



Systemtechnik



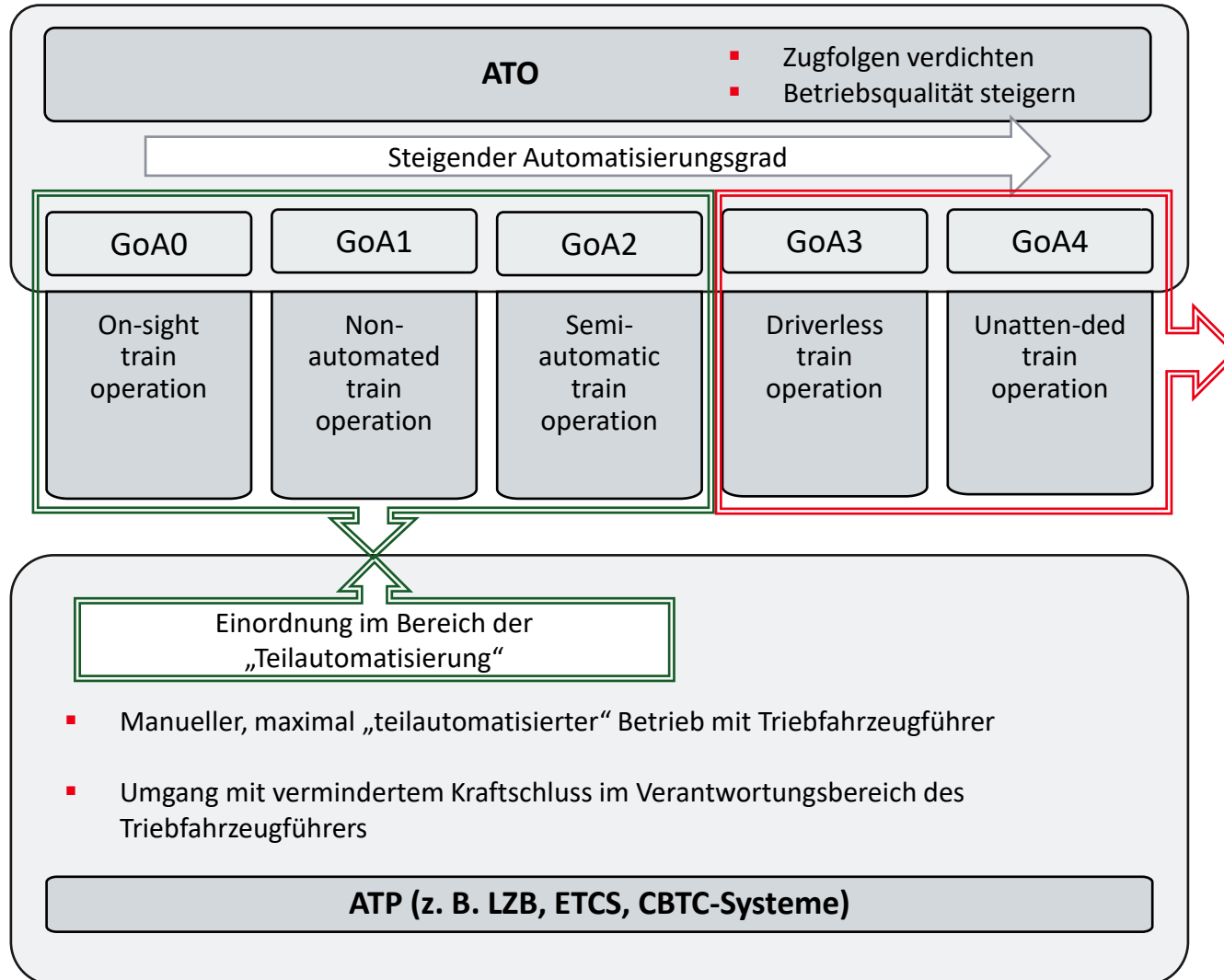
KNORR-BREMSE

ATO und Kraftschluss

Berücksichtigung extrem niedriger Kraftschlüsse (xnH) bei ATO

ATO und Kraftschluss

Motivation



Herausforderung durch ATO

Beherrschen extremer Kraftschluss-verhältnisse zur Vermeidung

- des erhöhten Kollisionsrisikos durch Zugfolgenverdichtung
- von Vorbeifahrten am Gefahrpunkt

Lösungsansatz

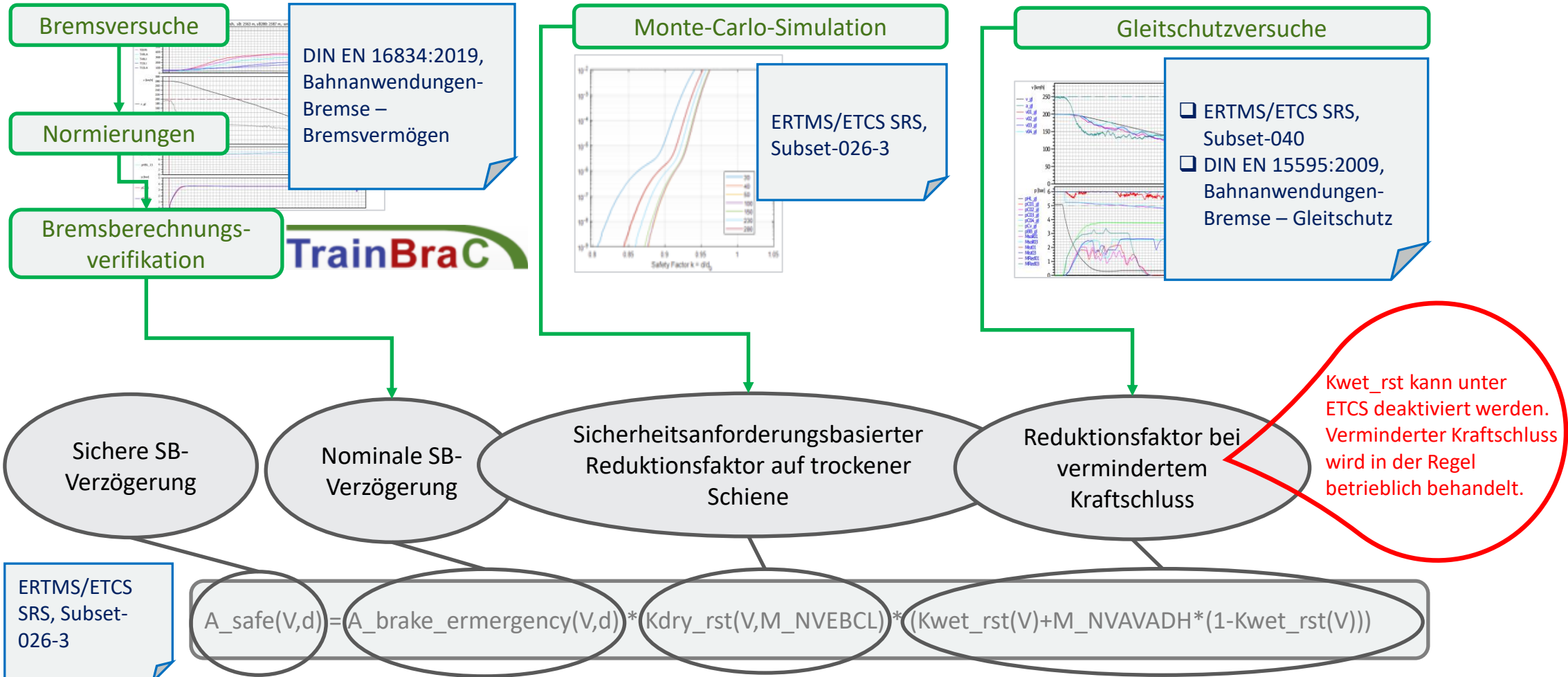
Um Fahrzeuge unabhängig von allen Kraftschlussverhältnissen auch im ATO- Betrieb sicher bremsen zu können, sind die vorhandenen Regeln anzuwenden und durch den Konditionierungsansatz zu ergänzen.

ATO und Kraftschluss

Bremskurvenparameter am Beispiel ETCS – Gamma-Züge



Systemtechnik



ATO und Kraftschluss

Nutzung der ATP-Parameter im ATO-Betrieb am Beispiel ETCS



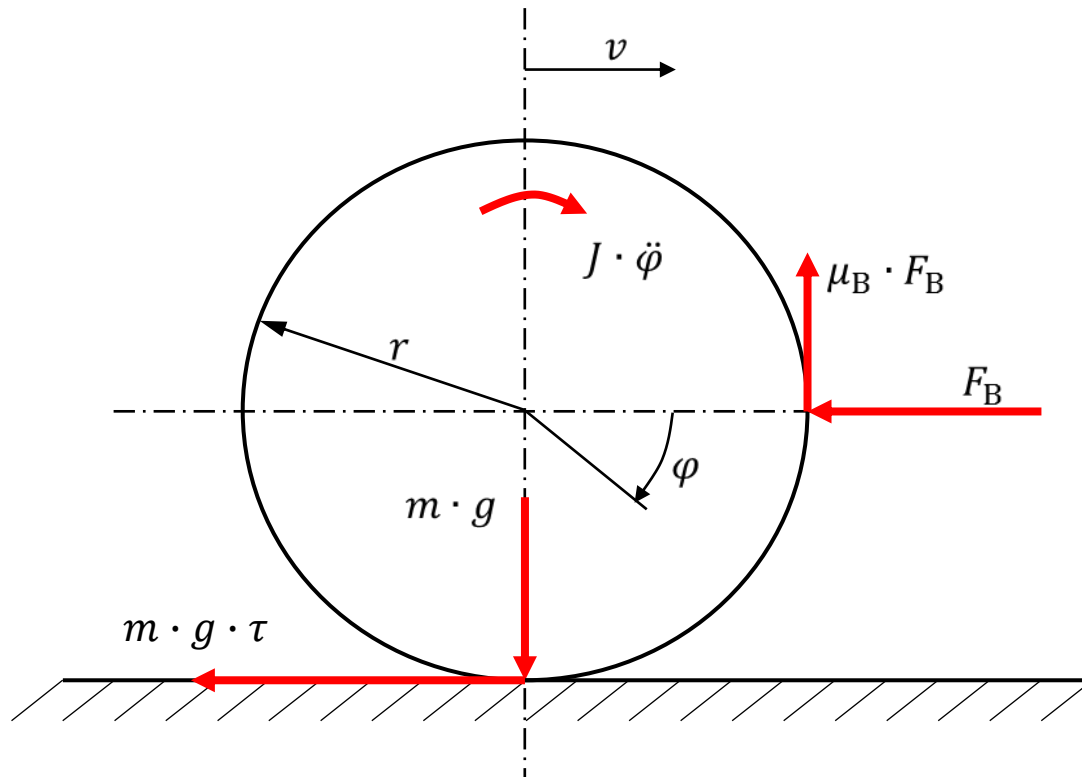
Systemtechnik



		ETCS-Anforderung	Übertragbarkeit auf ATO möglich?
Bremskurvenparameter	t_e	Einheitlich für alle EBCL. Hergeleitet gemäß DIN EN 16834:2019.	Grundsätzlich ist Übertragbarkeit möglich.
	A_brake_emergency	Einheitlich für alle EBCL. Hergeleitet gemäß DIN EN 16834:2019.	Unter Berücksichtigung der Sicherheitsanforderungen ist die Übertragbarkeit der ETCS Parameter auf ATO bei trockenen Schienenverhältnissen möglich.
	Kdry_rst	Differenziert nach EBCL. Hergeleitet gemäß ERTMS/ETCS SRS, Subset- 040.	
	Kwet_rst	Einheitlich für alle EBCL. Hergeleitet gemäß ERTMS/ETCS SRS, Subset- 040 (Berücksichtigung der Bremswegverlängerung der Gleitschutzversuche).	Kwet_rst deckt extrem niedrige Kraftschlussverhältnisse nicht ab. Damit ist Kwet_rst zur Festlegung der sicheren Verzögerung unter ATO nicht geeignet!

ATO und Kraftschluss

Definition Kraftschluss Rad/Schiene



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

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

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

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

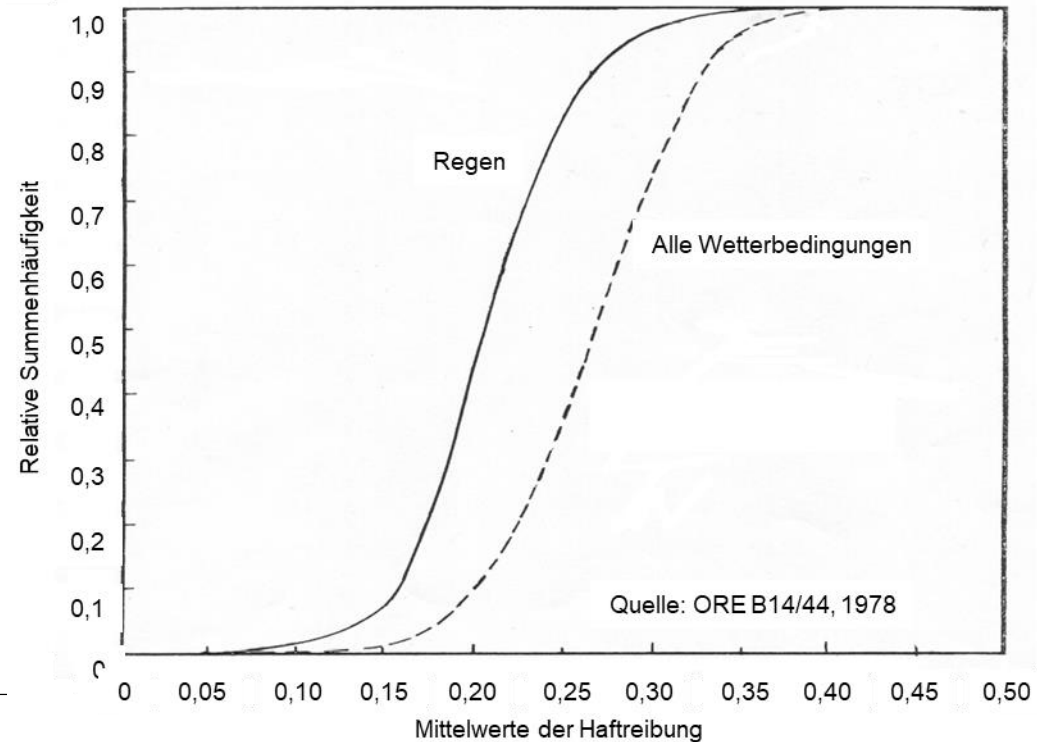
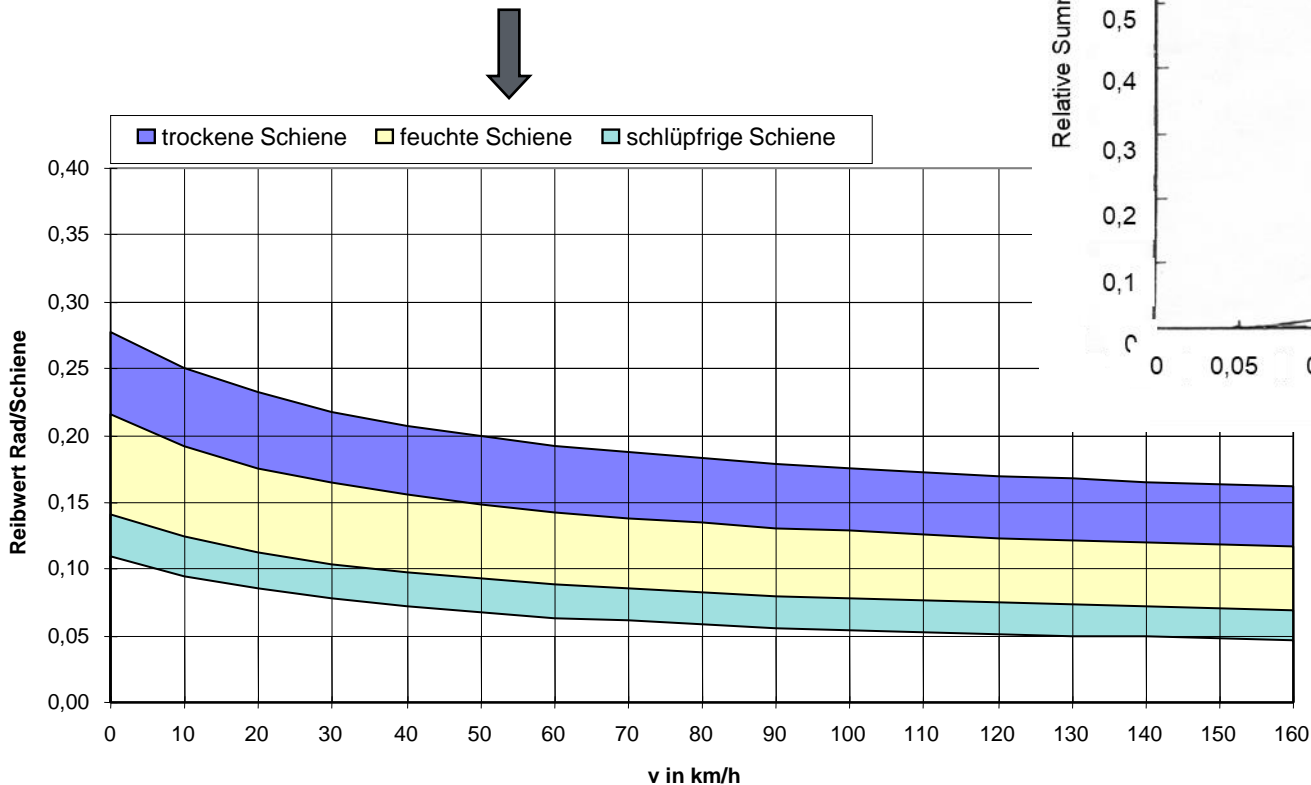
Der erforderliche Kraftschluss τ_{erf} zwischen Rad und Schiene ist das Verhältnis der Bremskräfte, die über das Rad übertragen werden müssen, zur Radaufstandskraft (inklusive rotatorischer Anteile).

ATO und Kraftschluss

Der Kraftschluss als statistische Größe

Der Kraftschluss τ zwischen Rad und Schiene ist

- eine statistisch verteilte Größe
- eine Funktion der Zeit und des Ortes
- eine Funktion der Geschwindigkeit



Grenzwert lt. AG für Bremsen seit
09.05.1935: 0,15

ATO und Kraftschluss

Konditionierungseffekt

Konditionierungs-Effekt

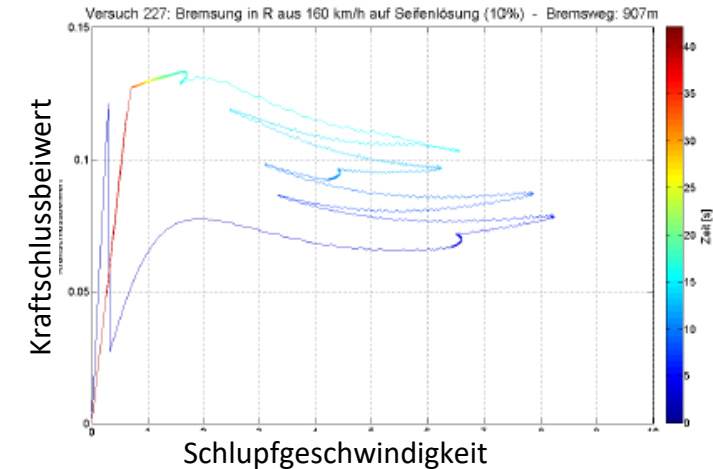
Der Kraftschluss Rad/Schiene kann bis auf den Trockenwert durch Einbringen von Schlupfenergie in Rad und Schiene steigen:

- Wirkung bei einem anfänglichen Kraftschluss Rad/Schiene im Bereich niedrigen und sehr niedrigen Kraftschlusses - nH
- Wirkung wird nach den Kriterien von UIC 541-05 und EN 15595 angenommen
- äquivalente Kraftschlussausnutzung von bis zu 0,1 möglich

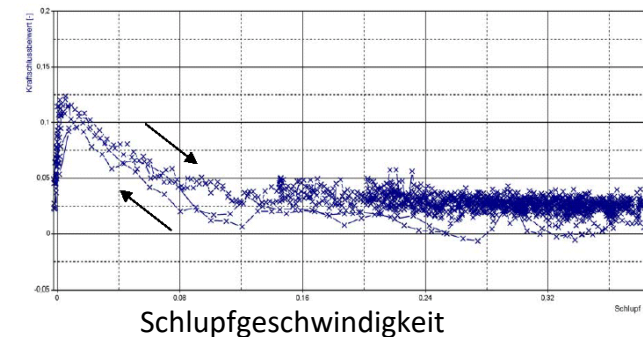
Der **Konditionierungs-Effekt** verliert sich bei extrem niedrigen Kraftschlusswerten $< 0,03 - \text{xnH}$:

- Das gilt insbesondere dann, wenn größere Zwischenschichten (feuchtes Laub, Zellulose) auftreten, die durch Energieeintrag nicht zerstörbar sind.
- Der extrem niedrige Kraftschluss selbst verhindert die Aufnahme von Energie in Rad und Schiene.
- Nutzbar ist nur das oft ausgeprägte Maximum des Kraftschlusses bei sehr kleinen Schlupfgeschwindigkeiten.

Kraftschlussverbesserung durch Konditionierung (Simulation)



Kraftschlusskurve bei extrem niedrigem Kraftschluss (Messung)



ATO und Kraftschluss

Extreme Bremswegverlängerungen im Betrieb



Systemtechnik



Gemeinsamkeiten:

- Extrem niedriger Kraftschluss - μ
- Alle Vorfälle im Herbst (Laubfall!)
- Bei allen Vorfällen
 - Sandstreuanlage entweder nicht aktiv oder defekt
 - keine Mg-Bremse

Datum	Vorfall	Art des Vorfalls	v_0 [km/h]	Brems- weg [m]	Sandstreu- anlagen	Magnet- schienen- bremsen
26.10.2005	Lövenich (GER)	Bahnsteigverfehlung	78	1180	Nicht betätigt/defekt	Nicht vorhanden
30.11.2005	Lewes (GB)	Signalvorbeifahrt	~112	~2500	Defekt/falsch konfiguriert	Nicht vorhanden
25.11.2005	Esher (GB)	Signalvorbeifahrt	~145	~3000	Defekt (zu geringe Sandmenge)	Nicht vorhanden
01.11.2006	Gauting (GER)	Bahnsteigverfehlung	134	2312	Defekt (falsch eingestellte Sandrohre)	Nicht vorhanden
08.11.2010	Stonegate (GB)	Bahnsteigverfehlung	~110	~5100	Kein Sand im Vorratsbehälter	Nicht vorhanden
07.11.2011	Marslev (DK)	Signalvorbeifahrt	~180	~2800	Nicht vorhanden	Abgeschaltet

Schlussfolgerung:

Es kann "**selten**" ein extrem verlängerter Bremsweg auftreten, dessen Folgen "**katastrophal**" sein können (Signalvorbeifahrt, Kollision); eine **Risikoreduktion** ist daher erforderlich (EN 50126-1).

ATO und Kraftschluss

Schutzziel 1 der B007: „Gewährleistung eines betrieblich sicheren Bremsweges“



Systemtechnik



Das Schutzziel 1 der B007 ist erfüllt, wenn:

- die (Trocken-)Kraftschlussausnutzung auf einen Wert von 0,15 begrenzt ist,
- „die Wirkung des Gleitschutzes in der Lage ist, im Falle niedriger Kraftschlusswerte (nH) den Kraftschluss im Regelfall auf das Niveau anzuheben, das zur Einhaltung des signal-technisch bestimmten Bremsweges erforderlich ist, sowie
- eine Verlängerung des Bremswegs über den Gefahrenpunkt hinaus „unwahrscheinlich“ im Sinne der EN 50126-1 ist; nach Umsetzung ergänzender fahrzeugseitiger Maßnahmen wie:
 - Ausrüstung mit Mg-Bremsen nach B012 und/oder
 - Sandstreuanlagen nach B011.



Eisenbahnen der Bundesrepublik Deutschland

Verkehrsministerium

DB

Schenker

MVPI

Verkehrsmittel-Verkehrs-Infrastruktur

VDV

Die Verkehrsunternehmen

Ergänzungsregelung¹ Nr. B 007

zur

„Kraftschlussausnutzung“

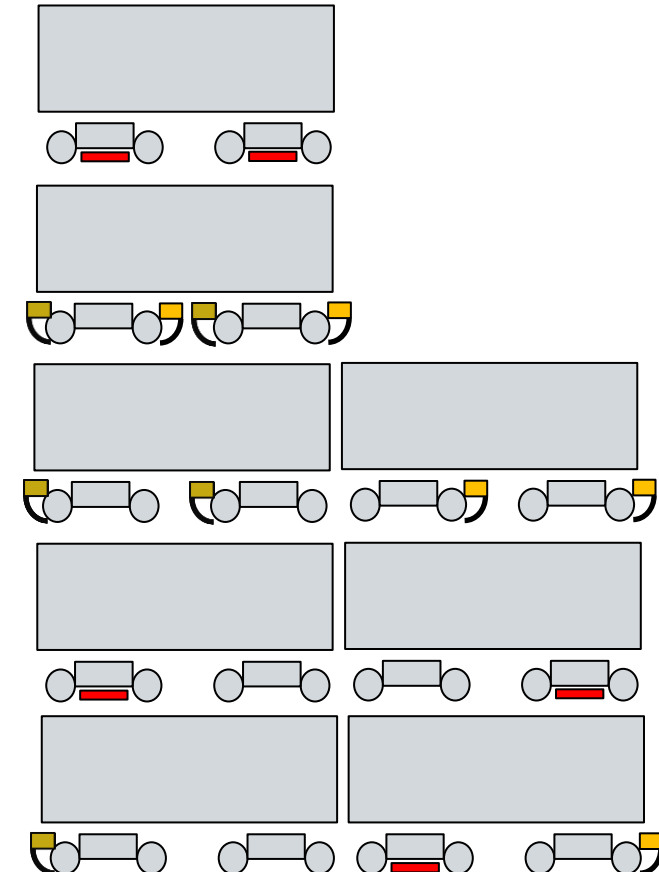
Stand: Rev. 4.0, vom 18.05.2021



Rev.-Nr.	Datum	Verantwortung	Bemerkungen
1	18.11.2012	LK Fahrzeuge	Durch LK Fahrzeuge genehmigt
3.0	10.02.2016	LK Fahrzeuge	Durch den Lenkungsleiter Fahrzeuge am 10.02.2016 genehmigte Version
4.0	18.05.2021	LK Fahrzeuge	Durch den Lenkungsleiter Fahrzeuge am 18.05.2021 genehmigte Version

Bereich: Radbremsen

Inhalt: Definition von Grenzwerten der Rad-Schiene-Kraftschlussausnutzung

¹ Die „Ergänzungsregelungen zur B007“ ergeben die „Anforderungen für die betriebliche Ausstattung von Eisenbahnfahrzeugen“.



 Sandstreueinrichtung
 Magnetschienebremse

ATO und Kraftschluss

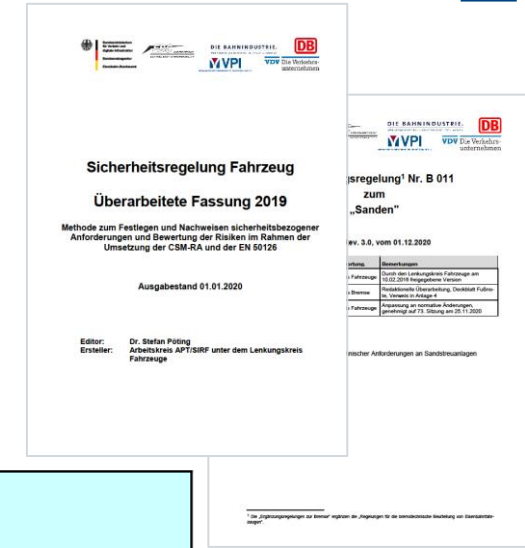
Schutzziel 2 der B011: „Verbesserung des Kraftschlusses beim Bremsen“



Systemtechnik



- Sand erhöht die Bremsfähigkeit bei verringerten Kraftschlusswerten und unterstützt damit die Einhaltung des Bremsweges.
- Die Funktion „Ausbringen von Streumittel“ ist Teil der SIRF/TeSiP-Funktion JC1 „Medien bereitstellen“, sofern sie als ergänzende Maßnahme im Sinne der B 007 erforderlich ist. Die Erfüllung der ... Anforderungen in Kombination mit Prüfungen gemäß VDV-Schrift 757 ist dazu ausreichend.
- SIRF/TeSiP: SAS = 2, Risikoakzeptanzprinzip: COP – Code of Practice, Anwendung von Regelwerken



Eisenbahnfahrzeugfunktionen												Gefährdungsermittlung					
Hauptfunktion	Teilfunktion	lfd. Nr.	Funktion	Erläuterung der Funktion	Beispiele: Typische Themen/ ELEMENTE	Betriebs- und Umgebungsbedingungen (für Hauptfunktion Z: Sicherheitsanforderungen und deren Bedingungen)	Sichere Gewährleistung von...	Gefährdung ist gegeben, wenn....	Nr. Teilgefährdung	Maßgebliche Teilgefährdung							
J	C	1	Medien bereitstellen	---	Bereitstellung von Kraftstoff und Hilfsstoffen (Sand, Schmiermittel, Kühlmittel etc.), Sicherheitsdatenblätter		Bevorratung von Betriebsstoffen emissionsfrei in den spez. Bedingungen	durch fehlende Betriebsstoffe der sichere Betrieb des Fahrzeugs gefährdet ist, (nicht die Verfügbarkeit)	2a	Bremskraft vermindert oder nicht gegeben							
Gefährdungseinstufung								Festlegung des Risikoakzeptanzprinzips		Informativ							
S _A	Schaden - Anzahl	S _V	Schaden - Verletzungsgrad	W	Eintrittswahrscheinlichkeit	E	Expositions-dauer	V	Vermeidung	I	Sicherheitsanforderungsstufe (SAS)	für Gefährdungseinstufung relevante Bemerkung	Quellen weiterer Sicherheitsanforderungen aus Regelwerken für die Funktionen	Referenz zu weiteren Information bezgl. der Risikobewertung (z.B. Gefährdungsbäumen, Szenarien)	COP = Anwendung von Regelwerk ERE = explizite Risikoabschätzung SRS = Vergleich mit ähnlichen Systemen (Referenzsystemen) BAR = Broadly Acceptable Risk	Referenz zur Begründung der Wahl des Risikoakzeptanzprinzips	mögliche Nachweiswege z.B. Gefährdungsbäume
5,0	Mehrere (1 < x ≤ 10 Personen)	9,0	Tote	1,0	Niedrig	1,3	Lang	1,0	Nicht möglich	58,50	2	zu W: Es ist nahezu ausgeschlossen, dass ein Sandmangel zu dem Schadensmaß führt			COP		---

ATO und Kraftschluss

Zusammenfassung zum regelwerksbasierten Ansatz



Systemtechnik



- Extrem niedrige Kraftschlüsse sind bei der Bestimmung der anrechenbaren Verzögerung zu berücksichtigen.
- Das Fahrzeug muss den anerkannten Regeln der Technik entsprechen, mit:
 - anforderungsgerechtem Gleitschutz und
 - Mg-Bremsen nach B012 und/oder
 - Sandstreuanlagen nach B011 in Kombination mit betrieblichen Regeln z. B. VDV-Schrift 757.
- Mit einem derart ausgerüsteten Fahrzeug kann eine äquivalente Verzögerung von höchstens $1,0 \text{ m/s}^2$ mit SAS2 dargestellt werden.
- Die tatsächlich anrechenbare Verzögerung ist obligatorisch in Laub- oder Papierversuchen messtechnisch nachzuweisen.



Preparation



Künstlicher Papierstreifen-Schmierfilm



Realer Herbst-Schmierfilm (Laub)

ATO und Kraftschluss

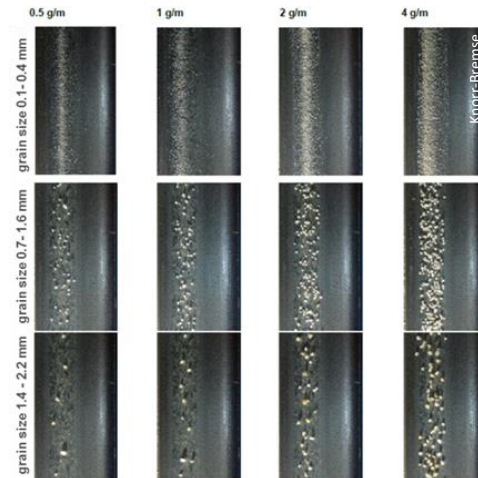
Konditionierung des Kraftschluss R/S unter Sandeinfluss

Prüfstands- und Fahrversuche

- **Basisversuche am Knorr-Bremse Linearprüfstand in Mödling, Österreich**
- Öl- und Laubversuche am Knorr-Bremse Rollenprüfstand ATLAS in München
- Versuche der RSSB (UK), mit Beteiligung von Knorr-Bremse, 4-Wagen-EMUs auf genässter Papierstreifenzwischenschicht
- Versuche der DB ST und Knorr-Bremse mit dem „advanced TrainLab“ auf feuchter, Laub kontaminierter Schiene bzw. benässter Papierstreifenzwischenschicht



Linearprüfstand in Mödling
konfiguriert für Versuche mit Sandapplikation



Variation der Sandschicht bzgl. der Korngröße und
Verteilungsdichte auf der Schiene



Beispiel einer Präparation
der Versuchsschiene

ATO und Kraftschluss

Konditionierung des Kraftschluss R/S unter Sandeinfluss

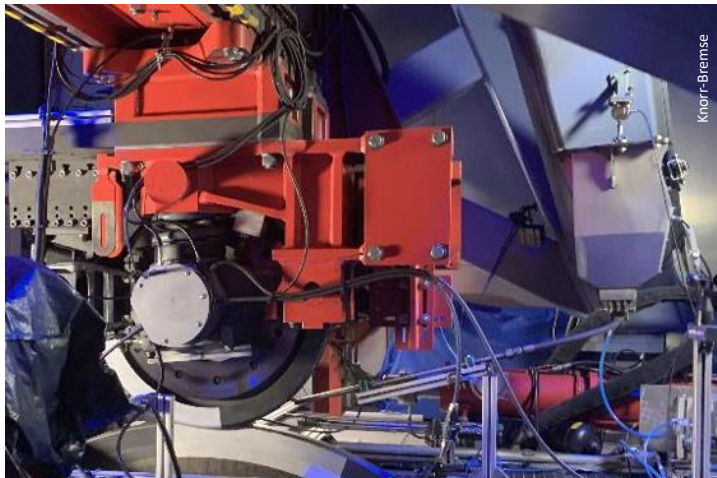


Systemtechnik

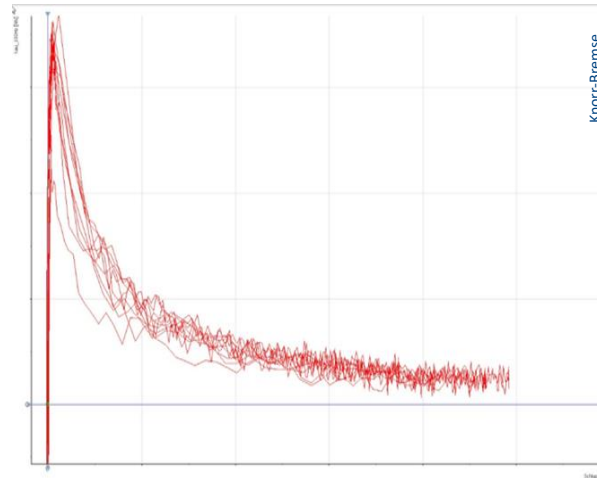


Prüfstands- und Fahrversuche

- Basisversuche am Knorr-Bremse Linearprüfstand in Mödling, Österreich
- **Öl- und Laubversuche am Knorr-Bremse Rollenprüfstand ATLAS in München**
- Versuche der RSSB (UK), mit Beteiligung von Knorr-Bremse, 4-Wagen-EMUs auf genässter Papierstreifenzwischenschicht
- Versuche der DB ST und Knorr-Bremse mit dem „advanced TrainLab“ auf feuchter, Laub kontaminierter Schiene bzw. benässter Papierstreifenzwischenschicht



ATLAS-Rollenprüfstand in München
konfiguriert für Versuche mit Sandapplikation



ATLAS-Messung des Kraftschluss-Schlupf Verhalten
auf Laub kontaminierter Schiene (black layer)



Laub kontaminiertes
ATLAS-Rad/Schienenrad



Laub kontaminierte
reale Schiene

ATO und Kraftschluss

Konditionierung des Kraftschluss R/S unter Sandeinfluss



Systemtechnik



Prüfstands- und Fahrversuche

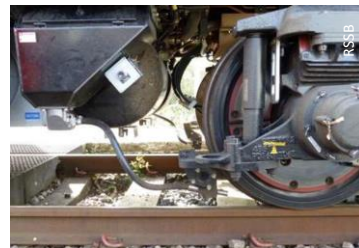
- Basisversuche am Knorr-Bremse Linearprüfstand in Mödling, Österreich
- Öl- und Laubversuche am Knorr-Bremse Rollenprüfstand ATLAS in München
- **Versuche der RSSB (UK), mit Beteiligung von Knorr-Bremse, 4-Wagen-EMUs auf genässter Papierstreifenzwischenschicht** (RSSB Bericht T1107)
- Versuche der DB ST und Knorr-Bremse mit dem „advanced TrainLab“ auf feuchter, Laub kontaminierter Schiene bzw. benässter Papierstreifenzwischenschicht



Versuchskonfiguration der Class 387
Versuchszüge der RSSB-Sandungsversuche
gem. RSSB-Bericht T1107



- Sprühhvorrichtung vor Radsatz 1
- Wasser oder Wasser/Seife-Mischung
- Sandungen vor Radsatz 3, 7 und 11



Installation der Sandung



Neu mit Papier
präparierte
Schiene



Konditionierte
Schiene vor den
Versuchen



Schiene nach den
Versuchen

ATO und Kraftschluss

Konditionierung des Kraftschluss R/S unter Sandeinfluss

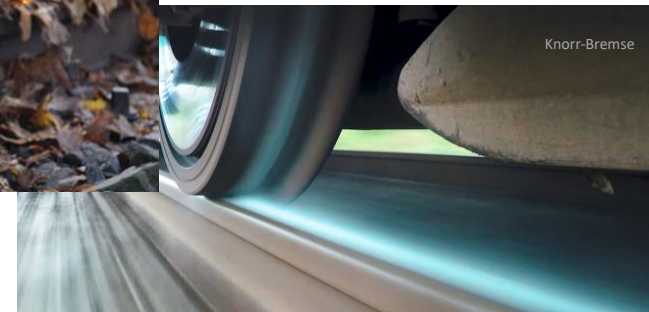


Systemtechnik



Prüfstands- und Fahrversuche

- Basisversuche am Knorr-Bremse Linearprüfstand in Mödling, Österreich
- Öl- und Laubversuche am Knorr-Bremse Rollenprüfstand ATLAS in München
- Versuche der RSSB (UK), mit Beteiligung von Knorr-Bremse, 4-Wagen-EMUs auf genässter Papierstreifenzwischenschicht
- **Versuche der DB ST und Knorr-Bremse mit dem „advanced TrainLab“ auf feuchter, Laub kontaminierter Schiene bzw. benässter Papierstreifenzwischenschicht**



Knorr-Bremse Sandungsversuche mit dem „advanced Trainlab“ der Deutschen Bahn AG (Baureihe 605) mit extremen Kraftschlussverhältnissen durch mit Laub oder Papierstreifen konditionierter Schiene

Entwicklung des KB-Sandwirkungsmodell



- Kraftschlussentwicklung entlang des Zugs
- Kraftschlussbeanspruchung der Bremseinrichtung
- Sandverteilung und -verlust entlang des Zugs
- Geschwindigkeit abhängige Sand Applikation
- Dynamisch veränderliche Sandwirkung
- Dynamik des Weg gemittelten Kraftschluss pro Radsatz (Regel konformer Gleitschutz)

ATO und Kraftschluss

Plausibilisierung des Modells

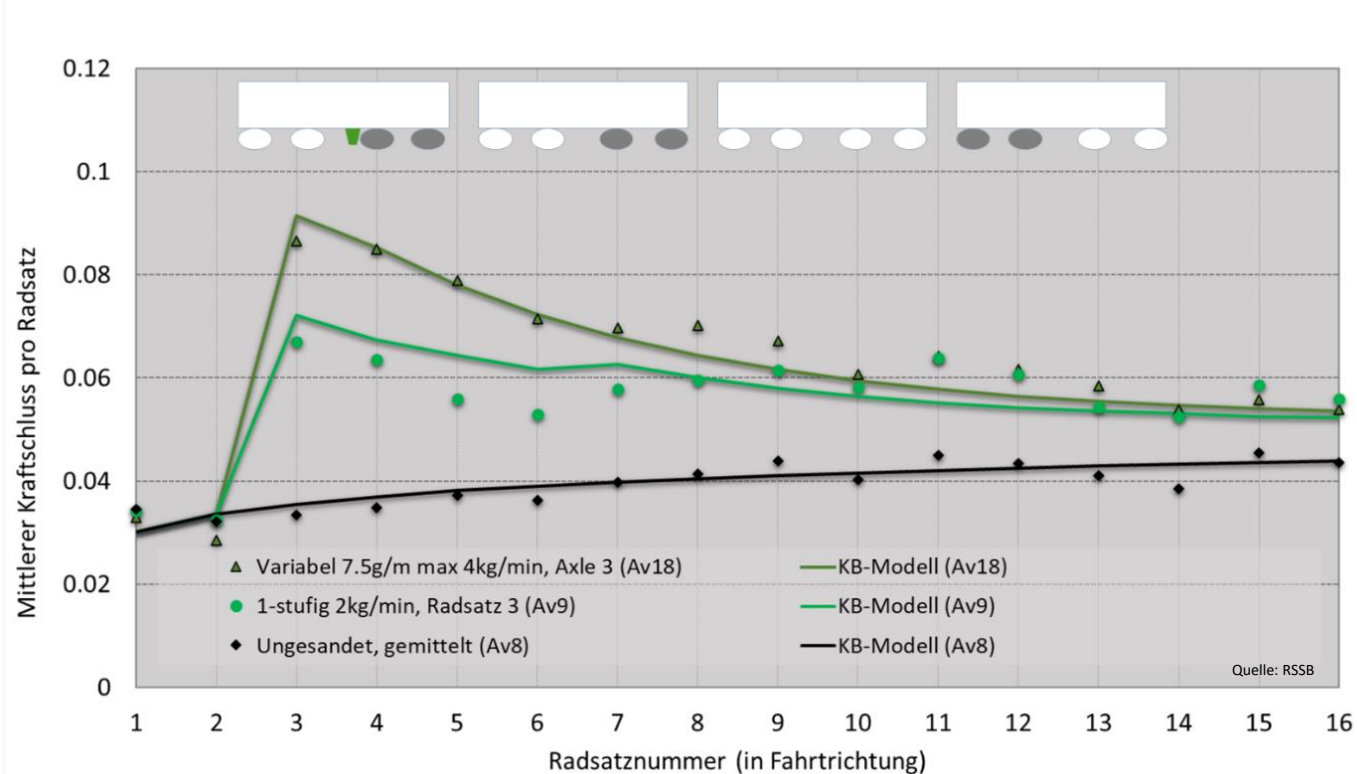


Systemtechnik



Nachrechnung der Kraftschlussdynamik der RSSB Versuche - Einfache Sandung vor dem Radsatz Nr.3

- Vergleichsrechnungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit Versuchen (4-Wagen-EMUs der Class 387 (RSSB) $V_0 = 88 \text{ km/h}$)
- Kraftschlussverbesserung ist direkt abhängig von der applizierten Sandmenge im Verhältnis zur Schiene (g/m)
- Die Sandwirkung lässt mit zunehmendem Abstand zur Sandapplikation deutlich nach



ATO und Kraftschluss

Plausibilisierung des Modells

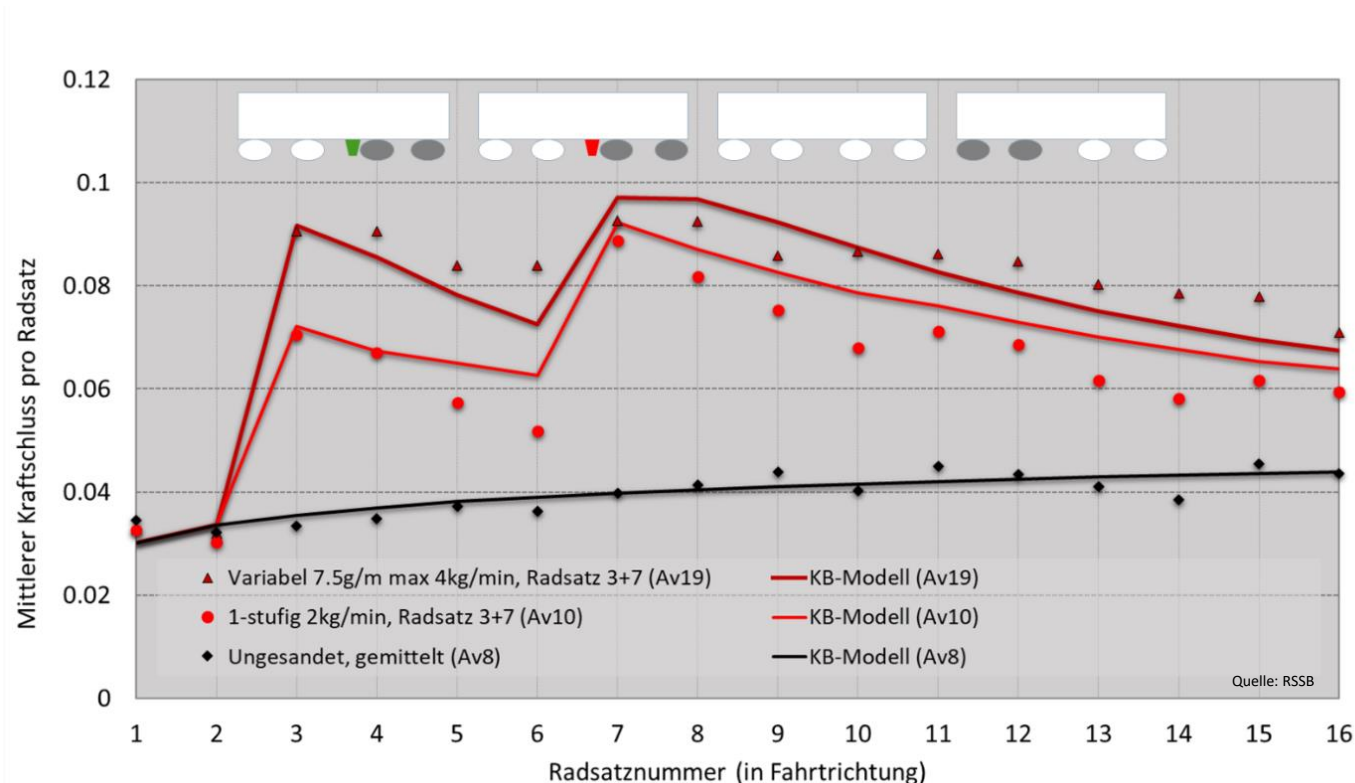


Systemtechnik



Nachrechnung der RSSB Versuche - Zweifache Sandung vor den Radsätzen Nr.3 und 7

- Wiederholte Sandung stellt die nachlassende Wirkung nicht nur wieder her, sondern steigern diese zusätzlich (4-Wagen-EMUs der Class 387 (RSSB) $V_0 = 88 \text{ km/h}$)
- Auch bei multipler Sandung zeigt das Modell eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen



ATO und Kraftschluss

Plausibilisierung des Modells

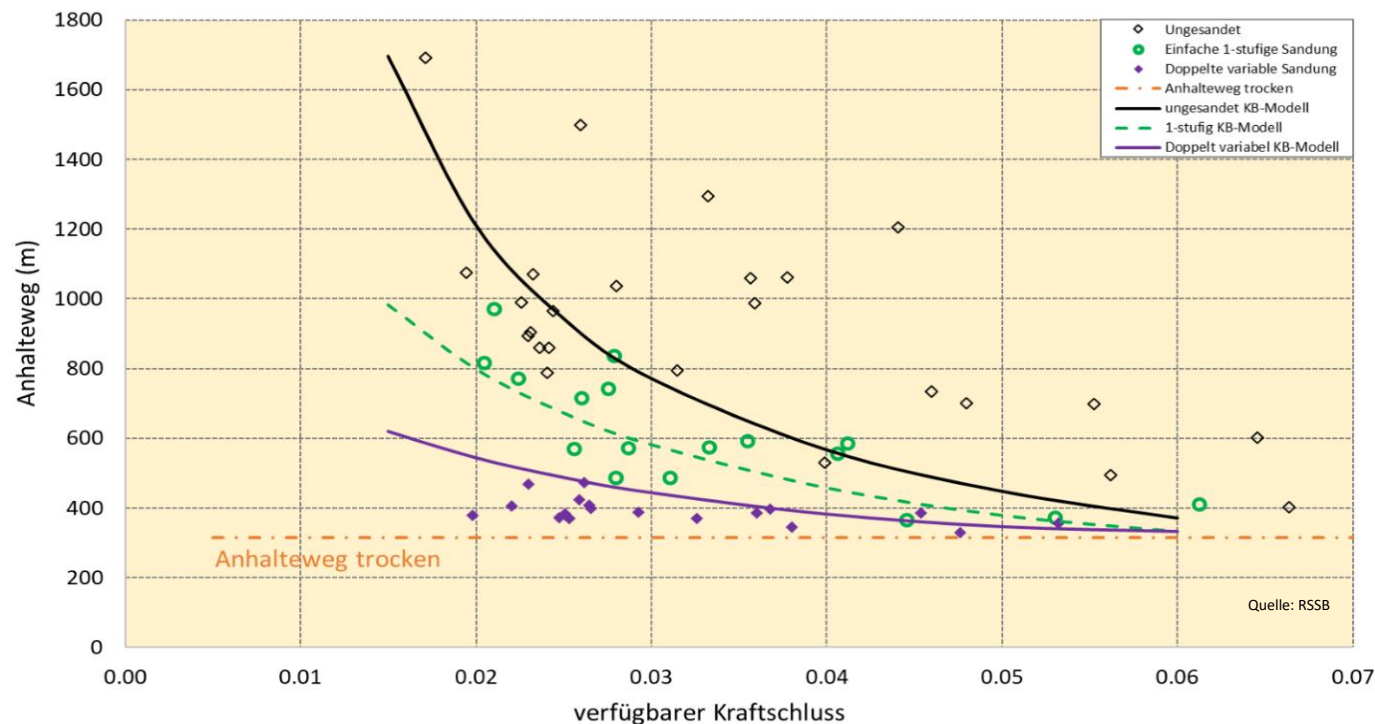


Systemtechnik



Versuchsdaten und Modellergebnisse aus $V_0 = 88 \text{ km/h}$

- Sinkende Zuverlässigkeit der Anhaltewege mit Verschlechterung der Kraftschlussverhältnisse
- Verbesserung der Anhaltegenauigkeit mit zunehmender Sandmenge und multipler Sandung
- Bestenfalls Annäherung der Anhaltewege an Trockenbremswege
- Konservative Modellierung bei extrem niedrigen Kraftschlusswerten
- Praktische Nachweise durch Fahrversuche sind obligatorisch



ATO und Kraftschluss

Abschätzung der ATO-Potentiale



Systemtechnik



Nachrüstung des Irish Rail (IE) DMU Class 2600 mit einer geschwindigkeitsabhängigen Sandungsanlage

- Gehäufte gefährlichen Signalvorbeifahrten und Bahnsteigverfehlungen machte dringende Verbesserungen notwendig.
- Mit dem variabel geregelten Sandungssystem (max. 1100g/30s) vermeldete der Betreiber im Jahr 2021 das Ausbleiben jeglicher unerwünschten Vorbeifahrten.
- Bildung von Flachstellen hat sich deutlich reduziert.
- Radsatzlebensdauer erhöhte sich von 1,5 auf nun 4 Jahre!
- Investitionen amortisierte sich bereits nach 2 Jahren!

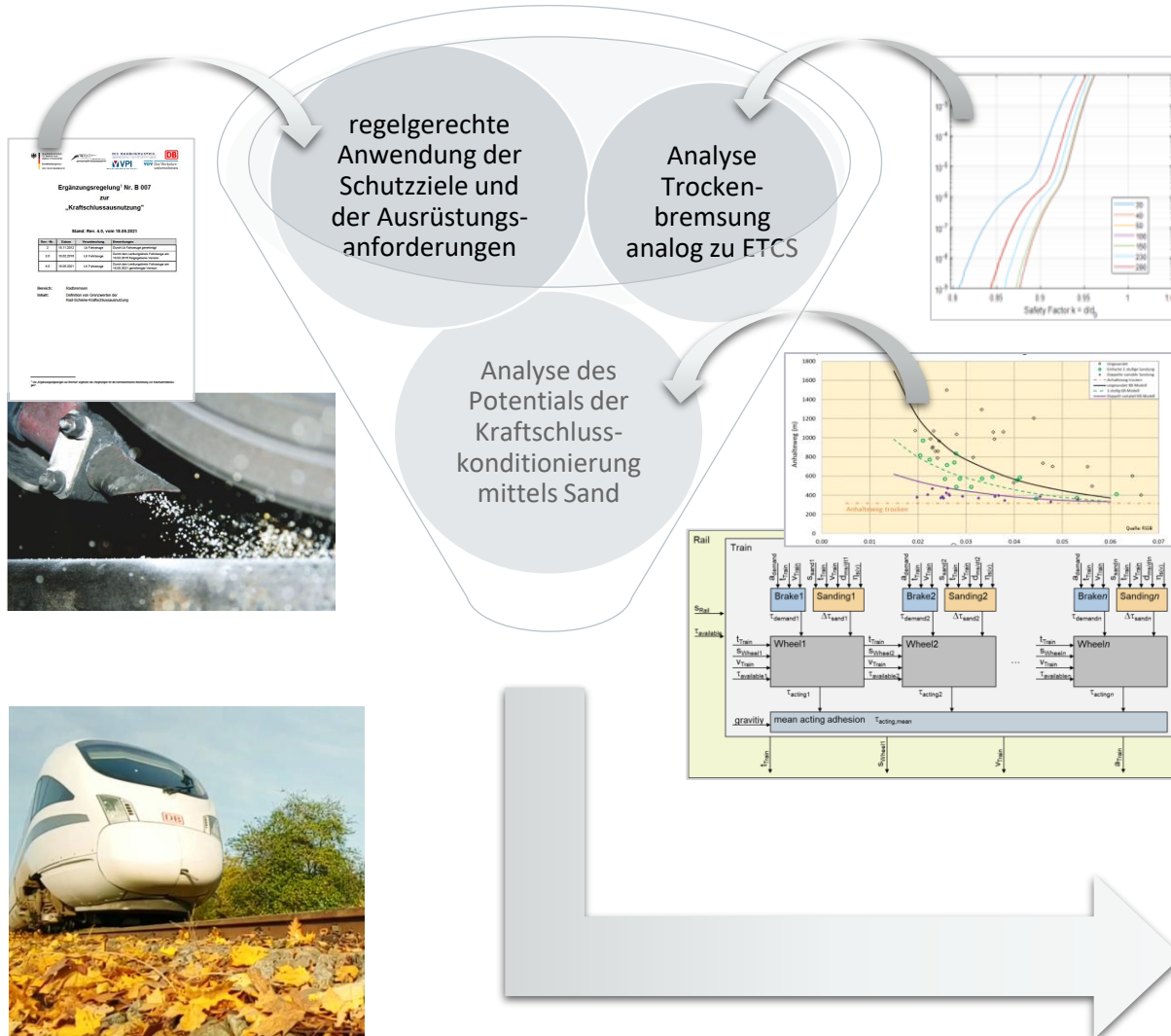


ATO und Kraftschluss

Zusammenfassung der Potentiale



Systemtechnik



- Extrem niedriger Kraftschluss (xnH) wird derzeit u.a. in ETCS nicht berücksichtigt.
- ATO verlangt die Betrachtung von xnH -Bedingungen.
- Fahrzeuge sind nach den anerkannten Regeln der Technik auszurüsten.
- Die Kraftschlusskonditionierung mittels Sand kann modelliert werden.
- Die Modellierung liefert verlässliche Prognose für ein erreichbares Bremsvermögen bei xnH -Bedingungen.
- Die Potentiale eines sicheren ATO-Betriebes können bereits in der Projektplanung abgeschätzt werden.
- Praktische Nachweise durch Fahrversuche sind obligatorisch.

Ihre Ansprechpartner. Sprechen Sie uns gerne an.



Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH

Moosacher Straße 80
80809 München
Internet: knorr-bremse.com

Ernst Hohmann
+49 89 3547-181914
Mail: ernst.hohmann@knorr-bremse.com



DB Systemtechnik GmbH

Pionierstraße 10
32423 Minden
Mail: db-systemtechnik@deutschebahn.com
Internet: db-systemtechnik.de

Frank Minde
+49 571 393-5100
Mail: frank.minde@deutschebahn.com

Olga Frank
+49 571 393-5445
Mail: olga.frank@deutschebahn.com

Olaf Gröpler
+49 571 393-5438
Mail: olaf.groepler@deutschebahn.com



Quelle: Patrick Kuschfeld, DB Systemtechnik



Systemtechnik