

Schienenfahrzeuge und ihre Komponenten

Schulung für das DMG-Einführungsseminar

Prof. Dr. Raphael Pfaff


Fachhochschule Aachen



- Meine Studierenden waren 2019 bis 2021 Europameister im Parkbahn bauen.
- Ich arbeite an einer Rückfahrkamera für Güterzüge.
- Ich (und ein von mir verantwortetes Produkt) war für ein Wochenende Schienenersatzverkehr in einer Großstadt verantwortlich.
- Ich kann Bremsanschriften lesen.
- Hintergrund:
 - Regelungstechnik, Mathematik, Mechatronik
 - Bremse und Kupplung (Wabtec Faiveley)



pfaff@fh-aachen.de
raphaelpfaff.net



Wie werden Schienenfahrzeuge definiert und was macht sie aus?

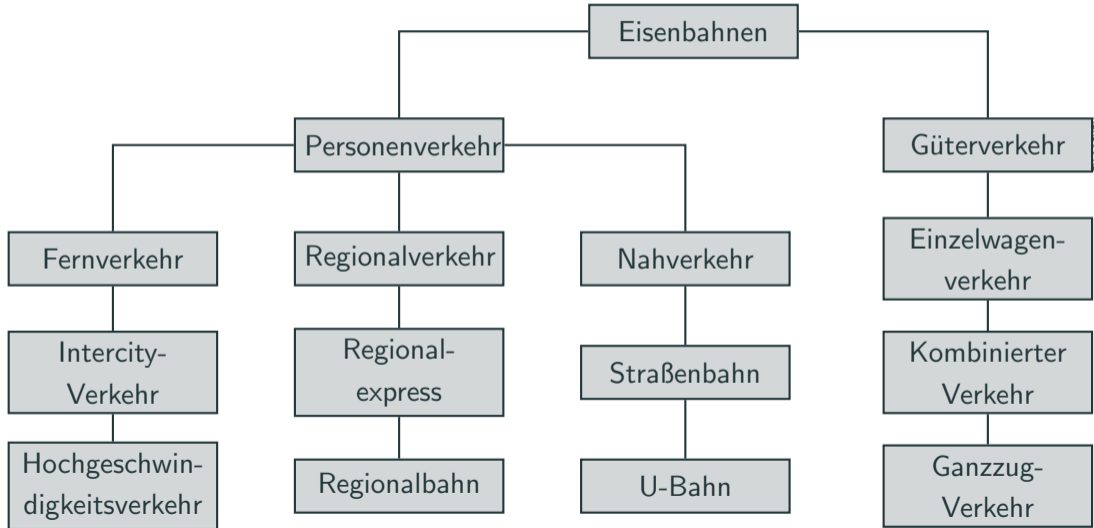
Definition (Schienenfahrzeuge)

Spurgebundene Fahrzeuge, die auf mit Spurkranz versehenen Rädern auf Gleisen, die aus Schienen einer bestimmten gleichbleibenden Spurweite gebildet sind, geführt und getragen werden.

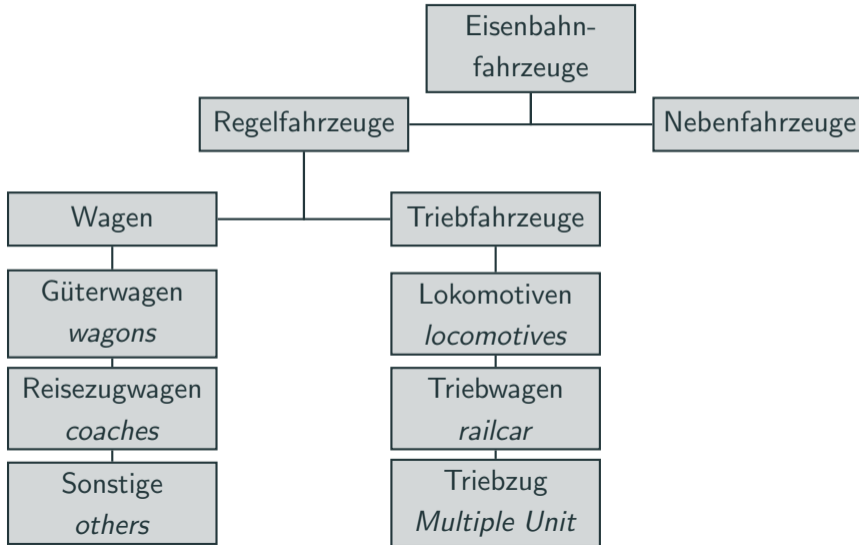
Unterscheidung:

- Eisenbahnfahrzeuge (gemäß AEG und EBO/ESBO)
- Strassenbahnen (gemäß PBefG und BOSTRAB)
- Nicht öffentliche Bahnen (z.B. Werksbahnen) (gemäß BOA und EBOA)

Systematik des Eisenbahnverkehrs



Systematik der Eisenbahnfahrzeuge



Merkmale der Schienenfahrzeuge (teilweise nach Schindler (2014))

	Straßenbahn	Stadtbahn	U-Bahn	S-Bahn	XMU CR	XMU HST
Gleis	Im Straßenraum	Großteil eigener Gleiskörper	Eigener Gleiskörper	Vollbahngleis	Vollbahngleis	Vollbahngleis, z.T. HGV-Trassen
Bogenradius	≥ 15 m	≥ 25 m	≥ 90 m	≥ 180 m	≥ 625 m	≥ 1800 m
Zugsicherung	Sicht	Sicht/Signale	Signale	Signale	Signale	Führerstands-signalisierung
Haltestellenabstand	(300 ... 600) m	(500 ... 800) m	(500 ... 1000) m	(750 ... 3000) m	(3 ... 20) km	$\gg 20$ km
v_{max}	70 km/h	100 km/h	100 km/h	140 km/h	≤ 189 km/h	≥ 190 km/h
a_{max}	$\leq 1.5 \frac{m}{s^2}$	$\leq 1.5 \frac{m}{s^2}$	$\leq 1.3 \frac{m}{s^2}$	$\leq 1.15 \frac{m}{s^2}$	$\leq 1.15 \frac{m}{s^2}$	$\leq 1.15 \frac{m}{s^2}$
$F_{L,test}$	≤ 300 kN	≤ 600 kN	≤ 800 kN	≤ 1500 kN	≤ 1500 kN	≤ 1500 kN

- XMU: Triebzüge, unabhängig von der Antriebsart (z.B. EMU, HMU, ...)
- CR: Conventional rail (in Abgrenzung zum Hochgeschwindigkeitsverkehr)
- HST: Hochgeschwindigkeitsverkehr

Bottom up - warum machen wir das überhaupt?

- Streckenwiderstand, z.B.
 - Neigungswiderstand
 - Bogenwiderstand
- Zugwiderstände
 - Rollwiderstand ($\propto 1$)
 - Aus Radverformung
 - Lagerwiderstand ($\propto 1$)
 - Radsatzlager
 - Dynamischer Widerstand ($\propto v$)
 - Sinuslauf
 - Luftwiderstand ($\propto v^2$)

Übliche Gleichungen

Nach Strahl (für Güterzüge):

$$f_{WW} = 1,6\text{‰} + 5,7\text{‰} \left(\frac{v}{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right)^2 \quad (1)$$

Nach Sauthoff (für Personenzüge (n_W Wagen, m_Z Zugmasse)):

$$f_{WW} = 1,6\text{‰} + 0,25\text{‰} \left(\frac{v}{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right) + \frac{683 \text{ N}(2,7 + n_W)}{m_Z g} \left(\frac{v + 12 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right)^2 \quad (2)$$

¹Ausführlicher im Teil Fahrdynamik von Dr. Huber.

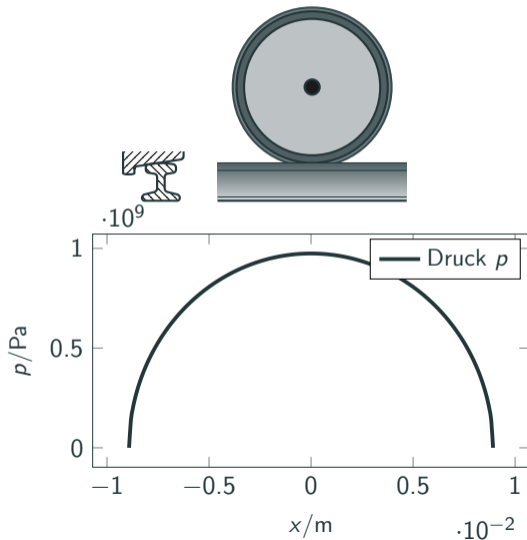
Rad-Schiene-Kontakt

- Näherung nach Hertz:
 - Zwei Zylinder
 - Winkel 90°
- Länge der Halbachsen a ,
 b nach Hertz'scher
Pressung
- Radaufstandskraft Q

$$p = p(x, y) = p_{\max} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}$$

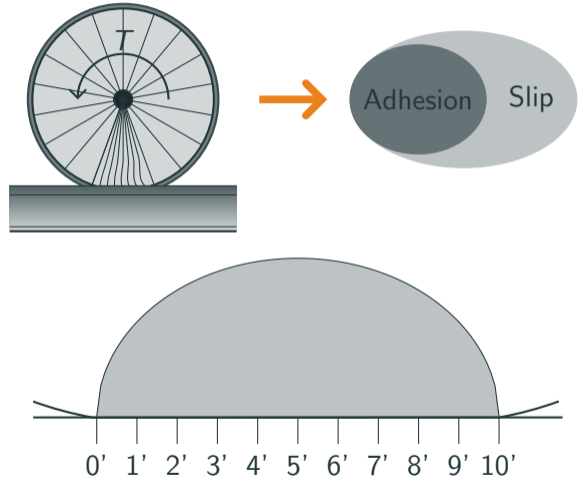
mit

$$p_{\max} = \frac{3}{2\pi ab} Q$$



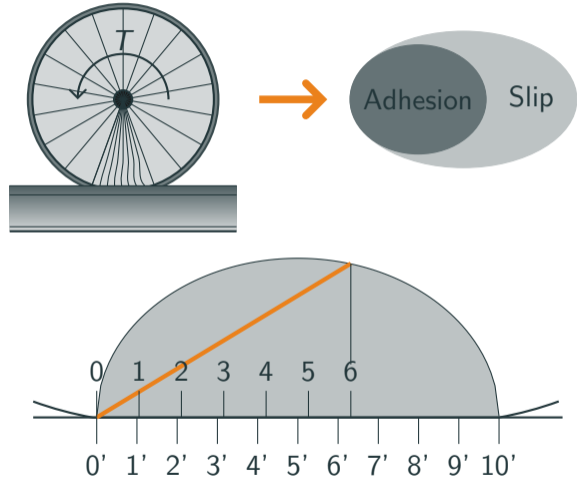
Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt

- Durch Drehmoment aus Antrieb oder Bremse:
 - Aufbau von Tangentialspannung
- Linear steigend
 - Steigung abhängig von Drehmoment
- Bei Überschreiten der übertragbaren Kraft: Schlupf
 - Mikroschlupf - reversibel
 - Makroschlupf - irreversibel



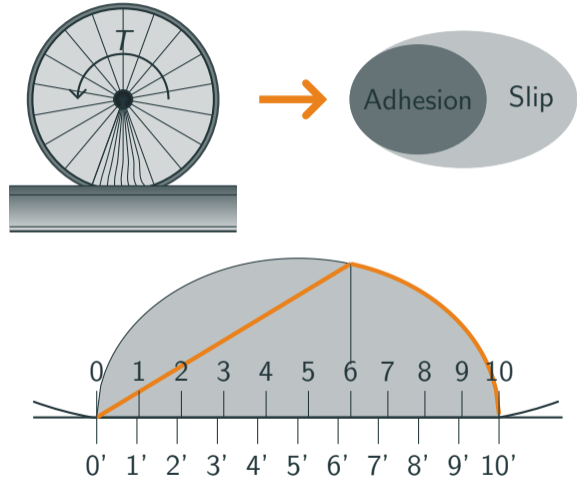
Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt

- Durch Drehmoment aus Antrieb oder Bremse:
 - Aufbau von Tangentialspannung
- Linear steigend
 - Steigung abhängig von Drehmoment
- Bei Überschreiten der übertragbaren Kraft: Schlupf
 - Mikroschlupf - reversibel
 - Makroschlupf - irreversibel



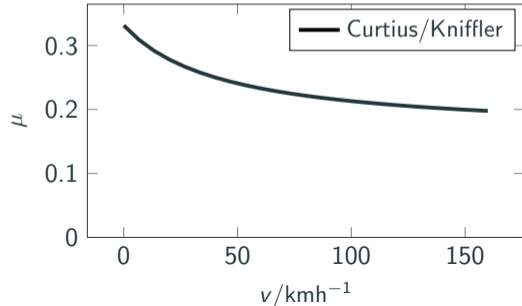
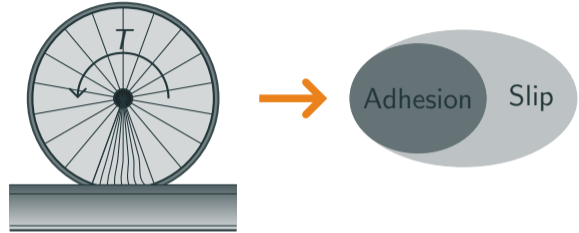
Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt

- Durch Drehmoment aus Antrieb oder Bremse:
 - Aufbau von Tangentialspannung
- Linear steigend
 - Steigung abhängig von Drehmoment
- Bei Überschreiten der übertragbaren Kraft: Schlupf
 - Mikroschlupf - reversibel
 - Makroschlupf - irreversibel



Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt

- Durch Drehmoment aus Antrieb oder Bremse:
 - Aufbau von Tangentialspannung
- Linear steigend
 - Steigung abhängig von Drehmoment
- Bei Überschreiten der übertragbaren Kraft: Schlupf
 - Mikroschlupf - reversibel
 - Makroschlupf - irreversibel





Und wie bleibt der Zug in der Spur?

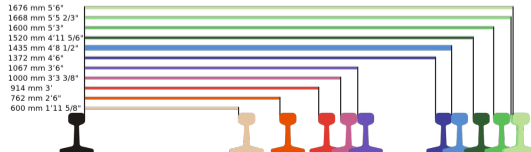
- Regelspur: 1435 mm
- Breitspur
 - Russische Spur: 1520 mm
 - Indische Spur: 1676 mm
 - Iberische Spur: 1668 mm
- Schmalspur
 - Kapspur: 1067 mm
 - Meterspur: 1000 mm

Definition (Spurweite)

Die Spurweite ist der Abstand der Schienen zueinander, gemessen ($14,5 \pm 0,5$) mm unterhalb der Schienenoberkante.

Definition (Spurweitentoleranz)

Abhängig von Netz und Strecke ist die Spurweite toleriert, üblich in Deutschland: (1435^{+35}_{-5}) mm.



Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes

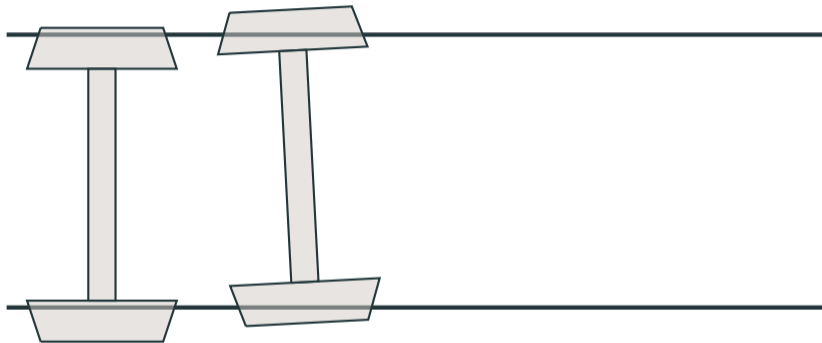


Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes



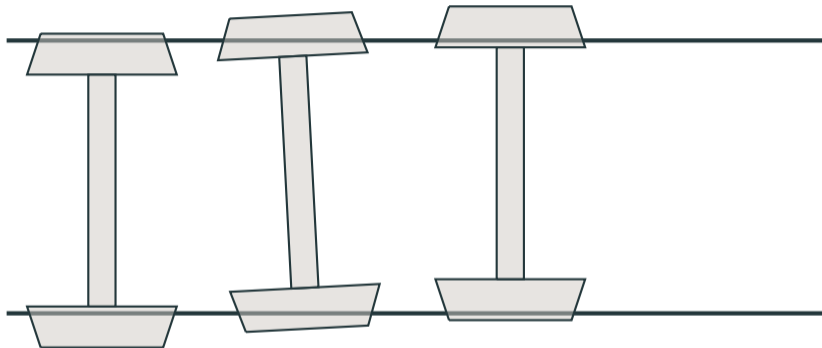
- Kegeliges Radprofil führt zu unterschiedlichen Laufkreisradien $R > r$.
- Durch die Differenz der Laufkreisradien wird der Radsatz ausgelenkt

Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes



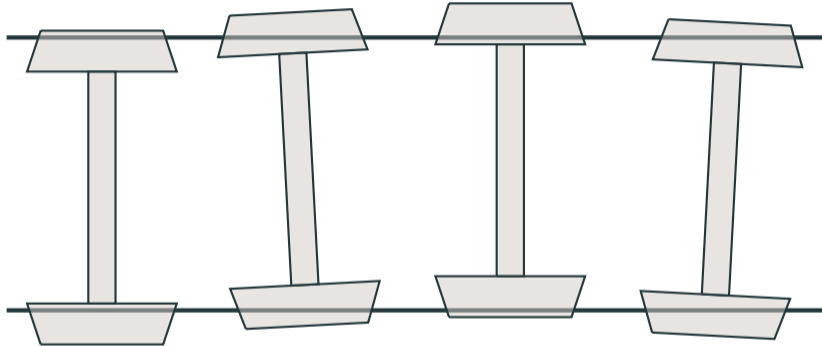
Der Prozess wiederholt sich...

Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes



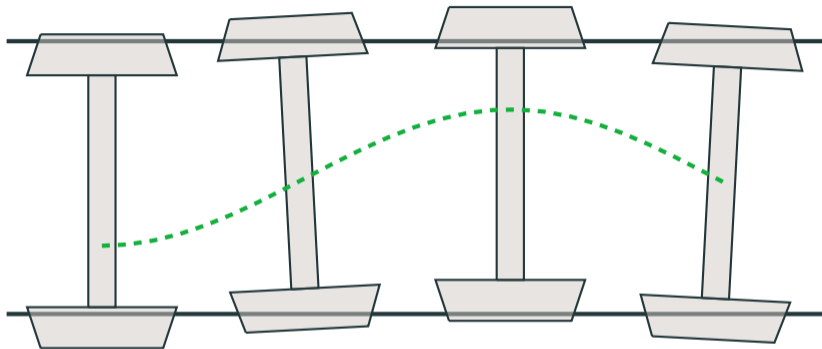
Der Prozess wiederholt sich...

Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes



Der Prozess wiederholt sich...

Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes



Der Prozess wiederholt sich und es gilt für die Eigenkreisfrequenz Ω nach Klingel

$$\Omega^2 = \frac{v^2 \tan \gamma}{br}$$

mit Laufkreisradius r , Spurweite $2b$ und Kegelwinkel γ .

Worauf kommt es bei diesen einfachen Wagen an?

- Größte Gruppe an Fahrzeugen
- Universalwagen
 - Standardisierte Verkehre
 - z.B. Flachwagen
- Sonderbauart
 - Bestimmte Verkehre
 - z.B. Containertragwagen (natürlich auch sehr universell!), Pkw-Transportwagen
- Anspruchsvoll trotz einfacher Technik

Regelbauart:

E	offene Wagen
G	gedeckte Wagen
K	Flachwagen (2 RS)
O	gemischte Offen-Flachwagen
R	Drehgestell-Flachwagen



Gattungsbezeichnung kommuniziert Typ und Ausstattungsmerkmale.

- Festigkeit gemäß EN12663-2
- Integrität: bewegliche Teile sind gegen Positionsänderungen gesichert
- Begrenzungslinie abhängig vom Zielprofil
- Radsatzlast gemäß EN 15228
- Kompatibilität mit Gleisfreimeldeanlagen
- Zustandsüberwachung der Radsatzlager
- Laufsicherheit
 - Sicherheit gegen Entgleisen unter Gleisverwindung
 - Dynamisches Verhalten gem. EN14363 oder mittels validiertem Modell
- Laufwerk

Anforderungen an Güterwagen gemäß WAG TSI ii

- Festigkeit gemäß EN13749
- Forderungen an Radsätze und Räder gemäß WAG TSI
- Bremse
 - Sicherheitsbetrachtung gemäß Common Safety Methods (CSM, (EG) Nr. 352/2009)
 - Bremsleistung
 - Feststellbremse
- Umgebungsbedingungen
 - T1: -25 °C bis +40 °C
 - T2: -40 °C bis +35 °C
 - T3: -25 °C bis +45 °C
 - Schnee, Eis und Hagel gemäß EN50125-1
- Brandschutz

- Für einige Elemente (Interoperabilitätskomponenten) wird von einer EG-Konformität ausgegangen:
 - Einachsige Laufwerke: Doppelschakenaufhängung, Niesky 2, S 2000
 - Drehgestelle mit zwei Radsätzen: Y25-Familie, zweiachsiges Lenkdrehgestell
 - Dreiachsige Drehgestelle mit Schakenaufhängung



Doppelschakenaufhängung



Y25-Drehgestell

Personenverkehr verkauft Quality Time – wie kann das
gelingen?

- Umsetzung als Wagen oder Triebzug
- Wichtige Aspekte:
 - Inneneinrichtung und Grundriss
 - Zugang
 - Ausstattung
 - Energieversorgung
 - Fahrkomfort (Fahrzeuglauf)
 - Fahrgastströme
 - Reisegeschwindigkeit
- In verschiedenen Kulturen unterschiedliche Akzeptanz des Bahnverkehrs!

A developed country is not a place where the poor have cars. It's where the rich use public transportation. - Enrique Peñalosa, former mayor of Bogotá

- Unterschiedliche Bedürfnisse in den verschiedenen Verkehrsarten
- Häufig sehr detailliert Inhalt von Verkehrsausschreibungen im Nahverkehr
 - Transportmöglichkeiten (Fahrrad, Kinderwagen, Rollstühle,...)
 - Sitzplätze, Tische
 - Überwachungssysteme (CCTV)
- Einstieg
 - Fernverkehr: Wagenende
 - Regional-, Nahverkehr: Dritteinstieg (oder häufiger)
- Sitzanordnungen
 - Abteil: 4, 5, 6 Sitze je Abteil, Seitengang
 - Großraum: i.d.R. 3 oder 4 Sitzplätze je Reihe, Mittelgang
- Sitzplatzanzahl: Effizienz dominiert

- Definition People with reduced mobility
 - Personen, die mit der Nutzung von Eisenbahnen (Fahrzeuge und Infrastruktur) Schwierigkeiten haben
- Außentür mit Kontrast zum Fahrzeug
- Zustiegshilfe
- Verfügbarkeit von Haltegriffen, Vorrangsitzen (10%)
- Rollstuhlplätze: 1 ($L_{Zug} < 30$ m) bis 4 ($L_{Zug} > 300$ m)
- Unversaltoilette
- Fahrgastinformation:
 - Piktogramme (max. 5 zusammen)
 - Taktile Informationen
 - Displays etc. von 51% der Fahrgastplätze und allen Rollstuhlplätzen lesbar

Türen und Türsteuerung

- Wichtige Aspekte:
 - Öffnungsweite
 - Druckertüchtigung
 - Sicherheit
- Bauarten:
 - Drehfalttür
 - Schwenkschiebetür in verschiedenen Bauarten
- Türsteuerung:
 - Verschiedene Verfahren (Automatisierung):
 - Türsicherung
 - TB 0:
 - SAT: Selbstabfertigung durch Tf
 - TAV: Technikbasiertes Abfertigungsverfahren




Wikimedia/LosHawlos



Wikimedia/Lief_Jörgensen

- Ausführungen:
 - Heute dominierend: elektrische Energieversorgung
 - Noch im Bestand: Dampf/elektrische Heizungen, Ölheizungen
 - Für Kühlung: Kühlmittel- und Kaltluftanlagen
- Aufgaben:
 - Belüftung: benötigte Luftmenge zuführen
 - Klimatisieren: Innenraumtemperatur auf bestimmtem Niveau halten
- Herausforderungen:
 - Große Fahrzeugflächen und -scheiben
 - Hohe, schwankende Personenzahlen
 - Installationsraum
 - Türöffnung
 - Feuchtigkeitszufuhr (nasse Reisende)
 - Zugfreiheit

- Aufgaben:
 - Information des Reisenden: Zuglauf, nächster Halt, etc.
 - Kommunikation (betrieblich und öffentlich, Mobilfunk-Repeater, WLAN, ...)
 - Unterhaltung
 - Kommunikation im Notfall (Notbremsanforderung)
- Umsetzung:
 - Anzeigen
 - Elektroakustische Anlage (ELA)



S21		Lausanne		voie 70	
Arrivée 19:36					
Correspondances			voie	Remarques	
	qui				
19:40	3	Belleaux			
19:40		Sallaz			
19:41	1	Blécherette			
19:42	IC	Genève-Aéroport Gare	5	Retard env. 4'	
19:42	RE	Romont Paléol	1	Retard env. 4'	
19:43		Croisettes			
19:43		Ouchy			
19:45	ICV	St. Gallen Hofwilen - Olten - Zollikofen	8		



Worauf kommt es bei der Konstruktion der Wagenkästen an?

Konstruktionsprinzipien der Wagenkästen

Differenzialbauweise

- Fertigung aus Halbzeugen:
 - Einzelteile einfach geformt
 - Formgebung durch Fügen und Umformen

Integralbauweise

- Fertigung aus komplex geformten Elementen:
 - z.B. Strangpressprofile
 - Formgebung durch Fügen und Zerspanen

Tragfunktion

- Tragendes Untergestell
- Selbsttragender Wagenkasten



© Siemens Pressebild

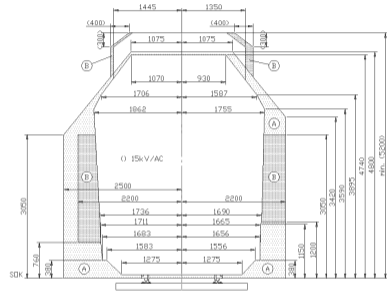


© Siemens Pressebild

Differenzial- (oben) und
Integralbauweise

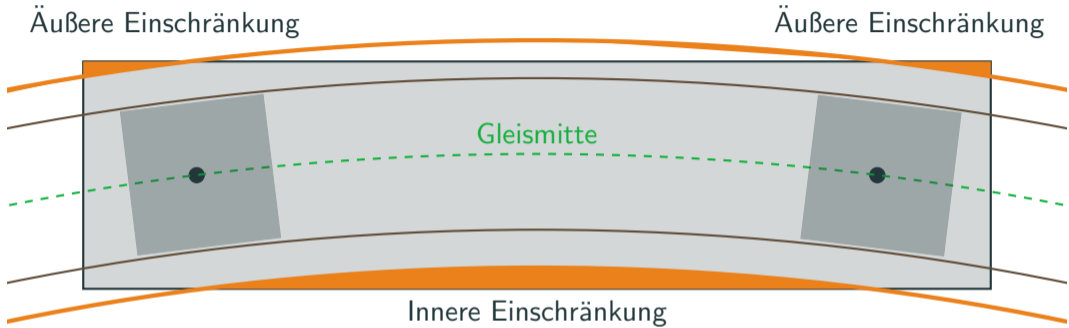
Lichtraumprofil streckenseitig

- Streckenseitiges Lichtraumprofil muss berücksichtigen
 - Beladungszustände
 - Dynamische Bewegungen:
 - Ein-/Ausfedern
 - Wanken
 - Nicken
 - Bogenfahrt
 - Kompatibilität mit anderen Fahrzeugen
- Deutsches Regelprofil: G2
- Europäisch: G1
- Betrieblich Lademaßüberschreitungen möglich



Lichtraumprofil G2 gemäß EBO

Breiteneinschränkung



Anforderungen an den Wagenkasten

- Festigkeit (EN 12663):
 - Zug-/Druckkräfte im Zugverband
 - Crash-Szenarien (EN 15227)
 - Druckstöße, Druckdichtigkeit
- Kunden-/ betriebliche Anforderungen
 - Lebensdauer
 - Reparaturfreundlichkeit, Ersatzteilverfügbarkeit
 - Geringe Masse
 - Entsorgung/Recycling
- Normative/gesetzliche Anforderungen
 - Brandschutz (DIN 5510, EN 45545, ...)
 - Material (EG 1907/2006 REACH)
- Systemimmanente Anforderungen (Schwingungen, elastische Verformung,...)

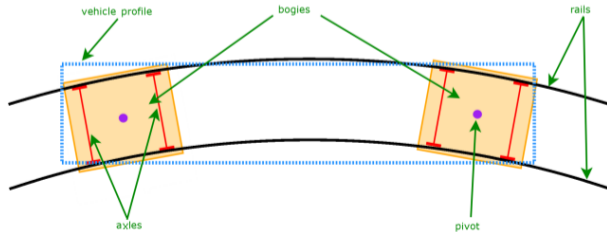
Laufwerk (Fahrwerk)

Worauf müssen wir beim Laufwerk achten?



Grundsätzliche Anforderungen

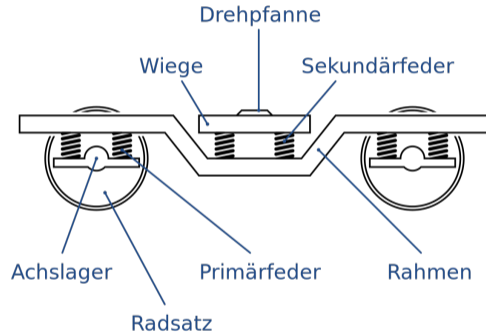
- Übertragung und Ausgleich der Vertikallasten zwischen Rad und Schiene
- Spurführung des Fahrzeugs
- Übertragung und Begrenzung der dynamischen Kräfte, z.B. aufgrund von:
 - Gleislagefehlern
 - Dynamik zwischen den Fahrzeugen
- Wirksame Dämpfung von angeregten Schwingungen
- Übertragung von Traktions- und Bremskräften



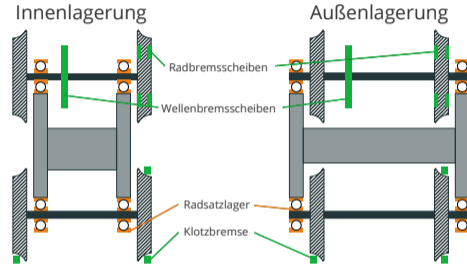
Christophe Jacquet

Anatomie der Eisenbahndrehgestelle

- Radsätze
- Räder
- Radsatzlager
- Radsatzaufhängung (Primärfederung)
 - Federn
 - Dämpfer
- Begrenzungen und Anschläge
- Wagenkastenbindung (Sekundärfederung)
 - Verschiedene Ausführungen
- Drehgestellrahmen



- Unterscheidung:
 - Innen-/Aussenlagerung
 - Bremse
 - Klotzbremse
 - Radbremsscheibe
 - Wellenbremsscheibe
 - Antriebe
 - Symmetrisch
 - Asymmetrisch



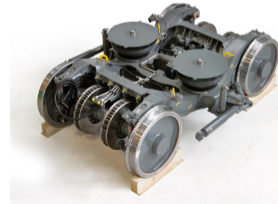
Verbindung Drehgestell - Wagenkasten

- **Tragen (z-Richtung)**
 - Schraubenfedern
 - Luftfedern
 - Flexicoilfedern
 - Evtl. mit Gleitplatte
- **Führen (y-Richtung)**
 - Drehpfanne
- **Antreiben und Bremsen (x-Richtung)**
 - Drehpfanne
 - Evtl. Zugstange o. vgl.
- **Stabilisierend:**
 - Wankstütze
 - Schlingerdämpfer



Manuel Schneider

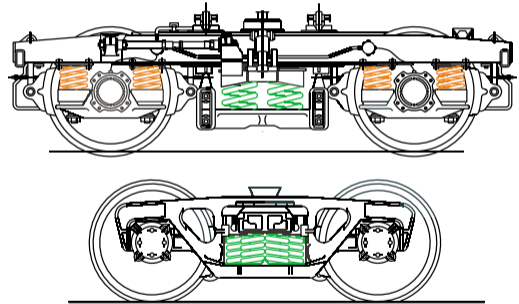
Drehpfanne



©Siemens Pressebild

Luftfedern

- Üblich: zweistufige Federung
 - **Primärstufe:**
 - Radsatz gegen Drehgestellrahmen
 - Beschleunigung bis 100 g
 - **Sekundärstufe:**
 - Drehgestellrahmen gegen Fahrzeug
 - Hohe Anforderungen an Dämpfung
- Bei Güterwagen auch einstufige Federung



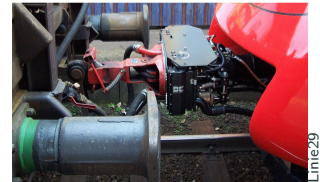
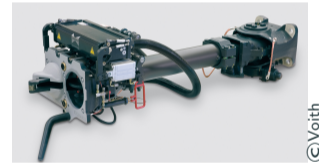
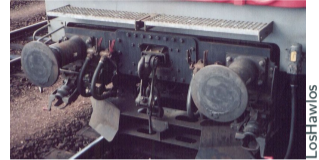
Zug- und Stoßeinrichtung



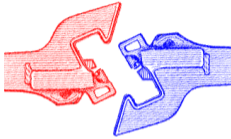
Und wie machen wir daraus einen Zug?

Aufgaben und Bauarten

- Aufgaben:
 - Zugintegrität
 - Transfer von Signalen, Daten und Energie
 - Energieabsorption
 - Kuppelstoß
 - Crash
- Bauarten:
 - Betrieblich zu kuppeln
 - Zughaken und Seitenpuffer
 - Automatikkupplung
 - Betrieblich nicht trennbare Einheiten
 - Kurzkupplung
 - Abschleppkupplung
 - Rangierkupplung



(Einige) Kupplungstypen



SA 3 (Willison)



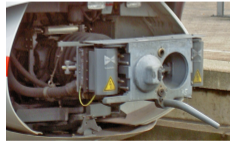
AAR Type E (Janney)



APTA Type H



Albert



Scharfenberg Typ 10



BSI COMPACT

Quellen: Dimitry Sutyagin, Daniel Schwen, LosHawlos, Chris McKenna (2), Robbie aka Zoqaeski (alle Wikimedia)

Joachim Ihme. *Schienenfahrzeugtechnik*. Springer, 2019.

Simon Iwnicki, editor. *Handbook of railway vehicle dynamics*. CRC Press, 2006.

Jürgen Janicki, Horst Reinhard, and Michael Rüffer. *Schienenfahrzeugtechnik*. Bahn Fachverlag, 2013.

Joost J Kalker. *Three-dimensional elastic bodies in rolling contact*, volume 2. Springer Science & Business Media, 2013.

Klaus Knothe and Sebastian Stichel. *Schienenfahrzeugdynamik*. Springer-Verlag, 2003.

Christian Schindler, editor. *Handbuch Schienenfahrzeuge*. Eurailpress, 2014.

Maksym Spiryagin, Colin Cole, Yan Quan Sun, Mitchell McClanachan, Valentyn Spiryagin, and Tim McSweeney. *Design and simulation of rail vehicles*. CRC press, 2014.

Dietrich Wende. *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*. Vieweg und Teubner, 2003.