

SIEMENS



Der Avenio

Ein Fahrzeugkonzept und seine Wechselwirkung mit der Infrastruktur

Wolfgang-D. RICHTER

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

IGF
RWTH AACHEN

14. 12. 2010

© Siemens AG

Die Evolution eines Konzepts

Zwei Entwicklungslinien vereinigt der Avenio: die Einzelgelenktechnik, die den Einsatz von Drehgestellen auch bei 100 % Niederflur erlaubt und die Längsradsatz-Technologie des Combino, die verschleißarmes Fahren auch im engen Bogen ermöglicht



**Combino-Serie für Potsdam
1998**

**MAN-Prototyp für Bremen
1990**



Die Evolution eines Konzepts

Mit den Combino Plus für Almada und Budapest wurden erstmals alle Erfahrungen der Vorgänger in einem Fahrzeugkonzept vereint



**Combino Plus für Almada
2005**

**Combino Plus für Budapest
2006**



Modularer Baukasten für individuelle Kundenanforderungen

Länge

18 m



27 m



36 m



45 m



54 m



63 m

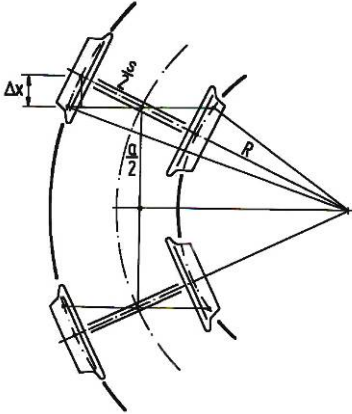


72 m

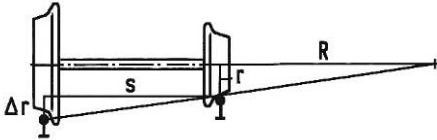


- 2- 8-Teiler
- Normal- und Meterspurausführung
- Fahrzeug-Breite von 2,3 bis 2,65 m
- Ein- und Zweirichtungsausführung
- 50 – 100% Motorisierung
- Flexible Innenraumgestaltung
- Verschiedene Klimazonen
- Straßen- und Stadtbahn (bis 80 km/h)
- Individuelles Design möglich
- Umfangreicher Optionskatalog
- Projektspezifisches Customizing

Typisch Straßenbahn: Anforderungen an die Spurführung



Einstellbedingung:
für konventionelle Drehgestelle in engen Bögen nicht erfüllbar



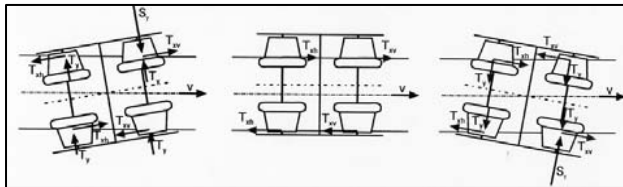
Abrollbedingung:
für konventionelle Radsätze in engen Bögen nicht erfüllbar



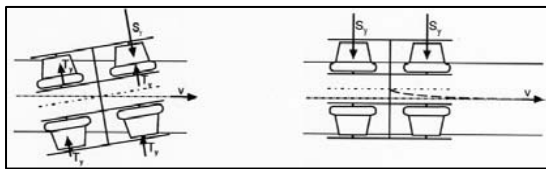
Quelle: Frederich, Spurführung in engen Gleisbögen

Kann man die Abrollbedingung erfüllen?

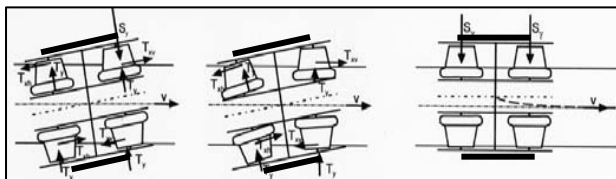
Typisches Zentrierverhalten ausgelenkter Drehgestelle im Vergleich



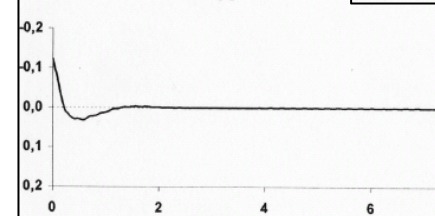
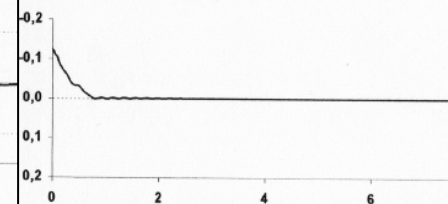
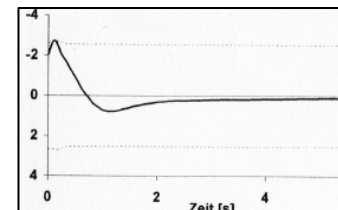
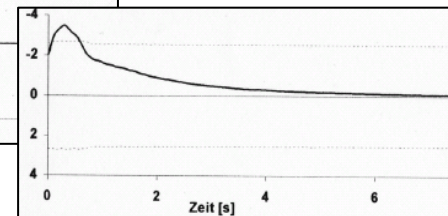
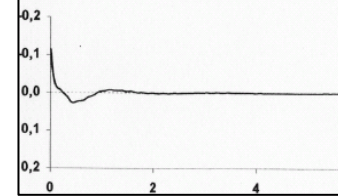
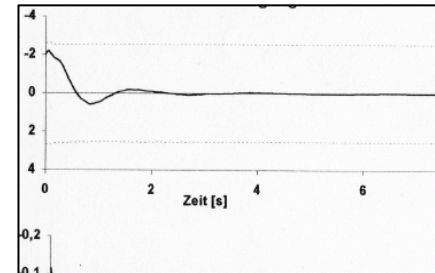
Drehgestell mit konventionellen Radsätzen



Losrad-Drehgestell



Losrad-Drehgestell mit Längsradsätzen

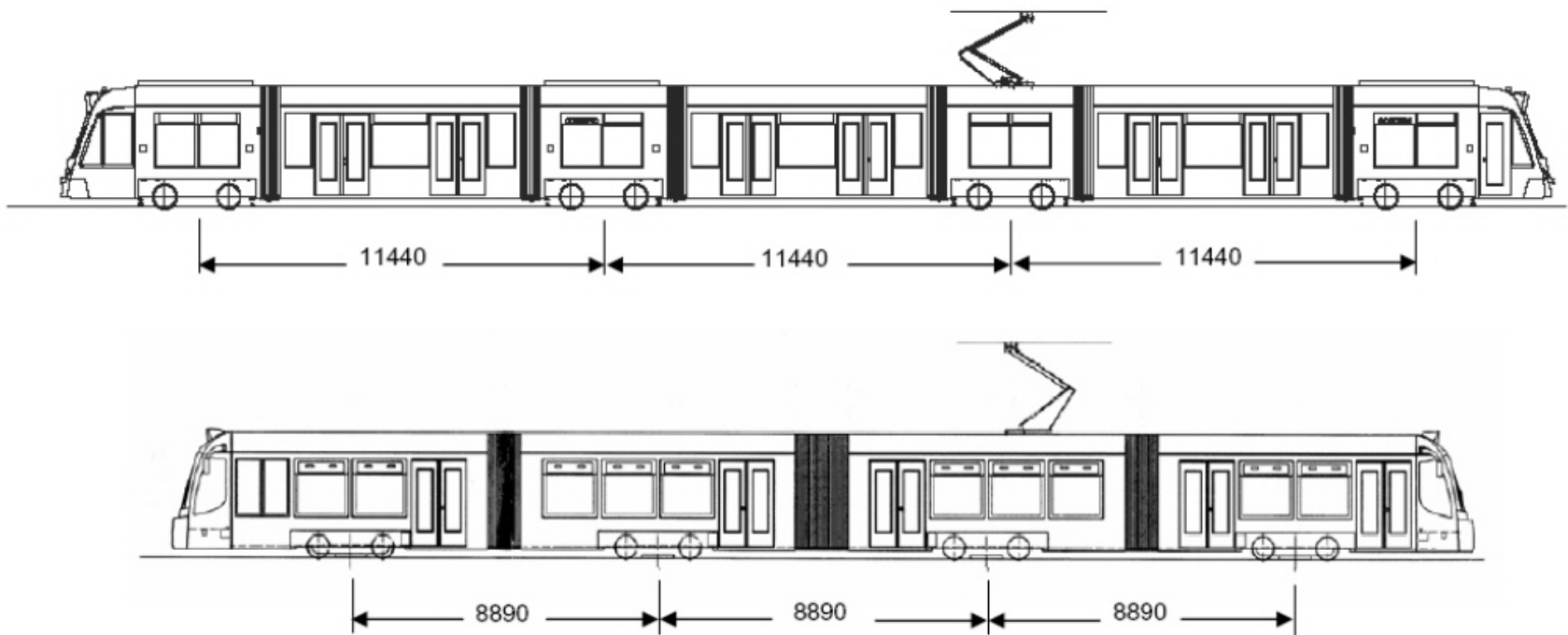


Quelle: Schindler, Spurführung und Fahrdynamik von Niederflurfahrzeugen

➡ **Der Längsradsatz stabilisiert sich in der Geraden ähnlich einem konventionellen Radsatz**

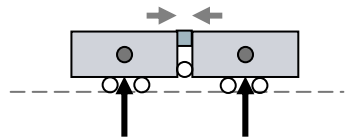
Zur Unterscheidung: Definition der Fahrzeugkonzepte

Multigelenkwagen – mehr als ein Wagenkasten-Gelenk zwischen zwei Fahrwerken

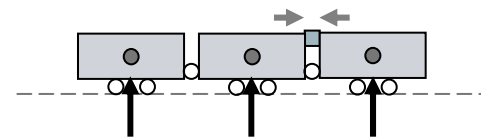


Einzelgelenkwagen – nur ein Wagenkasten-Gelenk zwischen zwei Fahrwerken

Konzeptbedingte Strukturbelastung

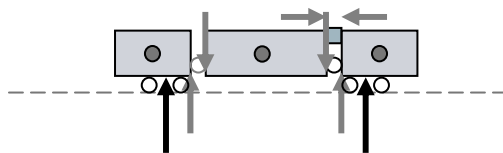


Einzelgelenk-Zweiteiler

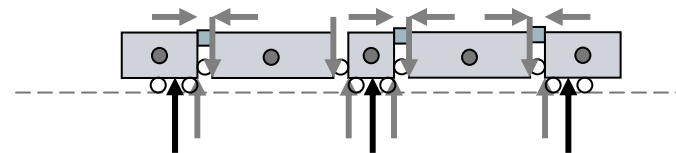


Einzelgelenk-Dreiteiler

Einzelgelenkwagen: jeder Wagenkasten ist in sich auf eigenem Drehgestell abgestützt. Die Gelenke übertragen neben den Längskräften nur Vertikalanteile, die sich aus Zuladungsdifferenzen in den einzelnen Wagenmodulen ergeben. Im Dachbereich werden daher auch nur geringe Stützkräfte in Längsrichtung eingeleitet. Gelenkanschlüsse und Stirwandstruktur können den geringen Belastungen entsprechend gewichtsoptimiert werden, ohne die Festigkeit des Wagenkastens zu gefährden



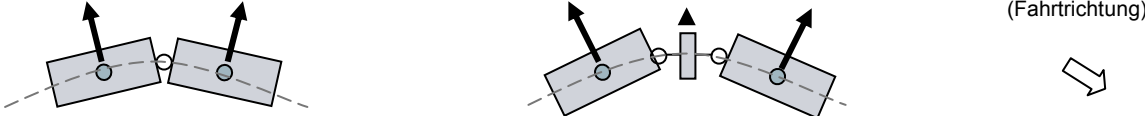
Multigelenk-Dreiteiler mit Sänfte



Multigelenk-Fünfteiler mit Sänften

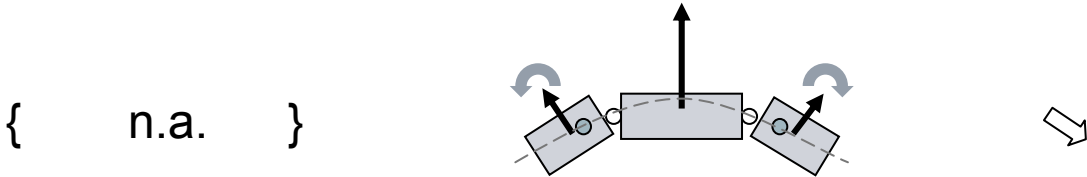
Multigelenkwagen: die Gelenke sind in vertikaler Richtung hoch belastet, da das Gewicht der Sänfte und ein überwiegender Teil der Nutzlast hier übertragen werden müssen. Dazu kommen höhere Stützkräfte im Dachbereich, die nur an den Kopfbenden teilweise durch den Massenüberhang kompensiert werden. Aufgrund der niedrigen Fußbodenhöhe und der erforderlichen Bodenfreiheit resultiert eine hohe spezifische Materialbelastung im Bereich der Gelenke und der anschließenden Stirwandstruktur.

Fahrdynamik: Konzeptbedingtes Systemverhalten im Bogen



Einzelgelenkwagen: stabiles Laufverhalten durch individuelle laterale Abstützung der Module, geringe Empfindlichkeit gegen Gleislagefehler wurde durch Versuche in Augsburg (s. nachfolgende Seiten) nachgewiesen.

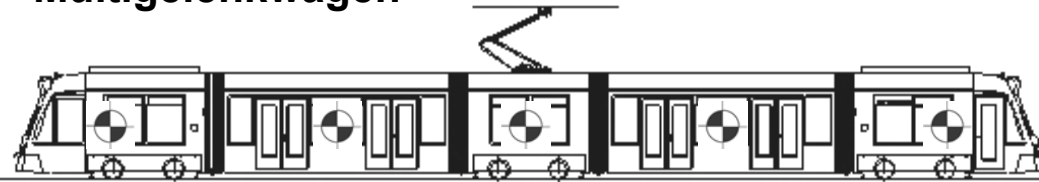
Aus der zentralen Kraftereinleitung resultiert eine Sehnenstellung der Drehgestelle bei niedrigem Kraftniveau. Bei Einfahrt in S-Bögen ohne Zwischengerade besteht nur ein geringes Entgleisungsrisiko, da im Gegenbogen das anlaufende führende Rad um den Fliehkraftanteil entlastet wird.



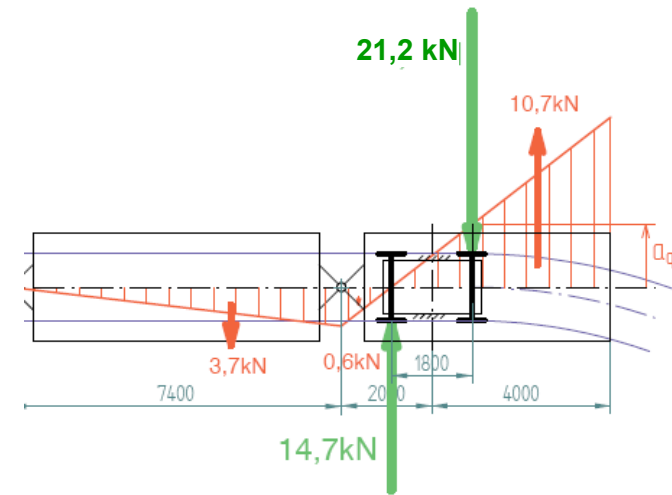
Multigelenkwagen: bedingt stabiles Laufverhalten, höhere Empfindlichkeit gegen Gleislagefehler durch Versuche in Augsburg (s. nachfolgende Seiten) nachgewiesen. Die von der Sänfte herrührenden parasitären Momente führen zu einer Spießgangstellung der Fahrwerke mit erhöhtem Querkraftniveau. Bei Einfahrt in S-Bogen ohne Zwischengerade besteht ein erhöhtes Entgleisungsrisiko, da das im Gegenbogen anlaufende führende Rad zusätzlich mit der aus dem Moment resultierenden Gegenkraft belastet wird.

Durchaus eine Konzeptfrage: quasistatische Querkraft am führenden Rad bei Bogeneinfahrt

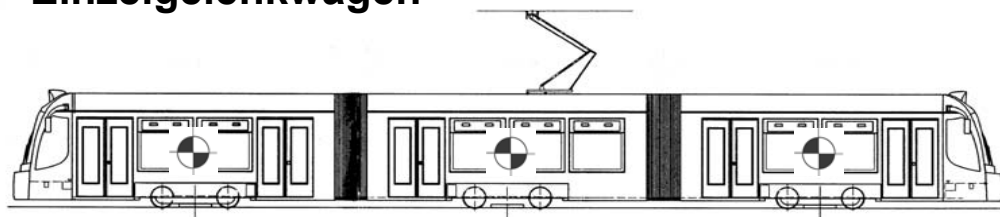
Multigelenkwagen



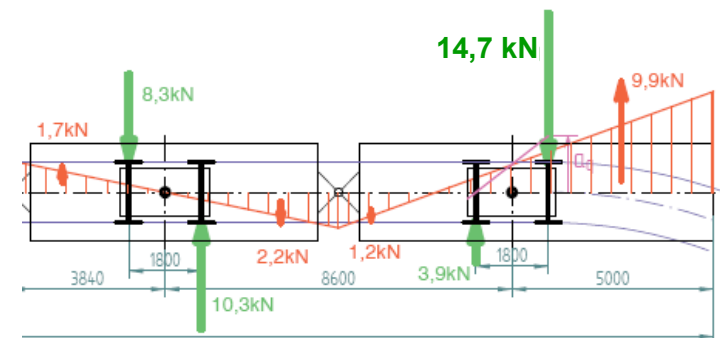
Hohe Ausdrehsteifigkeit der Fahrwerke,
geringe Ausdrehwinkel



Einzelgelenkwagen



Niedrige Ausdrehsteifigkeit der Drehgestelle,
große Ausdrehwinkel

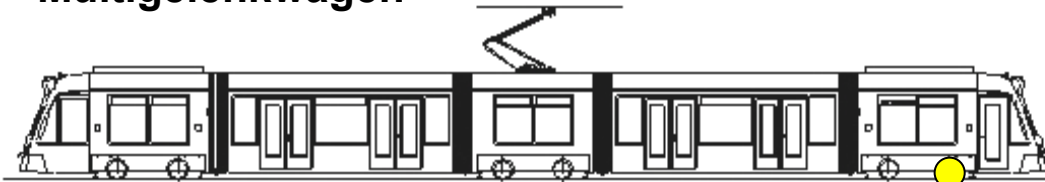


Quasistatische Untersuchung bei identischen Randbedingungen mit 1 m/s²

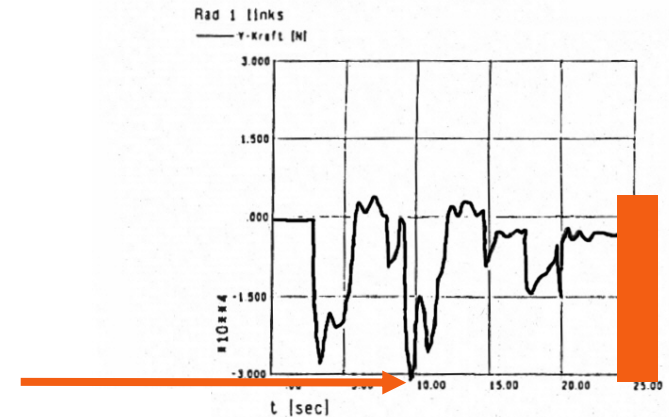
Durchaus eine Konzeptfrage:

gemessenes Querkraftniveau am führenden Rad bei Bogeneinfahrt

Multigelenkwagen

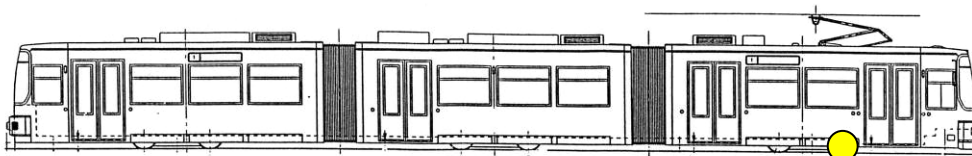


Hohe Ausdrehsteifigkeit der Fahrwerke,
geringe Ausdrehwinkel

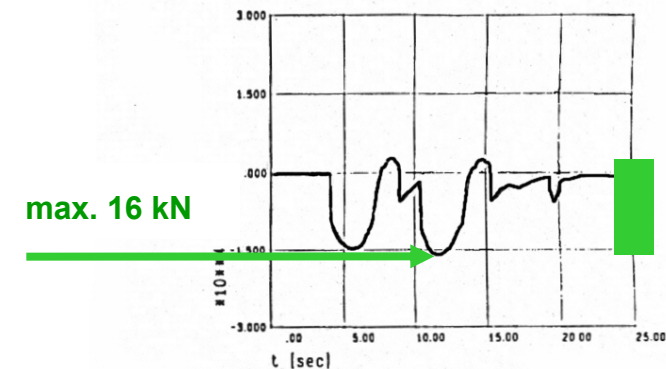


max. 31 kN

Einzelgelenkwagen



Niedrige Ausdrehsteifigkeit der Drehgestelle,
große Ausdrehwinkel



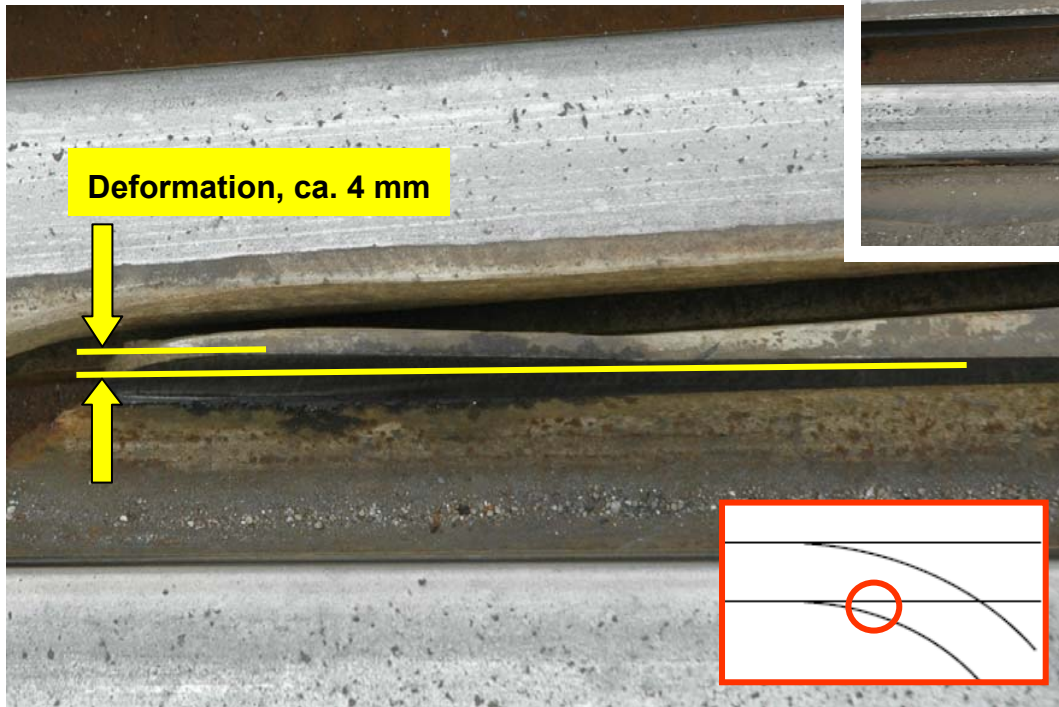
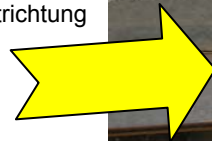
max. 16 kN

Messungen unter identischen Randbedingungen bei 1 m/s²

Auswirkungen trägheitsbedingter Querkräfte bei Multigelenkwagen, "weiches" Gelenk

Deformation im Bereich des Übergangs von der Zunge zur Rillenkante in einer Weiche durch dynamische Querkraftspitzen

Fahrtrichtung

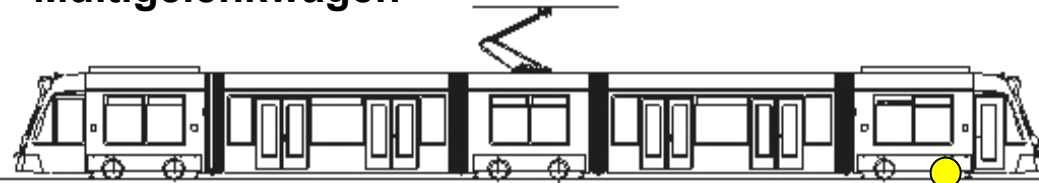


Bei dem gegebenen Querschnitt kann eine plastische Verformung erst bei Kräften > 20 kN auftreten, konventionelle Drehgestellfahrzeuge können derartig hohe Kräfte nicht erzeugen

Durchaus eine Konzeptfrage:

gemessenes Querkraftniveau am führenden Rad bei Fahrt im Bogen

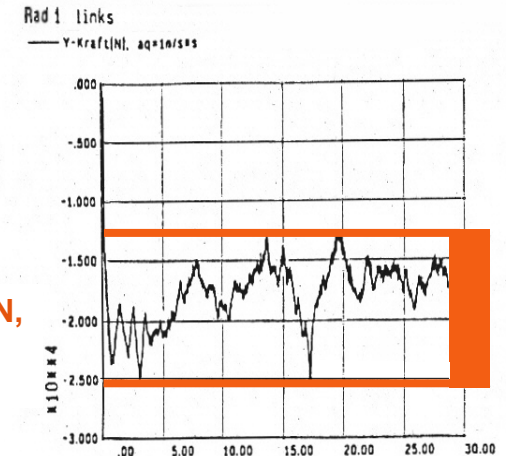
Multigelenkwagen



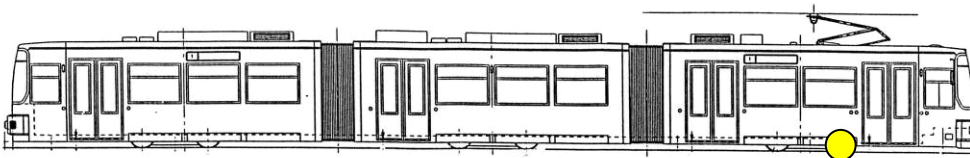
Hohe Ausdrehsteifigkeit der Fahrwerke,
geringe Ausdrehwinkel

**Bandbreite 12,5 kN,
Mittelwert 19 kN,
Maximum 25,5 kN**

● Querkraftmessung am führenden Rad



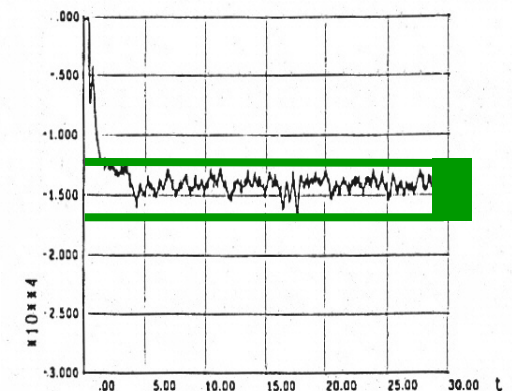
Einzelgelenkwagen



Niedrige Ausdrehsteifigkeit der Drehgestelle,
große Ausdrehwinkel

**Bandbreite 4,5 kN,
Mittelwert 14 kN,
Maximum 17 kN**

Messungen unter identischen Randbedingungen bei 1 m/s²



Auswirkung dämpfungsbedingter Querkräfte bei Multigelenkwagen, “steifes” Gelenk

Beobachtungen an Vignolgleisen



Quelle: www.strassenbahn.tk/intram

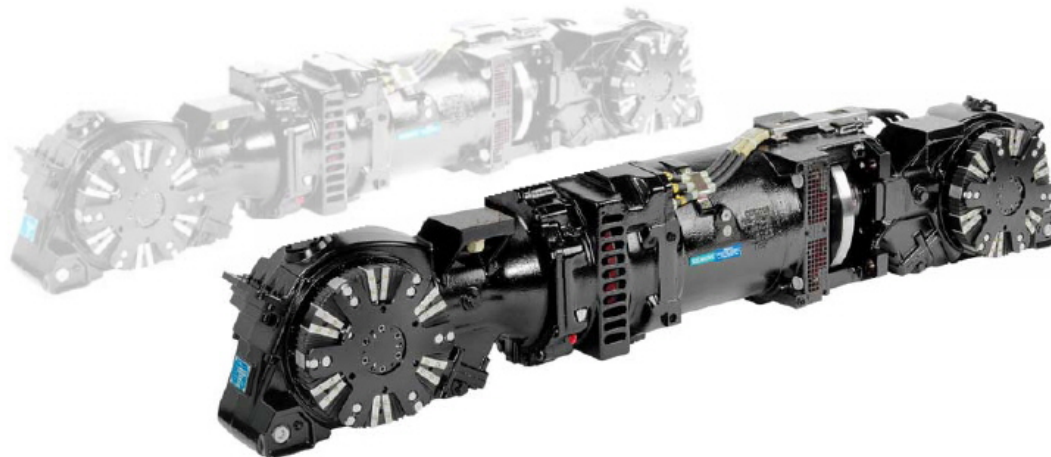


Die auf Fahrer und exponierte Fahrgäste wirkenden Querschleunigungen lassen sich reduzieren, wenn die Gelenke stark bedämpft werden – damit erhöht sich jedoch die Summe der lateralen Reaktionskräfte an der Schiene und damit der Verschleiß im Bereich von Richtungswechseln.

Radsätze oder Losräder? Längsradsätze!

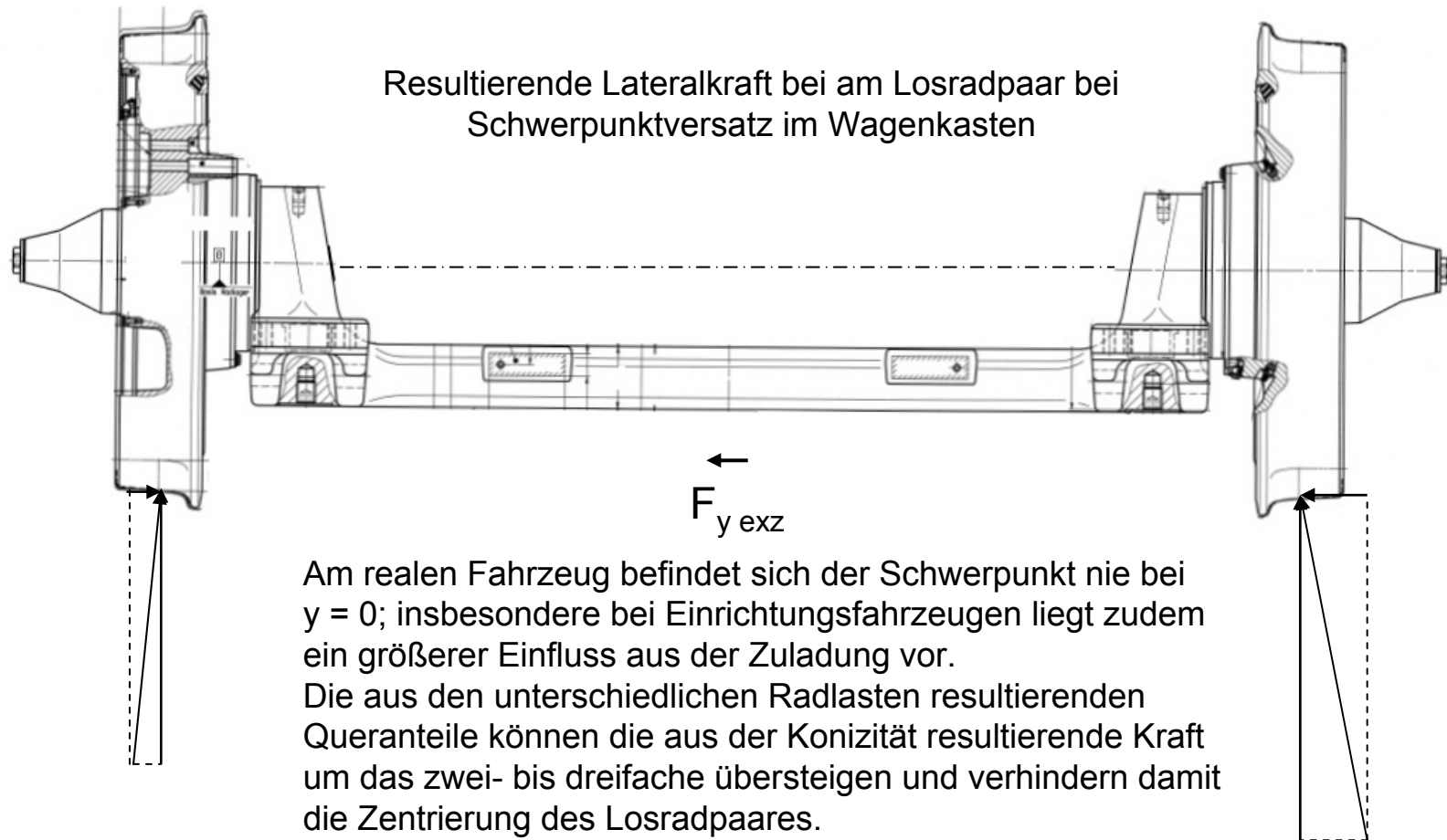


Abbildungen:
GHH Radsatz GmbH



Oft übersehen:

Auslenkkraft am asymmetrisch belasteten Losradpaar

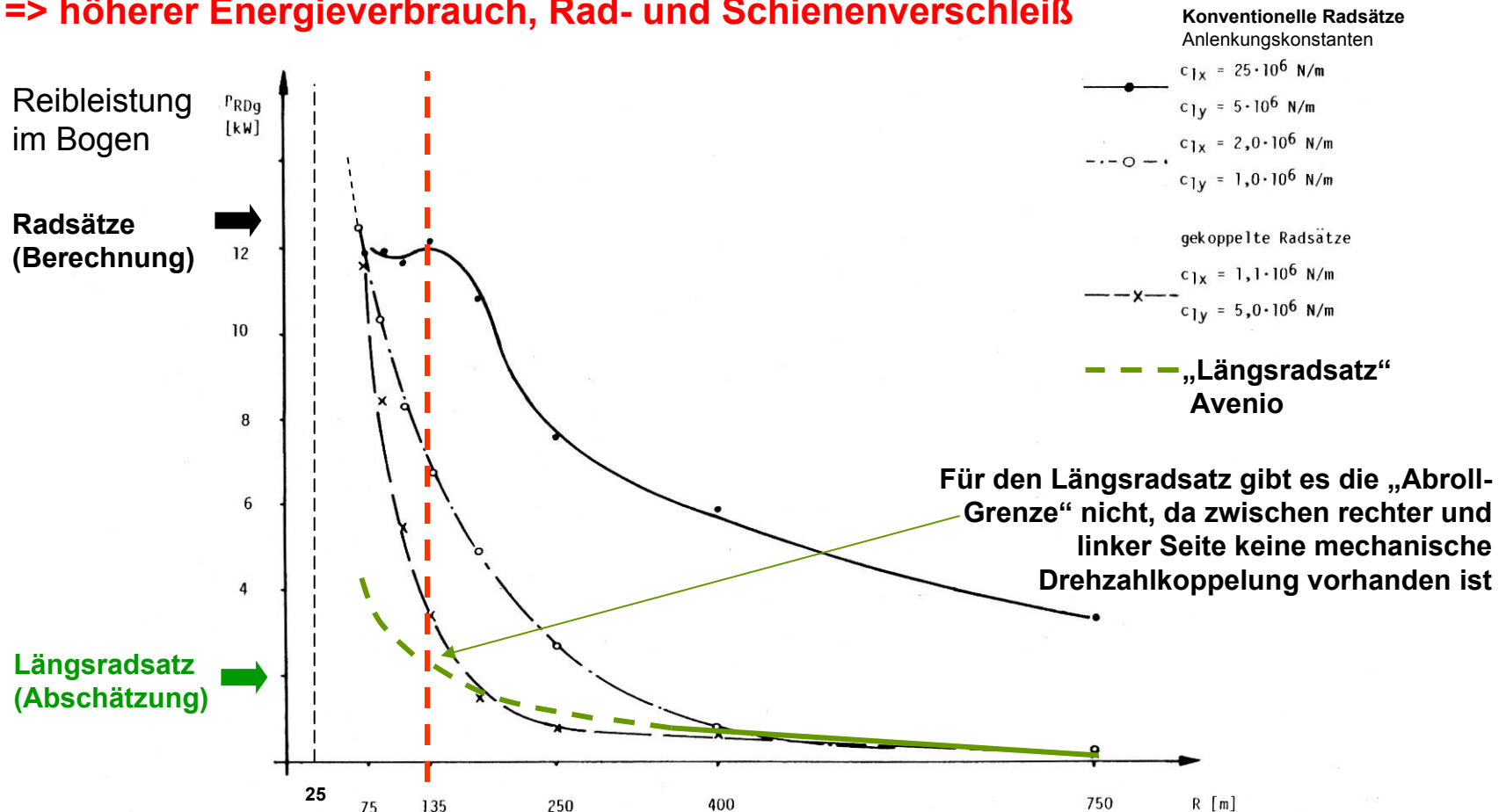


Winkel und Kräfte nicht maßstäblich!

Zur Abrollbedingung:

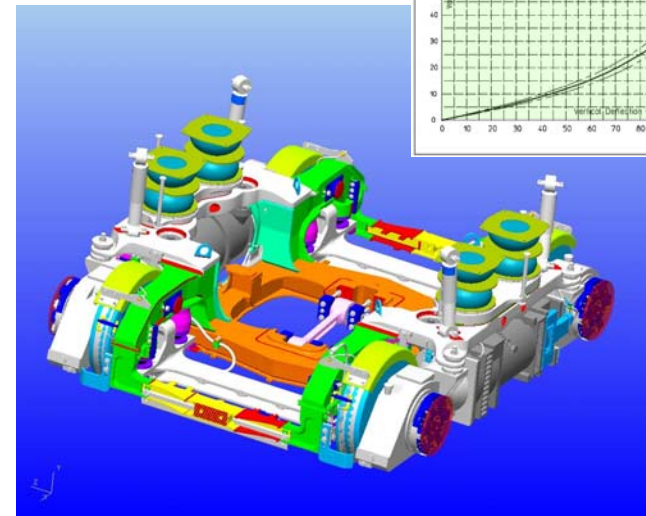
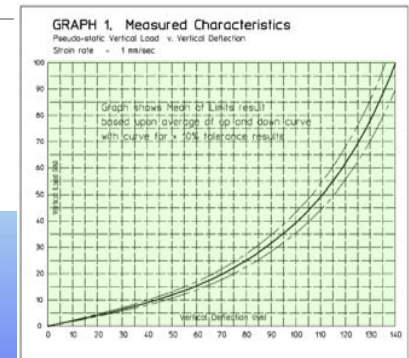
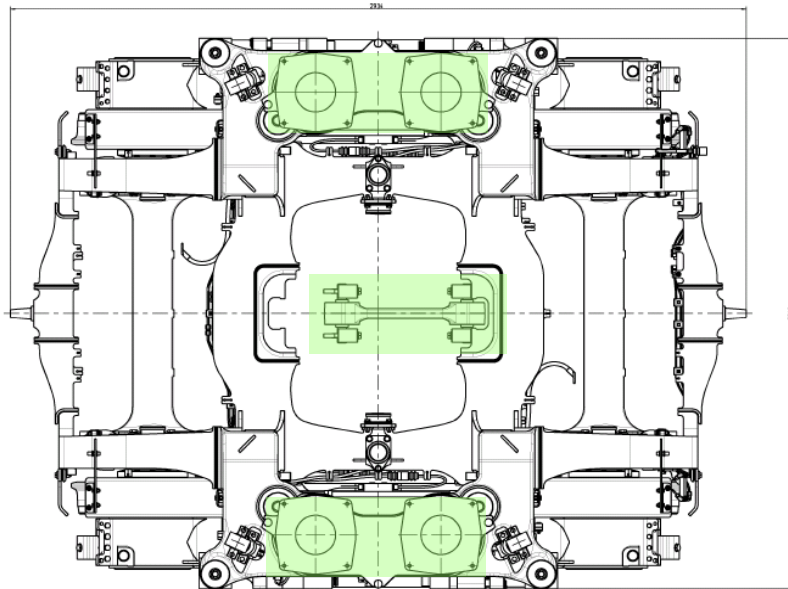
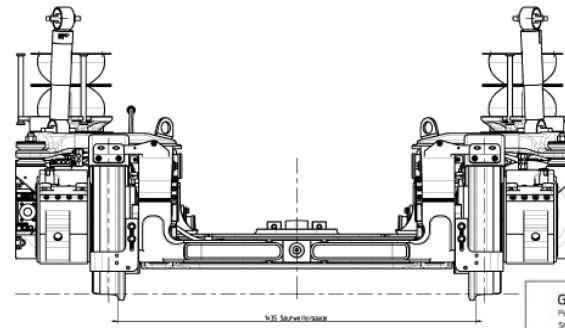
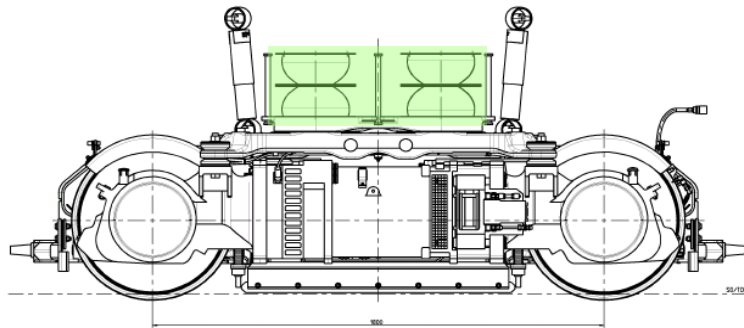
Längsradsätze laufen reibungsarm auch in engen Bögen

**Konventionelle Radsätze erzeugen hohe Reibleistung in Bögen unter 135 m Radius:
=> höherer Energieverbrauch, Rad- und Schienenverschleiß**



Wiegenlos:

Drehgestell mit schubelastischen Sekundärfedern



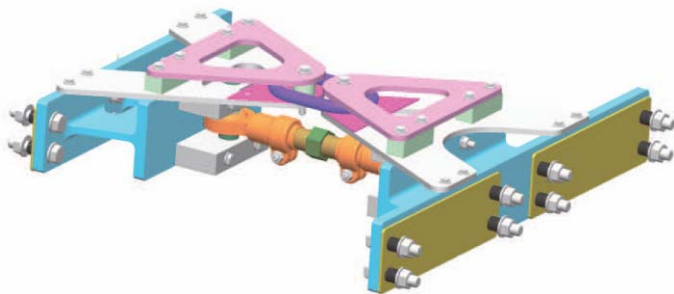
Uneingeschränkter Einsatz: Verwindungsanforderungen im täglichen Betrieb

Budapest Linie 37,
Verbindungsstrecke zwischen
Linie 4/6 und dem
Hungaria-Depot



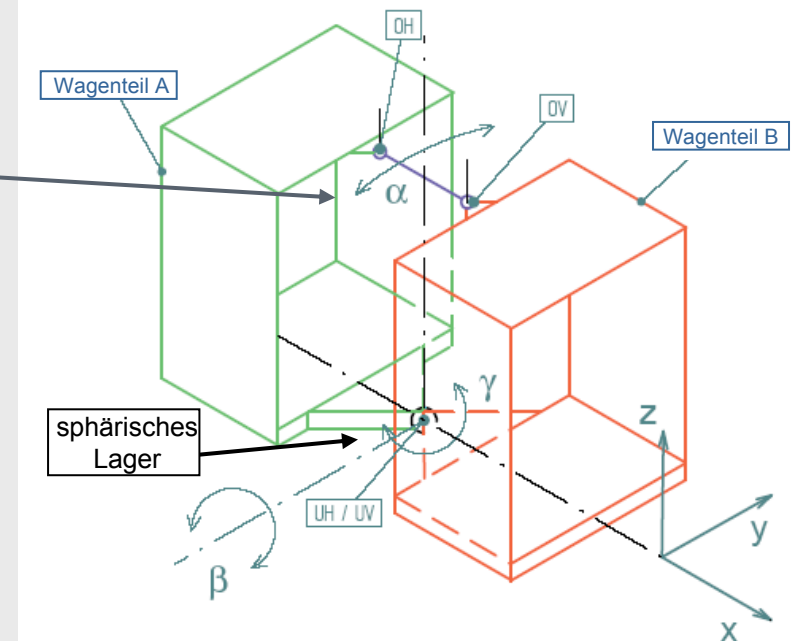
Flexibel: Gelenke für hohe Gleisverwindungen

Einfachgelenk mit definierter Wankfreiheit (Budapest)



Ergebnis:

- Sicherheit gegen Entgleisen wird auch durch schlechte Gleislage nicht beeinflusst
- Deutliche Verringerung der Strukturbeanspruchung
- Sphärische Lager ermöglichen torsionsfreie Kraftübertragung



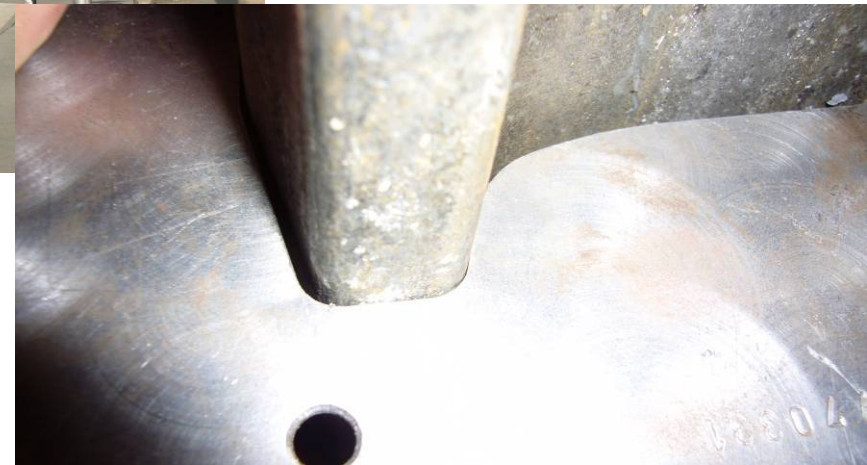
Budapest: Erfahrungen aus vier Jahren Betriebseinsatz

SIEMENS



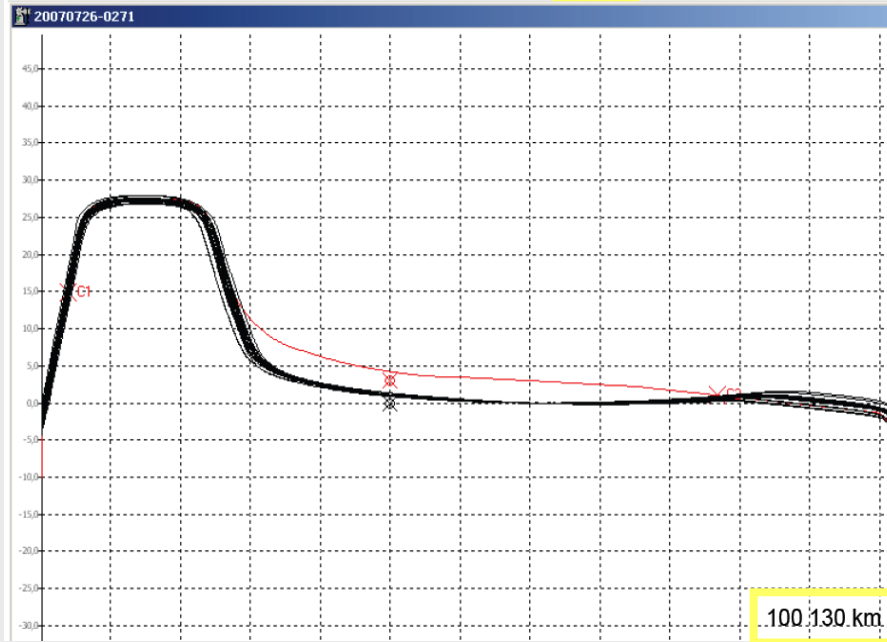
Wagen 2026 auf der Strecke,
Laufleistung am 27.07.2009:
156 102 km,
kleinster Raddurchmesser 585 mm
verbleibendes Verschleißvolumen: 80%

Radprofil am Wagen 2030
nach 121 000 km ohne
Reprofilierung
die Neu-Schablone liegt
ohne Lücke an, der
Spurkranz weist die
ursprüngliche Dicke auf



Budapest: Identische Verschleißentwicklung in der Fahrzeugflotte

Budapest – MiniProf Wheelprofiles Fzg.: 2017

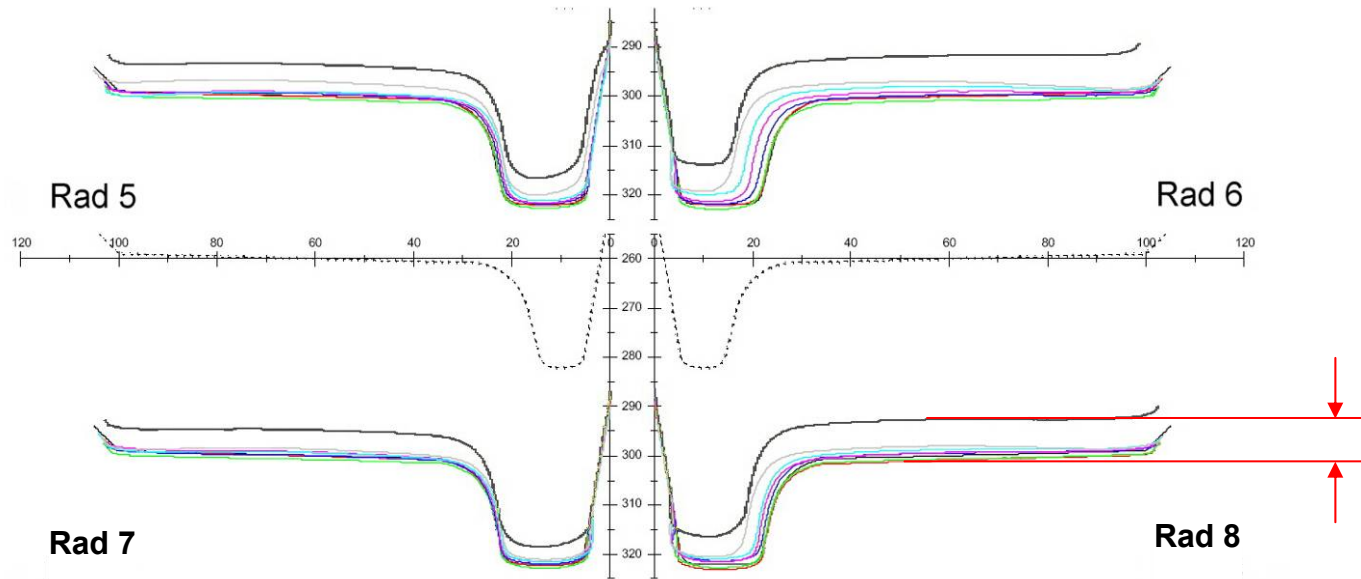


Budapest – MiniProf Wheelprofiles Fzg.: 2020

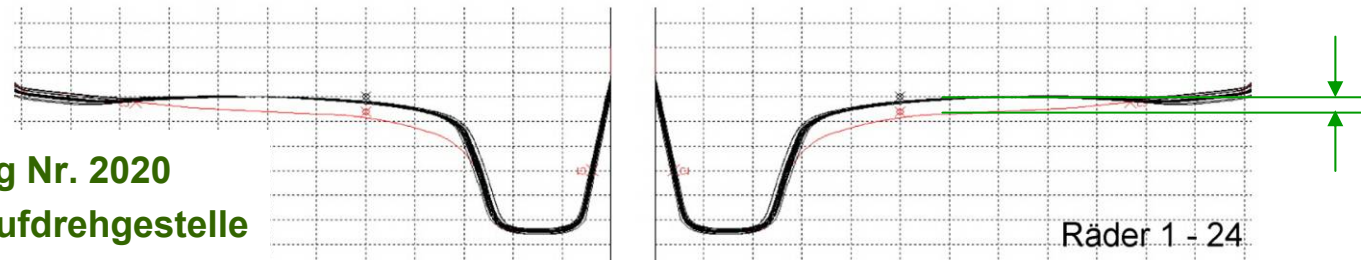


Einfluss des Fahrzeugkonzepts auf das Verschleißbild bei identischen Fahrwerken

Spurkranz- und Laufflächenverschleiß bei Multigelenkwagen Lauffahrwerk im Portal zwischen 0 und 53.000 km



BKV-Fahrzeug Nr. 2020 Trieb- und Laufdrehgestelle nach 99 358 km

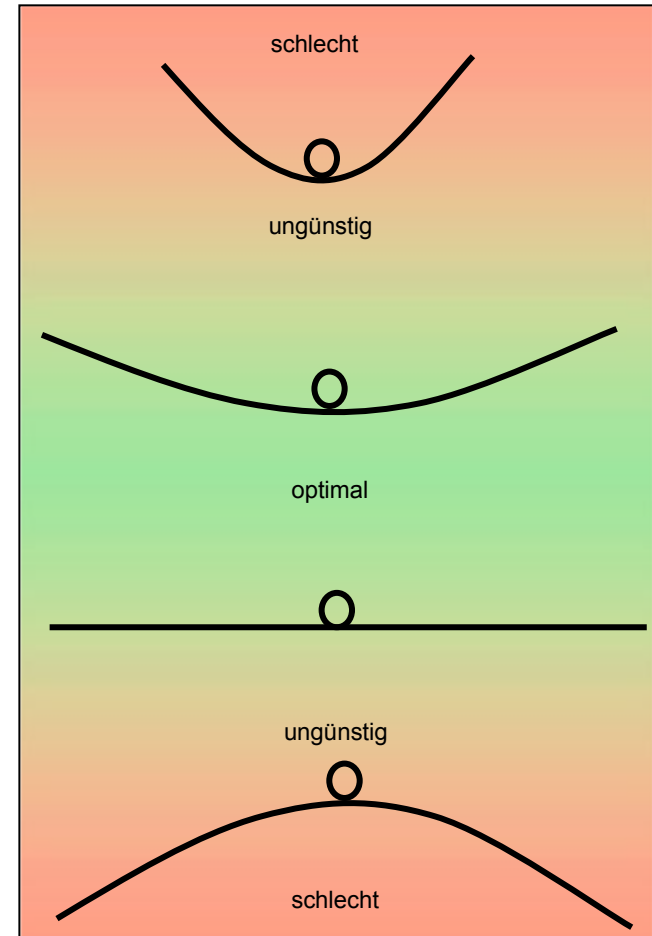


Im Überblick:

Verschleißverhalten von Längsradständen und Losradpaaren

Analogiebetrachtung zum „Verschleiß-Gleichgewicht“ und die Ausnutzung der Radlaufflächenbreite

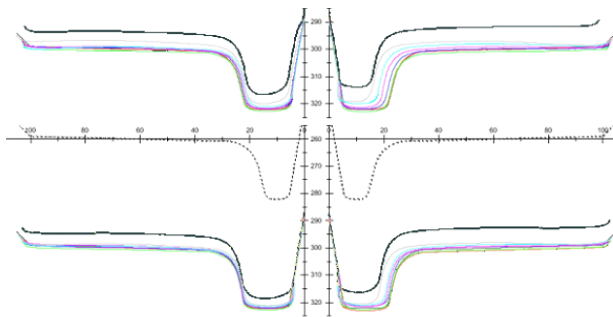
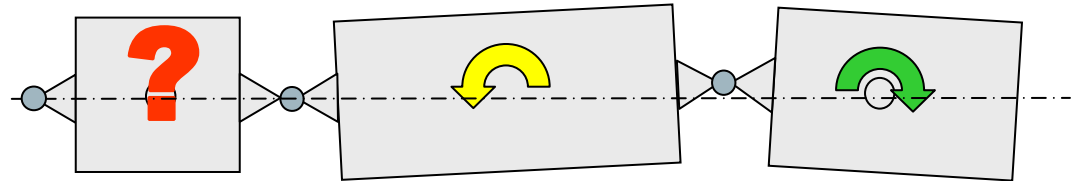
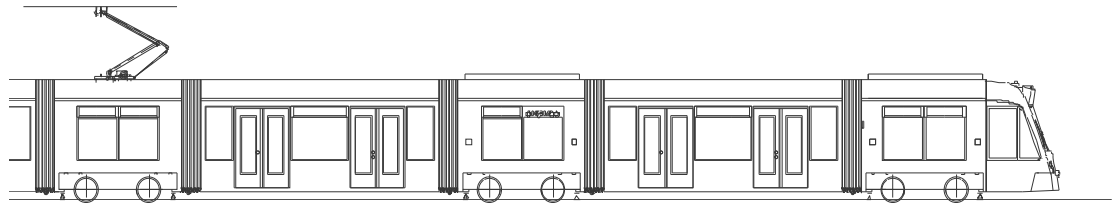
- gesteuerte Losradpaare
- gesteuerte Einzelradsätze
- gesteuerte Radsätze in selbstzentrierenden Drehgestellen
- **weich geführte Längsradstände in selbstzentr. Drehgestellen**
- weich geführte Radsätze in selbstzentr. Drehgestellen
- starr geführte Losradpaare in selbstzentr. Drehgestellen
- starr geführte Radsätze in selbstzentrierenden Drehgestellen
- starr geführte Radsätze in nicht zentrierenden Drehgestellen
- **Losradpaare in Fahrwerken**
- Losradpaare in nicht zentrierenden Drehgestellen



Durchaus vorhanden: Konzepteinfluss auf das Zentrierverhalten

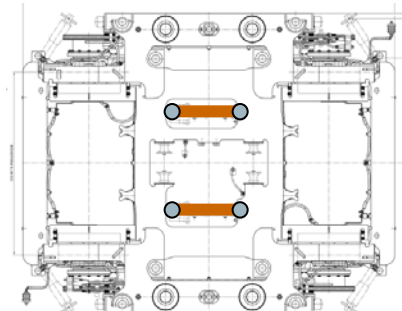
Keine Informationsübertragung bei Multigelenkwagen:

Die Information des Triebfahrwerks über die Position im Gleis geht über die zwei Gelenke verloren; die Losräder des Portalwagens verbleiben in ausgelenkter Stellung und verschleiben asymmetrisch.

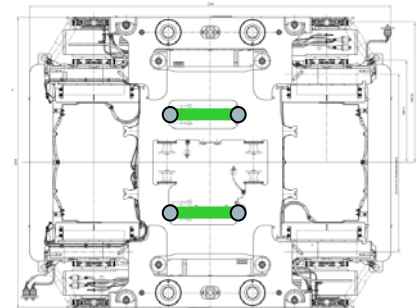


Aufzeichnungen nach 50.000 km ohne Reprofilierung

Losräder in festem Fahrwerk



Längsradsätze in festem Fahrwerk

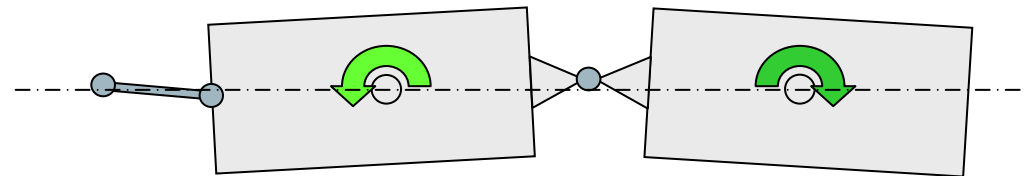
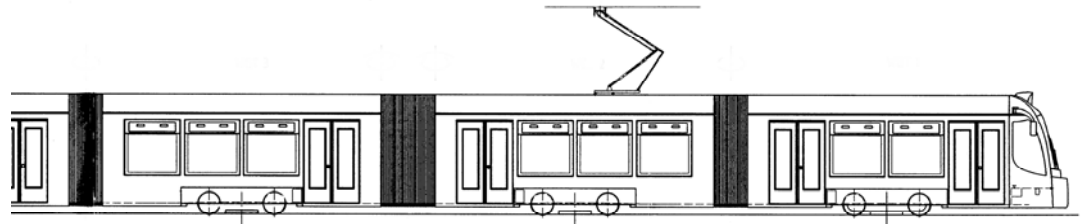


Durchaus vorhanden: Konzepteinfluss auf das Zentrierverhalten

Informationsübertragung beim Einzelgelenkwagen:

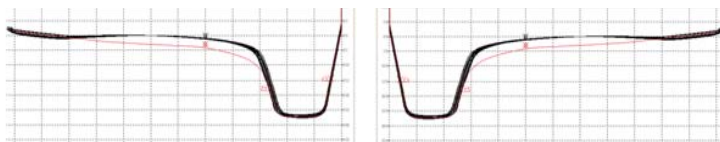
Die Zentrierbewegung des Triebdrehgestells wird über die drehelastischen Anbindungen und das Gelenk auf das Laufdrehgestell übertragen.

Damit wird die Einstellung des Losradgestelles unterstützt; Trieb- und Laufdrehgestell verschleifen symmetrisch.

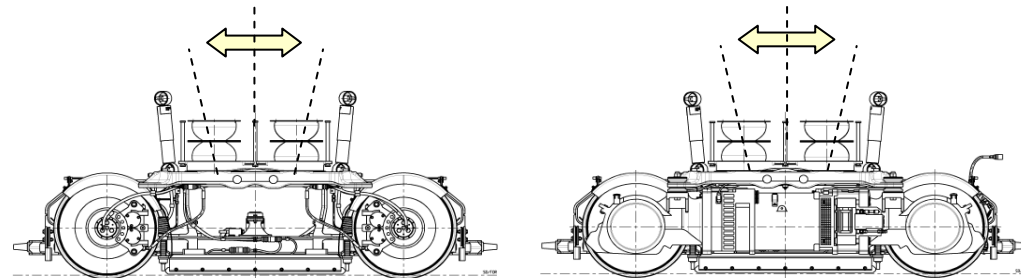


Losräder in schubelastisch angebundenem Drehgestell

Längsradsätze in schubelastisch angebundenem Drehgestell



Aufzeichnungen nach 100.000 km ohne Reprofilierung



Einsatz unter identischen Randbedingungen: Budapester Fahrzeuge im Vergleich

Quelle: BKV

SIEMENS

Fahrzeugtyp

mittlere Radreifenlaufleistung

Ganz-Gelenkwagen



250.000 km

Tatra-T5C5



300.000 km

ex-Hannover TW 6000



270.000 km

Combino Plus



> 500.000 km erwartet

Einsatz unter identischen Randbedingungen: Budapester Fahrzeuge im Vergleich

Quelle: BKV

SIEMENS

Fahrzeugtyp

Ganz-Gelenkwagen
670/600 mm



spezifischer Materialverbrauch*

25 mm³/km

Tatra-T5C5
690/620 mm



22 mm³/km

ex-Hannover TW 6000
730/650 mm



29 mm³/km

Combino Plus
600/520 mm



< 12 mm³/km erwartet

* einschließlich Reprofilierungsverluste

Budapest: Linie 4/6, Mester Utca – der Weg zum Depot

SIEMENS



Budapest: Linie 4/6, Endhaltestelle Moszkva Tér

SIEMENS



Budapest:

Linie 4/6, Schienenverschleiß in Flachrillenbereichen

Rillengrund im Kreuzungsbereich der Endhaltestelle Moszkva tér

Fehlendes Wendemoment reduziert Spießgangfolgen: vor- und nachlaufendes Rad laufen fast in gleicher Spur.

In der Vergangenheit musste der Rillengrund der rechts gezeigten Kreuzung – wie auch an den anderen Endpunkten der Linien 4 und 6 – in regelmäßigen Abständen durch Auftragschweißung saniert werden. In den letzten vier Jahren, seit Einsatz des Combino Plus, war diese Maßnahme kein einziges Mal erforderlich.

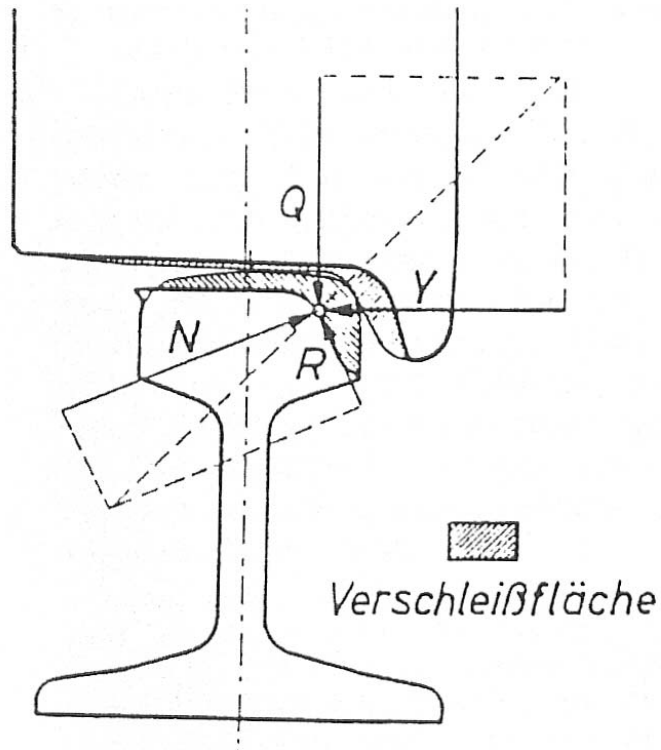


Quelle: BKV

© Siemens AG 2010

Allgemein: Schienenverschleiß im Bogen

Typisches Verschleißbild an Rad und Schiene



Budapest: Linie 4/6, Schienenverschleiß im Bogen

43 m-Bogen zwischen Margit híd und Moszkva tér



(Position C siehe folgende Seite)

© Siemens AG 2010

Budapest:

SIEMENS

Linie 4/6, Schienenverschleiß im Vergleich

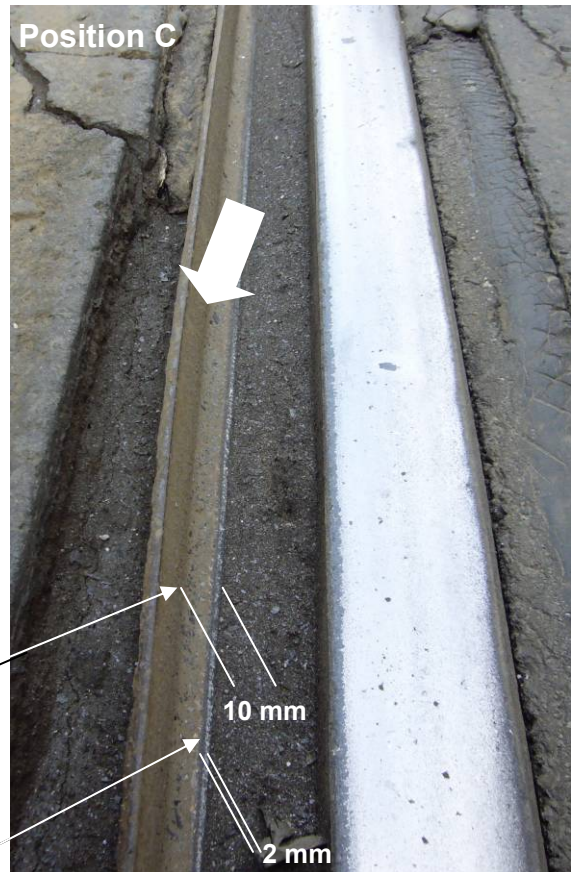
43 m-Bogen zwischen Margit híd und Moszkva tér

In der Vergangenheit wurden die Schienen dieses Bogens alle drei Jahre ausgewechselt, da die Fahr- und Leitkanten nach Abtrag von ca. 10 mm das Grenzmaß erreicht hatten (links). Die jetzt seit drei Jahren liegenden Schienen weisen erst einen lateralen Leitkantenverschleiß von ca. 2 mm auf.

Quelle: BKV

Verschleißspuren aus drei Jahren Einsatz konventioneller Fahrzeuge

Verschleißmarkierung der Spurkranzkuppe des Avenio nach drei Jahren Betrieb



© Siemens AG 2010

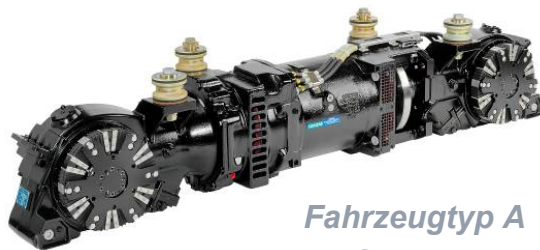
Im Vergleich:

Einfluss unabgefederter Massen auf das Emissionsspektrum

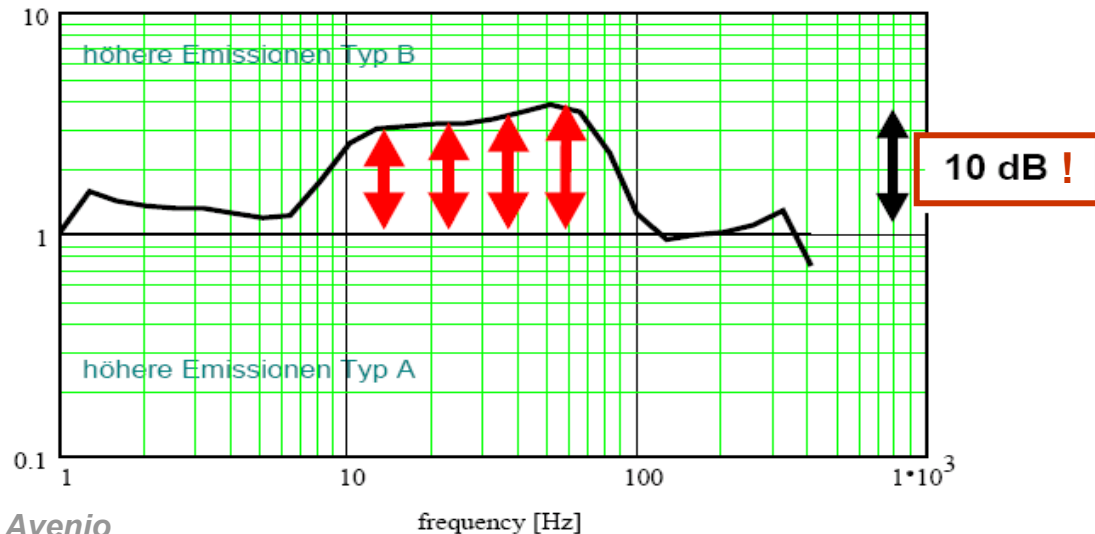
| Fahrzeugtyp | Typ A | Typ B |
|--|---------|-----------|
| Achslast | 57 kN | ca. 67 kN |
| Achsabstand im Fahrgestell | 1,80 m | 1,60 m |
| Raddurchmesser | 60 cm | 59 cm |
| Unabgefederte Masse pro Triebfahrgestell | 1300 kg | 3500 kg |

Hauptunterschied:
Fahrzeuge Typ B
haben keine
Primärfederung

Im für die Immissionen wichtigen Frequenzbereich 10 bis 80 Hz verursachen die höheren unabgefederten Radsatzmassen der Fahrzeuge Typ B rund **3-fach höhere Werte**. Dies entspricht Pegelzunahmen von rund **10 dB**.



Fahrzeugtyp A
=> Combino und Avenio



Quelle: Ing.-Büro Dr.-Ing. Müller-Boruttau

Avenio

SIEMENS

Große Gangbreite trotz Drehgestell: 675 mm

großer Sitzkastenabstand – ausreichender Fußraum für stehende Fahrgäste



Der Avenio

SIEMENS

- 100 % Niederflur bei hohem Komfort und niedrigen Betriebskosten

