

Dipl.-Ing. Lutz Uebel, Siemens AG, Erlangen
Dr.-Ing. Roland Rennert, IMA GmbH, Dresden
Dipl.-Ing. Gerhard Kaserer, Siemens AG Österreich, Graz

Vom Combino zum Avenio

Vom Combino zum Avenio

Leichtbau als Leitgröße für die Entwicklung der Avenio Plattform

Weiterentwicklung der Praxis der Festigkeitsauslegung aus Combino Projekt

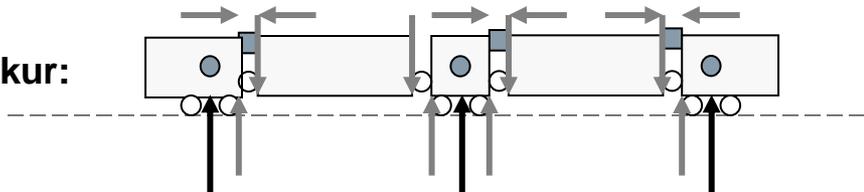
- Lastannahmen durch Simulationen und Messungen auf Basis von Lastkollektiven
- Beanspruchbarkeit durch Bauteilversuche

Konzeptleichtbau ermöglicht Wechsel von Aluminium zu Stahl bei gleich bleibender Radlast und verbessertem Verschleißverhalten

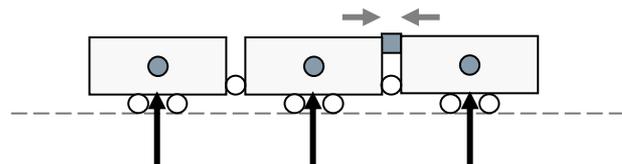
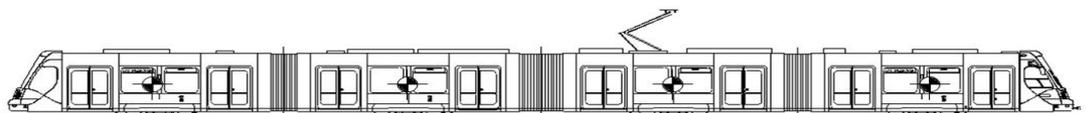
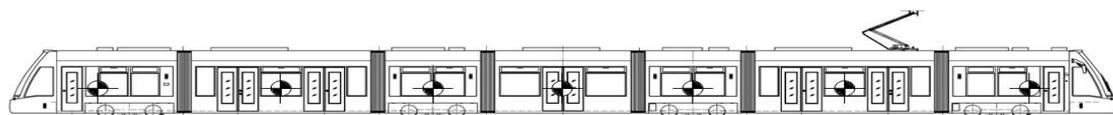
- Direkter Kraftfluss
- Gleichmäßige Auslastung der Struktur
- Schnittkräfte zur Infrastruktur in Höhe und Einleitung gleichmäßig verteilt
- Möglichst geringe dynamische Reaktionskräfte durch günstige Schwerpunktlagen. Damit gutes Lauf- und Verschleißverhalten

Vom Combino zum Avenio

Schnittkräfte auf
Wagenkastenstruktur:

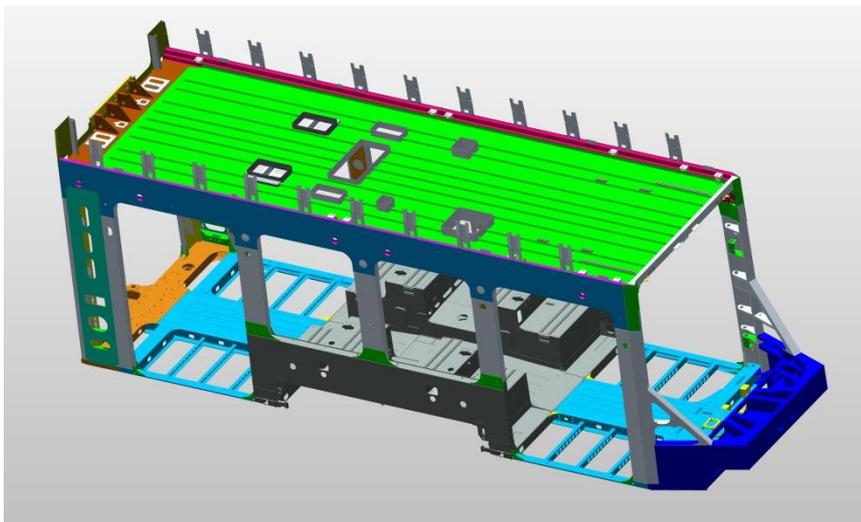


- Schwerpunkt der Sänfte erzeugt Momente im Gelenkbereich
- Führung Gelenkpunkt zur Gleismittelnachse durch Momente von drehsteifen Fahrwerk auf Wagenkästen



- Schwerpunktlage erzeugt kaum Momente im Gelenkbereich
- Drehgestellprinzip erzeugt geringe Führungskräfte auf Wagenkästen

Vom Combino zum Avenio - Wagenkastenrohbau

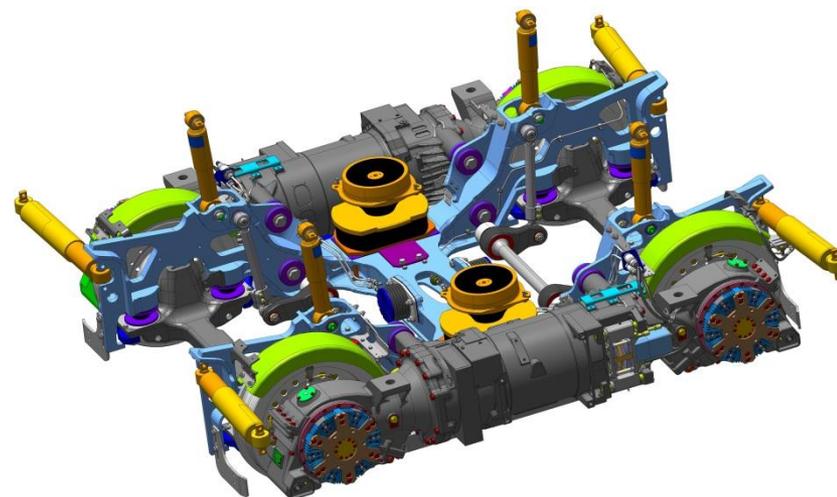


Stahlrohbaukasten

- Erhöhung Sitzplatzkapazität von 12 auf 16 Sitze
- 9 m Modul für alle Fahrzeuglängen
- 2 Türen pro Seite und Modul
- Crash Norm EN 15227

Triebdrehgestell

- Veränderte Schnittstelle Wagenkasten Drehgestell
- Hohlwellenantrieb
- max. Radsatzlast 105 kN

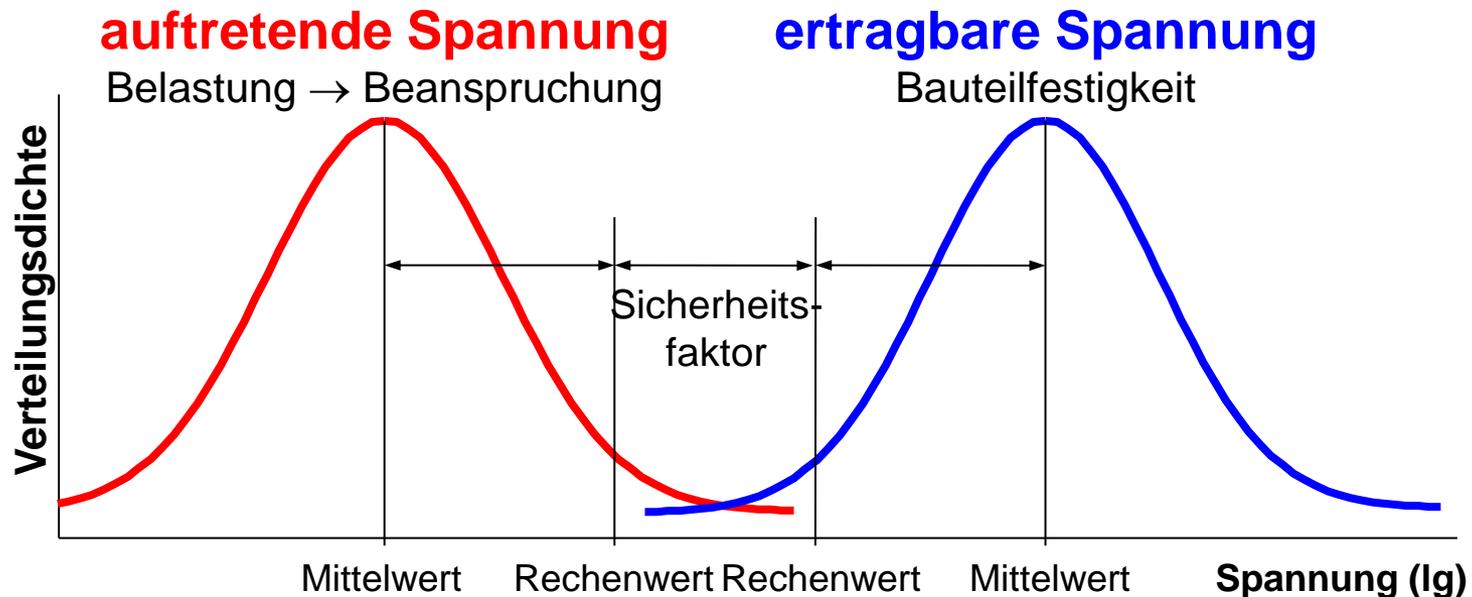


Festigkeitsbewertung – Auslastungsgrad

Der rechnerische Festigkeitsnachweis erfolgt über die Berechnung des Auslastungsgrades.

$$a = \frac{\text{auftretende Spannung}}{\text{zulässige Spannung}} = \frac{\mathbf{F} \cdot \mathbf{C}}{\sigma_{\text{ertr}} / j}$$

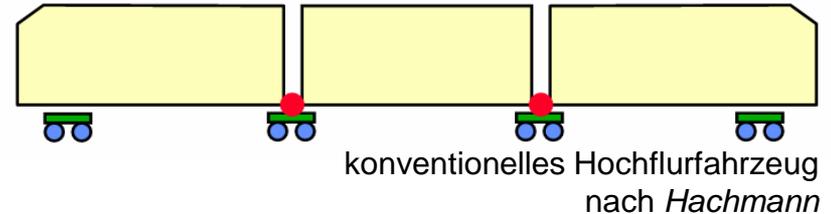
- F** Vektor der auftretenden Belastungen
- C** Vektor der Einflusszahlen zur Berechnung der auftretenden Spannung
- σ_{ertr} Bauteilfestigkeit, ertragbare Spannung
- j** Sicherheitsfaktor



Festigkeitsbewertung – „alte“ Praxis nach VDV152 (1992)

Annahmen für auftretende Belastungen:

- Normative Lastfälle nach VDV 152
- abgeleitet von *Bugarcic* u.a. aus Messdaten an konventionellen Hochflur-Straßenbahnen, diese wurden verallgemeinert zu netzunabhängigen Dauerfestigkeits-Lastfällen.



Berechnung der Nachweisspannungen:

- quasistatische Berechnung der Lastfälle, üblicherweise mittels FEM, keine konkreten Modellierungsvorgaben.

Ertragbare Spannung (Festigkeitswerte):

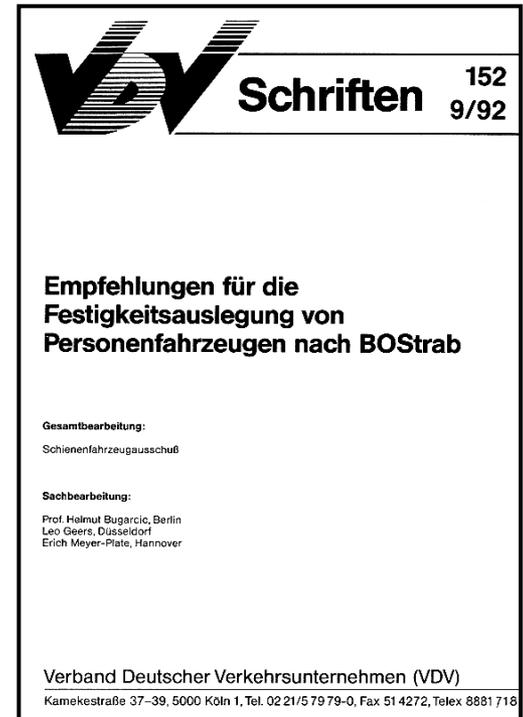
- MKJ-Diagramme nach DVS 1612 (Stahl, 1983) bzw. DVS 1608 (Alu, 1984) → „Kleinprobenwerte“, gegenüber heutiger Vorgehensweise relativ hoch.

Sicherheitsfaktoren:

- ein fester Sicherheitsfaktor nach VDV 152.

Festigkeitsnachweis:

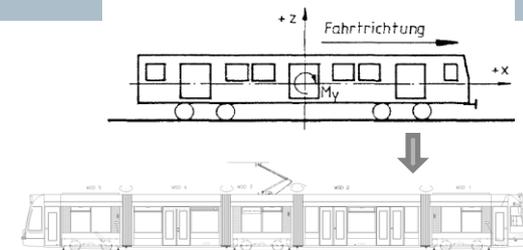
- Statischer Festigkeitsnachweis und Dauerfestigkeitsnachweis werden mit den jeweils anzuwendenden Lastfällen methodisch gleich durchgeführt.



Festigkeitsbewertung – Schwierigkeiten mit der „alten“ Praxis

Annahmen für auftretende Belastungen:

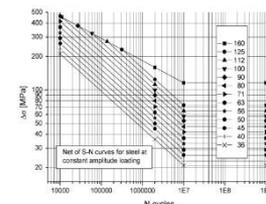
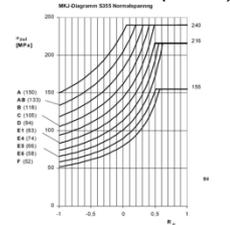
- VDV-Lastfälle (1992) sind unvollständig bei neuartigen Straßenbahnkonzepten (Niederflur- und Multigelenfahrzeuge), → Ergänzung von weiteren Auslegungslastfällen ist erforderlich.
- Belastungen an Straßenbahnen sind netzabhängig und damit kundenspezifisch, → kundenspezifische Trassierungs- und Belastungs- bzw. Beanspruchungsmessungen sind erforderlich.



Ertragbare Spannung (Festigkeitswerte):

- Kleinproben-Festigkeitswerte nach DVS 1612 (1983) und DVS 1608 (1984) entsprechen nicht mehr dem heutigen Stand der Technik, → EN 12663 und EN 13749 fordern Bauteil-Festigkeitswerte.
- Gegenseite: Bauteil-Festigkeitswerte (FAT-Klassen) für Schweißnähte nach IIW-Empfehlungen sind für Schienenfahrzeug-Anwendungen sehr konservativ → Bonus für Schienenfahrzeug-Anwendungen erforderlich.

DVS1612 (1983)



IIW (1996)

Festigkeitsnachweis:

- Nach alter VDV152+DVS-Praxis kann der Ermüdungsfestigkeitsnachweis nur als Dauerfestigkeitsnachweis („DFN“) geführt werden, → zumindest für die Bewertung von Beanspruchungsmessungen ist aber ein Betriebsfestigkeitsnachweis („BFN“) erforderlich.

Festigkeitsbewertung – Troubleshooting: Combino-Lösung

Annahmen für auftretende Belastungen:

- Ermittlung kundenspezifischer Last-Zeit-Verläufe durch Messung auf mehreren Streckennetzen,
 - war möglich, da Fahrzeuge schon im Einsatz,
 - Messung der Lastniveaus vor und nach Sanierung,
 - Ermüdungsfestigkeit musste über Betriebsfestigkeitsnachweis nachgewiesen werden.



Ertragbare Spannung (Festigkeitswerte):

- Verwendung der Festigkeitswerte nach FKM-Richtlinie für Grundmaterial bzw. nach IIW-Empfehlungen für Schweißnähte,
- Absicherung durch Durchführung von Coupon,- Baugruppen- und Wagenkastentests.



Festigkeitsnachweis:

- Entwicklung einer Methodik zur teilautomatisierten Festigkeitsbewertung (gemessene Last-Zeit-Verläufe und FEM-berechnete Nachweisspannungen)
- statischer Festigkeitsnachweis und Vorauswahl der im Betriebsfestigkeitsnachweis zu betrachtenden Nachweisstellen nach DVS 1608,
- Betriebsfestigkeitsnachweis nach FKM-Richtlinie.



Festigkeitsbewertung – „neue“ Praxis nach VDV152 (erwartet 2013)

Annahmen für auftretende Belastungen:

- Normative Lastfälle nach EN 12663 und EN 13749,
- ergänzende MKS-Lastfälle für kundenspezifische Trassierungsabschnitte,
- Empfehlung von Validierungsmessungen im Gleisnetz des Betreibers.

„DFN“ = Dauerfestigkeitsnachweis
 „BFN“ = Betriebsfestigkeitsnachweis

Berechnung der Nachweisspannungen:

- Unverändert: quasistatische Berechnung der Lastfälle, üblicherweise mittels FEM, keine konkreten Modellierungsvorgaben.

Ertragbare Spannung (Festigkeitswerte):

- Empfehlungen zur Verwendung bestimmter Regelwerke:
 - IIW-Empfehlungen oder FKM-Richtlinie: DFN und BFN mit „Schienenfahrzeug-Bonus“,
 - DVS 1608 (Alu, 2011): DFN und BFN (ohne Bonusfaktoren, da bereits schienenfahrzeugspezifisches Festigkeitsniveau enthalten),
 - DVS 1612 (Stahl, 2009): nur DFN.

Sicherheitsfaktoren:

- nach verwendetem Regelwerk festzulegen.

Festigkeitsnachweis:

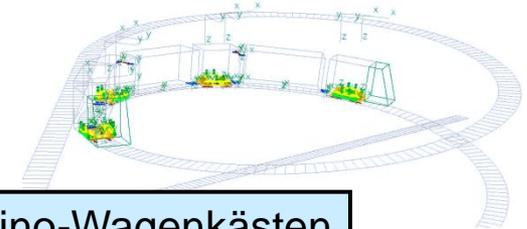
- im Allgemeinen statischer Festigkeitsnachweis und DFN,
- BFN wird als gleichwertige als Alternative zum DFN zugelassen.



Festigkeitsbewertung – Zwischenfazit

Bei Neukonstruktionen werden folgende Prinzipien konsequent umgesetzt:

- ermüdungsfestigkeitgerechte Konstruktion durch
 - Minimierung von Zwängungskräften im Fahrzeug und
 - Vermeidung bzw. Minimierung lokaler Spannungsspitzen,
- Absicherung von Festigkeitswerten durch Komponententests,
- moderner Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit MKS-Lastfällen in Form eines Dauerfestigkeitsnachweises.



Wesentliche Ursachen für die Festigkeitsprobleme der Combino-Wagenkästen (geringe Erfahrungen mit Niederflur- und Multigelenkdesign) waren nicht auf den Combino beschränkt, sondern branchenspezifisch.

In der Folge erschienen seit 2006

- Neuausgaben der Regelwerke EN 12663, EN 13749, DVS 1608, DVS 1612; die VDV 152 befindet sich in Überarbeitung,
- und wurde durch die Zusammenarbeit mit den Betreibern sowie durch die Auswertung der vielen Einsatzmessungen ein fundierter Erfahrungsschatz aufgebaut,

Nach der Combino-Sanierung wurden branchenweit gültige, verbesserte Regeln zur Festigkeitsauslegung von Straßenbahnen aufgestellt.

Fahrdynamik

Drehgestellkonzepte: Abkling- und Zentrierverhalten in der Geraden

Radsatz

„Sinuslauf“ aufgrund der Drehzahlkopplung zwischen rechtem und linkem Rad

- Gutes Zentrierverhalten
- Stabilitätsproblem abhängig von Fahrgeschwindigkeit, Konizität, Radsatzführung

Losradpaar

Kein „Sinuslauf“ aufgrund fehlender Drehzahlkopplung zwischen rechtem und linkem Rad

- Kein ausgeprägtes Zentrierverhalten, seitliches Anlaufen der Räder
- Kein Stabilitätsproblem

„Längsradsatz“

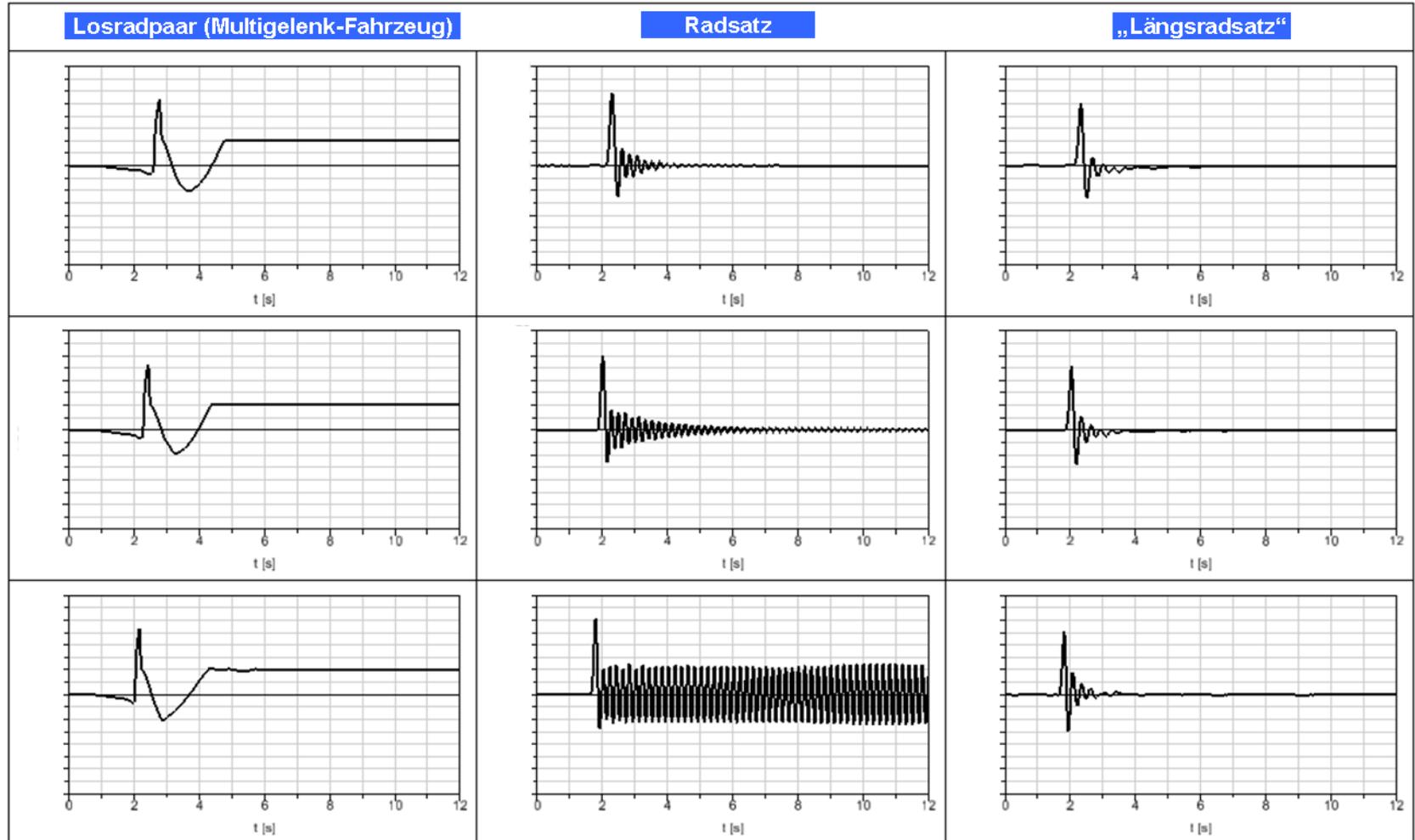
Vereint aufgrund einer Kopplung der Losräder einer Drehgestell-Seite - in Verbindung mit einer geeigneten Rad-/Schiene Paarung - die Vorteile von Losrad- und Radsatz-Technik

- Gutes Zentrierverhalten, ähnlich Radsatz
- Stabilitätsverhalten, ähnlich Losradpaar

Fahrdynamik

Drehgestellkonzepte: Abkling- und Zentrierverhalten in der Geraden

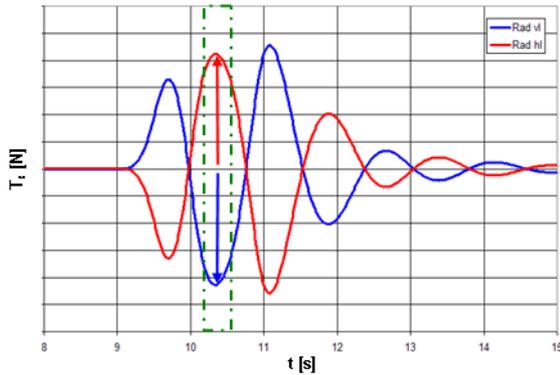
Fahrgeschwindigkeit



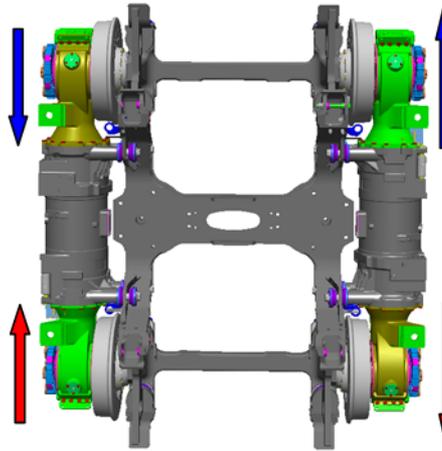
Fahrdynamik

Längsradatz – Lenkeffekt nach Querauslenkung

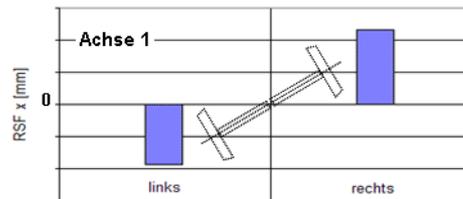
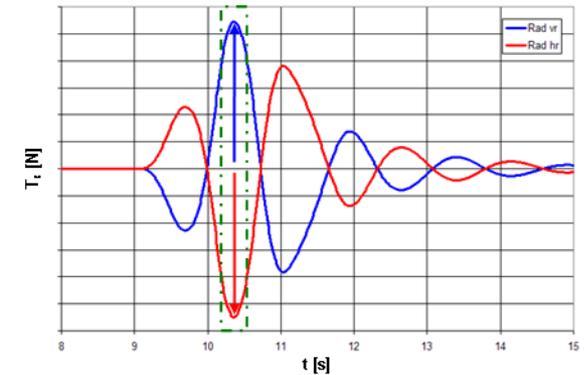
Verlauf der Längsreibkräfte T_x - links



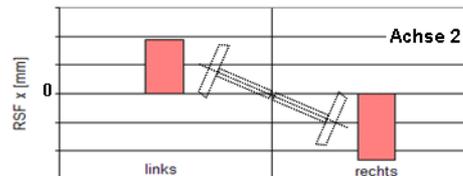
Momentaufnahme der Längsreibkräfte T_x



Verlauf der Längsreibkräfte T_x - rechts



Längswege in der Radsatzführung



Fahrdynamik

Drehgestellkonzepte: Verschleißverhalten im Bogen

In engen Bögen kann mit konventionellen Drehgestellbauformen grundsätzlich weder die Abroll- noch die Einstellbedingung erfüllt werden.

- Eine Verletzung der Einstellbedingung führt aufgrund der auftretenden Anlaufwinkel zu hohen Querreibkräften zwischen Rad und Schiene.
- Eine Verletzung der Abrollbedingung bedingt durch die Berührgeometrie führt aufgrund einer Drehzahlkopplung zwischen rechtem und linkem Rad eines konventionellen Radsatzes zu großen Längsreibkräften zwischen Rad und Schiene.

Fazit:

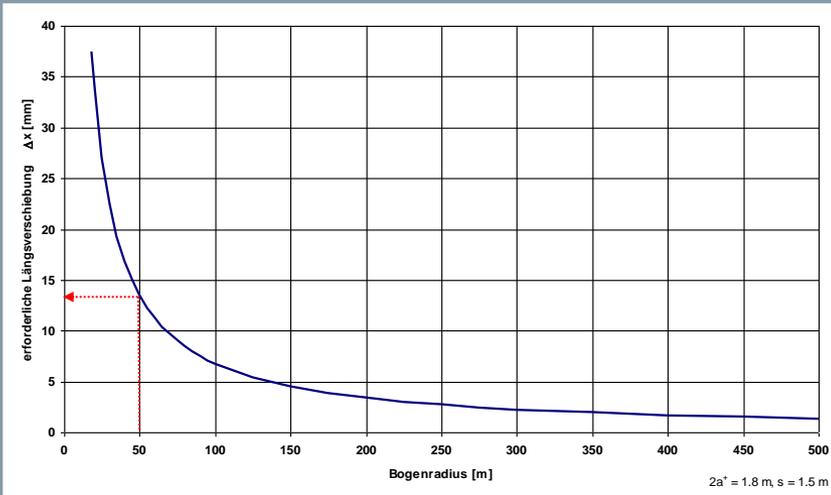
Aufgrund der nicht relevanten Abrollbedingung zwischen rechter und linker Drehgestellseite weist der „Längsradsatz“ gegenüber einem „konventionellen Radsatz“ in engen Bögen Vorteile in Punkto Bogenwiderstand auf. Dies wiederum hat Auswirkungen auf Energiebedarf, Geräusch-Emissionen sowie den Rad/Schiene–Verschleiß.

Fahrdynamik

Grundsätzliche Kriterien im Bogen

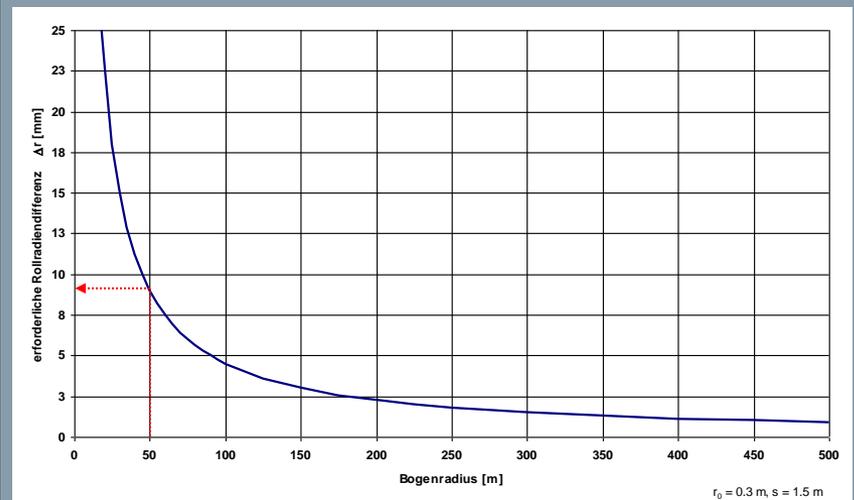
Einstellbedingung - Δx

erforderliche Längsverschiebung der Räder für radiale Stellung der Radachsen



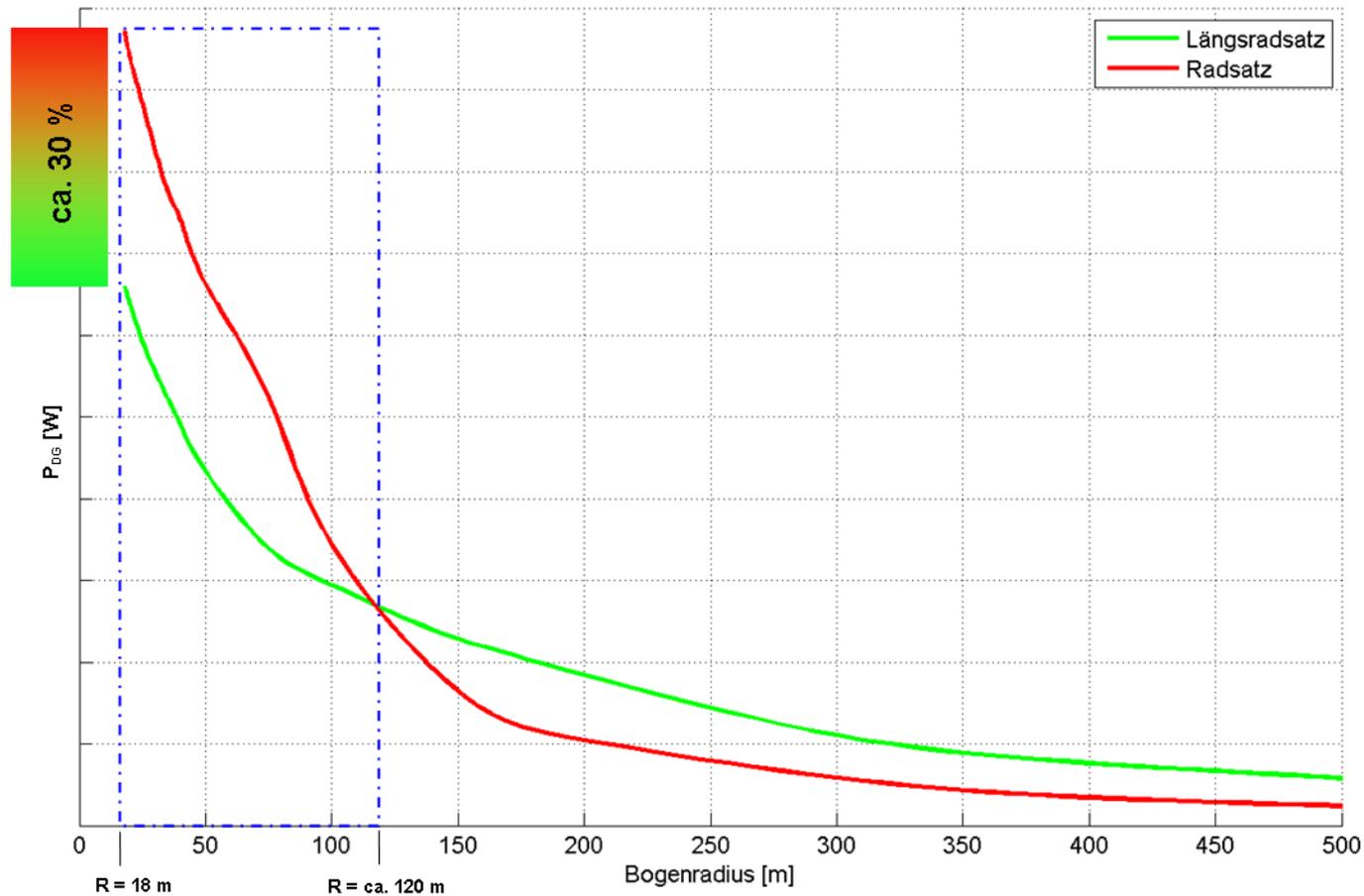
Abrollbedingung - Δr

erforderliche Differenz der Rollradien für optimales Abrollen



Fahrdynamik

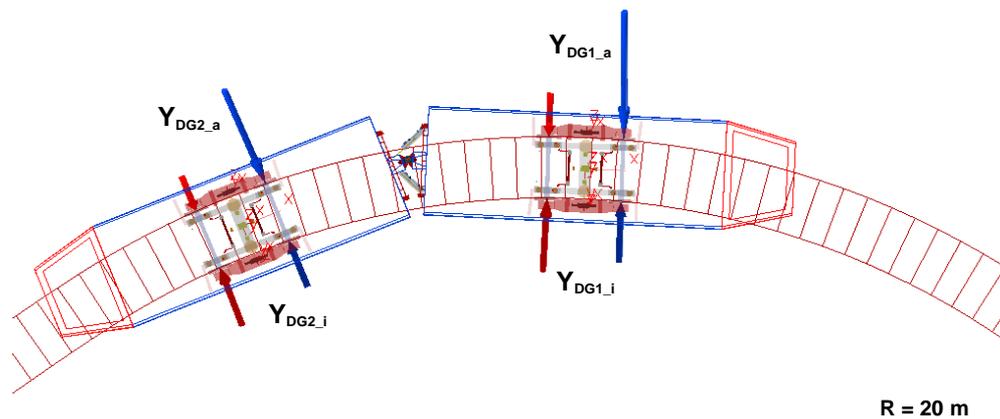
Drehgestellkonzepte: Verschleißverhalten im konstanten Bogen



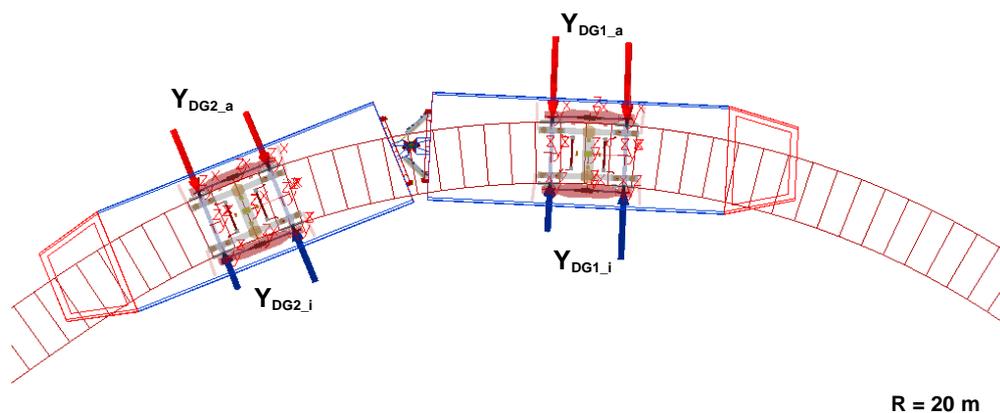
Auswertebereich: Konstanter Bogen

Fahrdynamik

Drehgestellkonzepte: Führungskräfte im konstanten Bogen



Konventioneller Radsatz



„Längsradsatz“

Fahrdynamik

Parameter: Ungefederte Masse

Die ungefederte Masse im Drehgestell hat einen wesentlichen Einfluss auf die Vertikaldynamik zwischen Rad und Schiene und somit auf die Geräuschemissionen und Oberbaubelastung.

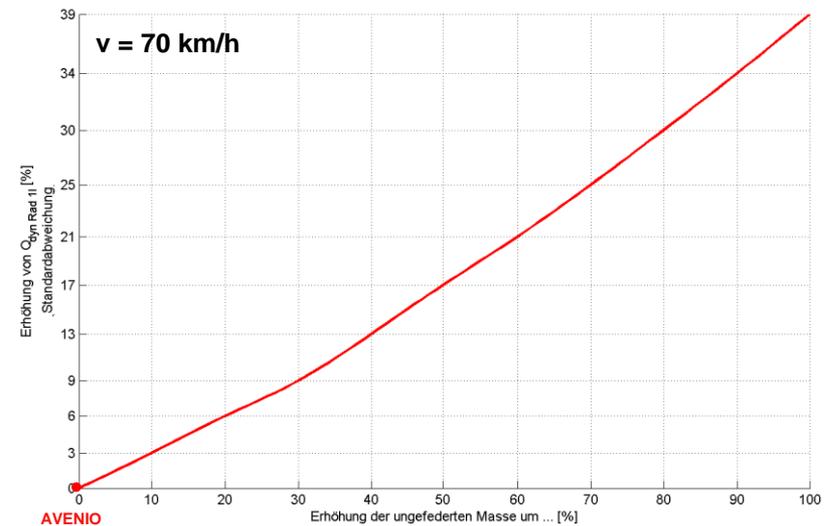
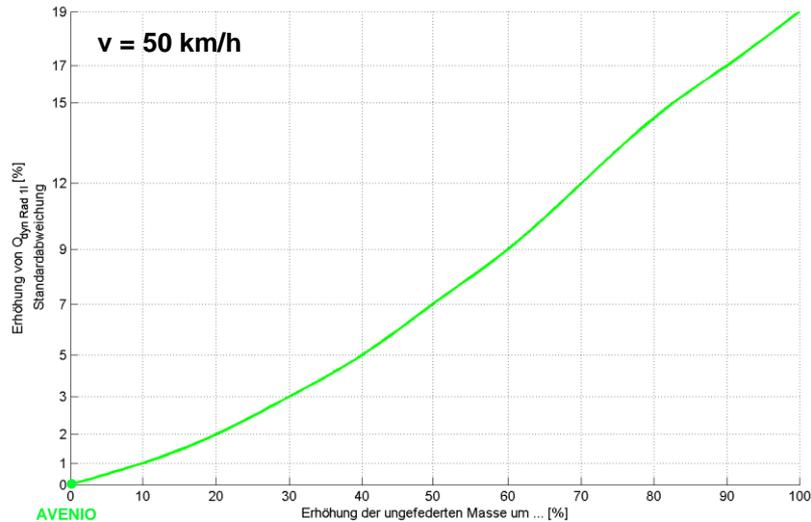
Das resultierende Kraftniveau wird maßgeblich durch die Fahrgeschwindigkeit und die Qualität der Gleislage beeinflusst.

- Eine Erhöhung der ungefederten Masse führt zu einem Anstieg der dynamischen Rad/Schiene-Kräfte.
- Zusätzlicher Einfluss des Massenträgheitsmomentes um die Längsachse aufgrund einer Querhöhen-Anregung aus der Gleislage.

Eine ungünstige Verteilung der ungefederten Masse führt zu einer zusätzlichen Erhöhung des Massenträgheitsmomentes und in der Folge zu einem Anstieg der dynamischen Rad/Schiene-Kräfte.

Fahrdynamik

Parameter: Ungefederte Masse – Standardabweichung von Q_{dyn} .



Fahrdynamik

Parameter: Drehgestell-Anlenkung

Untersuchungen am Fahrzeugkonzept Avenio führten zu folgenden Schlussfolgerungen:

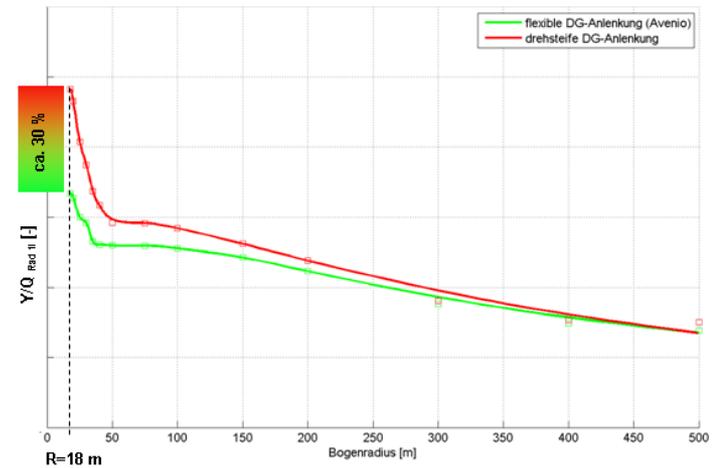
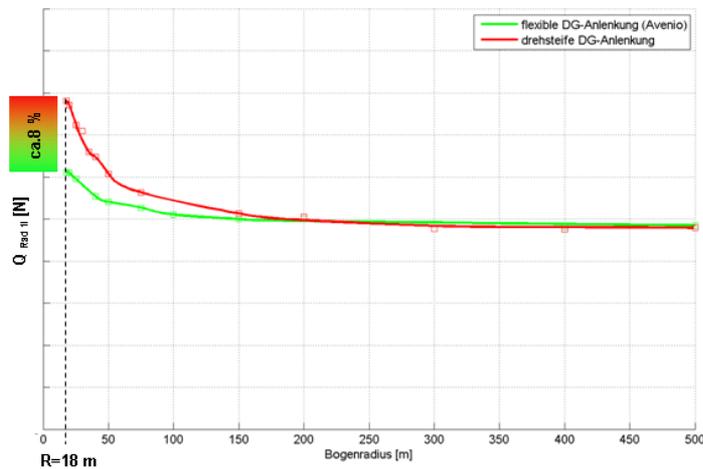
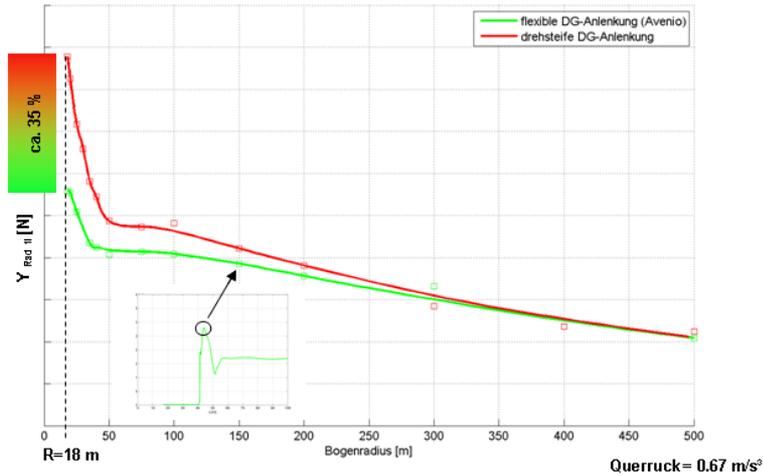
Im Vergleich zu einer flexiblen Anbindung führt eine drehsteife Anlenkung der Drehgestelle aufgrund der Massenträgheit des Wagenkastens - vor allem bei Bogeneinfahrt - zu erhöhten Reaktionskräften zwischen Rad und Schiene.

Fazit:

- höheres Niveau der Führungskräfte
- verminderte Sicherheit gegen Entgleisen
- erhöhter Verschleiß zwischen Rad und Schiene
- erhöhte Kräfte in den relevanten Koppелеlementen (Drehgestell-Anlenkung ...)
- höhere Querbeschleunigungen im Wagen (Querkomfort)

Fahrdynamik

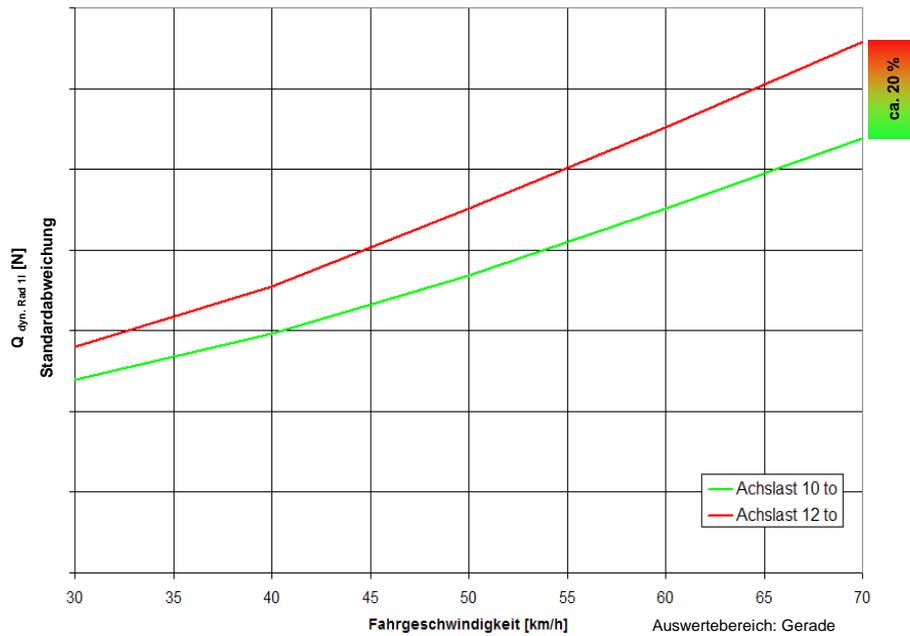
Parameter: Drehgestell-Anlenkung – Rad/Schiene-Kräfte bei Bogeneinfahrt



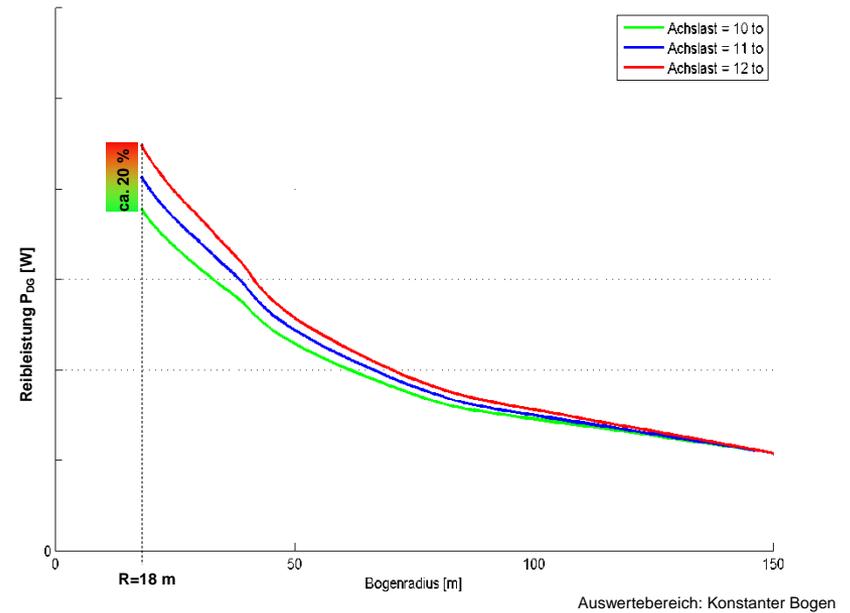
Fahrdynamik

Parameter: Achslast – Vertikaldynamik, Verschleißverhalten

Dynamische Q-Kräfte in der Geraden



Reibleistung im Bogen



Vom Combino zum Avenio

Die Leichtbauziele der Avenio Plattform

- Beanspruchungsgerechtere Auslegung der Struktur durch genauere Lastannahmen und Bauteilkennwerte
- Größere Fahrgastnutzfläche durch Optimierung Schnittstelle Drehgestell/Wagenkasten
- Ersatz Alu- durch Stahlrohbau mit gleichbleibender Radlast durch Konzeptleichtbau
- Reduzierung der dynamischen Radkräfte durch modifizierten Hohlwellenantrieb und veränderter Schwerpunktlagen
- Reduzierung der Spurführungskräfte durch Drehgestell und Längsradatz (Leichtbau durch Funktionsintegration)
- Durch Einhaltung der 100 kN Radsatzlast Verbleib im Erfahrungsraum für Instandhaltungsaufwendungen Oberbau Straßenbahn

Vom Combino zum Avenio

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

