

# Schienenfahrzeuge und ihre Komponenten

Schulung für das DMG-Einführungsseminar

Prof. Dr. Raphael Pfaff



## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Einführung</b>	<b>3</b>
<b>2 Grundlagen</b>	<b>5</b>
<b>3 Spurführung</b>	<b>8</b>
<b>4 Güterwagen</b>	<b>10</b>
<b>5 Personenfahrzeuge</b>	<b>13</b>
<b>6 Fahrzeugkonstruktion</b>	<b>17</b>
<b>7 Laufwerk (Fahrwerk)</b>	<b>20</b>
<b>8 Zug- und Stoßeinrichtung</b>	<b>23</b>

# 1 Einführung



Hier bekommt ihr eine kleine Einführung, eine zentrale Definition (auf die wir später zurückgreifen werden) und ein wenig Systematik sowie Werte wichtiger Parameter.

Als weiterführende Literatur empfehle ich euch Schindler (2014), Iwnicki (2006) und Spiryagin et al. (2014).

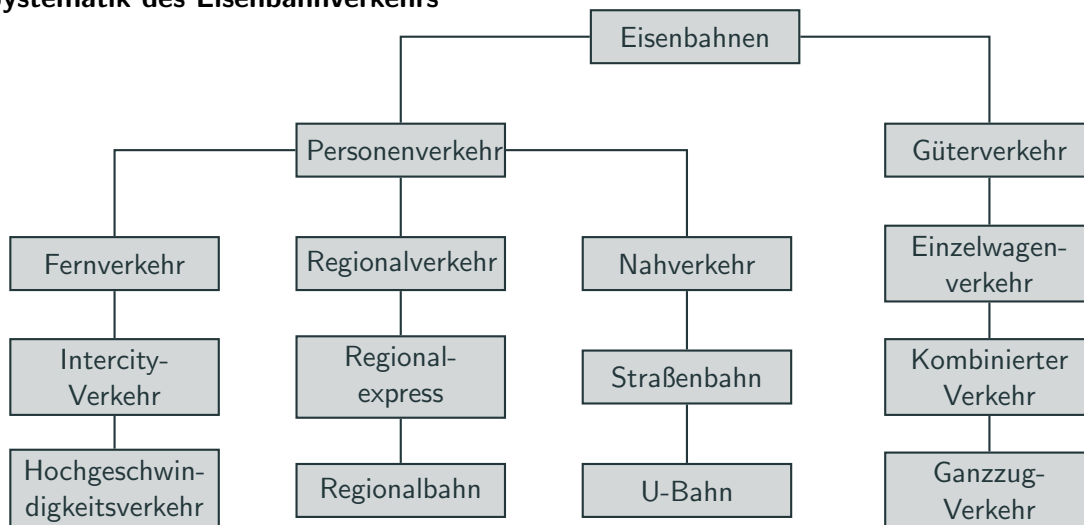
## Definition Schienenfahrzeug

**Definition 1** (Schienenfahrzeuge). Spurgebundene Fahrzeuge, die auf mit Spurkranz versehenen Rädern auf Gleisen, die aus Schienen einer bestimmten gleichbleibenden Spurweite gebildet sind, geführt und getragen werden.

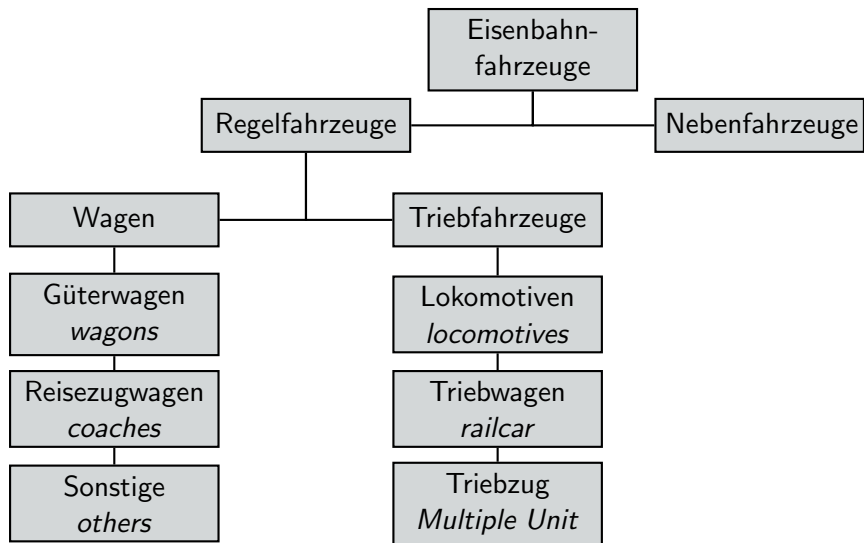
Unterscheidung:

- 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
Halte-stellen-abstand	(300 ... 600) m	(500 ... 800) m	(500 ... 1000) m	(750 ... 3000) m	(3 ... 20) km	≫ 20 km
$v_{max}$	70 km/h	100 km/h	100 km/h	140 km/h	≤ 189 km/h	≥ 190 km/h
$a_{max}$	≤ 1.5 $\frac{m}{s^2}$	≤ 1.5 $\frac{m}{s^2}$	≤ 1.3 $\frac{m}{s^2}$	≤ 1.15 $\frac{m}{s^2}$	≤ 1.15 $\frac{m}{s^2}$	≤ 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

## 2 Grundlagen



Die Leitfrage im Vortrag war *Bottom up - warum machen wir das überhaupt?* - viele der Vorteile der Schienenfahrzeuge sind ganz unten, im Rad-Schiene-Kontakt zu finden.

Zum Fahrwiderstand hat Wende (2003) viel zu bieten, vor allem viele praktische Formeln.

Der Rad-Schien-Kontakt alleine kann schon einige Vorlesungen füllen. Eine gute Einführung findet ihr bei Schindler (2014), den ganzen Stoff bringt euch Kalker (2013).

### Fahrwiderstand<sup>1</sup>

- 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[3mm] Nach Strahl (für Güterzüge):

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

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

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

<sup>1</sup>Ausführlicher im Teil Fahrdynamik von Dr. Huber.

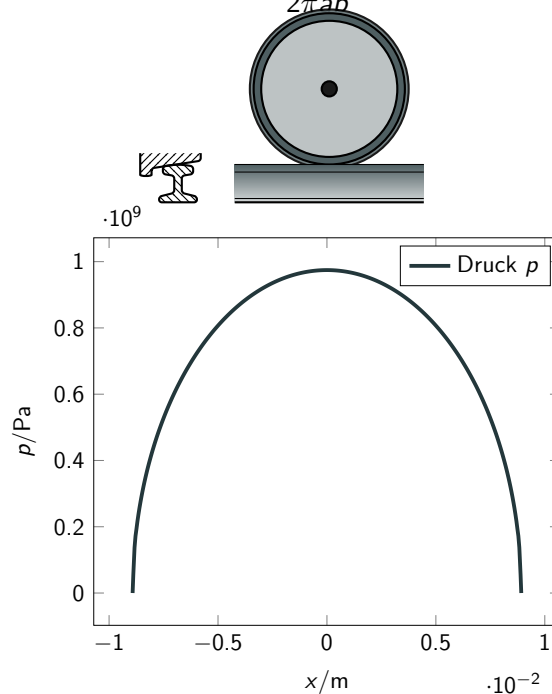
### Rad-Schiene-Kontakt

- 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

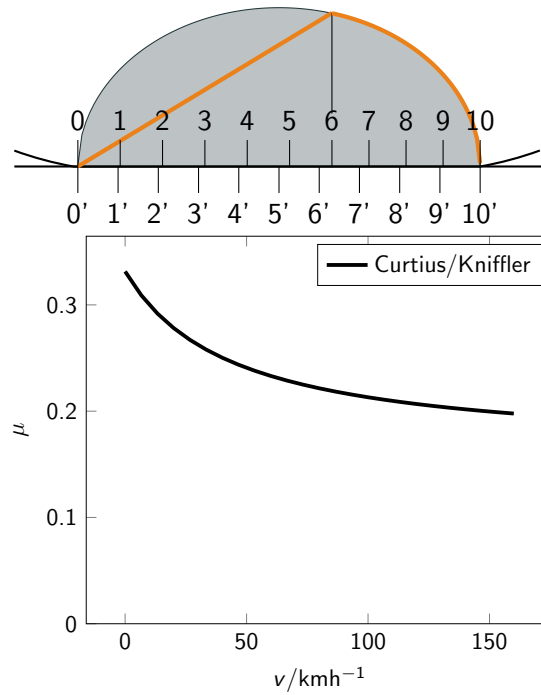
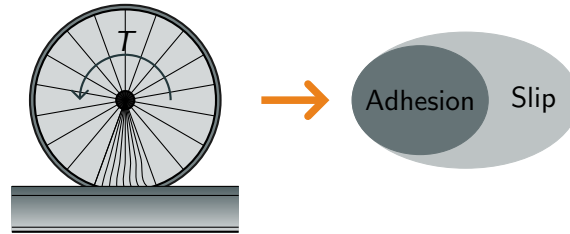
$$p_{\max} = \frac{3}{2\pi ab} Q$$



### 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



### 3 Spurführung



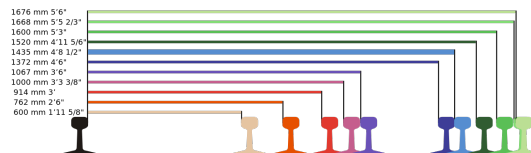
Hier geht es ganz knapp um die Grundlagen von Spur und Spurführung. Die Grundlagen sind gut in Schindler (2014) oder Iwnicki (2006) dargestellt, für eine eingehende Beschäftigung mit der Fahrdynamik empfehle ich euch Knothe and Stichel (2003).

#### Spurweite

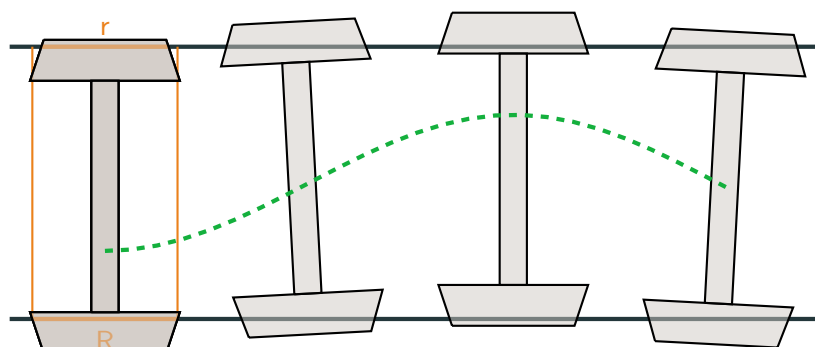
- Regelspur: 1435 mm
- Breitspur
  - Russische Spur: 1520 mm
  - Indische Spur: 1676 mm
  - Iberische Spur: 1668 mm
- Schmalspur
  - Kapspur: 1067 mm
  - Meterspur: 1000 mm

**Definition 2** (Spurweite). Die Spurweite ist der Abstand der Schienen zueinander, gemessen ( $14,5 \pm 0,5$ ) mm unterhalb der Schienenoberkante.

**Definition 3** (Spurweitentoleranz). Abhängig von Netz und Strecke ist die Spurweite toleriert, üblich in Deutschland:  $(1435^{+35}_{-5})$  mm.



#### Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes





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

Der Prozess wiederholt sich und es gilt für die Eigenkreisfrequenz  $\Omega$  nach Klingel

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

mit Laufkreisradius  $r$ , Spurweite  $2b$  und Kegelwinkel  $\gamma$ .

## 4 Güterwagen



Die Güterwagen sind in der (europäischen) Literatur eher schlecht vertreten. Hier kann ich euch für einen Überblick Janicki et al. (2013) und für Details die englischsprachigen Bücher Iwnicki (2006) und Spiriyagin et al. (2014) empfehlen.

### Einführung

- 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

Sonderbauart:

F	offene Wagen
H	gedeckte Wagen
I	Kühlwagen
L	Flachwagen mit unabhängigen RS
S	Drehgestell-Flachwagen
T	Wagen mit öfnungsfähigem Dach
U	Sonderwagen
Z	Kesselwagen



Gattungsbezeichnung kommuniziert Typ und Ausstattungsmerkmale.

## Anforderungen an Güterwagen gemäß WAG TSI

- 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
  - 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

## EG-Konformität nach TSI WAG

- 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

## 5 Personenfahrzeuge



Bei Personenfahrzeugen müssen wir die *Value Proposition* der Eisenbahn im Auge behalten - häufig bieten wir den Fahrgästen eine angenehmere Reisezeit.

Die Konstruktion und Herstellung der Personenfahrzeuge ist sehr gut in Ihme (2019) dargestellt.

### Einführung

- 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*

### Inneneinrichtung

- 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

## **Barrierefreiheit gemäß PRM TSI**

*Transversale PRM TSI people with reduced mobility stellt Anforderungen dar.*

- 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



## **Klimatisierung**

*Die Aufgaben Heizen, Belüften und Klimatisieren werden häufig integriert (HVAC).*

- 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

## **Fahrgastnotruf**

*Der Fahrgastnotruf löst die Notbremse bei TSI-konformen Fahrzeugen ab.*

- Ausstattung:
  - Jedes Abteil, Vorräume und alle anderen abgetrennten Bereiche ausser Toiletten und Übergänge
  - Sichtbar und gekennzeichnet
- Alarm kann nicht abgebrochen werden
- Alarm wird Tf visuell und akustisch angezeigt

- Tf kann bestätigen, dies wird Fahrgästen mitgeteilt
- Kommunikation mit Tf
- Rücksetzung durch Zugpersonal



### Fahrgastinformationssysteme

- 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 19:38			
Correspondances		voie	Remarques
19:40	3	Bellevaux	
19:40		Saliz	
19:41	1	Bâcherette	
19:42	IC	Genève-Aéroport	5
19:42	RE	Romond	1
19:43		Croisettes	
19:43		Ouchy	
19:45	ICV	St. Gallen	8

Wikimedia/Hoff1980





## 6 Fahrzeugkonstruktion



Die Wagenkästen sind durch ihre großen Ausmaße ein forderndes Teilsystem, dazu müssen sie nicht unerhebliche Kräfte ertragen und ein gutmütiges Crash-Verhalten an den Tag legen.

Falls ihr euch weitergehend mit der Fahrzeugkonstruktion auseinandersetzen möchtet: im Ihme (2019), Schindler (2014) und Spiryagin et al. (2014) werdet ihr bestimmt fündig!

Hört sich komisch an, ist aber auch gut: Die Sendung mit der Maus.

### 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 Wagen

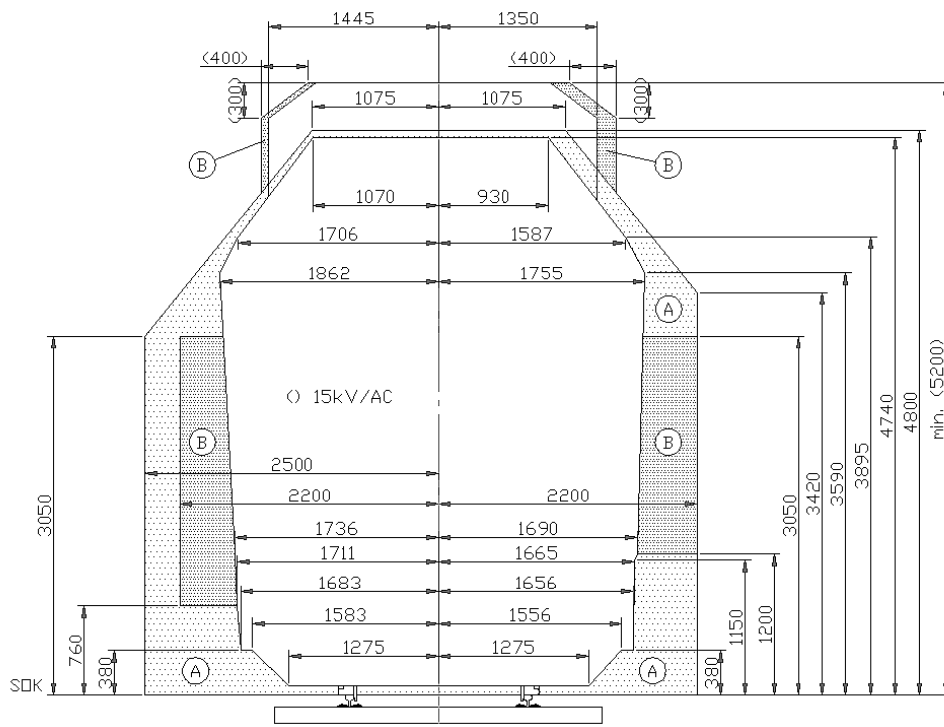
© Siemens Pressebild © Siemens Pressebild Differenzial- (oben) und Integralbauweise

#### Lichtraumprofil streckenseitig

- Streckenseitiges Lichtraumprofil muss berücksichtigen
  - Beladungszustände
  - Dynamische Bewegungen:
    - \* Ein-/Ausfedern
    - \* Wanken
    - \* Nicken
  - Bogenfahrt

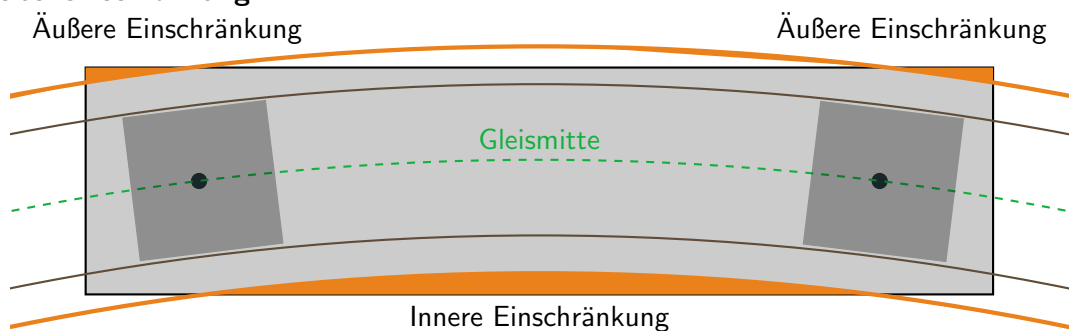
– Kompatibilität mit anderen Fahrzeugen

- Deutsches Regelprofil: G2
- Europäisch: G1
- Betrieblich Lademaßüberschreitungen möglich



Lichtraumprofil G2 gemäß EBO

**Breiteneinschränkung**



**Radsatzlasten und Meterlasten**

- Beschränkung der Radsatzlast:

- Gemäß Streckenkategorie
- Normativ, z.B. TSI Loc&Pas (für HGV), EN 15528
- Beschränkung der Streckenlast
  - z.B. für Brückenbauwerke, Oberbau

Klasse	Radsatzlast	Meterlast
A	16 t	5,0 t/m
B1	18 t	5,0 t/m
B2	18 t	6,4 t/m
C2	20 t	6,4 t/m
C3	20 t	7,2 t/m
C4	20 t	8,0 t/m
D2	22,5 t	6,4 t/m
D3	22,5 t	7,2 t/m
D4	22,5 t	8,0 t/m
E4	25 t	8,0 t/m
E5	25 t	8,8 t/m

### 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,...)

## 7 Laufwerk (Fahrwerk)

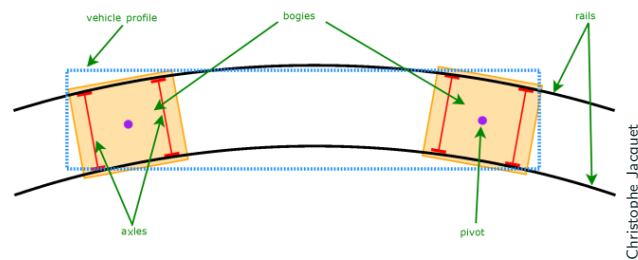


Das Fahrwerk trägt über die Dämpfung von Schwingungen und Relativbewegungen zu Sicherheit und Komfort bei, dazu unterliegt es erheblicher Belastung und Verschleiß.

Das Thema Fahrwerk ist hervorragend in Iwnicki (2006) dargestellt.

### 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

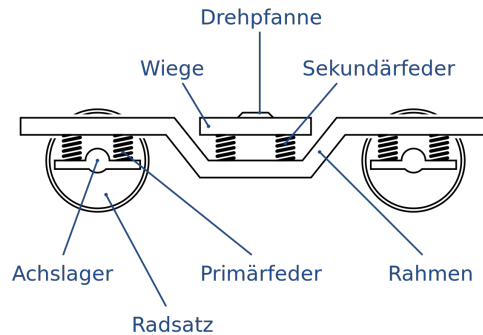


### Anatomie der Eisenbahndrehgestelle

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

– Verschiedene Ausführungen

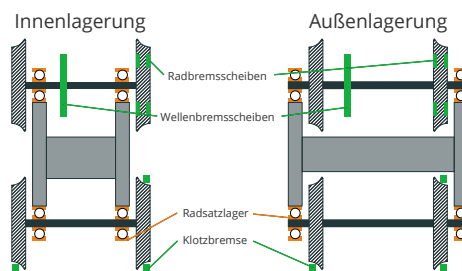
- Drehgestellrahmen



Partim

### Radsätze

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



### Verbindung Drehgestell - Wagenkasten

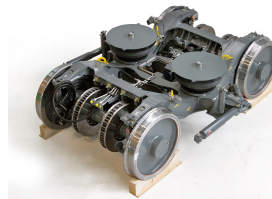
- Tragen (z-Richtung)

- 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

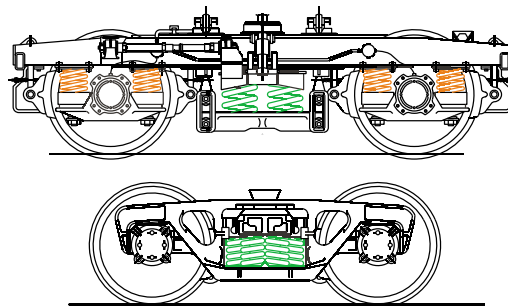


© Siemens Pressebild

Luftfedern

## Federung

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



Adapted from Glucke, CC-BY-SA 3.0

## 8 Zug- und Stoßeinrichtung

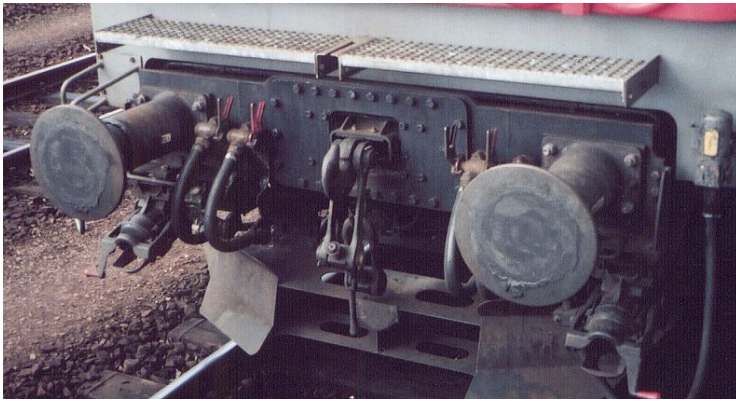


Neben der Bremse und dem Antrieb (in separaten Einheiten behandelt) ist die Zug- und Stoßeinrichtung eine wichtige Baugruppe der Schienenfahrzeuge.

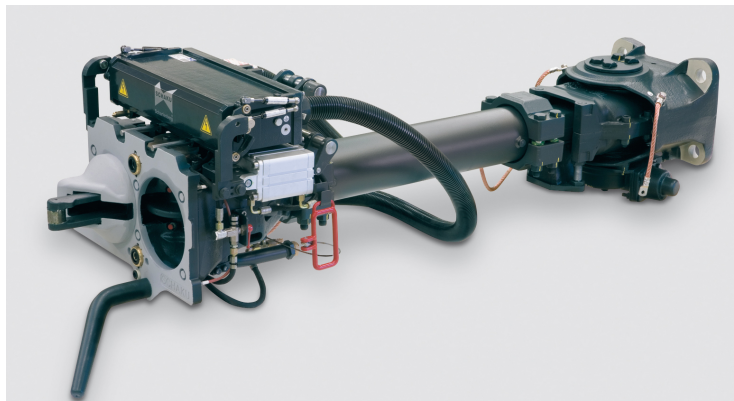
Zur Zug- und Stoßeinrichtung möchte ich euch neben Janicki et al. (2013) vor allem Iwnicki (2006) ans Herz legen.

### Aufgaben und Bauarten

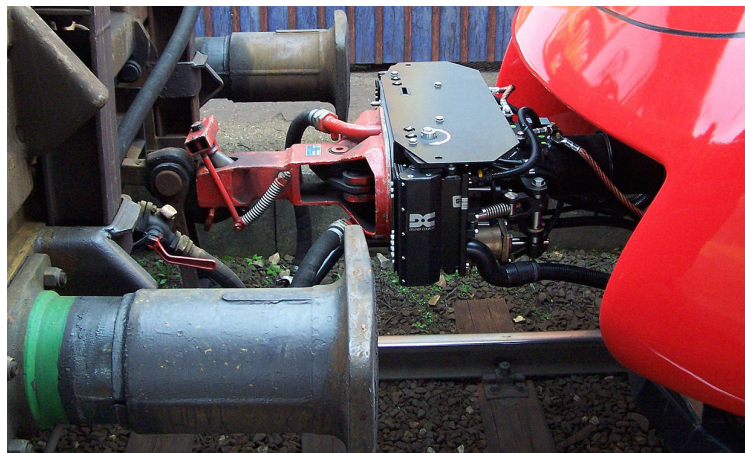
- Aufgaben:
  - Zugintegrität
  - Transfer von Signalen, Daten und Energie
  - Energieabsorption
    - \* Kuppelstoß
    - \* Crash
- Bauarten:
  - Betrieblich zu kuppeln
    - \* Zughaken und Seitenpuffer
    - \* Automatikkupplung
  - Betrieblich nicht trennbare Einheiten
    - \* Kurzkupplung
  -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



LosHawias



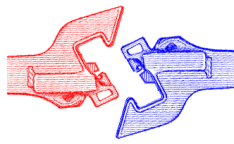
© Voith



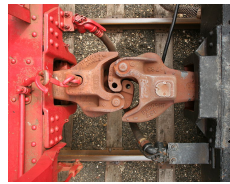
Lime29

### (Einige) Kuplungstypen





SA 3 (Willison)



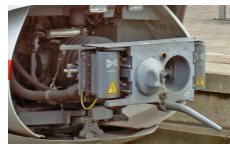
AAR Type E (Janney)



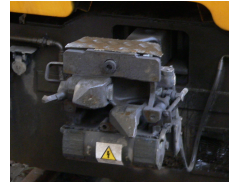
APTA Type H



Albert



Scharfenberg Typ 10



BSI COMPACT

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

## Literatur

Joachim Ihme. *Schienefahrzeugtechnik*. Springer, 2019.

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

Jürgen Janicki, Horst Reinhard, and Michael Rüffer. *Schienefahrzeugtechnik*. 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. *Schienefahrzeugdynamik*. Springer-Verlag, 2003.

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

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

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