

# Schienenfahrzeuge und ihre Komponenten

Schulung für das DMG-Einführungsseminar

Prof. Dr. Raphael Pfaff

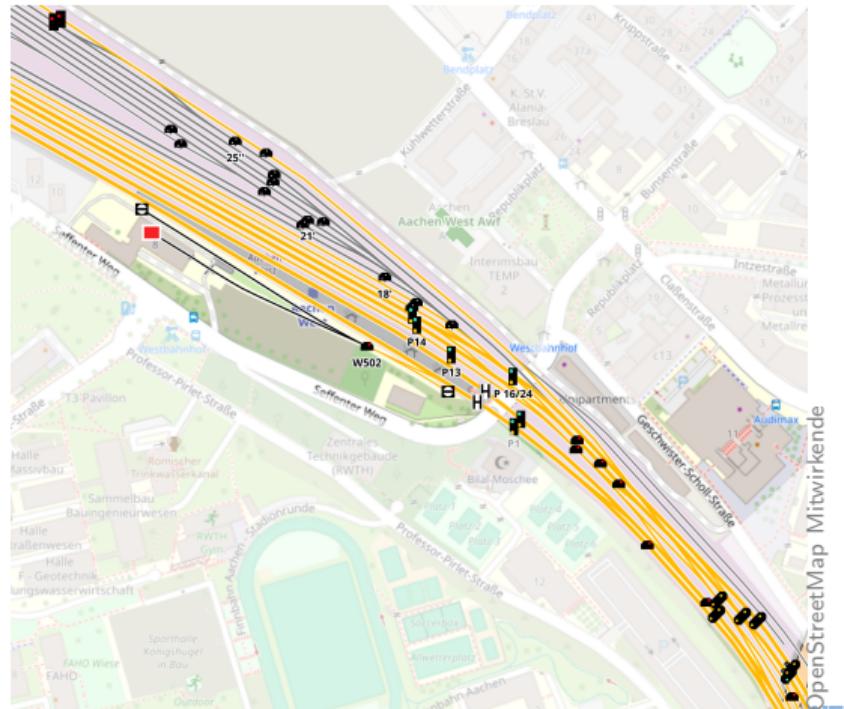
Institut für Schienenfahrzeuge, RWTH Aachen University



15. Oktober 2025

Das Institut für Schienenfahrzeuge (ifs)

- 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

# Raphael Pfaff



Cabinet maker  
Tool & die maker

System engineer  
System engineer  
Manager product engineering

Mechtronics  
Dipl. Ing. (FH)  
  
Mathematics  
B.Sc.  
  
Control  
Engineering  
M.Sc.  
  
Control  
Engineering  
Ph.D.

Professor  
of Rail Vehicle  
Engineering  
  
Professor  
of Rail Vehicles

Hochschule Bochum  
Bochum University  
of Applied Sciences

**BO**

FernUniversität in Hagen

Coventry  
University

not to scale

A blurred photograph of a modern electric train in motion, traveling along a track. The train is primarily green with yellow accents on the front and side. It has large windows and a modern design. The background is blurred to emphasize speed.

Wie werden Schienenfahrzeuge definiert und  
was macht sie aus?

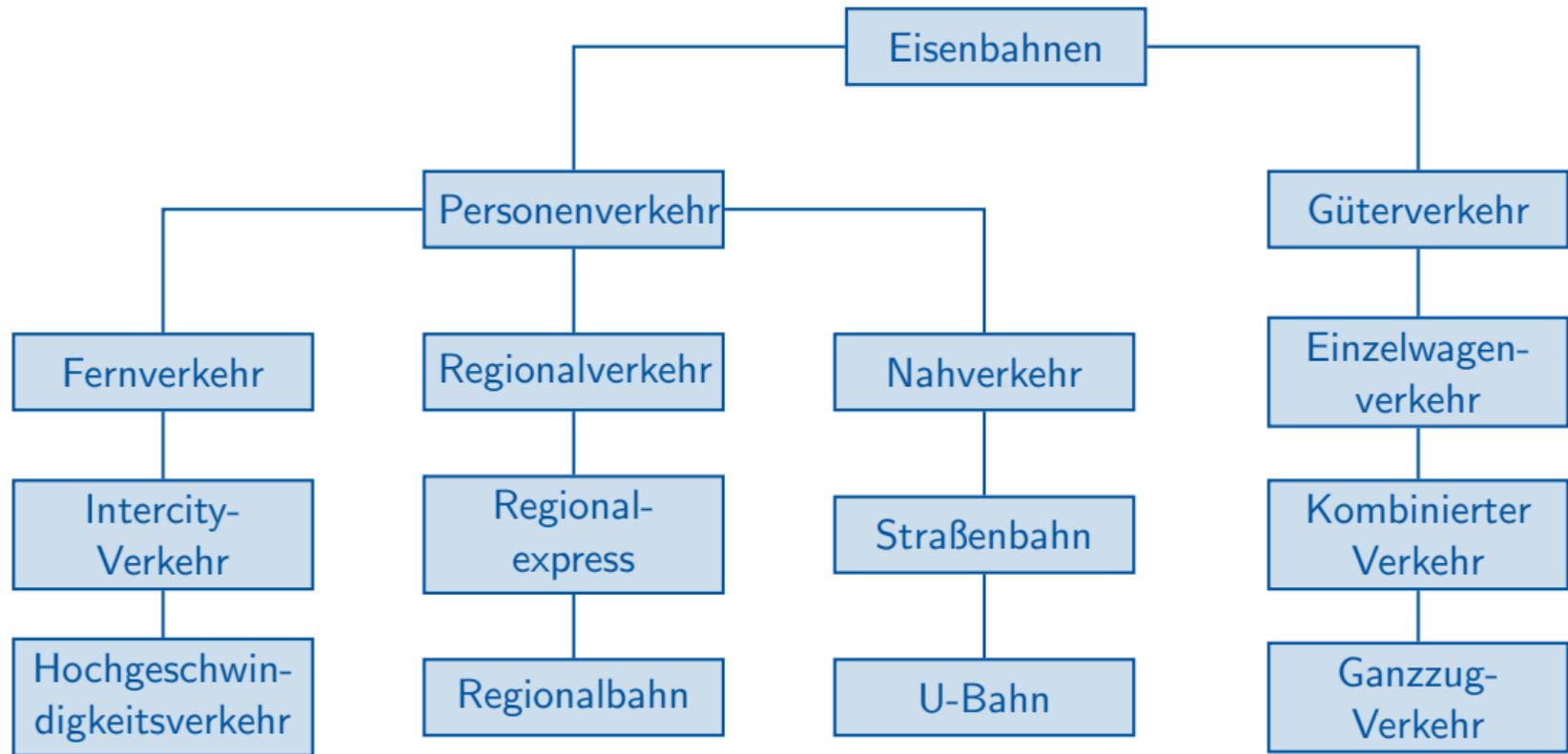
## Definition (Schienenfahrzeuge)

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

Unterscheidung:

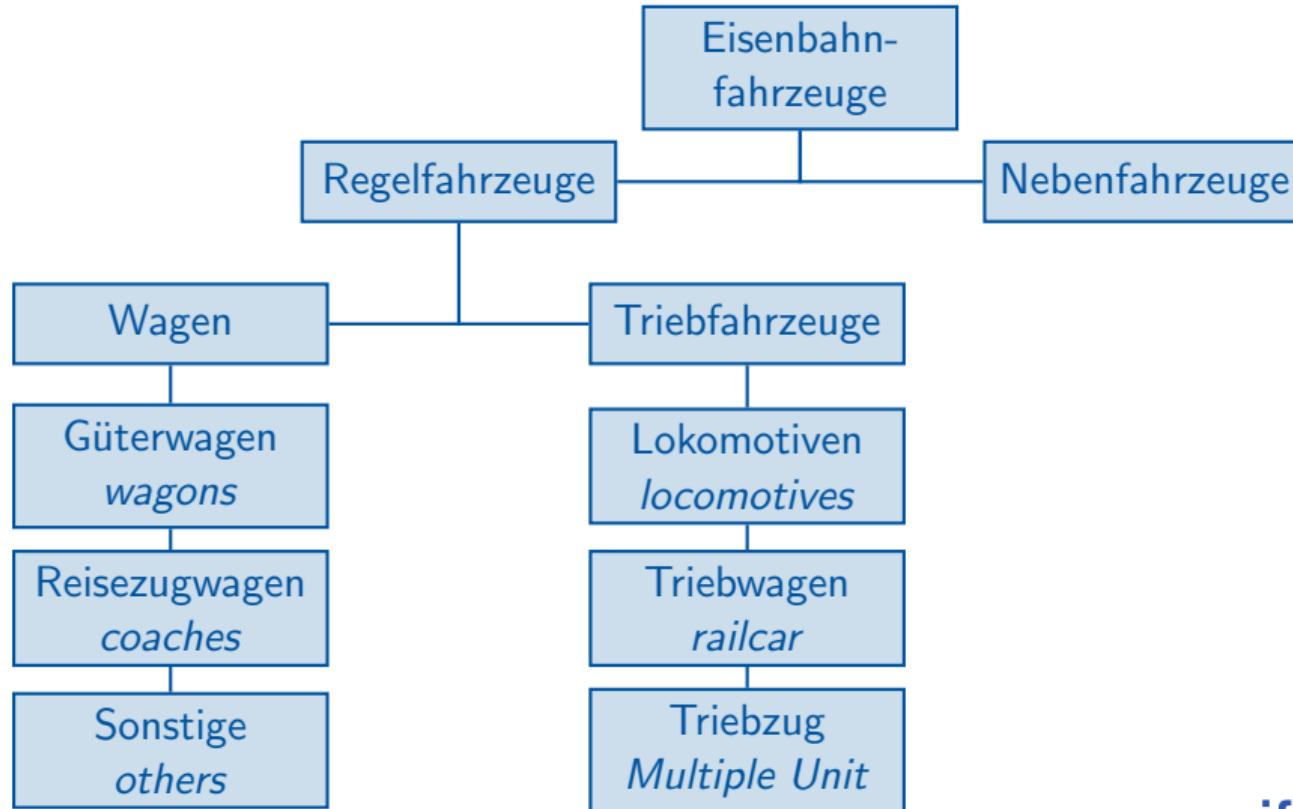
- Eisenbahnfahrzeuge (gemäß AEG und EBO/ESBO)
- Straßenbahnen (gemäß PBefG und BOSTRAB)
- Nicht öffentliche Bahnen (z.B. Werksbahnen) (gemäß BOA und EBOA)

# Systematik des Eisenbahnverkehrs



# Systematik der Eisenbahnfahrzeuge

---



# Merkmale der Schienenbahnen (teilweise nach [6])

---

	Straßenbahn	Stadtbahn	U-Bahn	S-Bahn	Regionalverkehr	Hochgeschwindigkeitsverkehr
Gleis	Im Straßenraum	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	Führerstandssignalisierung
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):

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

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

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

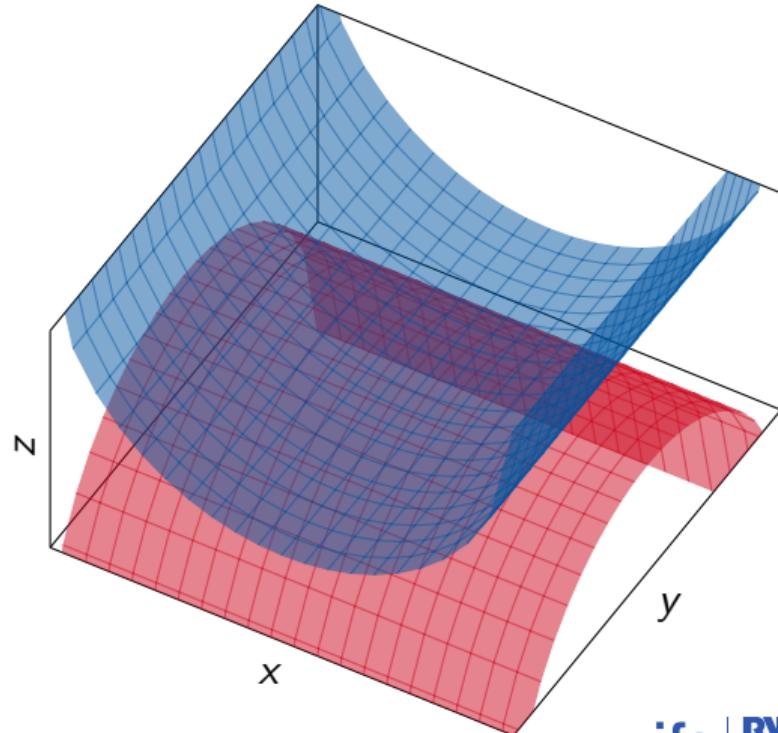
# Rad-Schiene-Kontakt

- 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

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



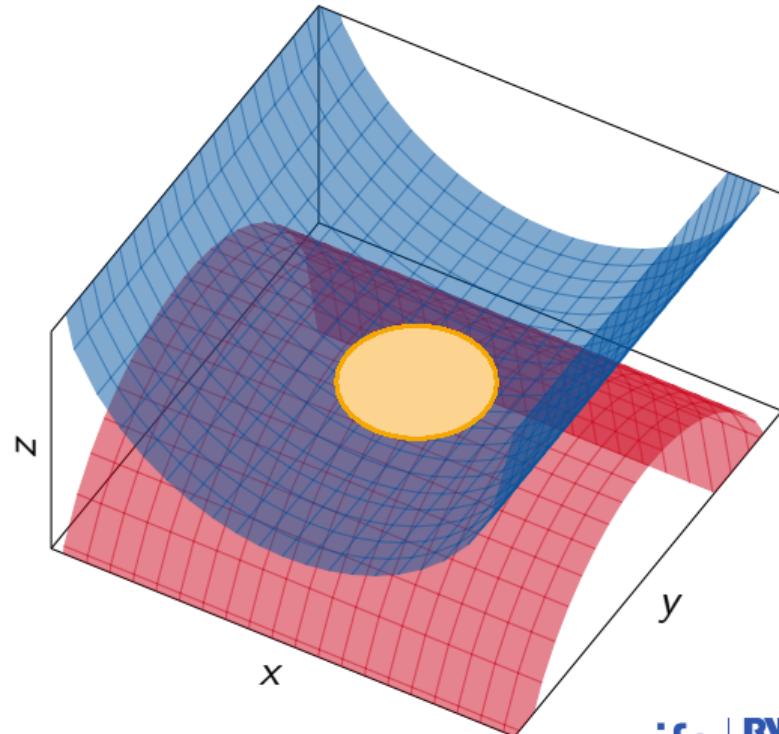
# Rad-Schiene-Kontakt

- 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

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



- Geschwindigkeitsunterschied

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

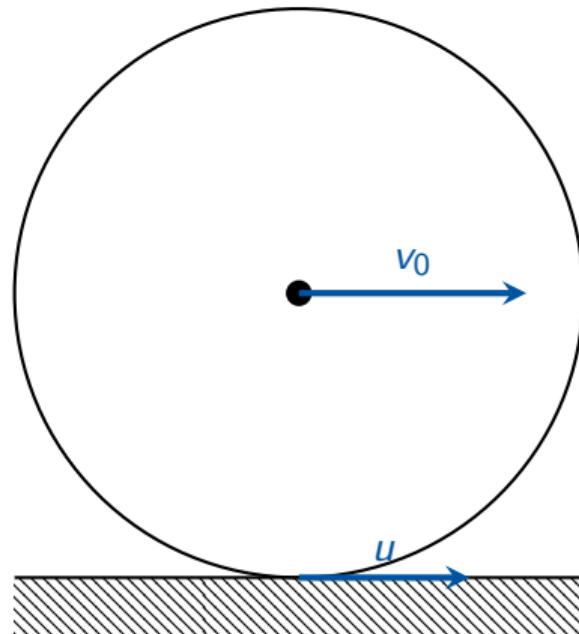
$$s = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{u - v}{v}$$

- Traktion:  $s > 0$

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

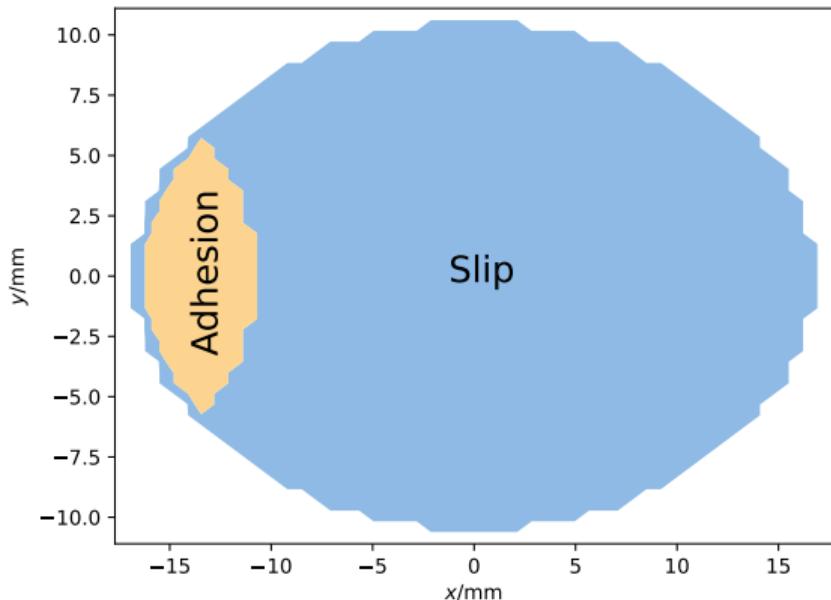
- Bremsen:  $s < 0$

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



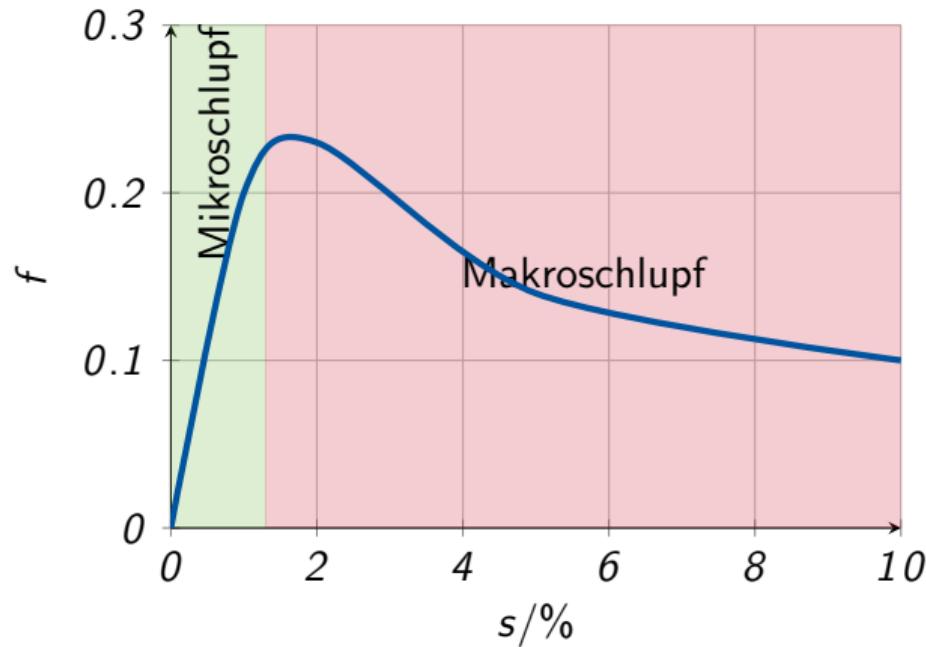
# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt

- 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



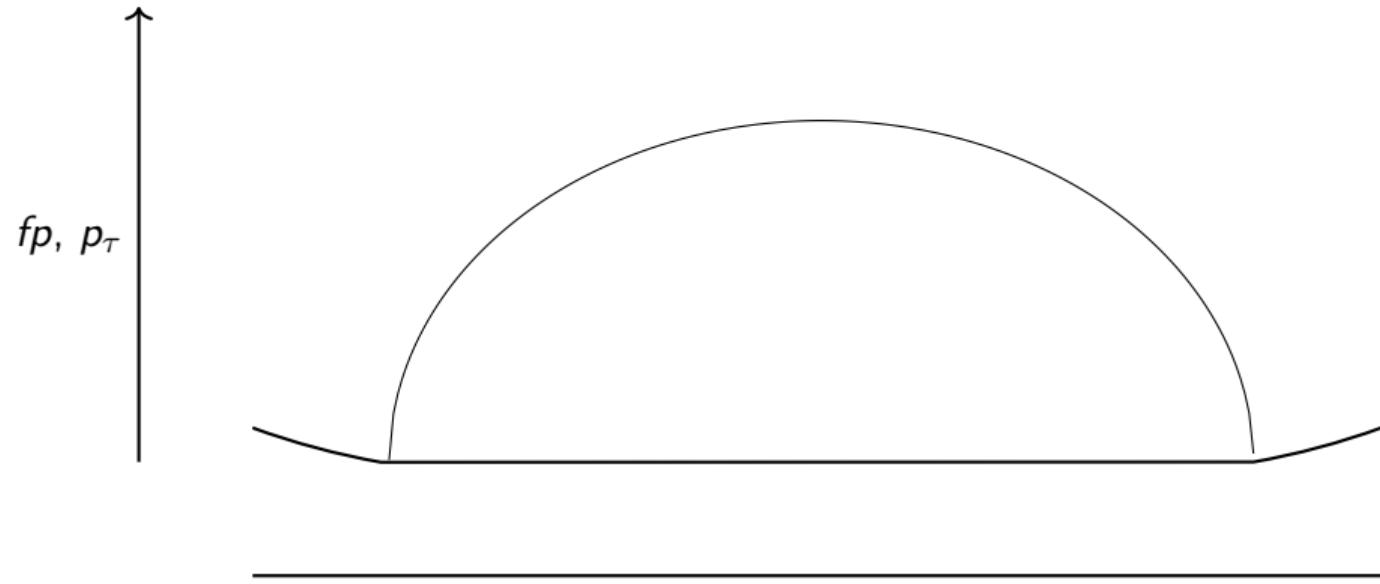
# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt

---



# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt

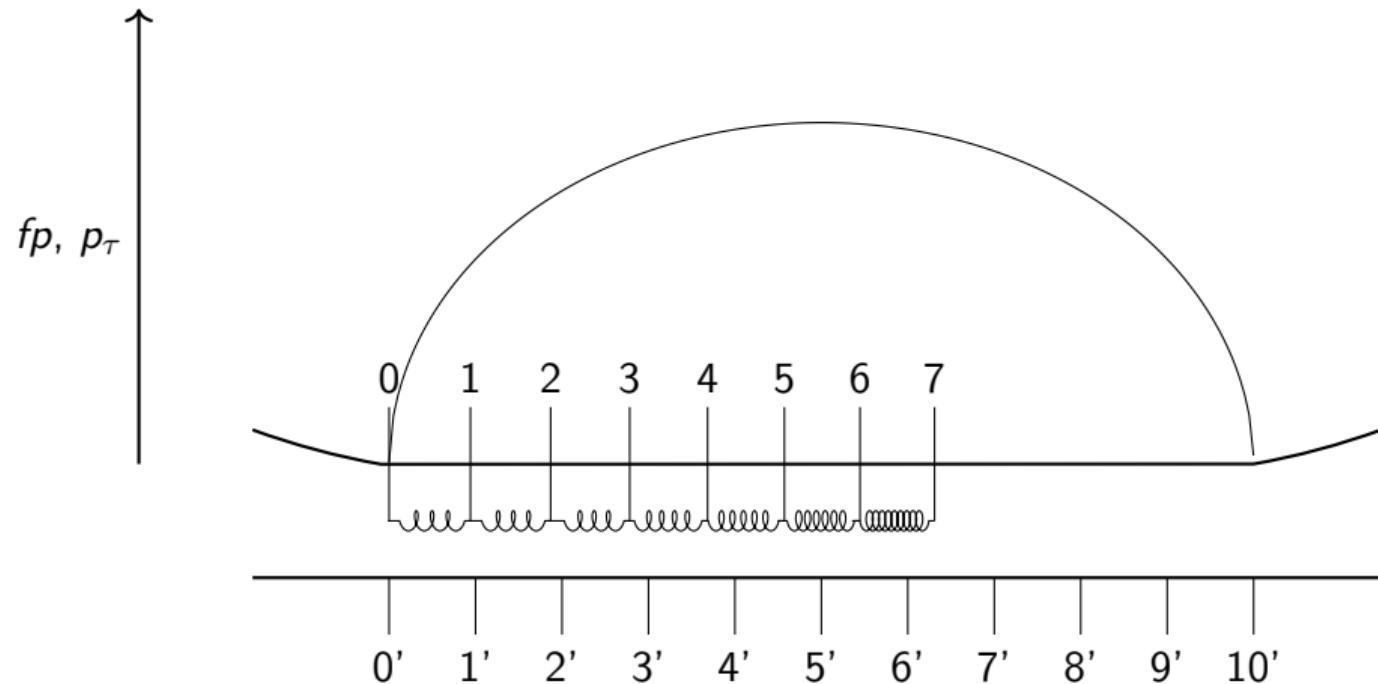
---



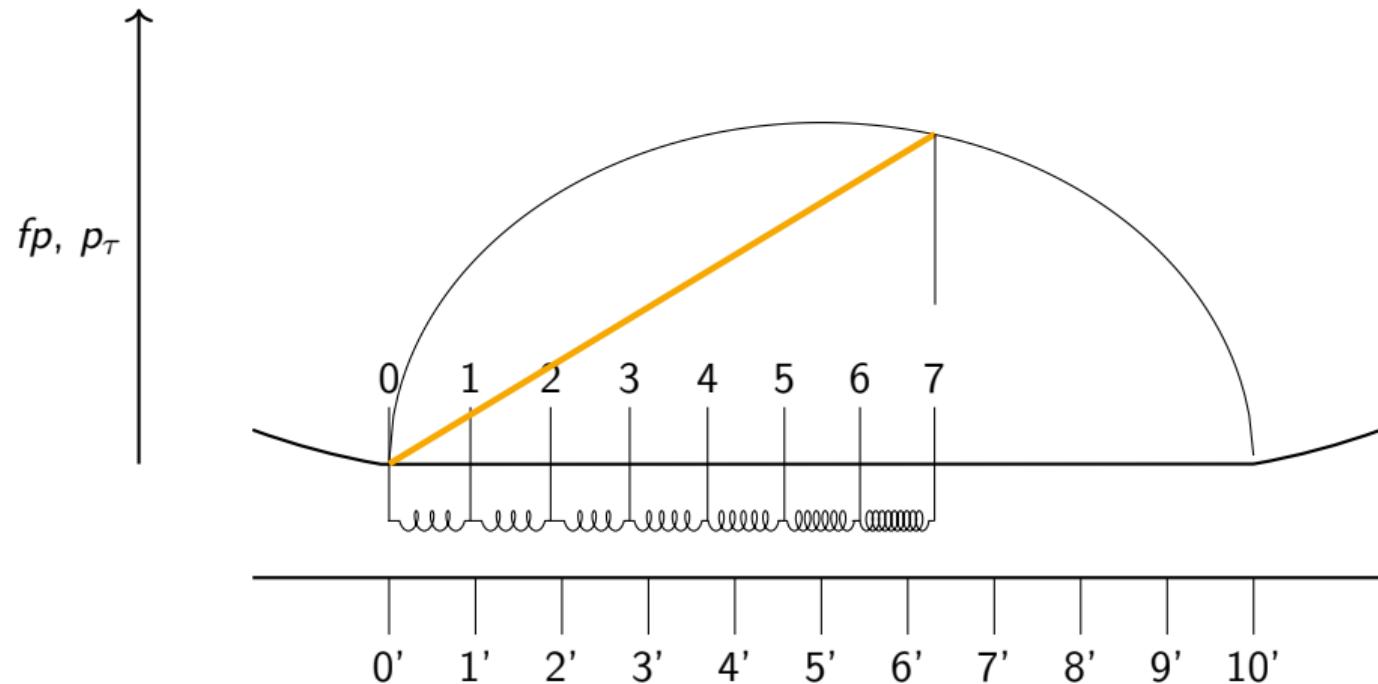
$fp$ : Produkt aus lokalem Druck  $p$  und Kraftschlusskoeffizient (konstant)  $f$

$p_T$ : Tangentiale Traktionsspannung

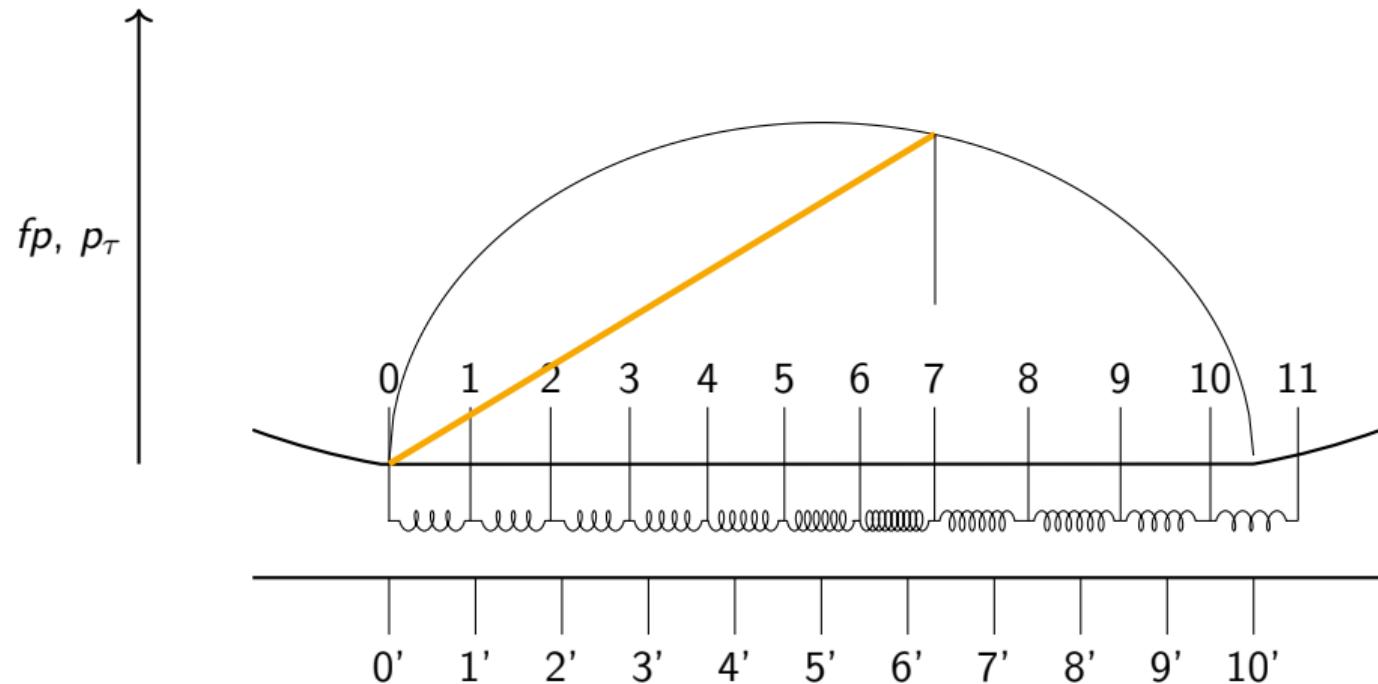
# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt



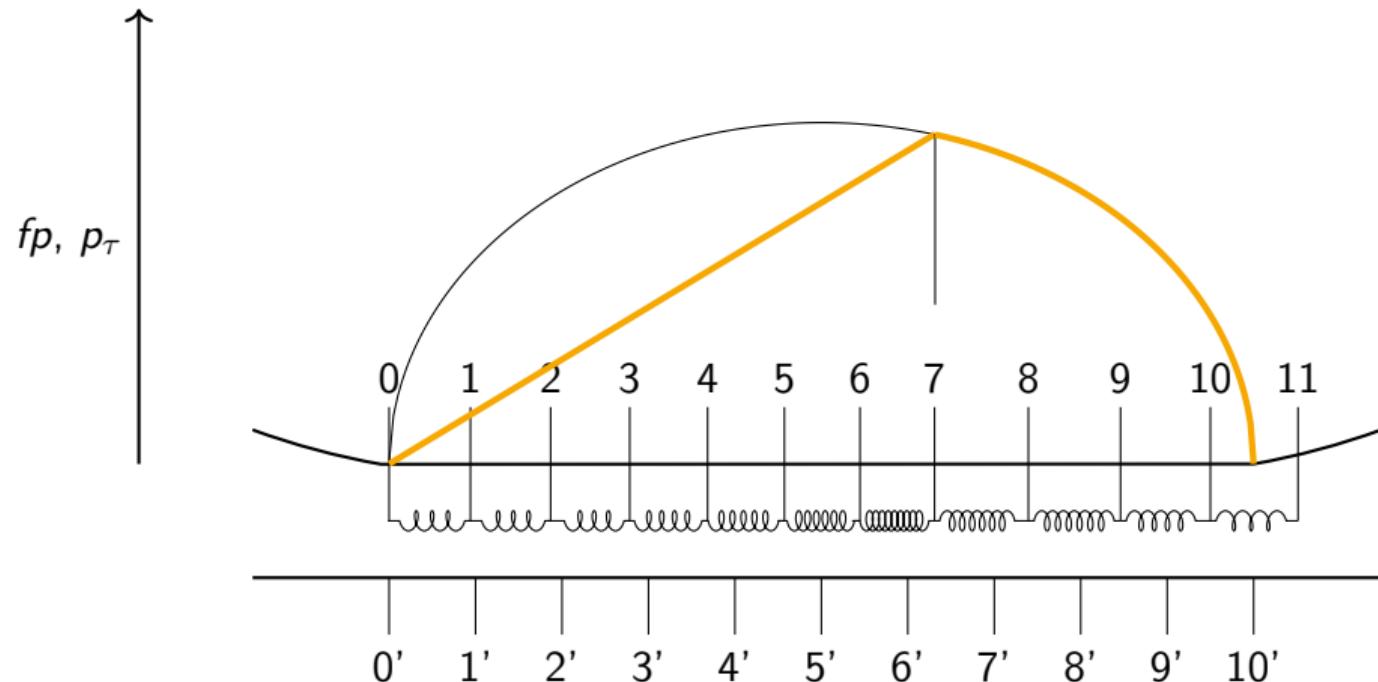
# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt



# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt



# Kraftübertragung im Rad-Schiene-Kontakt





Und wie bleibt der Zug in der Spur?



# Spurweite

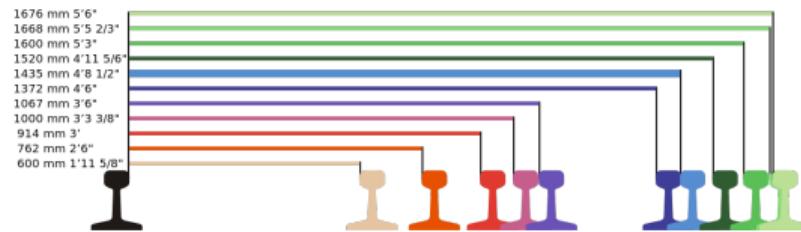
- Regelspur: 1435 mm
- Breitspur
  - Russische Spur: 1520 mm
  - Indische Spur: 1676 mm
  - Iberische Spur: 1668 mm
- Schmalspur
  - Kapspur: 1067 mm
  - Meterspur: 1000 mm

## Definition (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.

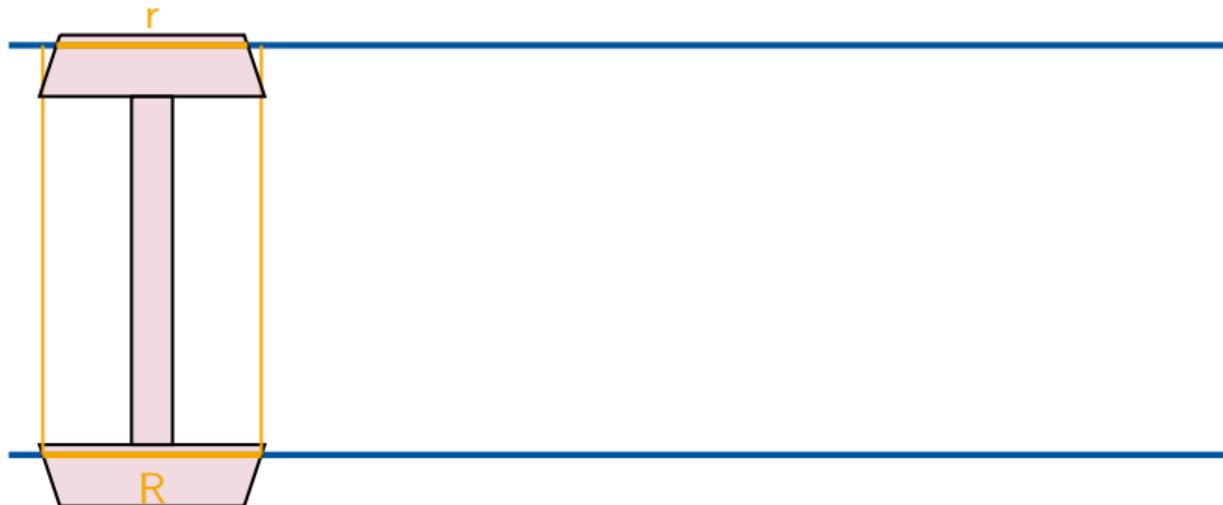


# Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes

---



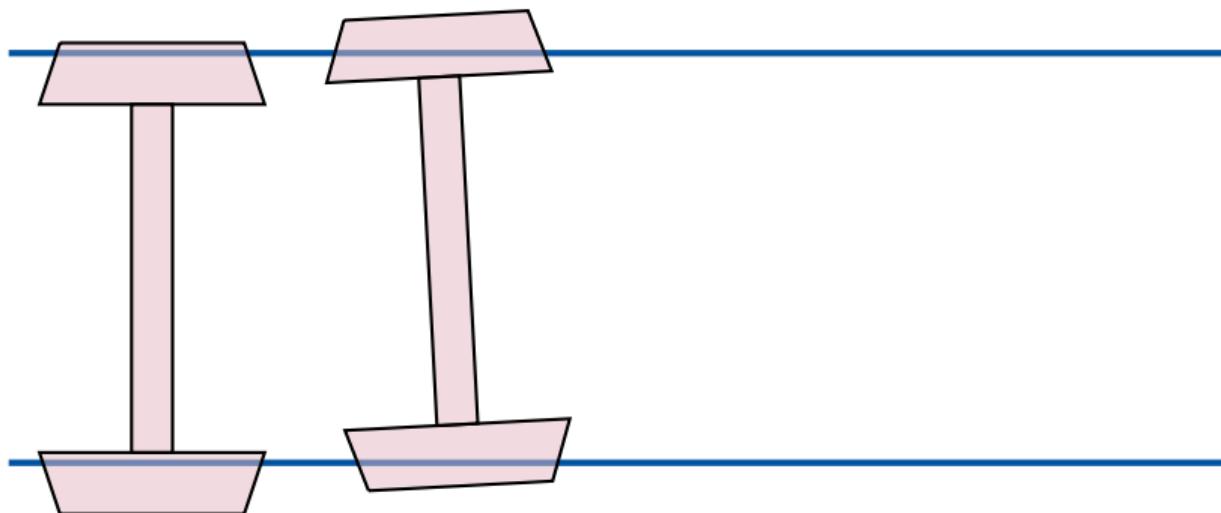
# Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes



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

# Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes

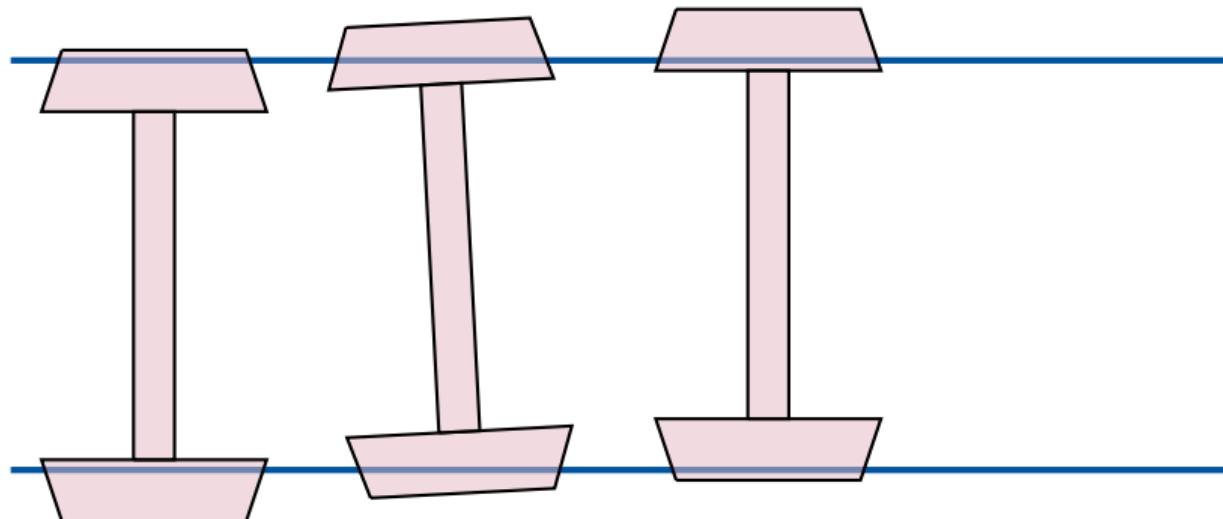
---



Der Prozess wiederholt sich...

# Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes

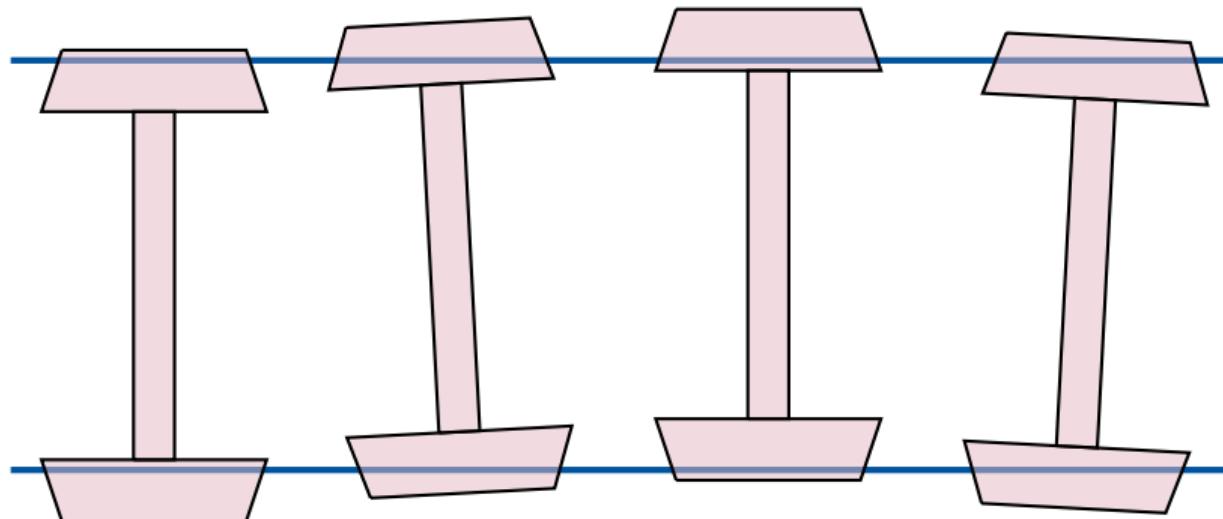
---



Der Prozess wiederholt sich...

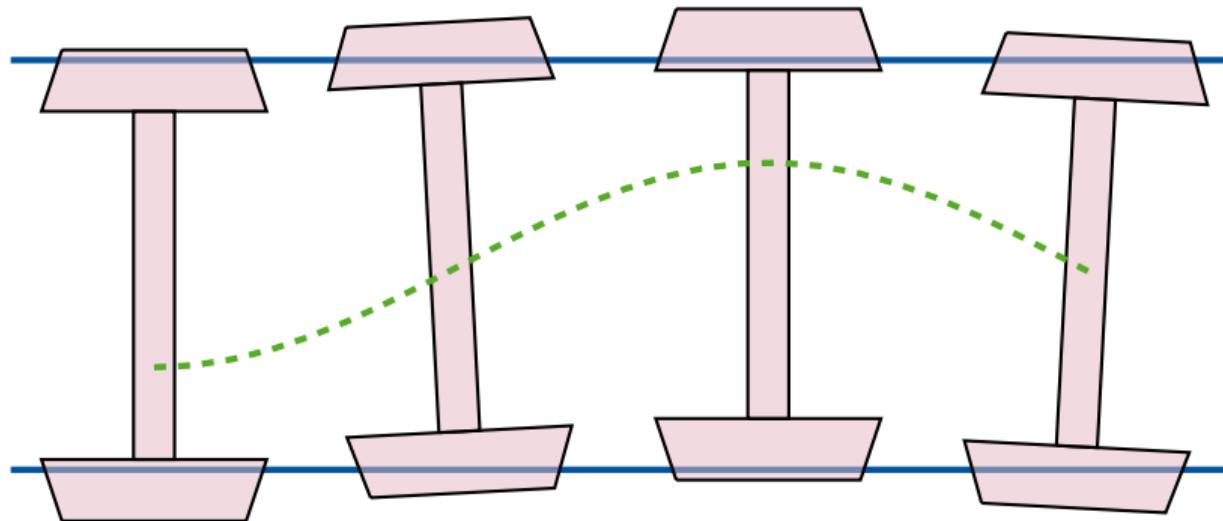
# Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes

---



Der Prozess wiederholt sich...

# Dynamik des freien und reibungsfreien Radsatzes



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



Ketamin (CC-BY-SA 2.0)

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

# 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



Wikimedia/Ketamin

Doppelschakenaufhängung



Markus Giger

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: Dritteleinstieg (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 ( $L_{Zug} < 30 \text{ m}$ ) bis 4 ( $L_{Zug} > 300 \text{ m}$ )
- Universaltoilette
- Fahrgastinformation:
  - Piktogramme (max. 5 zusammen)
  - Taktile Informationen
  - Displays etc. von 51% der Fahrgastplätze und allen Rollstuhlplätzen lesbar

- 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 Jørgensen

- 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)

S21 Lausanne Arrivée 19:36 voie 70			
Correspondances		voie	Remarques
19:40	3	Bellevaux	
19:40		Sallaz	
19:41	1	Blecherette	
19:42	IC	Genève-Aéroport Genève	5 Retard env. 4'
19:42	RE	Romont Fribourg	1 Retard env. 4'
19:43		Croisettes	
19:43		Ouchy	
19:45	ICN	St. Gallen (Inn) - Olten - Zürich HB	8



Wikimedia/Hoff1980

Wikimedia/Linie29



Worauf kommt es bei der Konstruktion  
der Wagenkästen an?

## Differenzialbauweise

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



©Siemens Pressebild

## Integralbauweise

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



©Siemens Pressebild

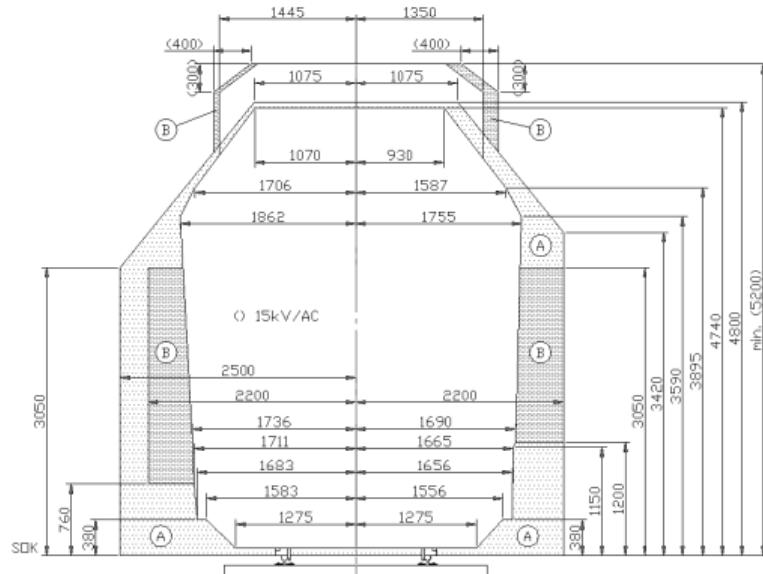
## Tragfunktion

- Tragendes Untergestell
- Selbsttragender Wagenkasten

Differenzial- (oben) und  
Integralbauweise

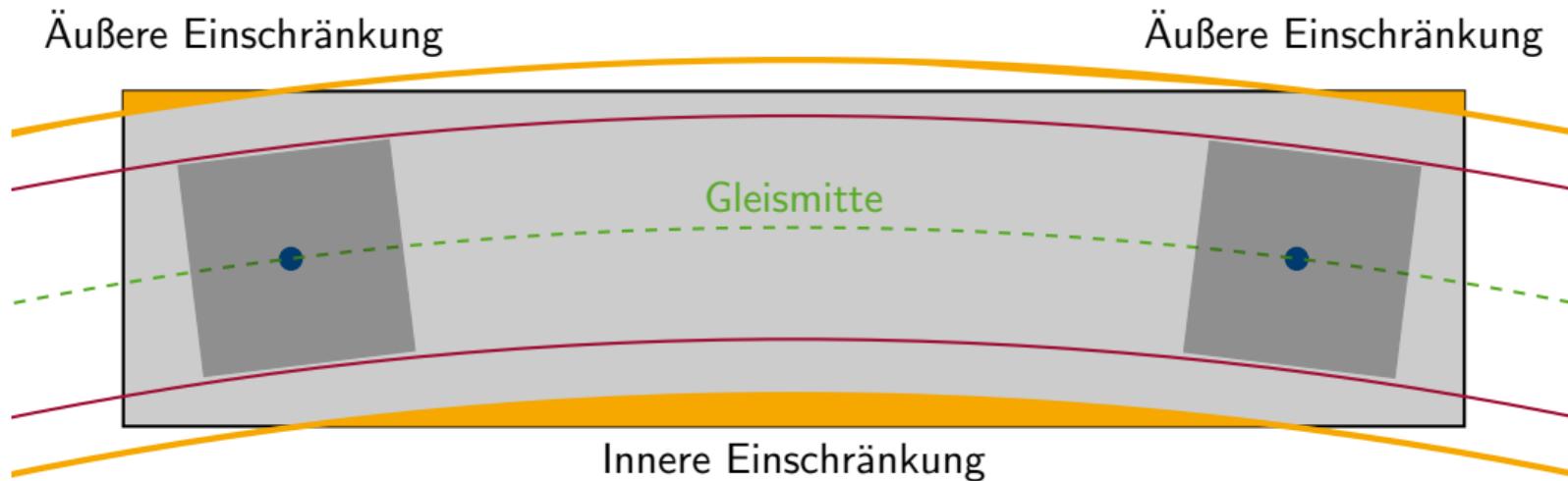
## Lichtraumprofil streckenseitig

- 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

# Breiteneinschränkung



- 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,...)

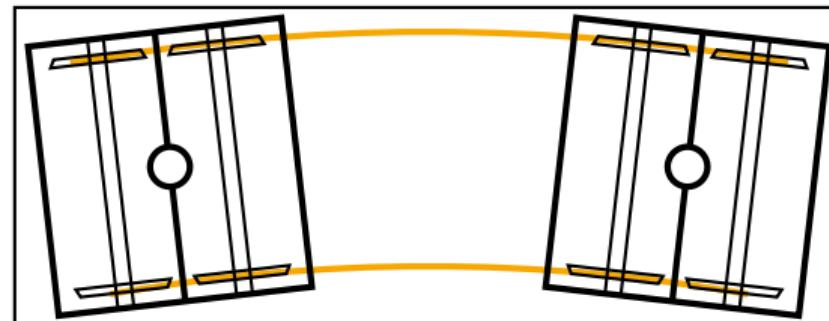


Worauf müssen wir beim Fahrwerk achten?

# Grundsätzliche Anforderungen

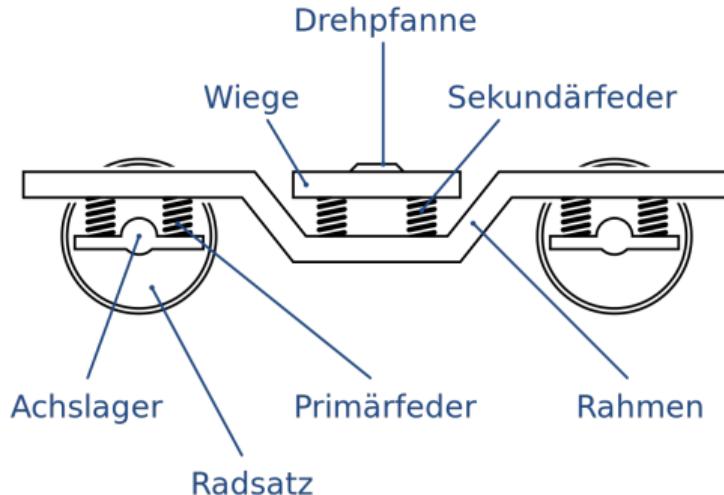
---

- 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

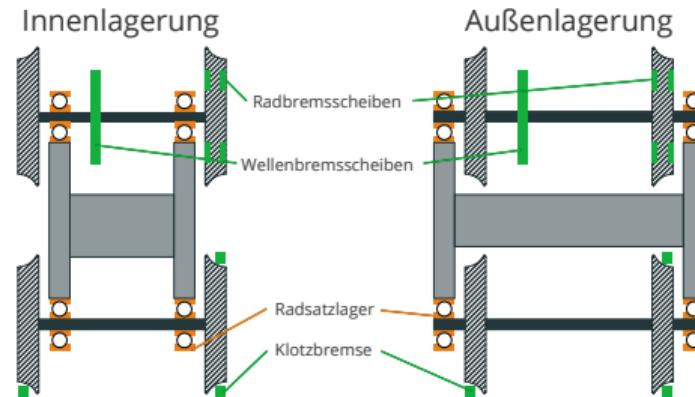


# Anatomie der Eisenbahndrehgestelle

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

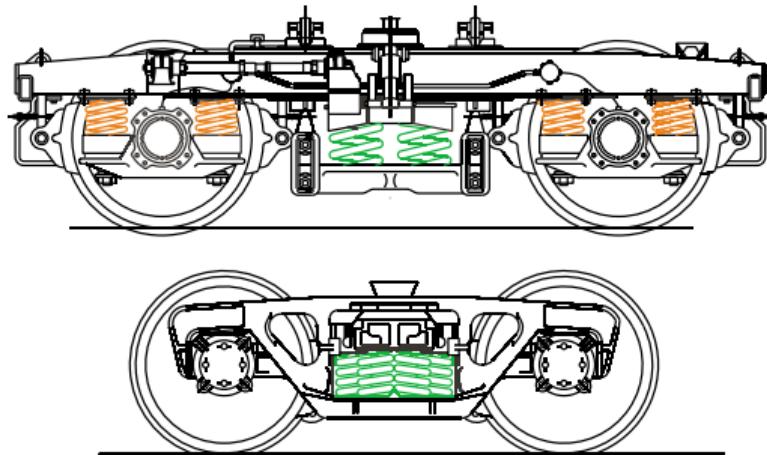
Drehpfanne



©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



Und wie machen wir daraus einen Zug?

# Aufgaben und Bauarten

---

## ■ Aufgaben:

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



LosHawlos

## ■ Bauarten:

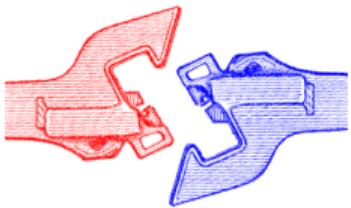
- Betrieblich zu kuppeln
  - Zughaken und Seitenpuffer
  - Automatikkupplung
- Betrieblich nicht trennbare Einheiten
  - Kurzkupplung
  - Abschleppkupplung
  - Rangierkupplung



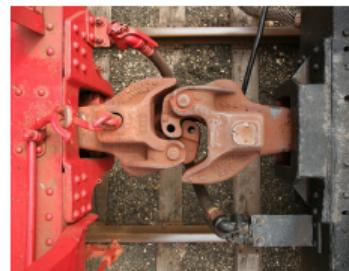
©Voith



# (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. Spiriyagin, 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.