

# Schienenfahrzeuge und ihre Komponenten

Schulung für das DMG-Einführungsseminar

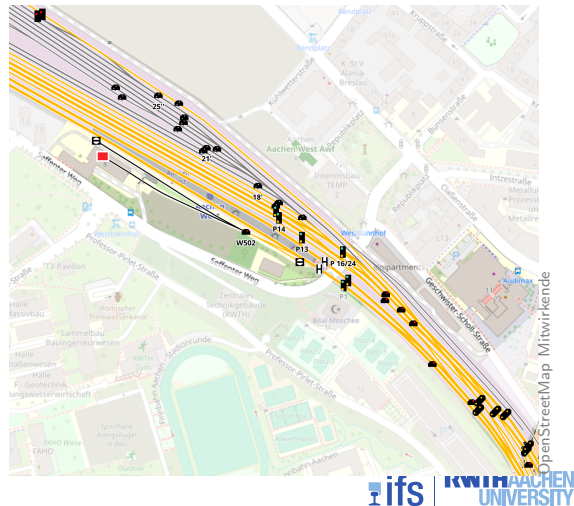
Prof. Dr. Raphael Pfaff

Institut für Schienenfahrzeuge, RWTH Aachen University



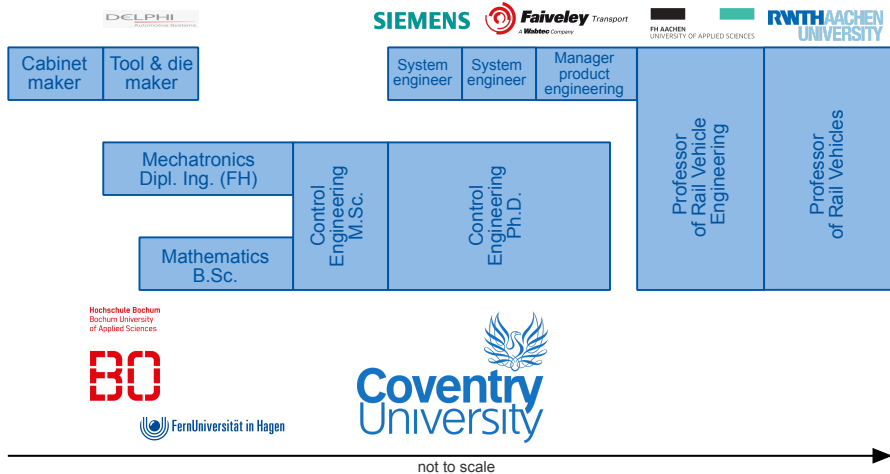
15. Oktober 2025

- Geschichte der Lehre und Forschung im Bereich der Schienenfahrzeuge seit 1870
- 1892 erste Berufung eines Professors für Schienenfahrzeuge
- Derzeit knapp 20 wissenschaftliche Mitarbeitende
- Forschung in den Bereichen
  - Fahrzeugdynamik
  - Rad/Schiene-Interaktion
  - Automatisierung und Digitalisierung
  - Fahrzeug- und Systementwicklung





- Bachelor (teils im Master):
  - Grundlagen der Schienenfahrzeugtechnik
  - Mechatronische Systeme in der Fahrzeugtechnik
- Master:
  - Schwingungsdynamik von Schienenfahrzeugen
  - Spurführungstechnik
  - Angewandte Schienenfahrzeugtechnik (mit Labor)
  - Produktentwicklung im Schienenfahrzeugbau
  - Strukturintegrität von Schienenfahrzeugen
  - Digitalisierung in der Schienenfahrzeugtechnik







Wie werden Schienenfahrzeuge definiert und was macht sie aus?

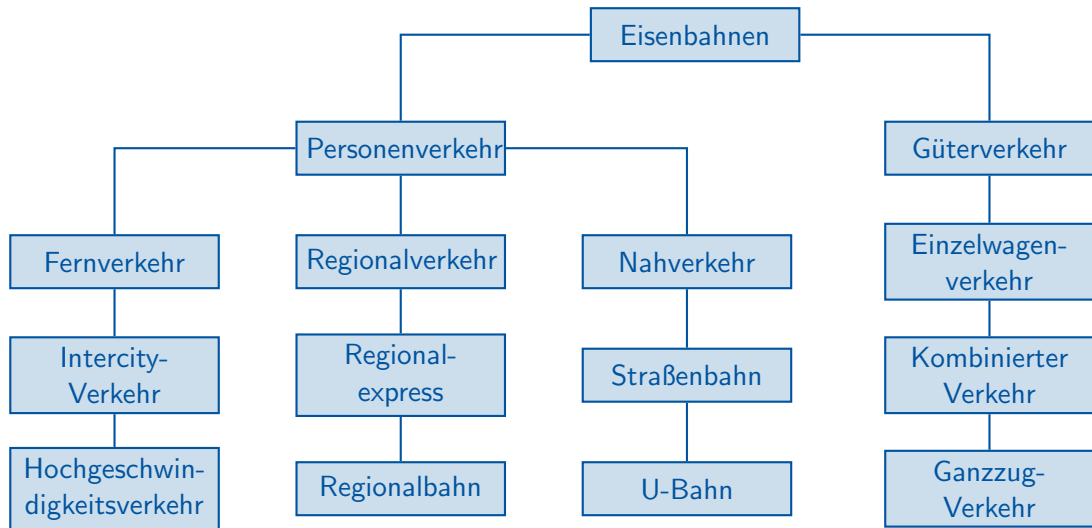
## Definition (Schienenfahrzeuge)

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

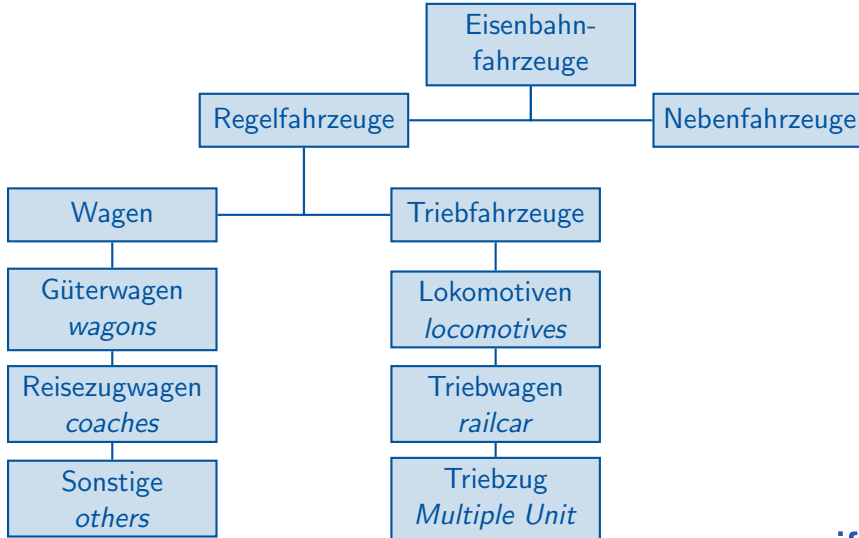
Unterscheidung:

- 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 Schienenbahnen (teilweise nach [6])

	Straßenbahn	Stadtbahn	U-Bahn	S-Bahn	Regional- verkehr	Hochgeschwin- digkeitsverkehr
Gleis	Im Straßen- raum	Großteil eigener Gleiskörper	Eigener Gleiskörper	Vollbahngleis	Vollbahngleis	Vollbahngleis, z.T. HGV- Trassen
Bogenradius	$\geq 15$ m	$\geq 25$ m	$\geq 90$ m	$\geq 180$ m	$\geq 625$ m	$\geq 1800$ m
Zug- sicherung	Sicht	Sicht/Signale	Signale	Signale	Signale	Führerstands- signalisierung
Haltestellen- abstand	(300 ... 600) m	(500 ... 800) m	(500 ... 1000) m	(750 ... 3000) m	(3 ... 20) km	$\gg 20$ km
Länge Fzg.	(20 ... 53) m	(25 ... 40) m	(25 ... 40) m	(25 ... 40) m	$\approx 26$ m	$\approx 26(28)$ m
Länge Zug	$\leq 75$ m	$\leq 75$ m	$\leq 120$ m	$\leq 300$ m	$\leq 400$ m	$\leq 400$ m
$v_{max}$	70 km/h	100 km/h	100 km/h	140 km/h	$\leq 200$ km/h	$\geq 200$ km/h
$a_{max}$	$\leq 1.2 \frac{m}{s^2}$	$\leq 1.2 \frac{m}{s^2}$	$\leq 1.2 \frac{m}{s^2}$	$\leq 1.0 \frac{m}{s^2}$	$\leq 0.8 \frac{m}{s^2}$	$\leq 0.8 \frac{m}{s^2}$
$b_{max}$	$\leq 2.5 \frac{m}{s^2}$	$\leq 2.5 \frac{m}{s^2}$	$\leq 1.5 \frac{m}{s^2}$	$\leq 1.5 \frac{m}{s^2}$	$\leq 1.5 \frac{m}{s^2}$	$\leq 1.5 \frac{m}{s^2}$
$F_{L,test}$	$\leq 300$ kN	$\leq 600$ kN	$\leq 800$ kN	$\leq 1500$ kN	$\leq 1500$ kN	$\leq 1500$ kN



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)):

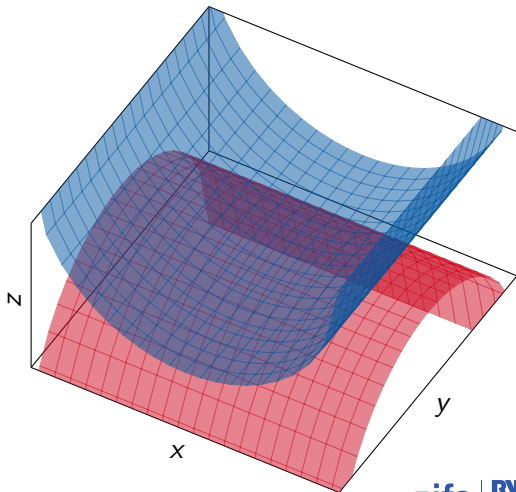
$$f_{WW} = 1,6\text{‰} + 0,25\text{‰} \left( \frac{v}{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right) + \frac{683 \text{ N}(2,7 + n_W)}{m_Z g} \left( \frac{v + 12 \frac{\text{km}}{\text{h}}}{100 \frac{\text{km}}{\text{h}}} \right)^2 \quad (2)$$

- Näherung nach Hertz:
  - Zwei Zylinder
  - Winkel  $90^\circ$
- 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

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



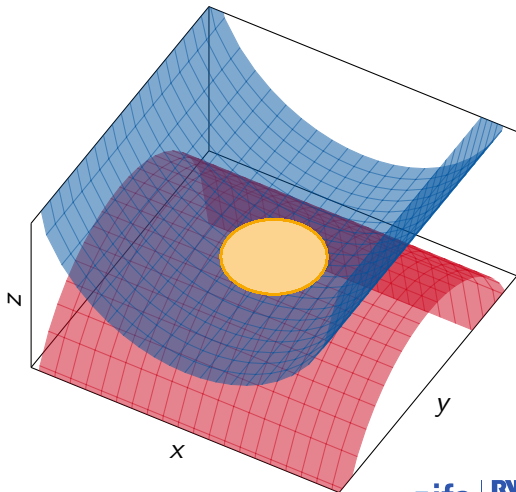


- Näherung nach Hertz:
  - Zwei Zylinder
  - Winkel 90°
- Länge der Halbachsen  $a$ ,  $b$  nach Hertz'scher Pressung
- Radaufstandskraft  $Q$

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

mit

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



## ■ Geschwindigkeitsunterschied

- Geschwindigkeit Rad  $u = \omega r$
- Wahre Geschwindigkeit Fahrzeug  $v = \omega_0 r$
- damit

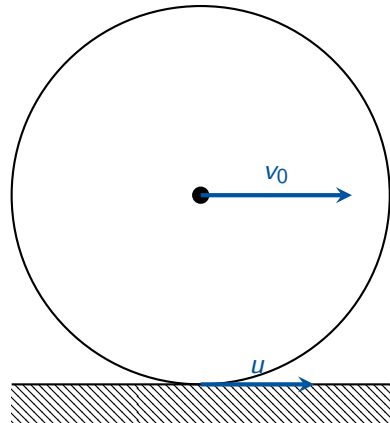
$$s = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{u - v}{v}$$

## ■ Traktion: $s > 0$

- Mikroschlupf für  $s \approx 0$
- **Schleudern** für  $s \gg 0$

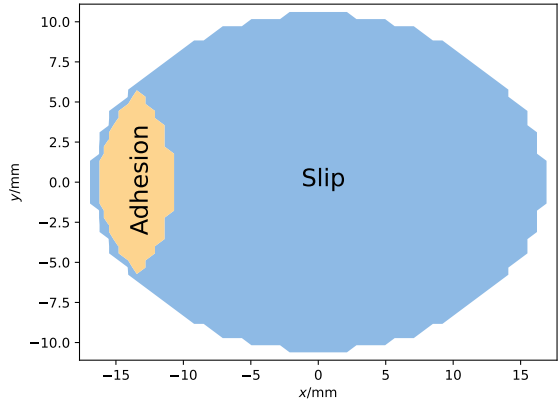
## ■ Bremsen: $s < 0$

- Mikroschlupf für  $s \approx 0$
- **Gleiten** für  $s \ll 0$



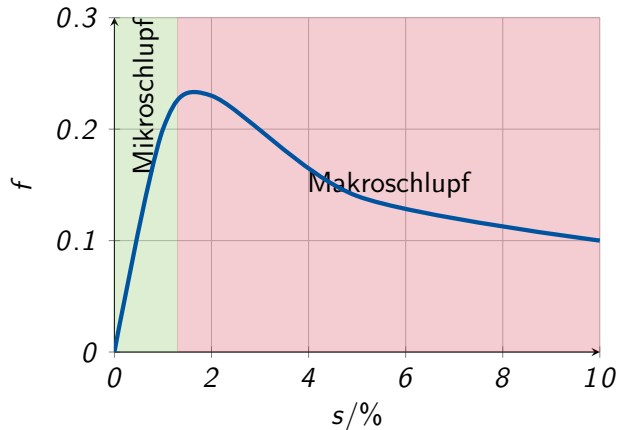
# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt

- 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

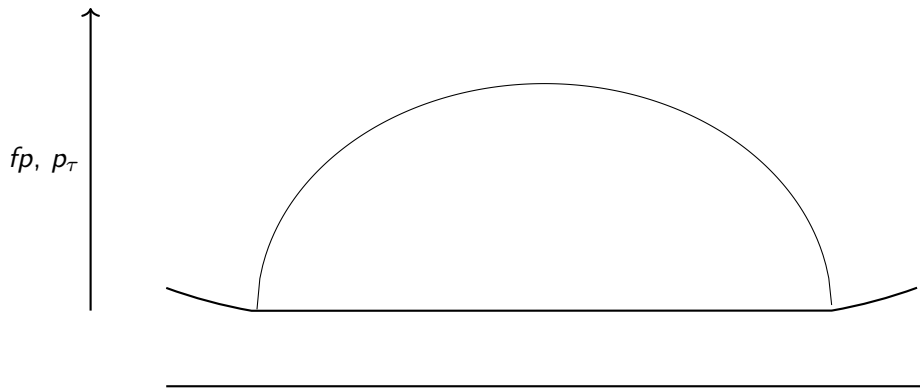


# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt

---



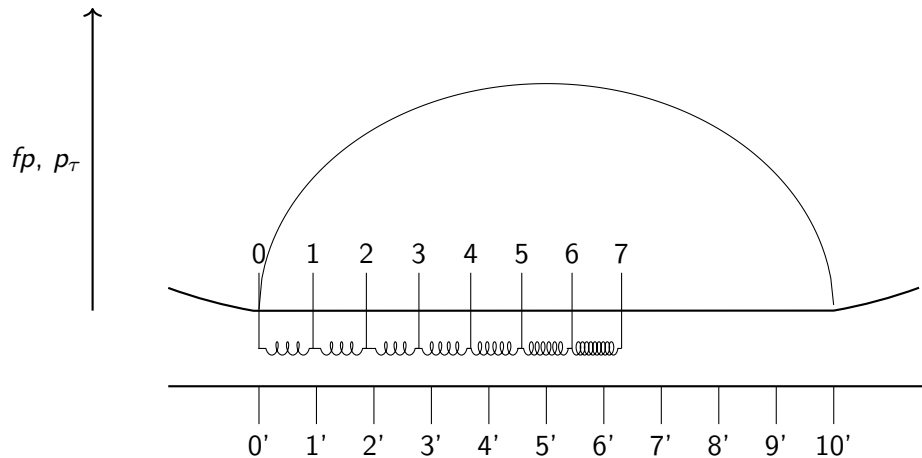
# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt



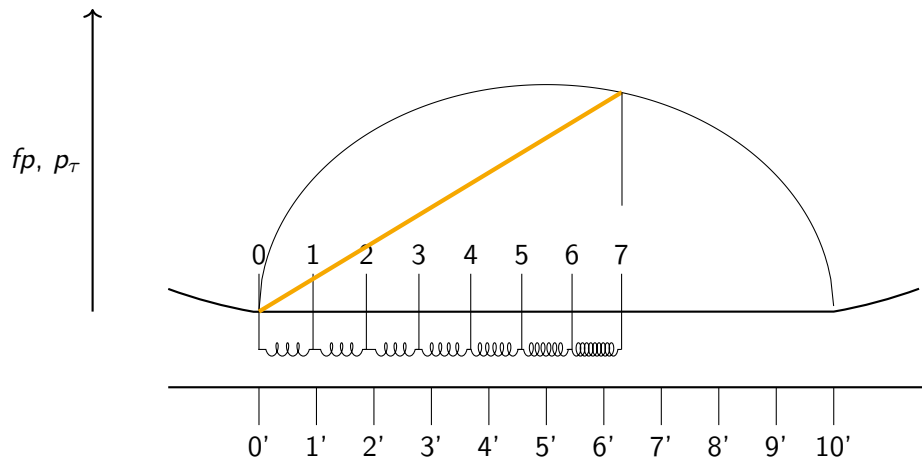
$f p$ : Produkt aus lokalem Druck  $p$  und Kraftschlusskoeffizient (konstant)  $f$

$p_{\tau}$ : Tangentiale Traktionsspannung

# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt

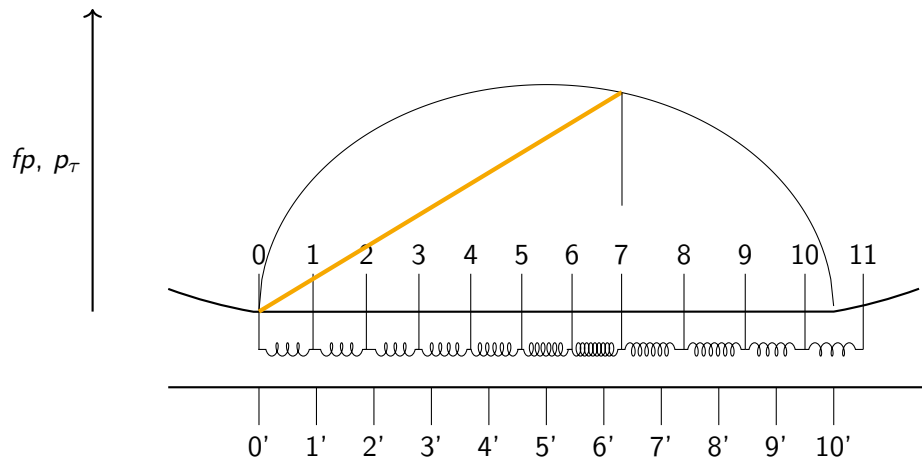


# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt

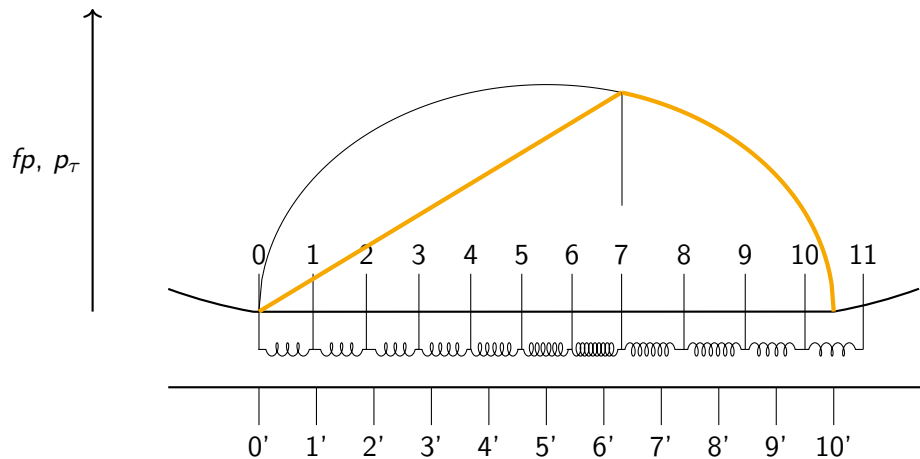




# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt



# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt



Und wie bleibt der Zug in der Spur?

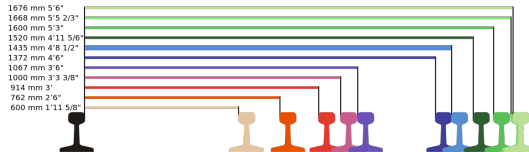
- Regelspur: 1435 mm
- Breitspur
  - Russische Spur: 1520 mm
  - Indische Spur: 1676 mm
  - Iberische Spur: 1668 mm
- Schmalspur
  - Kapspur: 1067 mm
  - Meterspur: 1000 mm

## Definition (Spurweite)

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

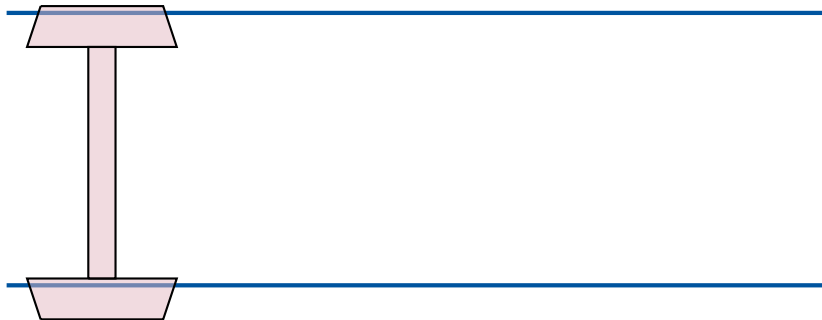
## Definition (Spurweitentoleranz)

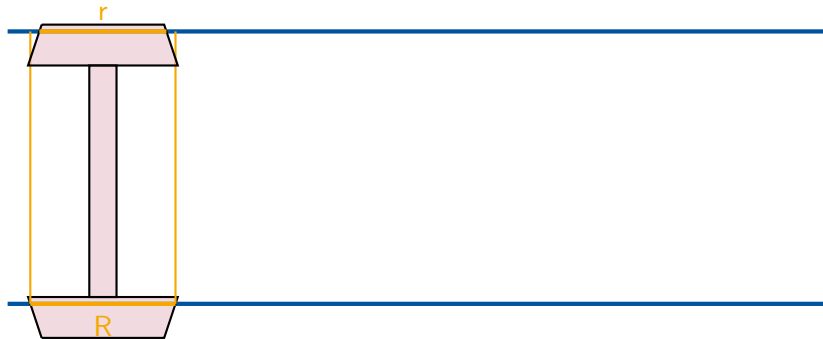
Abhängig von Netz und Strecke ist die Spurweite toleriert, üblich in Deutschland:  $(1435^{+35}_{-5})$  mm.



# Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes

---

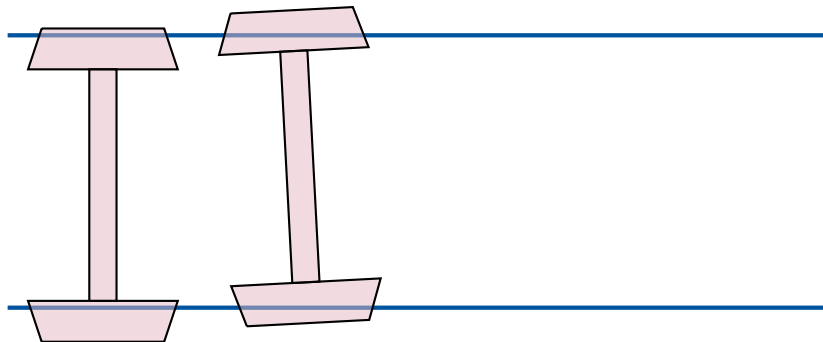




- Kegeliges Radprofil führt zu unterschiedlichen Laufkreisradien  $R > r$ .
- Durch die Differenz der Laufkreisradien wird der Radsatz ausgelenkt

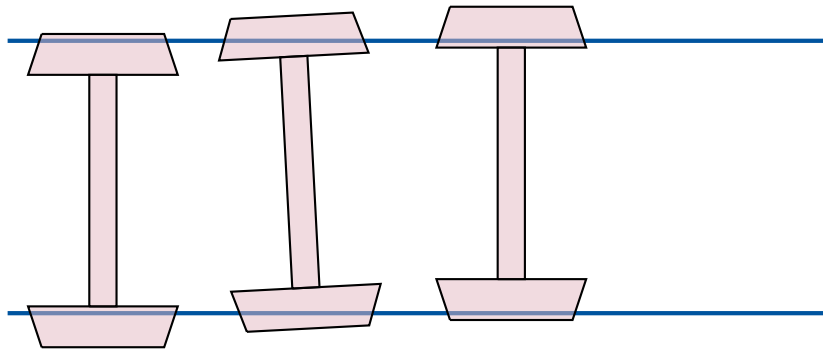
# Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes

---



Der Prozess wiederholt sich...

# Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes

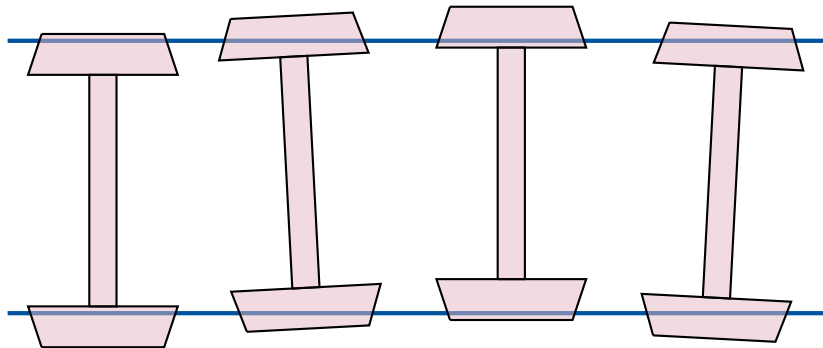


Der Prozess wiederholt sich...



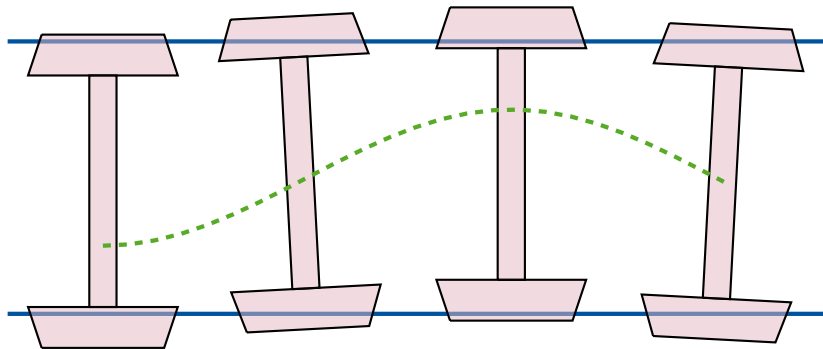
# Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes

---



Der Prozess wiederholt sich...

## Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes



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

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

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

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.

# Anforderungen an Güterwagen gemäß WAG TSI I

---

- 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

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



Doppelschkenaufhängung



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

- 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%)
- Rollstuhlpätze: 1 ( $L_{Zug} < 30$  m) bis 4 ( $L_{Zug} > 300$  m)
- Universaltoilette
- 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: Türblockierung ab 0 km/h
    - SAT: Selbstabfertigung durch Tf
    - TAV: Technikbasiertes Abfertigungsverfahren



Wikimedia/Lief Jörgensen

- Ausführungen:
  - Elektrische Energieversorgung
  - 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)



Screenshot of a train information display for S21 Lausanne. The display shows the arrival time 19:36 and the platform voie 70. It lists the following correspondences:

Correspondances	voie	qual	Remarques
19:40 3 Bellevaux			
19:40 3 Sallaz			
19:41 1 Blécherette			
19:42 IC Genève-Aéroport	5		Retard max. 4'
19:42 RE Romont	1		Retard max. 4'
19:43 Croisettes			
19:43 Ouchy			
19:45 ICN St. Gallen	8		

Wikimedia/Hoff1980



Wikimedia/Lineie29



Worauf kommt es bei der Konstruktion  
der Wagenkästen an?

## Differenzialbauweise

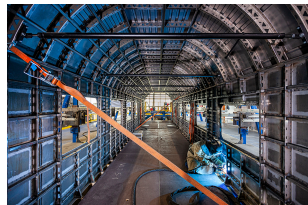
- Fertigung aus Halbzeugen:
  - Einzelteile einfach geformt
  - Formgebung durch Fügen und Umformen

## Integralbauweise

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

## Tragfunktion

- Tragendes Untergestell
- Selbsttragender Wagenkasten



© Siemens Pressebild



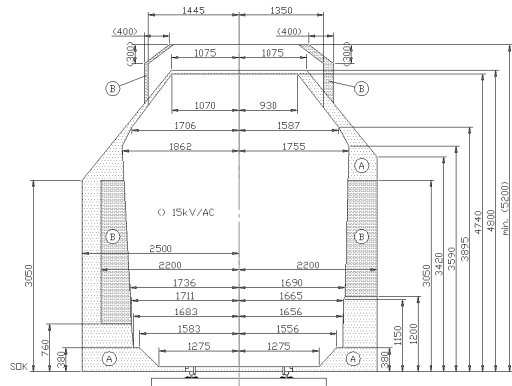
© Siemens Pressebild

Differenzial- (oben) und  
Integralbauweise

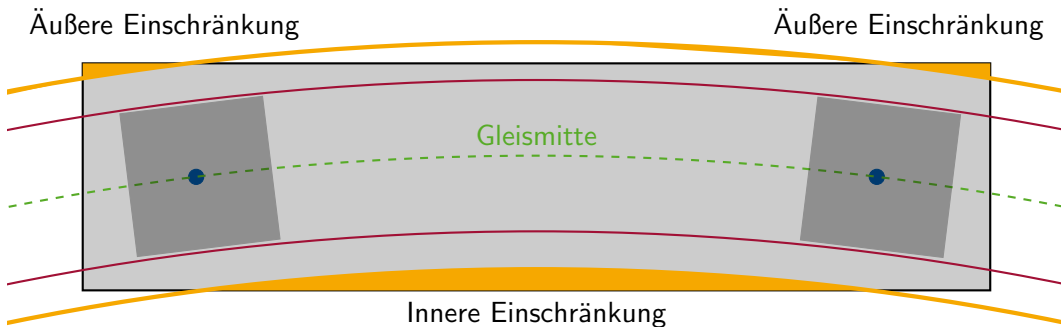


# Lichtraumprofil streckenseitig

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



Lichtraumprofil G2 gemäß EBO

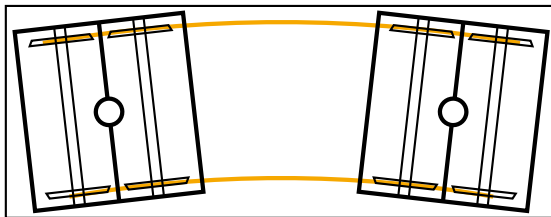


- Festigkeit (EN 12663):
  - Zug-/Druckkräfte im Zugverband
  - Crash-Szenarien (EN 15227)
  - Druckstöße, Druckdichtigkeit
- Kunden-/ betriebliche Anforderungen
  - Lebensdauer
  - Reparaturfreundlichkeit, Ersatzteilverfügbarkeit
  - Geringe Masse
  - Entsorgung/Recycling
- Normative/gesetzliche Anforderungen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

Worauf müssen wir beim Fahrwerk achten?

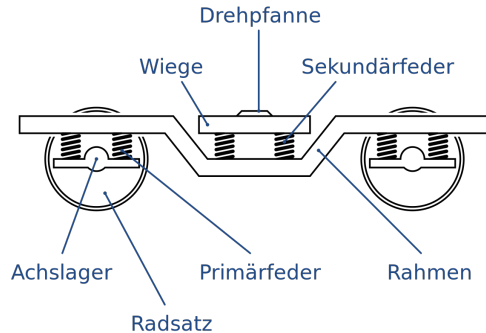
# Grundsätzliche Anforderungen

- 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



# Anatomie der Eisenbahndrehgestelle

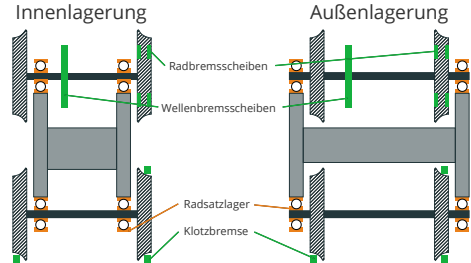
- Radsätze
- Räder
- Radsatzlager
- Radsatzaufhängung (Primärfederung)
  - Federn
  - Dämpfer
- Begrenzungen und Anschläge
- Wagenkastenankündigung (Sekundärfederung)
  - Verschiedene Ausführungen
- Drehgestellrahmen



Partim

## ■ Unterscheidung:

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



## ■ Tragen (z-Richtung)

- Schraubenfedern
- Luftfedern
- Flexicoilfedern
- Evtl. mit Gleitplatte

## ■ Führen (y-Richtung)

- Drehpfanne

## ■ Antreiben und Bremsen (x-Richtung)

- Drehpfanne
- Evtl. Zugstange o. vgl.

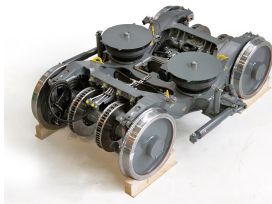
## ■ Stabilisierend:

- Wankstütze
- Schlingerdämpfer



Manuel Schneider

Drehpfanne

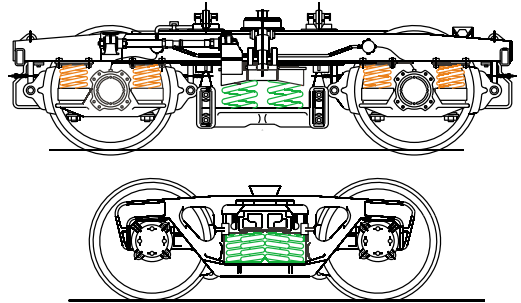


©Siemens Pressebild

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



Und wie machen wir daraus einen Zug?

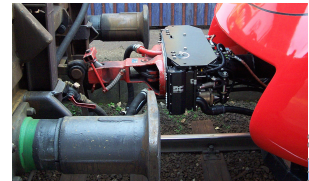
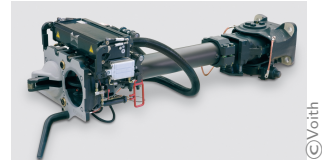
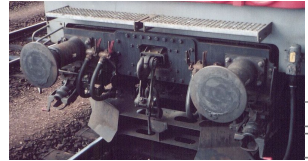
# Aufgaben und Bauarten

## ■ Aufgaben:

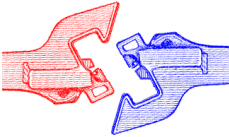
- Zugintegrität
- Transfer von Signalen, Daten und Energie
- Energieabsorption
  - Kuppelstoß
  - Crash

## ■ Bauarten:

- Betrieblich zu kuppeln
  - Zughaken und Seitenpuffer
  - Automatikkupplung
- Betrieblich nicht trennbare Einheiten
  - Kurzkupplung
- Abschleppkupplung
- Rangierkupplung



# (Einige) Kupplungstypen



SA 3 (Willison)



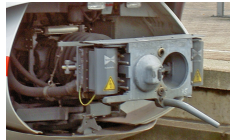
AAR Type E (Janney)



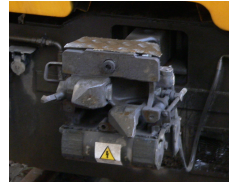
APTA Type H



Albert



Scharfenberg Typ 10



BSI COMPACT

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

- [1] J. Ihme. *Schienenfahrzeugtechnik*. Springer, 2019.
- [2] S. Iwnicki, M. Spiryagin, C. Cole, and T. McSweeney. *Handbook of railway vehicle dynamics*. CRC Press, Boca Raton, 2019.
- [3] J. Janicki, H. Reinhard, and M. Rüffer. *Schienenfahrzeugtechnik*. Bahn Fachverlag, 2013.
- [4] M. Kache. *Fahrdynamik der Schienenfahrzeuge*. Springer, 2024.
- [5] K. Knothe and S. Stichel. *Schienenfahrzeugdynamik*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2003.
- [6] C. Schindler. *Handbuch Schienenfahrzeuge*. Eurailpress, 2014.