



***FLEXX* Tronic** **Streckenversuche & UIC Zulassung**

38. Tagung “Moderne Schienenfahrzeuge” - Graz 15. September 2008

FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie

- **Problematik Bogenlauf/Schnellfahrt, so alt wie Eisenbahn selbst**
- **Gummi/Metall-Technologie ermöglichte Entwicklung passiver mechanischer Systeme, allerdings mit wesentlichen Nachteilen versehen**
- **ARS, erstes System, welches Problem an der Wurzel anpackt und dies praktisch kompromisslos**
- **Trotz hohem Einsparungspotential bedeuten höhere Investitionskosten ein großes Hindernis in der Markteinführung**
- **Bereits zwei mal in Graz vorgetragen**
 - 2002 Konzept, Funktionsweise & erste Versuche auf Rollprüfstand
 - 2004 Prototypenprobung, Safetycase zusammen mit TÜV Rheinland
- **Heute marktreifes Produkt mit enormem Potential bezüglich**
 - Leistungsteigerung
 - Wirtschaftlichkeit

***FLEXX* Tronic – Mechatronic Bogie**

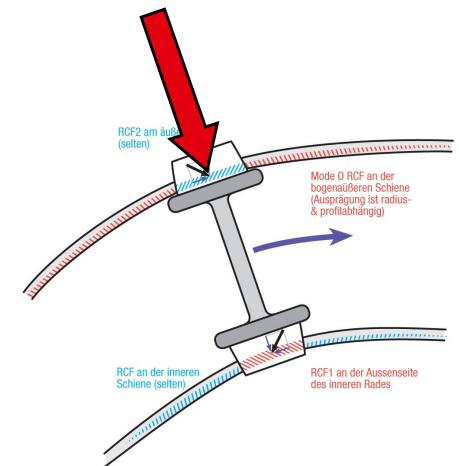
Inhalt:

- **Einleitung**
 - **Problemstellung: Konflikt Bogen / Gerade**
 - **Lösungsansatz: Aktive Radialsteuerung und Stabilisierung**
 - **Konzept und Entwicklungsstand des mechatronischen Fahrwerks**
 - **Streckenerprobung und UIC-Zulassung in Schweden**
 - **Technische/Wirtschaftliche Vorteile**
 - **Zusammenfassung und Ausblick**
-

■ Problemstellung: Konflikt Bogen / Gerade

— Steife Radsatzanlenkung, kleine Bogenradien, ungünstige R/S-Profilpaarung führen im Bogen zu:

- Hohen Rad- & Schienekräften
- bedeutendem Verschleiß an **Rad** und **Schiene**,
- erhöhtem Rollwiderstand und damit Energieverbrauch,
- Geräuschemission,
- Rolling Contact Fatigue RCF an Rad & Schiene.



— Stabilität in der Geraden:

- Mindeststeifigkeit der Radsatzanlenkung erforderlich.

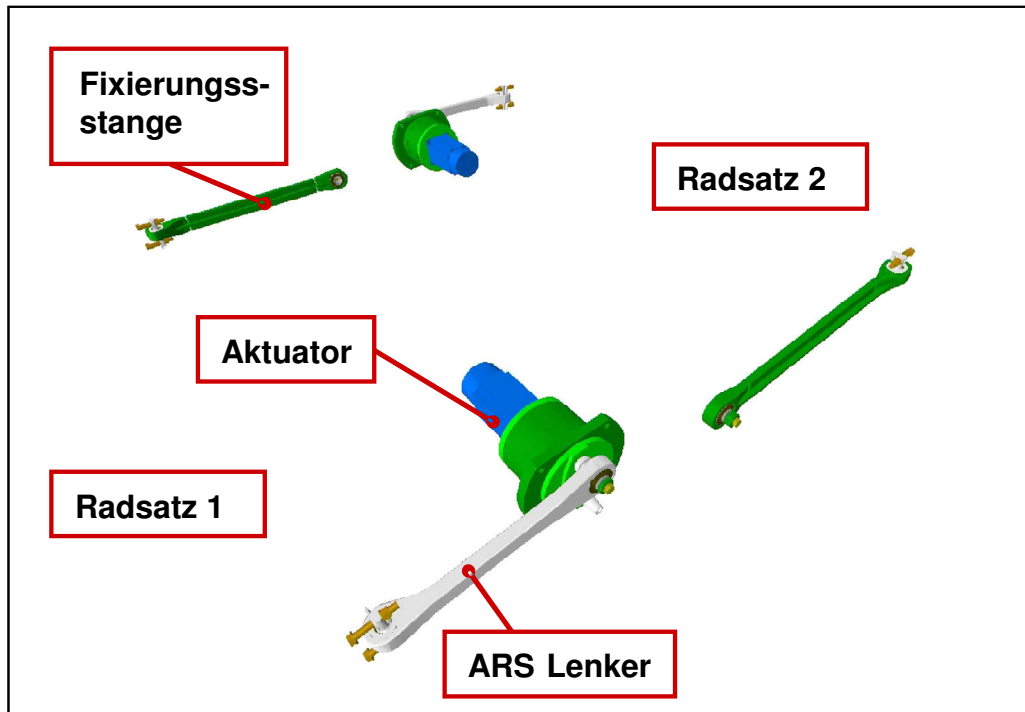
■ Grundlagen von ARS

- **Reduktion der mechanischen Komplexität durch Anwendung des mechatronischen Prinzips**
 - **Individuelle aktive Lenkung jedes Radsatzes**
 - Kurvenangepasste Einstellung des Radsatzes im Gleisbogen
 - Höher dynamische Regelung zur Verhinderung von Instabilität
- **Robuste, selbst-konfigurierende und wartungsfreundliche Elektronikarchitektur**
 - Modular, CAN-basiert
 - „Intelligente“ Sensoren mit TEDS
- **Sehr hohe Zuverlässigkeit**
 - Angemessene Redundanz der Elektronik
 - Elektromechanischer Aktuator mit spielfreiem Getriebe
 - Selbst-Diagnose
- **Keine Einbuße an Sicherheit**
 - Fail-Safe Verhalten im gesamten Geschwindigkeitsbereich

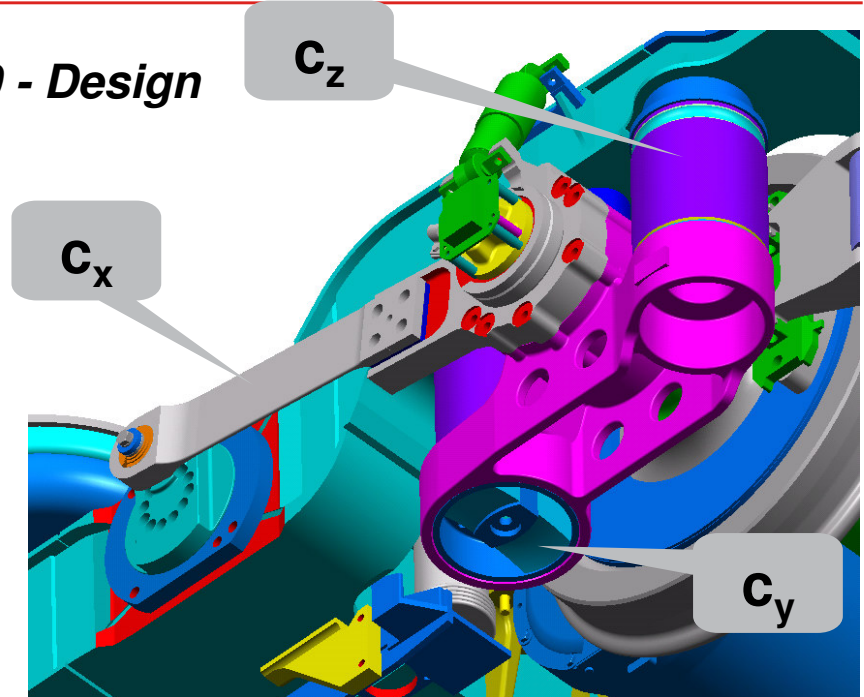
FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie

■ Mechanik

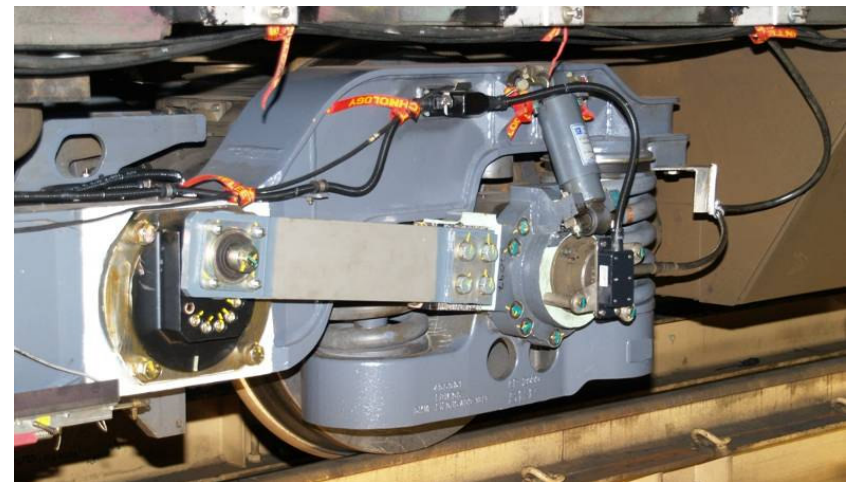
Regina 250 - Design



Konzept



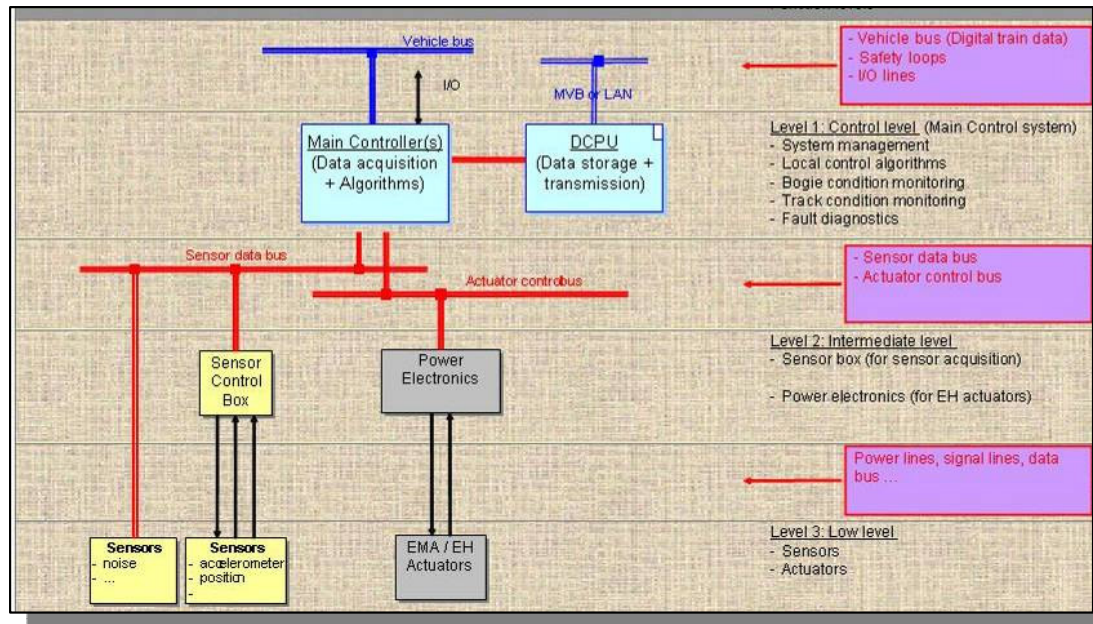
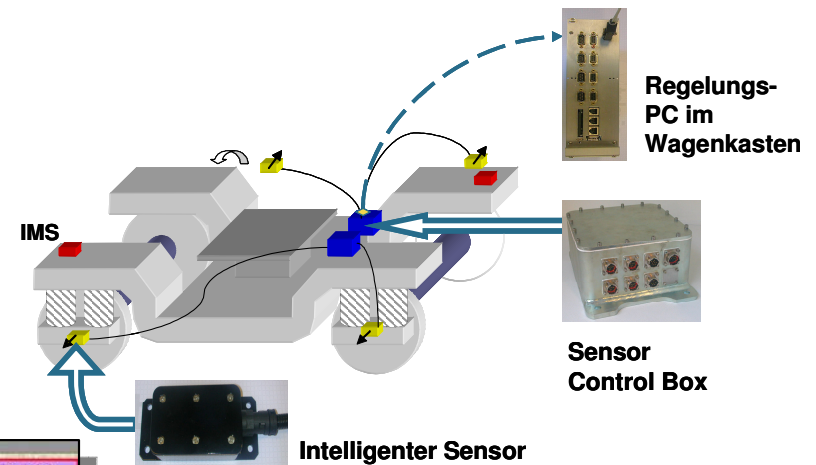
Regina 250 - Realisierung



- **Elektronik-Architektur: “Plug & Play“-Prinzipien**
 - **Robustheit**
 - Bahntaugliche Komponenten
 - Busbasiert: CAN (Control Area Network)
 - **Modularität**
 - Austauschbarkeit von Komponenten über Standard-Schnittstellen
 - Erweiterbarkeit
 - **Selbst-Adaptierung**
 - „Intelligente“ Sensoren mit TEDS (Transducer Electronic Data Sheet)
 - Bei Sensortausch automatische Aktualisierung der Konfiguration und Anpassung der Signalverarbeitung an die im TEDS gespeicherten Kalibrierungsdaten
 - **Redundanz für erhöhte Zuverlässigkeit / Verfügbarkeit**
 - Notwendige Komponenten doppelt vorhanden ⇒ Fehlertoleranz
 - Selbstdiagnose mit Vormeldung erforderlichen Komponententauschs

■ ARS Elektronik-Architektur

- Schematische Anordnung im Fahrwerk:
- ARS Blockdiagramm:
 - (inkl. Diagnose)



■ Sicherheitskonzept

– Höhere Geschwindigkeiten

- “Independent Safety Assessment“ **gemäß CENELEC-Normen während der Konzeptphase** (Graz 2004)
- MKS-Simulation von Ausfallszenarien
- Versuche mit Ausfallszenarien **auf dem Rollprüfstand der Deutschen Bahn**
- **Von der ARS-Regelung unabhängiges, hardware-basiertes** Instabilitäts-Überwachungs-System IMS (Instability Monitoring System), **das die TSI-Forderung erfüllt**
- ICE-Verkehr mit 330 km/h: SIL2
 - IMS als Teil einer Sicherheitsschleife
 - Regina-Verkehr mit 250 km/h: SIL0
 - Auch bei Totalausfall keine Überschreitung der Grenzwerte für Entgleisungsgefahr und Gleisschädigung

– Niedrigere Geschwindigkeiten

- Keine speziellen Maßnahmen erforderlich = geringere Kosten

FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie

■ Komponenten-Entwicklung

– Aktuator

- Elektro-mechanischer rotatorischer Aktuator mit Cycloid-Getriebe
- Serienprodukt (Fa. MOOG)

– Power PC

- Serienprodukt

– Sensor Control Box

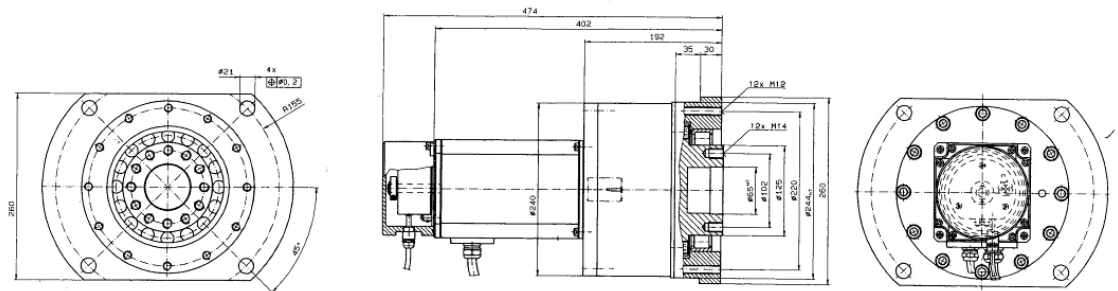
- Seriennahe Eigenentwicklung (Fa. Televic, Belgien)

– Intelligente Sensoren

- Beschleunigungsaufnehmer mit TEDS
- Serienprodukt

– Kommunikation

- CAN: Standardisiertes Serienprodukt
- Schutz am Erprobungsträger: PMA-Schläuche – vorläufige Lösung



FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie

■ Phasen der System-Erprobung

– 2003: Rollprüfstand der Deutschen Bahn AG in München-Freimann

- Aktive Stabilisierung bis 400 km/h
- Untersuchung von Ausfallszenarien



– 2004: VT612-001 im Siemens-Prüfcenter Wegberg-Wildenrath

- Test verschiedener Strategien zur Kurvenregelung
- Kombination mit der Stabilitätsregelung
- $v_{\max} = 166 \text{ km/h}$ (entspr. $a_q = 2,2$)



– 2005 / 2006: Anpassung an Regina 250

- Umkonstruktion, MKS-Simulation und Labortests der Elektronik



– 2007: Regina 250 mit ARS in Schweden

- Neuer schwedischer Rekord auf Schienen: 282 km/h
- UIC-Kriterien für Einsatz im Regelbetrieb mit Passagieren bis 200 km/h erfüllt



FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie

■ Streckenerprobung in Schweden 2007

– Partner im Projekt “Gröna Tåget” (Auszug):



- Banverket:
Projektleitung, Infrastruktur, Sicherheit (mit JVS)



- Interfleet:
Messradsätze, Messequipment, Aufzeichnung



- KTH Stockholm:
Technische Projektleitung



- Bombardier Transportation:
Testzug “Regina 250“, mechatronische Fahrwerke

BOMBARDIER

(Vortrag in Graz in 2007 von Prof. Evert Andersson)



BOMBARDIER

FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie

■ Streckenerprobung in Schweden 2007

– Zugkonfiguration “Regina 250”:



**Aktive Radialsteuerung
und Stabilisierung**

**Passive Radialsteuerung, sehr weiche
Achsanlenkung**

**Schallschürze am
Wagenkasten**

Messradsätze

- 4 Triebdrehgestelle (Motor und Getriebe im Fahrwerk aufgehängt)
- Achslast: 154 kN / Achsstand: 2,7 m
- Fahrwerksmasse: 8,9 t (incl. Antrieb und Radsätze)
- **Neue, serienmässige Fahrwerk-, Hardware- und Reglerkonfiguration**
- **Sehr enger Zeitplan ohne Möglichkeiten der Optimierung**
- **Auf Anhieb von 0 auf 200 km/h UIC Zulassung**

FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie

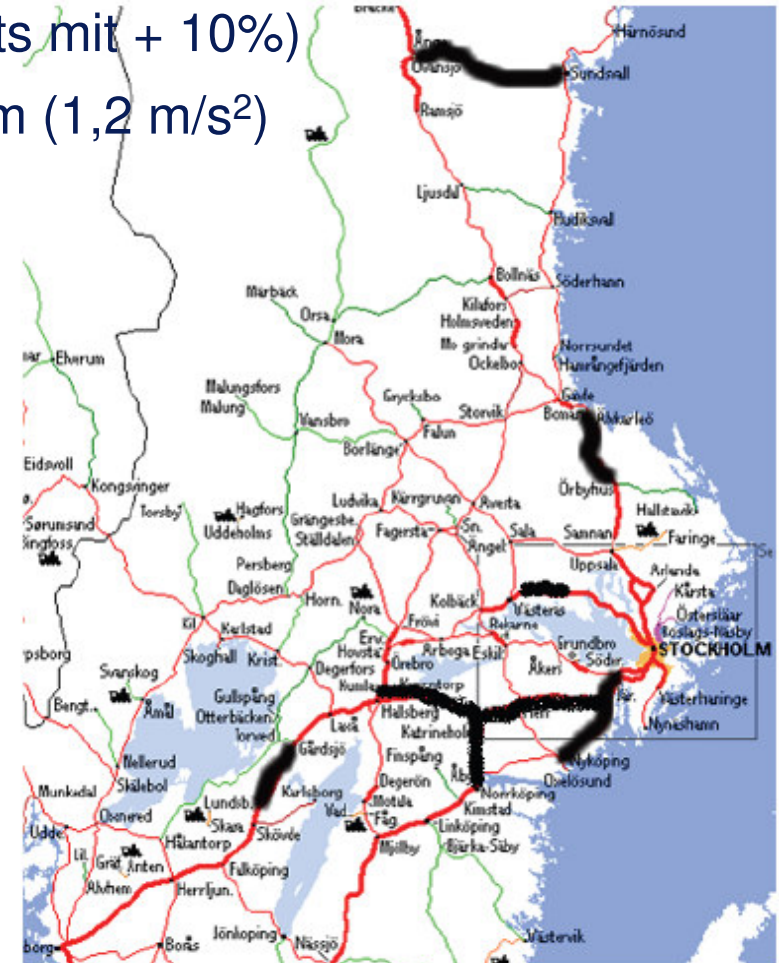


© Bombardier Inc. or its subsidiaries. All rights reserved.

FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie

■ Streckenerprobung in Schweden 2007

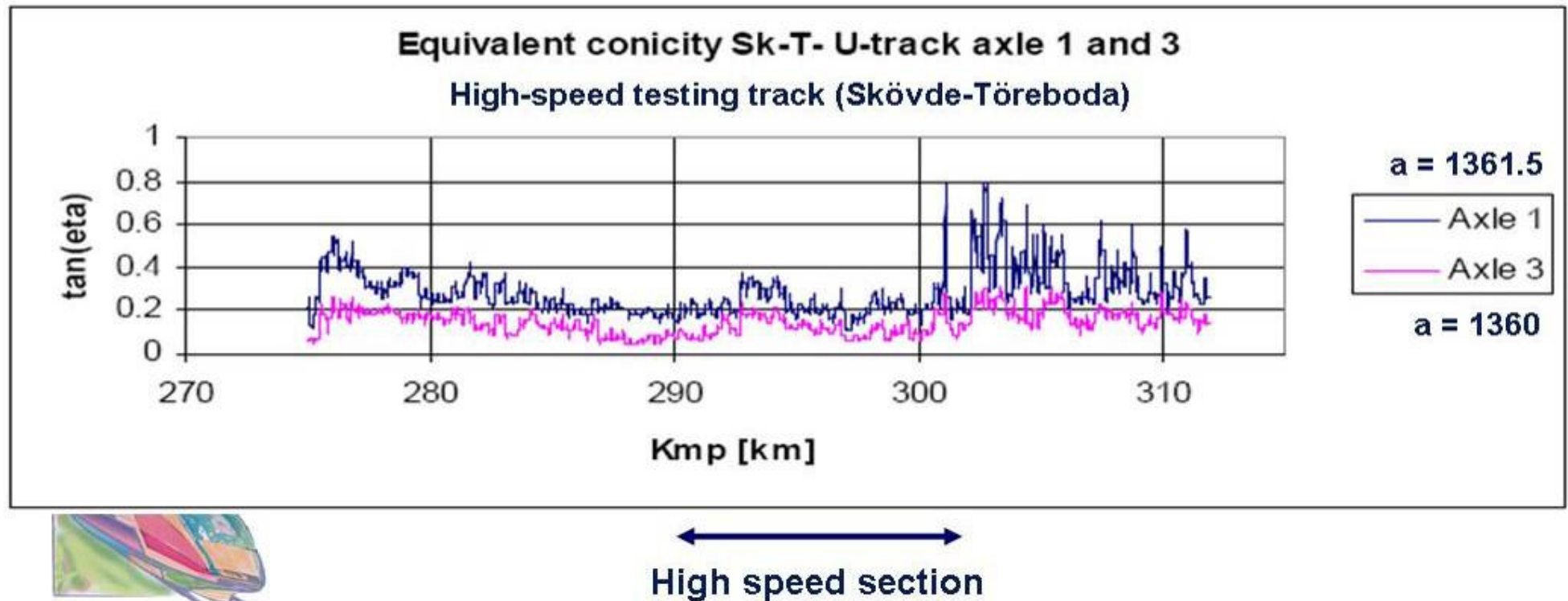
- Zulassungsgeschwindigkeit: 200 km/h (Tests mit + 10%)
- Zulässiger Überhöhungsfehlbetrag: 183 mm (1,2 m/s²)
- Bogenradien-Kategorien gemäß UIC 518:
 - Gerade
 - $250 \text{ m} \leq R < 400 \text{ m}$
 - $400 \text{ m} \leq R < 600 \text{ m}$
 - Große Radien (für max. Überhöhungsfehlbetrag bei Höchstgeschwindigkeit)
- Zusätzliche Bogenradien-Kategorien von Interesse für Banverket / KTH:
 - $600 \text{ m} \leq R < 900 \text{ m}$
 - $900 \text{ m} \leq R < 1500 \text{ m}$



© Bombardier Inc. or its subsidiaries. All rights reserved.

■ Streckenerprobung in Schweden 2007 – Messresultate

Rail profile: BV 50 and UIC 60; Inclination: 1:30
Combined with wheel UIC/ORE S1002



FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie

■ Streckenerprobung in Schweden 2007 – Messresultate



RAILWAY GROUP
Centre for Research
and Education
in Railway Engineering

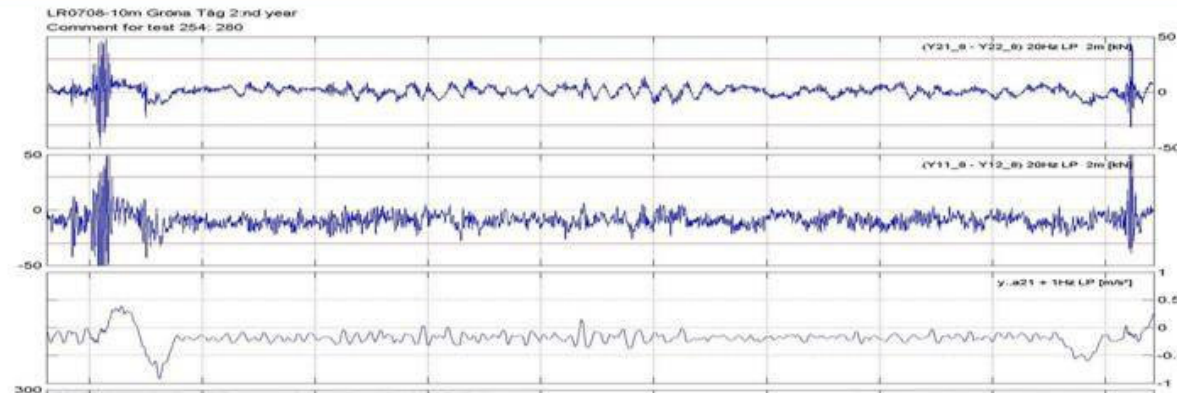


Skövde – Töreboda, down-tack, kmp 303 – 298

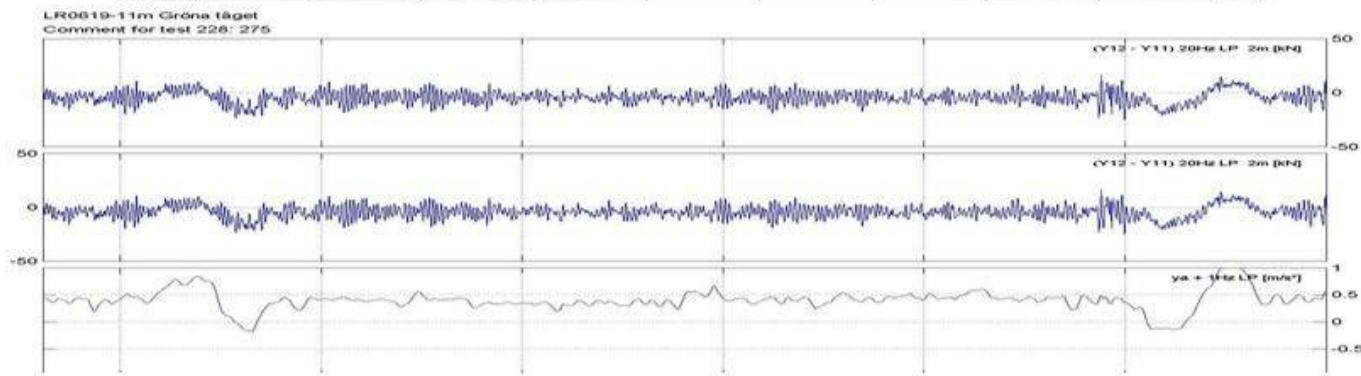
Eq conicity 0.05 – 0.10

Track shift forces ΣY , trailing bogie

ARS
(before last update)
275 km/h



Soft
275 km/h



■ Streckenerprobung in Schweden 2007 – Messresultate



RAILWAY GROUP
Centre for Research
and Education
in Railway Engineering



Derailment Y/Q ($m + 3\sigma$)

Test zone	ARS	Soft
$250 \text{ m} \leq R < 400 \text{ m}$	0.59	0.62
$400 \text{ m} \leq R \leq 600 \text{ m}$	0.44	0.54
$900 \text{ m} \leq R \leq 1500 \text{ m}$	0.39 (168mm)	0.48
Large-radius curves	0.33 (168mm, 200km/h)	0.40

Limit: 0.8



BOMBARDIER

■ Streckenerprobung in Schweden 2007 – Messresultate



RAILWAY GROUP
Centre for Research
and Education
in Railway Engineering



Track shift forces $\Sigma Y_{2m} (m + 3\sigma)$

Test zone	ARS	Soft
$250 \text{ m} \leq R < 400 \text{ m}$	45	47
$400 \text{ m} \leq R \leq 600 \text{ m}$	46	40
$900 \text{ m} \leq R \leq 1500 \text{ m}$	50 (168mm)	42
Large-radius curves	33 (168mm, 200km/h)	42

Limit: 61 kN

■ Streckenerprobung in Schweden 2007 – Messresultate



RAILWAY GROUP
Centre for Research
and Education
in Railway Engineering



Lateral guiding force Y_{qst} (average)

Test zone	ARS	Soft
$250 \text{ m} \leq R < 400 \text{ m}$	32	36
$400 \text{ m} \leq R \leq 600 \text{ m}$	20	23
$900 \text{ m} \leq R \leq 1500 \text{ m}$	15	18

Limit: 60 kN

Rechnerische Übertragung auf Serienfahrwerk mit hoher Achsführungssteifigkeit: - 30% mindestens!

■ Streckenerprobung in Schweden 2007 – Zusammenfassung

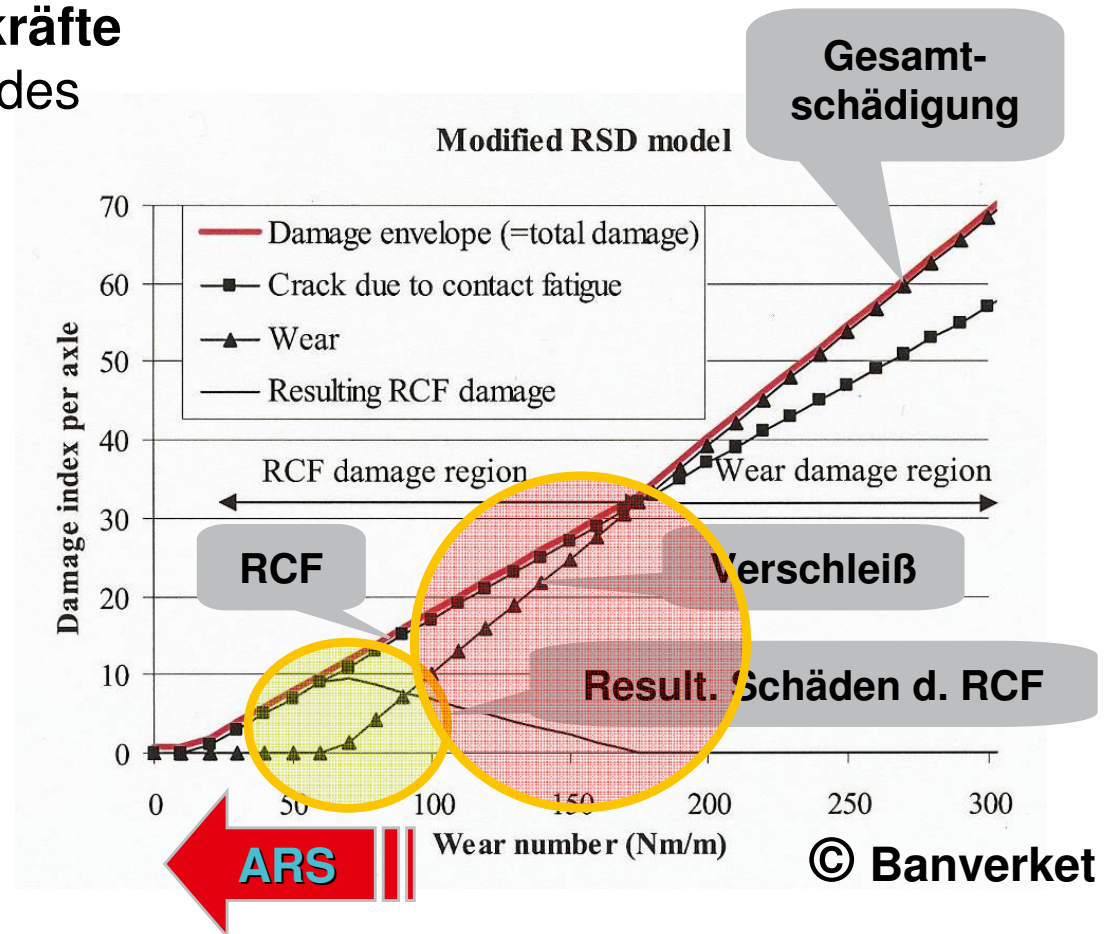
- Erste Streckenerprobung mit serienmässiger Fahrwerk-, Hardware- und Reglerkonfiguration
- Trotz fehlender Optimierungsphase (enger Zeitplan), wurden alle Kriterien für eine UIC Zulassung für $v=200$ km/h erfüllt
- Keine dramatische Veränderung durch ARS bei Stabilitätsgrenzen und Gleisquerkräften, ABER
- **deutliche Verbesserung bei Rad- und Schienenverschleiß zu erwarten:**
- Die wesentlichen Resultate im Vergleich mit einem optimierten passiven system sind:
 - Niedrige Y/Q Werte
 - Niedrigere Y_{qst} Werte
 - ΣY Kräfte z.T. noch höher infolge nicht optimierter Reglerkonfiguration
- Hohes Optimierungspotential im gesamten System vorhanden

- **Technisch wirtschaftliche Vorteile durch den Einsatz von ARS**
 - **Streckenunterhalt** (Rad-/Schiene-Beanspruchung, Verschleiss)
 - Verringerung von Rollkontaktermüdung an **Rad** und **Schiene**
 - Verringerung des Verschleißes an **Rad** und **Schiene** sowie
 - dessen gezielte Verteilung (*wear management*)
 - Reduktion der **Gleisbeanspruchung**
 - **Energieverbrauch**
 - Reduzierter Rollwiderstand
 - **Geräusch**
 - Vermeidung der Entstehung im Rad/Schiene-Kontakt
 - Reduzierte Transmission vom Fahrwerk in den Wagenkasten
 - **Flexibilität bei unterschiedlichen Trassierungen**
 - Gegeben durch Selbstadaptierung des ARS-Reglers
 - **Diagnosefunktionen für Fahrwerk & Strecke**
 - Lagerdiagnose mit gleichen Sensoren möglich

■ Reduktion von R-/S-Beanspruchung und Verschleiß durch ARS

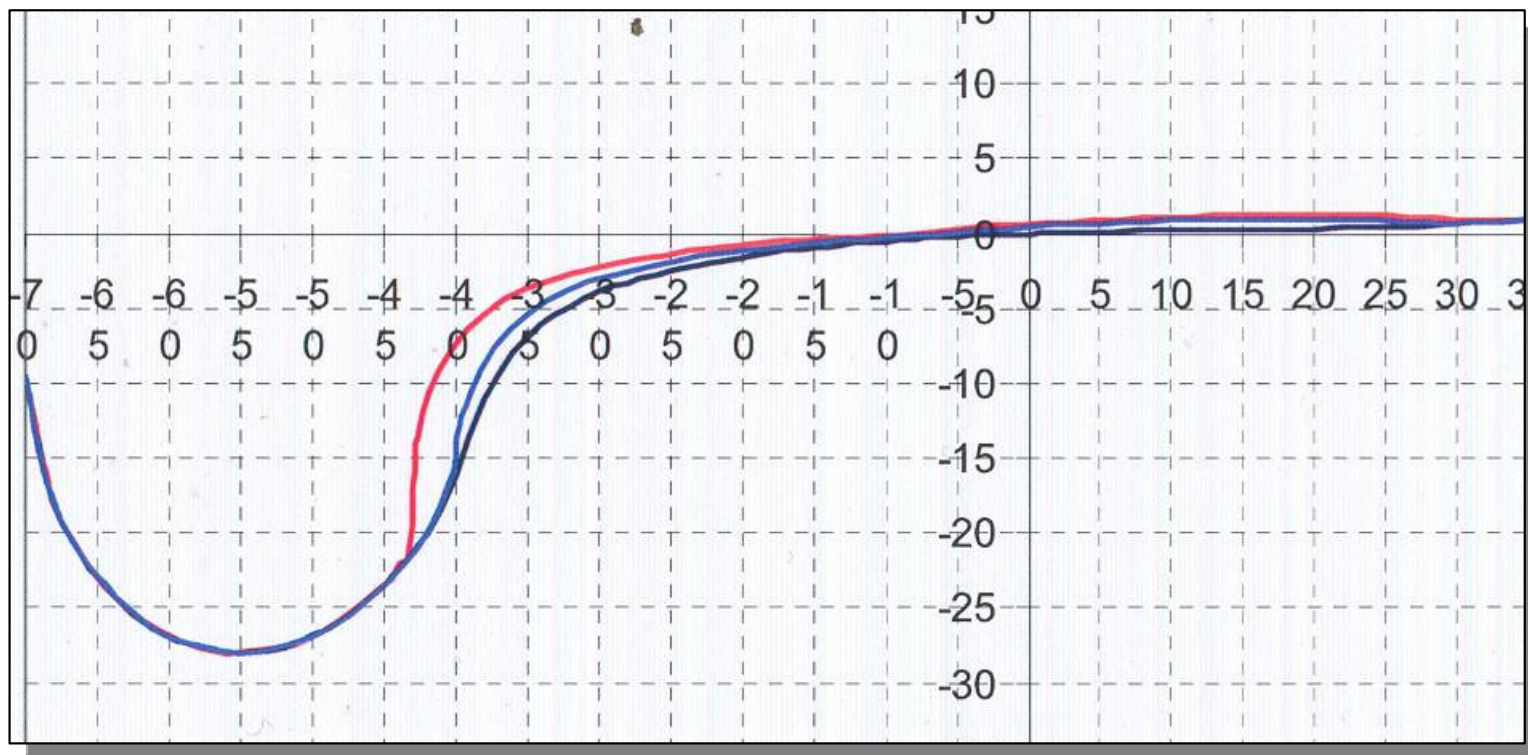
– Minimierung der Schlupfkkräfte durch ideale Ausrichtung jedes Radsatzes

- nahezu Eliminierung der Rollkontaktermüdung und
- Verschleißreduktion.



■ Radverschleiss: Profilentwicklung – Berechnung

- Deutliche Verringerung des Spurkranzverschleisses
- Verringerung des Laufflächenverschleisses
- Gezielte Verteilung durch „Wear Management“

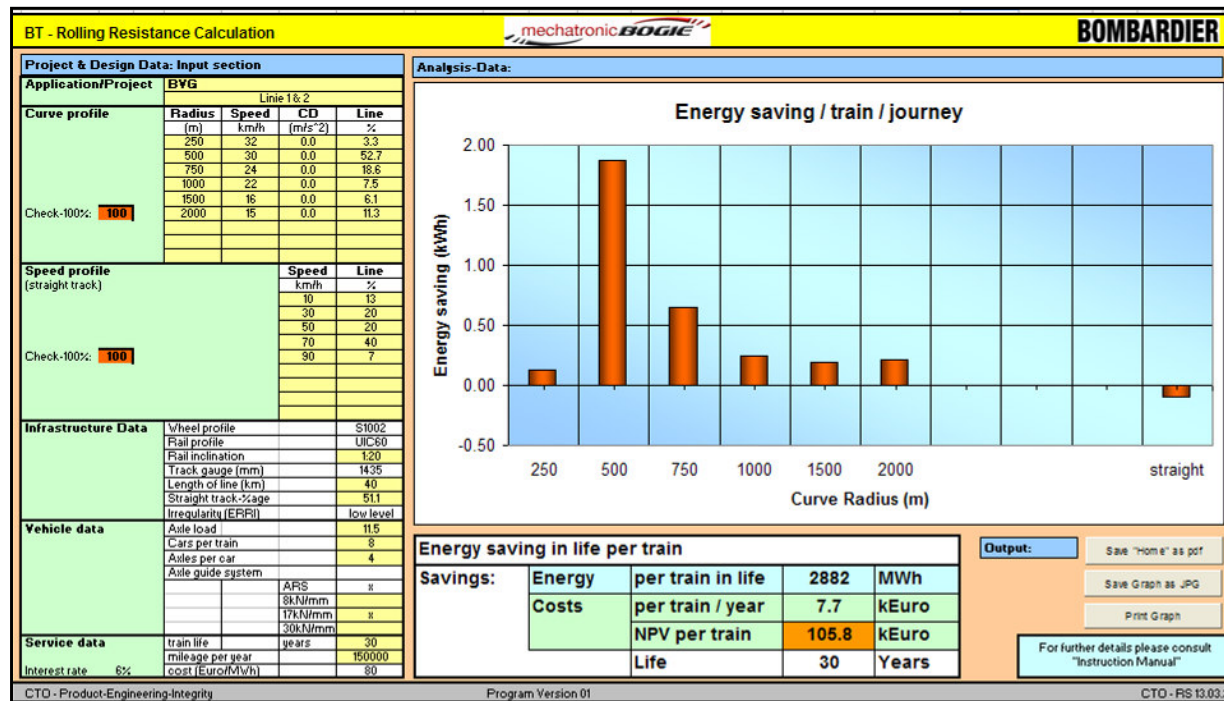


FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie

■ Energieverbrauch

– Lösung durch ARS:

- Die deutliche Verringerung der Schlupfkkräfte, insbesondere in Bögen, setzt den Rollwiderstand herab.



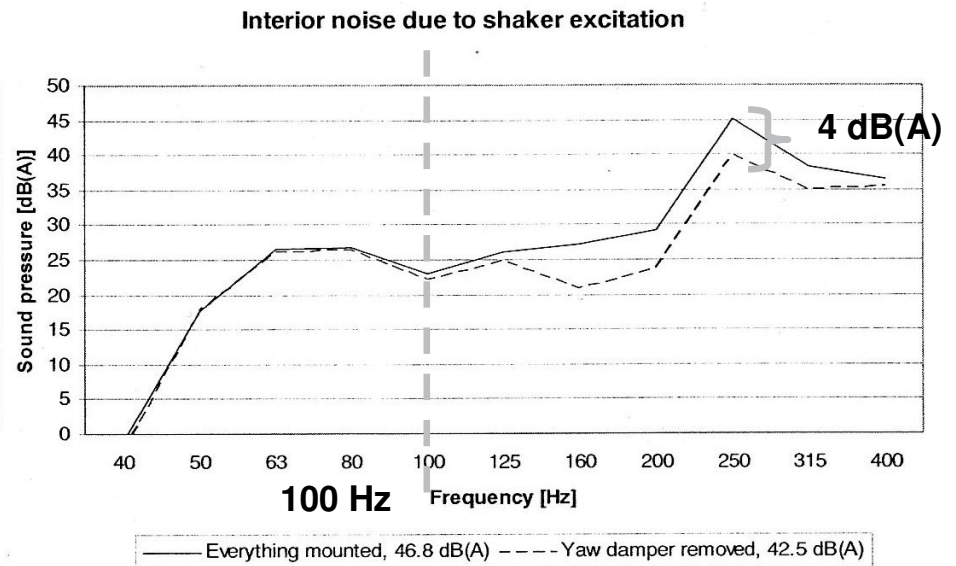
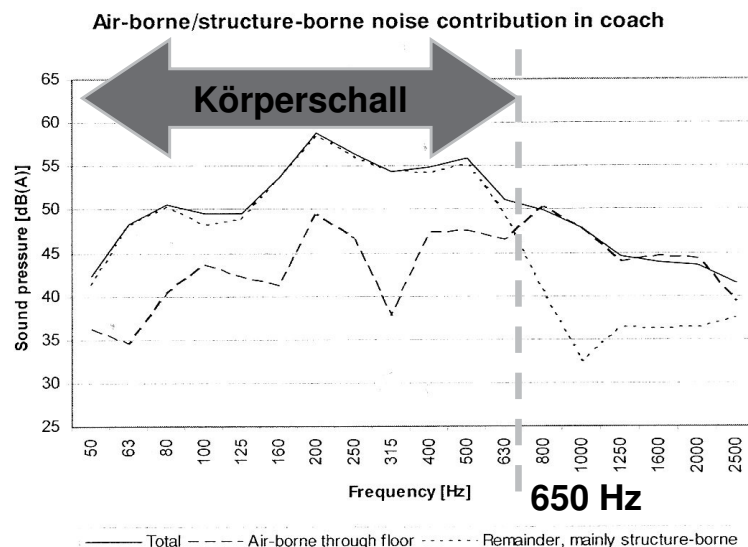
Beispiel: Metro

- 8-Wagenzug
- 30 Jahre
- 4000 – 6000 MWh

FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie

■ Schallminderung

- Verringerung der **Lärmerzeugung** im Rad/Schiene-Kontakt
- Entfall der Schlingerdämpfer als **Schall- und Vibrationsbrücke** vom Fahrwerk zum Wagenkasten
 - senkt das Schallniveaus in der Fahrgastkabine um ≈ 4 dB (A),
 - erleichtert die Anbringung von schallmindernden Schürzen.
 - Ermöglicht leichtere Bauweise des Wagenkastens



■ **Wirtschaftliche Vorteile**

– **Streckenunterhalt (Exemplarisch)**

- Schwedisches Schema der Streckenzugangsgebühren (TAC)
 - Parameter
- Exemplarische vergleichende Betrachtung
 - Betrachtete Zuggattungen
 - Bewertung mit dem schwedischen TAC-Schema

– **Energieeinsparung**

- Verringerter Rollwiderstand

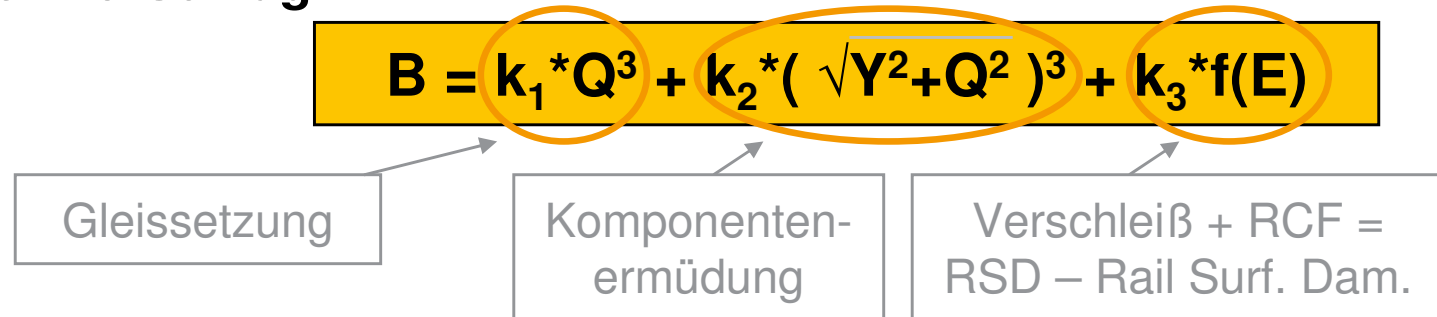
– **Reduktion der Wartungskosten des Fahrzeugs**

- Verlängerung der Standzeiten der Radsätze

– **Geringer Aufwand für Diagnosefunktionen**

- z.B. Streckenzustand, Radsatzlager, etc.

- **Schwedisches Schema der Streckenzugangsgebühren (TAC)**
 - **Erweiterter Vorschlag:**



B = Kostenfunktion (SEK/Tonnen-km)

E = Energiedissipation am bogenäußeren Rad, abhängig von

- Q = Radlast *)
- k_x = primäre Längssteifigkeit
- a_x = Radsatzstand

} durch ARS zu beeinflussen

Y = Querkraft am Rad

Q = Radlast *)

k_i = Gewichtungsfaktoren

*)

$$Q = Q_0 + \Delta Q_{qst} + \Delta Q_{20Hz} + \alpha^* \sqrt{m_u}$$

UIC 518

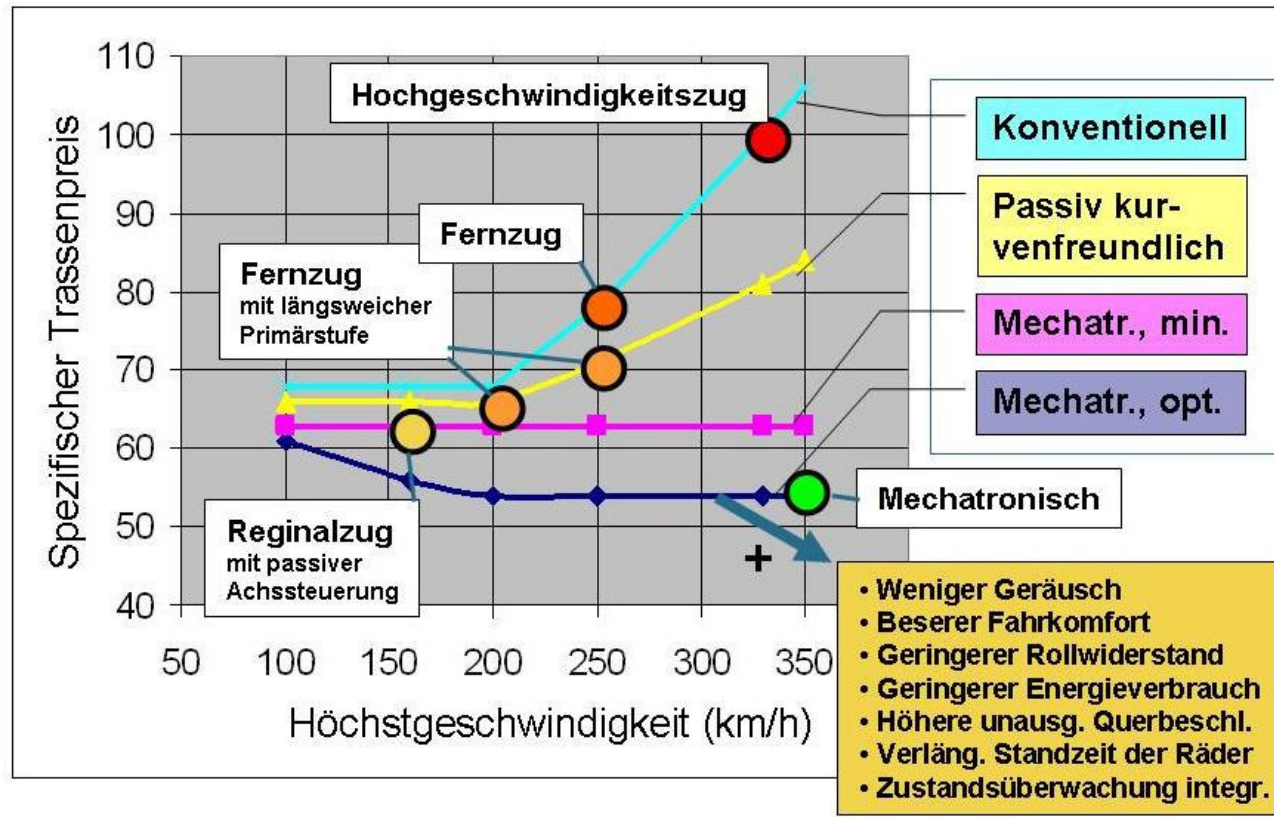
beinhaltet:

- hochfrequente Dynamik
- unabgefederte Masse

FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie

■ Schwedisches TAC-Schema

- Exemplarische Bewertung verschiedener Zuggattungen
- Zusätzlich zu berücksichtigen
 - Sehr hohe Abhängigkeit von Achslast – Q^4
 - Abhängigkeit von Bogenhäufigkeit, z.B. U-Bahn, Regionalverkehr, IC-Verkehr



■ Wirtschaftlichkeit (Beispielrechnung)

– Zusätzliche Aufwändungen:

- Zusätzliche Investition (im Fahrwerk): **1,0 x** (Tendenz sinkend)
- Zusätzliche Wartung (ARS-System): **1,6 x** (Tendenz sinkend)

– Einsparungen:

- Einsparung Fahrzeug: **- 0,5 x**
- Einsparung Radverschleiß: **- 2,2 x**
- Einsparung Energie: **- 2,0 x**
- **Einsparung TAC, Streckenunterhalt: - 4,3 x**

– Gesamtkosteneinsparung: **- 6,4 x**

ROI: ca. 2 Jahre (Tendenz sinkend)

■ **Zuverlässigkeit**

– **Hohe Zuverlässigkeit durch**

- Angemessene Redundanz
- Plug&Play Elektronik neuester Generation
- Systematische System- und Komponentenerprobung
- Betriebsversuche

– **Sensorik, Elektronik (ohne Aktuator) führen zu:**

- **1 Ausfall im Betrieb in 2 Jahren für 400 Wagen**

■ Zusammenfassung

- Die **Aktive Radialsteuerung und Stabilisierung (ARS)** des mechatronischen Fahrwerks verbindet sehr **gleisschonendes Fahrverhalten in Bögen** mit **Stabilisierung** bis zu höchsten Fahrgeschwindigkeiten.
- Ihre zahlreichen **funktionalen Optionen** eröffnen eine zielgerichtete Anpassung an die jeweiligen Bedürfnisse von Kunden und Infrastruktureignern.
- Der Einbezug des Streckenunterhalts anhand der von einem Fahrzeug tatsächlich verursachten Gleisbeanspruchungen wird die **Einführung von die Infrastruktur und damit auch die Ressourcen schonendem Rollmaterial** nachhaltig fördern.
- Das System eignet sich **ideal für alle Einsatzgebiete** von der Metro bis zum Hochgeschwindigkeitszug mit **kaum absehbarem Entwicklungspotential!**

FLEXX Tronic – Mechatronic Bogie



© Bombardier Inc. or its subsidiaries. All rights reserved.