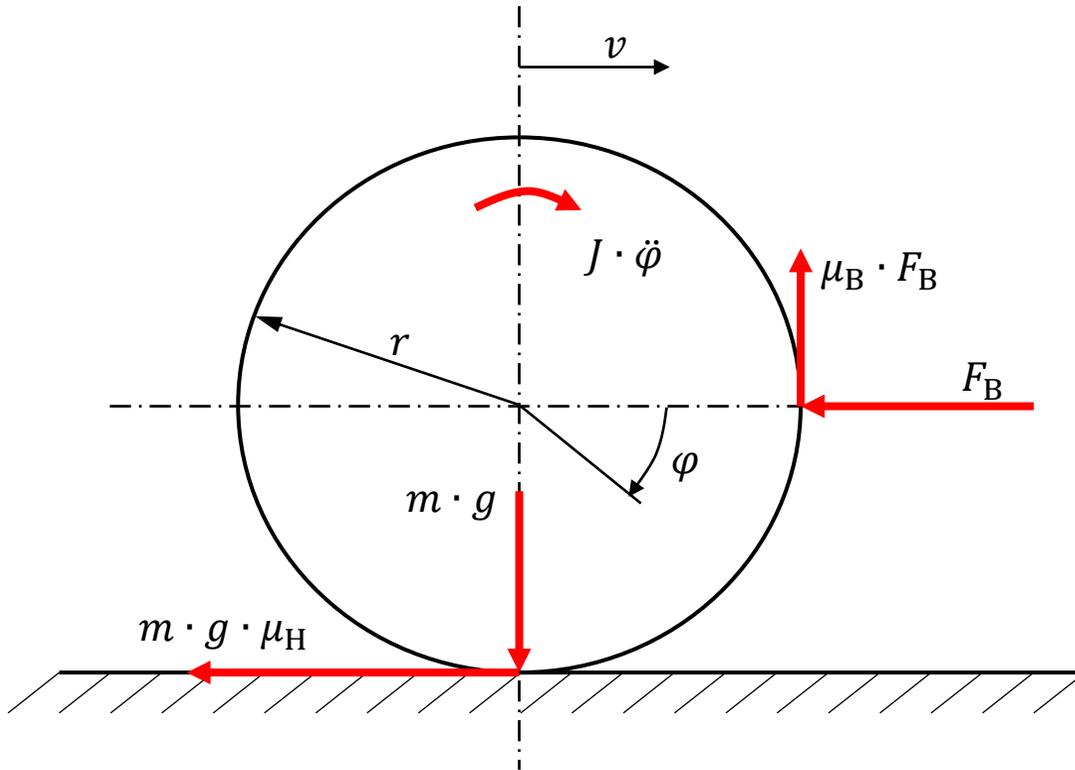
Dr.-Ing. Peter Berger  
Knorr-Bremse  
Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH



# Inhalt

- Herleitung der Kraftschlussausnutzung zwischen Rad und Schiene beim Bremsen
- Die maximale Kraftschlussausnutzung zwischen Rad und Schiene beim Bremsen
- Bewertung der maximalen Kraftschlussausnutzung zwischen Rad und Schiene
- Zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung des Kraftschlusses zwischen Rad und Schiene
- Ausblick

## Die Herleitung des erforderlichen Kraftschlusses zwischen Rad und Schiene erfolgt aus den Kräften am gebremsten Eisenbahnrad:



$$a_{mom} = \frac{\mu_B \cdot F_B - \frac{J \cdot \ddot{\varphi}}{r}}{m}$$

$$J = m_{rot} \cdot r^2 \quad \ddot{\varphi} \approx \frac{a_{mom}}{r}$$

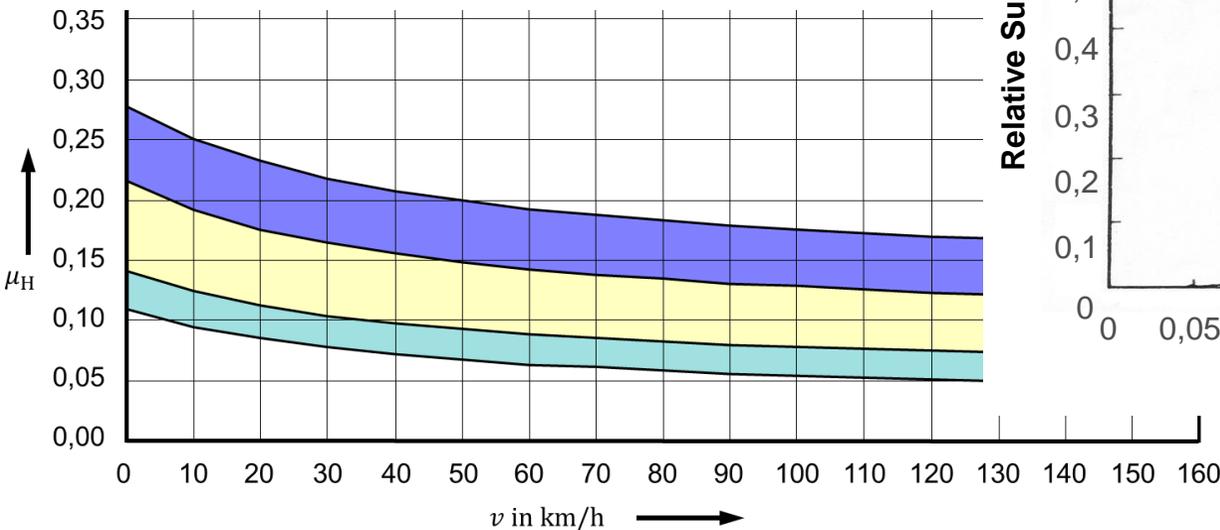
$$a_{mom} = \frac{\mu_B \cdot F_B}{m + m_{rot}}$$

$$\mu_{H,erf} = \frac{\mu_B \cdot F_B}{(m + m_{rot}) \cdot g}$$

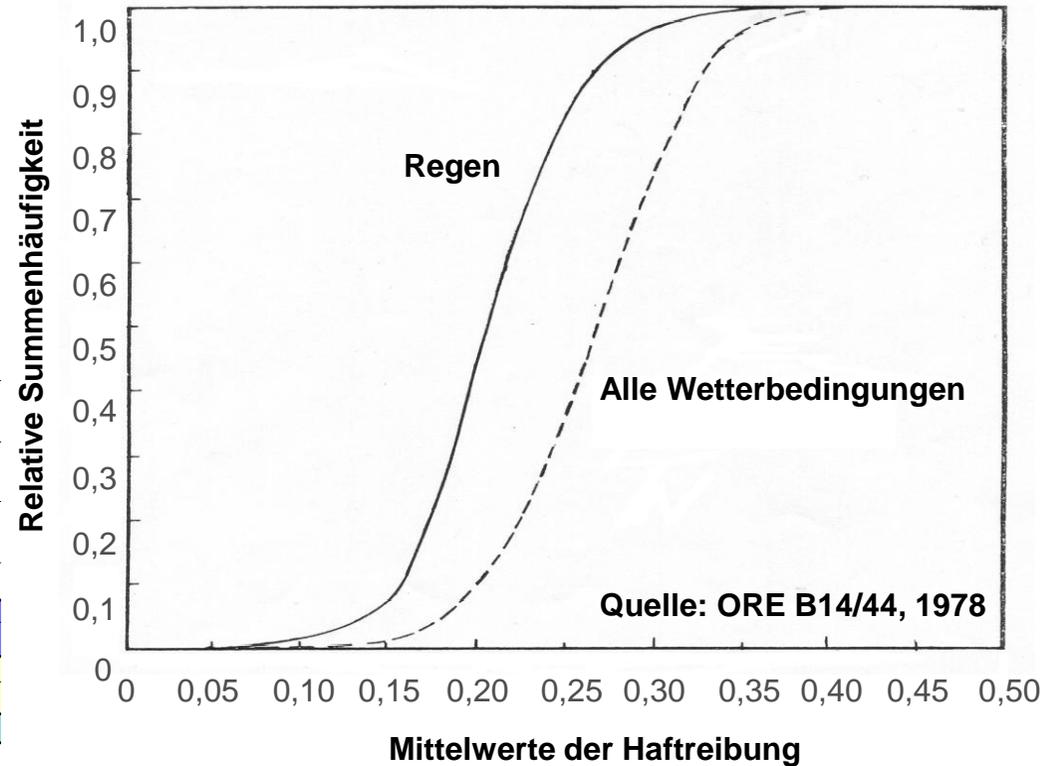
Der erforderliche Kraftschluss  $\mu_{H,erf}$  zwischen Rad und Schiene ist das Verhältnis der Bremskräfte, die über das Rad übertragen werden müssen, zur Radaufstandskraft (inklusive rotatorischer Anteile).

## Der maximal übertragbare Kraftschluss zwischen Rad und Schiene ist:

- eine statistisch verteilte Größe,
- keine exakt zu bestimmende und vorhersehbare Konstante,
- eine Funktion der Zeit und des Ortes,
- eine Funktion der Geschwindigkeit,
- ...



■ trockene Schiene   
 ■ feuchte Schiene   
 ■ schlüpfrige Schiene



**Grenzwert lt. AG Bremsen beim Reichsbahn-Zentralamt für Maschinenbau: 0,15 (09.11.1935)**

## Es existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Einflussgrößen auf den Kraftschluss zwischen Rad und Schiene, dazu gehören:

Einflussgröße	Einfluss auf den Kraftschluss
Dynamik im Kontakt zwischen Rad und Schiene	Abnahme mit steigender Dynamik, z.B. durch Schwingungen, Quergleiten, etc.
Materialeigenschaften und Oberflächenstrukturen	Zunahme mit steigender Festigkeit der Schienen- und Radwerkstoffe, Höherer Wert bei Klotz- als bei Scheibenbremsen
Raddurchmesser	Zunahme mit steigendem Raddurchmesser
Fahrgeschwindigkeit	Abnahme mit steigender Geschwindigkeit
Radsatzlast	Abnahme mit steigender Radsatzlast
Temperatur/Luftfeuchtigkeit	Abnahme mit steigender Luftfeuchtigkeit und kleiner werdender Differenz aus Schienentemperatur und Taupunkttemperatur
Zwischenmedium	Abnahme von trocken zu nass, von nass zu feucht, von sauber zu verschmutzt (Staub, Oxidschichten, Laub, Öl, etc.)
Schlupfregelung (Gleitschutz)	Zunahme durch optimales Einbringen von Schlupfarbeit und Schlupfleistung Abnahme mit steigender Gleitgeschwindigkeit

## Die obere Grenze der Kraftschlussausnutzung muss so festgelegt sein, dass:

- auch bei reduziertem Kraftschluss zwischen Rad- und Schiene ein Auftreten von gefährlichen Bremswegverlängerungen ausreichend unwahrscheinlich ist,
  - Begrenzung der maximalen Kraftschlussausnutzung und ggf. zusätzliche Maßnahmen.
- die Bremsen auch bei reduziertem Kraftschluss zwischen Rad und Schienen durch den Lokführer beherrschbar bleiben,
  - Betriebsbremsungen dürfen nicht stärker Wirken als Schnellbremsungen.
  - nur geringfügige Verzögerungseinbrüche beim Übergang von der Betriebsbremse auf die Schnellbremse.
- ein ökonomischer und ökologischer Bremsbetrieb möglich ist.
  - Vorrangiger Einsatz verschleißfreier Bremsen.



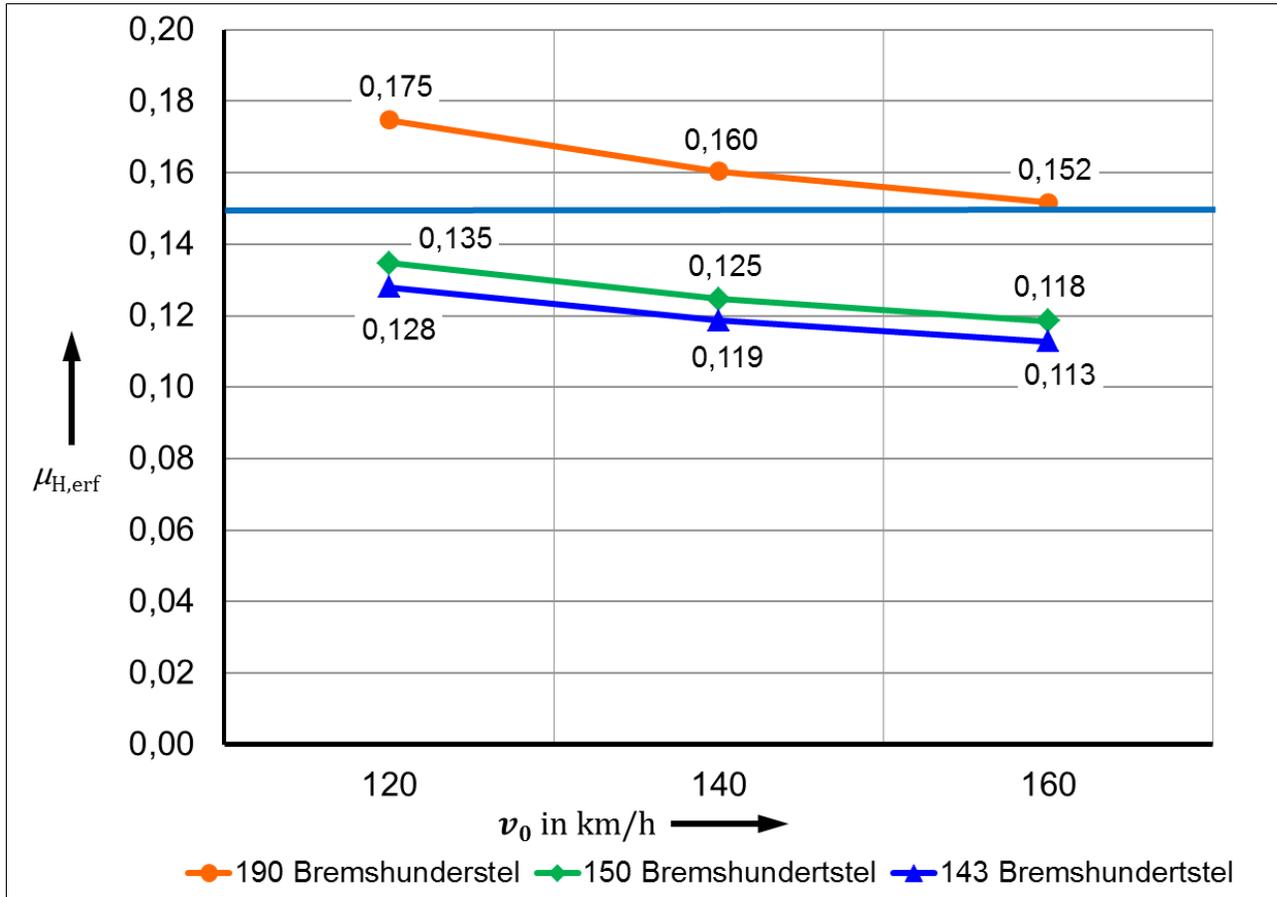
Foto: G. Krause

## Die Grenzwerte für die Kraftschlussausnutzung beim Bremsen bewegen sich in den verschiedenen Regelwerken mit wenigen Ausnahmen in einem Bereich um die 0,15:

Regelwerk	Grenzwert	Grenzwert normiert*	Bemerkung
UIC 544-1:2004 (Bremsbewertung)	0,15	0,15	Auslegungsrechnung
SAM F 009:2007	0,15 Triebzug (> 200 km/h) 0,13 sonstige Triebzüge und Lok 0,16 Reisezugwagen ( $\leq$ 200 km/h)	0,175 0,135 0,167	Fahrversuch
UIC 660:2002 (HST)	0,15	0,175	Fahrversuch
TSI RST HST:2008	0,15	0,175	Auslegungsrechnung
B 007	0,13 Triebzug (weniger als 8 RS) 0,17 HST (mehr als 20 RS) 0,15 alle anderen Fahrzeuge	0,13 0,17 0,15	Fahrversuch, zusätzlich „Deckelung“ der maximalen Verzögerung eines Zuges (1,5 m/s <sup>2</sup> )

\* bezogen auf Dienstmasse und abgenutztes Rad

## Betrieblich notwendige Kraftschlussausnutzung:



Betrieblich ist für eine Reibungsbremse bei einer maximalen Geschwindigkeit von 140 km/h bei 1.000 m Vorsignalabstand eine maximale Kraftschlussausnutzung von etwa 0,13 ausreichend.

Theoretisch erforderliche mittlere Kraftschlussausnutzung  $\mu_{H,erf}$  in einem Zugverband für verschiedene Bremshundertstel und Bremsausgangsgeschwindigkeiten  $v_0$ , abgeleitet aus den Bewertungskurven nach UIC-Merkblatt 544-1

## Auswertung der Kraftschlussausnutzung in der Vergangenheit:

- Regelwerk hinsichtlich zulässiger Kraftschlussausnutzung nicht an allen Stellen konsistent und eindeutig hinsichtlich der Rahmenbedingungen (z.B. Fahrzeugmassen, Raddurchmesser, Belagreibwerte, etc.).
- Rechnerische Auslegung der Fahrzeuge zunehmend an der oberen Grenze der zulässigen Kraftschlussausnutzung.
- Überprüfung der maximalen Kraftschlussausnutzung in der Regel nur anhand der Auslegungsrechnung ohne Anpassung der Eingangsparameter nach den Fahrversuchen.
- Das betrieblich anrechenbare Bremsvermögen wurde auf eine gemittelte Kraftschlussausnutzung von 0,132 begrenzt.



Foto: G. Krause

## Schrittweise Konkretisierung des Regelwerkes durch:



**DIE BAHNINDUSTRIE.**  
VDB VERBAND DER BAHNINDUSTRIE IN DEUTSCHLAND E.V.



### Ergänzungsregelung<sup>1</sup> Nr. B 007 zur „Kraftschlussausnutzung“

Stand: Rev. 2, vom 15.11.2012

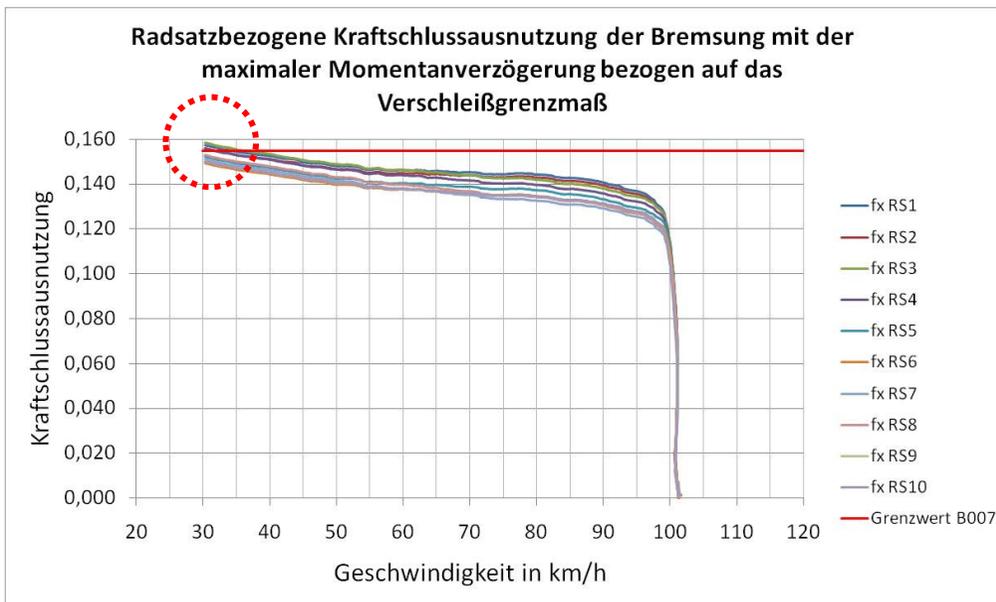
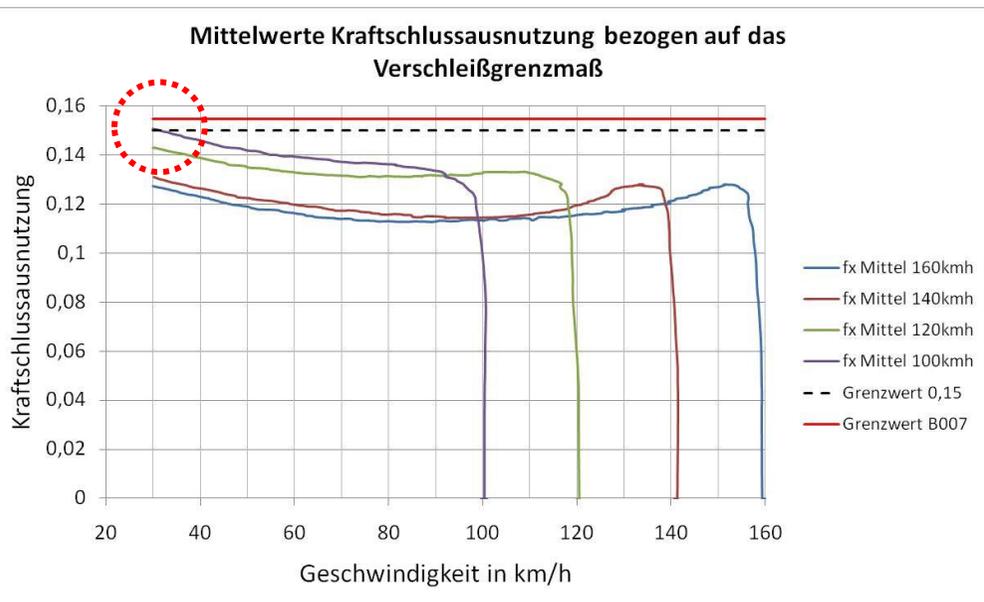
Rev.- Nr..	Datum	Verantwortung.	Bemerkungen
1.0	31.08.2009	Ak Bremse	Erstausgabe erstellt durch Ak Bremse
1.5h	03.09.2012	Ak Bremse	Von Ak Bremse auf 82. Sitzung beschlossen
2	15.11.2012	Lk Fahrzeuge	Durch Lk Fahrzeuge genehmigt

**Bereich:** Radbremsen

**Inhalt:** Definition von Grenzwerten der Rad-Schiene-Kraftschlussausnutzung

- die Definition von Schutzzielen
  - Gewährleistung eines betrieblich sicheren Bremsweges,
  - sicheres Handhaben der Bremsen,
  - Gewährleistung eines ökonomischen Bremsbetriebes,
- die Definition von Obergrenzen für die maximale Kraftschlussausnutzung in Anlehnung an das europäische Regelwerk (insbesondere TSI RST LOC&PAS) sowie für Betriebs- als auch Schnellbremsungen,
- die Definition eines Verfahrens zur Validierung der maximalen Kraftschlussausnutzung im Rahmen der bremstechnischen Erprobung durch Auswertung der Fahrversuche.

## Erfahrungen im Umgang mit einer früheren Version der Regelung B007:

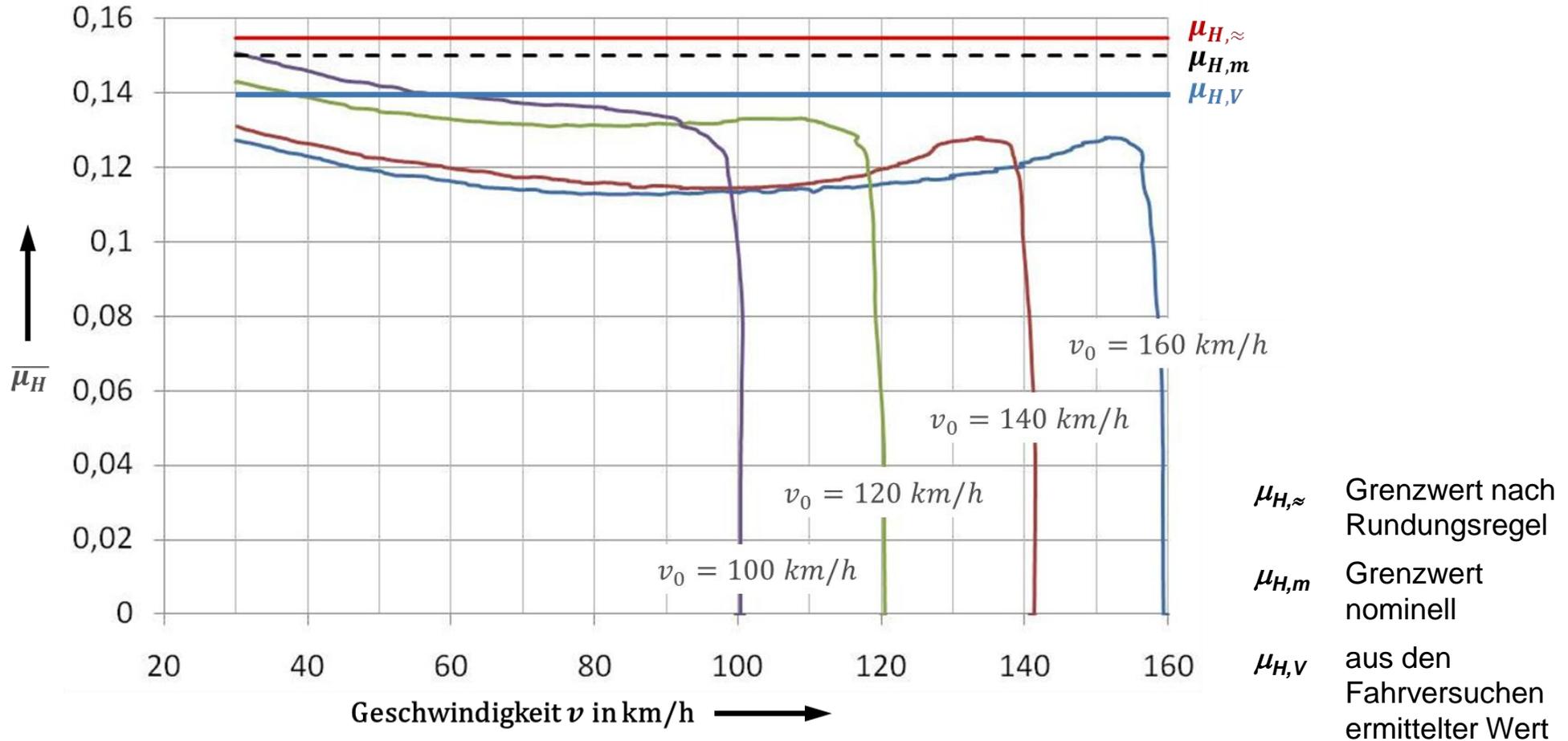


- Auswertung der Momentanverzögerung aller Bremsungen im Fahrversuch im Geschwindigkeitsbereich größer 30 km/h,
- Verwendung des tatsächlichen Bremszylinderdruckes und des Gestängewirkungsgrades der Krafterzeuger beim Versuch,
- Überschreitung der Grenze der zulässigen Kraftschlussausnutzung bei ein oder zwei Bremsungen,
- keine Zulassung aufgrund zufälliger Messwerte → es fehlte eine Definition des Validierungsverfahrens.

## Nach Überarbeitung der B007 Validierung der maximalen Kraftschlussausnutzung für jeden Radsatz durch:

- Verwendung der maximalen weggemittelten Verzögerung nach Ablauf der äquivalenten Bremsentwicklungszeit aus den gültigen Versuchen für jede für die Ermittlung der Bremsleistung relevante Bremsausgangsgeschwindigkeit (Mittelwert der gültigen Versuche einer Messreihe für eine Bremsausgangsgeschwindigkeit),
- Bestimmung der maximalen Kraftschlussausnutzung unter Verwendung:
  - der statischen Radsatzmasse zuzüglich der rotatorischen Masse
  - des maximalen nominellen Bremszylinderdruckes
  - des nominellen mittleren dynamischen Wirkungsgrades der Bremsgestänge zwischen zwei Überholungsintervallen,
  - des mittleren, aus der maximalen weggemittelten Verzögerung abgeleiteten Belagreibwertes der Reibungsbremse,
  - des Durchmessers des abgenutzten Rades,
- Überprüfung der Einhaltung der Obergrenzen.

## Das Verfahren zur Validierung der maximalen Kraftschlussausnutzung wurde an Hand von Beispielfahrzeugen überprüft



## Trotzdem: Fallbeispiele aus der Praxis

Zeitpunkt	Ort	$v_0$ [km/h]	s [m]	Sandung	Mg-Bremse	Bemerkung
Okt. 2003	Horn-Bad Meinberg (D)	~ 70	~ 1.725	x	-	Sandung nicht funktionsf.
Okt. 2005	Köln-Lövenich (D)	~ 78	~ 1.180	x	-	Sandung nicht funktionsf.
Nov. 2005	Lewes (GB)	~ 112	~ 2.500	x	-	Sandung nicht funktionsf.
Nov. 2005	Esher (GB)	~ 145	~ 3.000	x	-	Sandung gestört
Nov. 2010	Stonegate (GB)	~ 110	~ 5.100	x	-	Sandung nicht funktionsf.
Nov. 2011	Marslev (DK)	~ 180	~ 2.800	-	x	Mg-Bremse nicht funktionsf.

Auftreten bei extrem schlechten Haftwertverhältnissen, insbesondere in den Herbstmonaten:

- nicht abgedeckt durch Anforderungen an die maximale Kraftschlussausnutzung,
- Konditionierungseffekt durch den Gleitschutz kaum wirksam.

## Es kann bei extrem schlechten Kraftschlussverhältnissen ein stark verlängerter Bremsweg auftreten, so dass weitere Maßnahmen erforderlich sein können, wie:

- die Vermeidung oder Beseitigung von den zur Verfügung stehenden Kraftschluss zwischen Rad und Schiene reduzierenden Zwischenschichten auf Seiten der Infrastruktur,
- die Beseitigung von den zur Verfügung stehenden Kraftschluss zwischen Rad und Schiene reduzierenden Zwischenschichten auf Seiten des Fahrzeugs,
- die Verbesserung des zur Verfügung stehenden Kraftschlusses zwischen Rad und Schiene durch Einbringung von Partikeln in die Zwischenschicht.  
→ Sandung

## Maßnahmen im Betrieb (Infrastruktur), z.B. durch:



- Vegetationsrückschnitt,
- Schienenreinigung (Beispiel Groß Britannien),
- besondere Regeln zum Umgang mit schlechtem Kraftschluss, z.B. Railway Group Standard GE/RT8040: „Low Adhesion between Wheel and Rail – Managing the Risk“.

Quelle: Wikipedia – Geof Sheppard

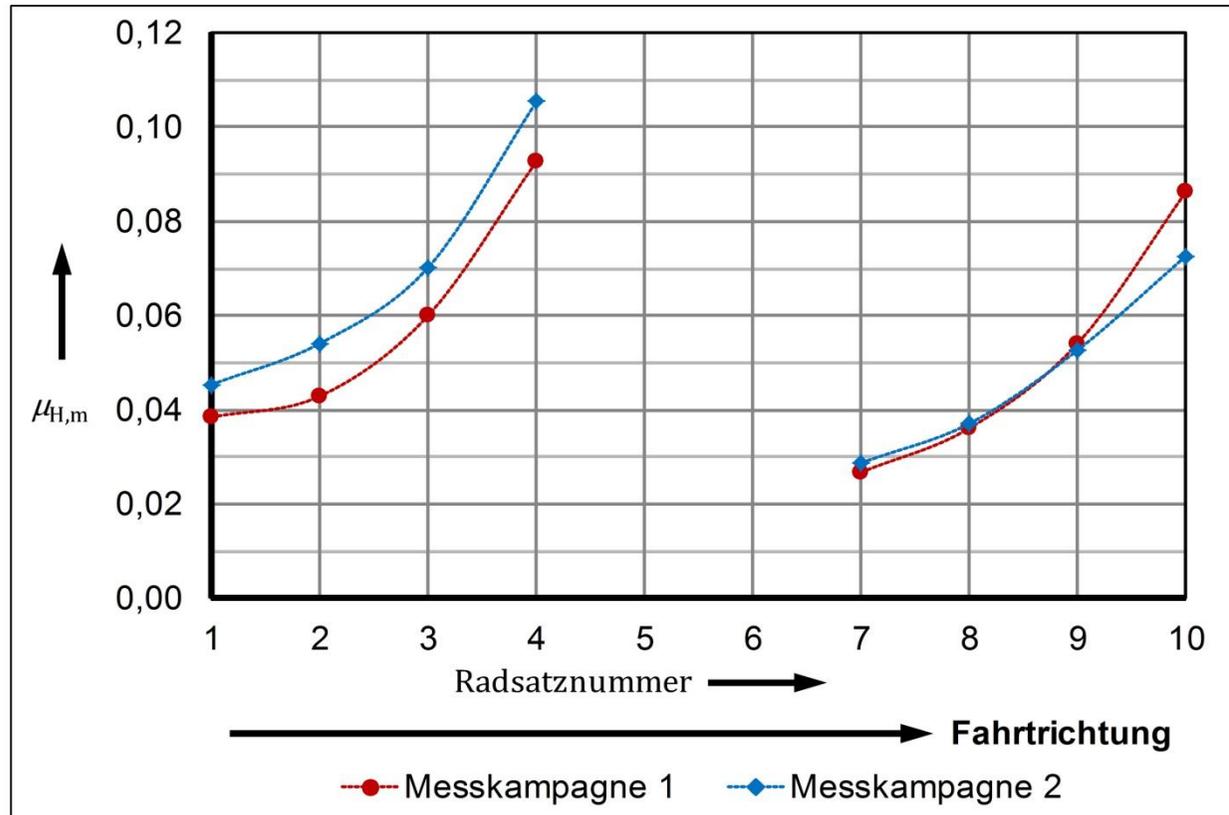
## Maßnahmen am Fahrzeug, z.B. durch



- Reinigungswirkung durch Überrollen,
- Reinigungswirkung durch Einbringung von Schlupfleistung bei Makroschlupfregelung durch die Gleitschutzeinrichtungen,
- Reinigungswirkung durch Schienenbremsen.



## Einbringung von Zwischenschichten, z.B. durch Sandung:



- Abnehmende Wirkung durch Zermahlen des Sandes mit zunehmender Radsatzzahl,
- Magnetschienenbremsen säubern die Schiene und verhindert Wirkung von Sand für nachlaufende Radsätze,
- Begrenzung der Sandmenge wegen möglicher Beeinflussung von Gleisstromkreisen erforderlich.

Durchschnittlich erreichter, über den Weg gemittelter Kraftschluss  $\mu_{H,m}$  zwischen Rad und Schiene in einem Triebzugverband bei Bremsungen auf Öl (Ausbringung von Sand vor den Radsätzen Nr. 10 und 4)

## Was ist noch zu tun:

- Überführung der aufgestellten Regeln sowohl zur Begrenzung der maximalen Kraftschlussausnutzung als auch zur Validierung der maximalen Kraftschlussausnutzung in das allgemeine Regelwerk (z.B. europäische Normung).
- Quantifizierung des Einflusses der Maßnahmen zur Verbesserung des Kraftschlusses zwischen Rad und Schiene, wie z.B. durch Magnetschienenbremsen oder Sandungseinrichtungen.
- Systematische Untersuchung und Optimierung der Sandungssysteme mit paralleler Weiterentwicklung der derzeit gültigen Grenzwerte für die ausgebrachten Sandmengen.



## Kontakt

DB Systemtechnik GmbH  
Bremse und Kupplungen  
Herr Dipl.-Ing. Frank Minde  
Weserglaxis 2  
32423 Minden (Westf.)  
Germany

[Frank.Minde@deutschebahn.com](mailto:Frank.Minde@deutschebahn.com)

Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH  
Bremsysteme Fernverkehr  
Herr Dr.-Ing. Peter Berger  
Moosacher Str. 80  
80809 München  
Germany

[Peter.Berger@knorr-bremse.com](mailto:Peter.Berger@knorr-bremse.com)