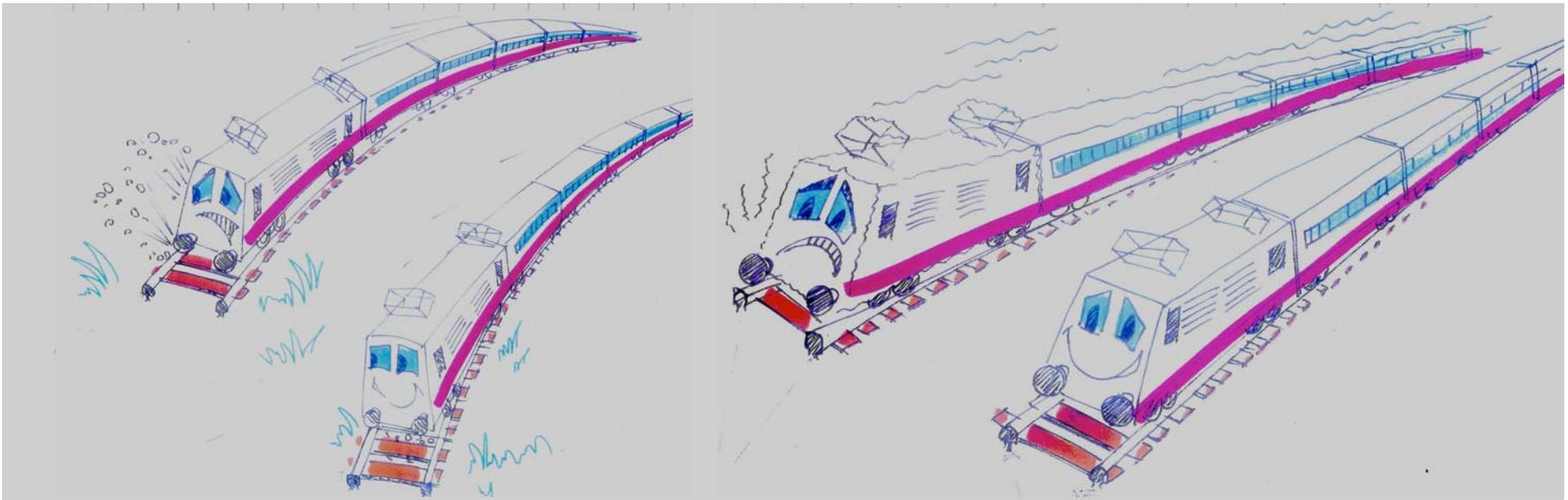
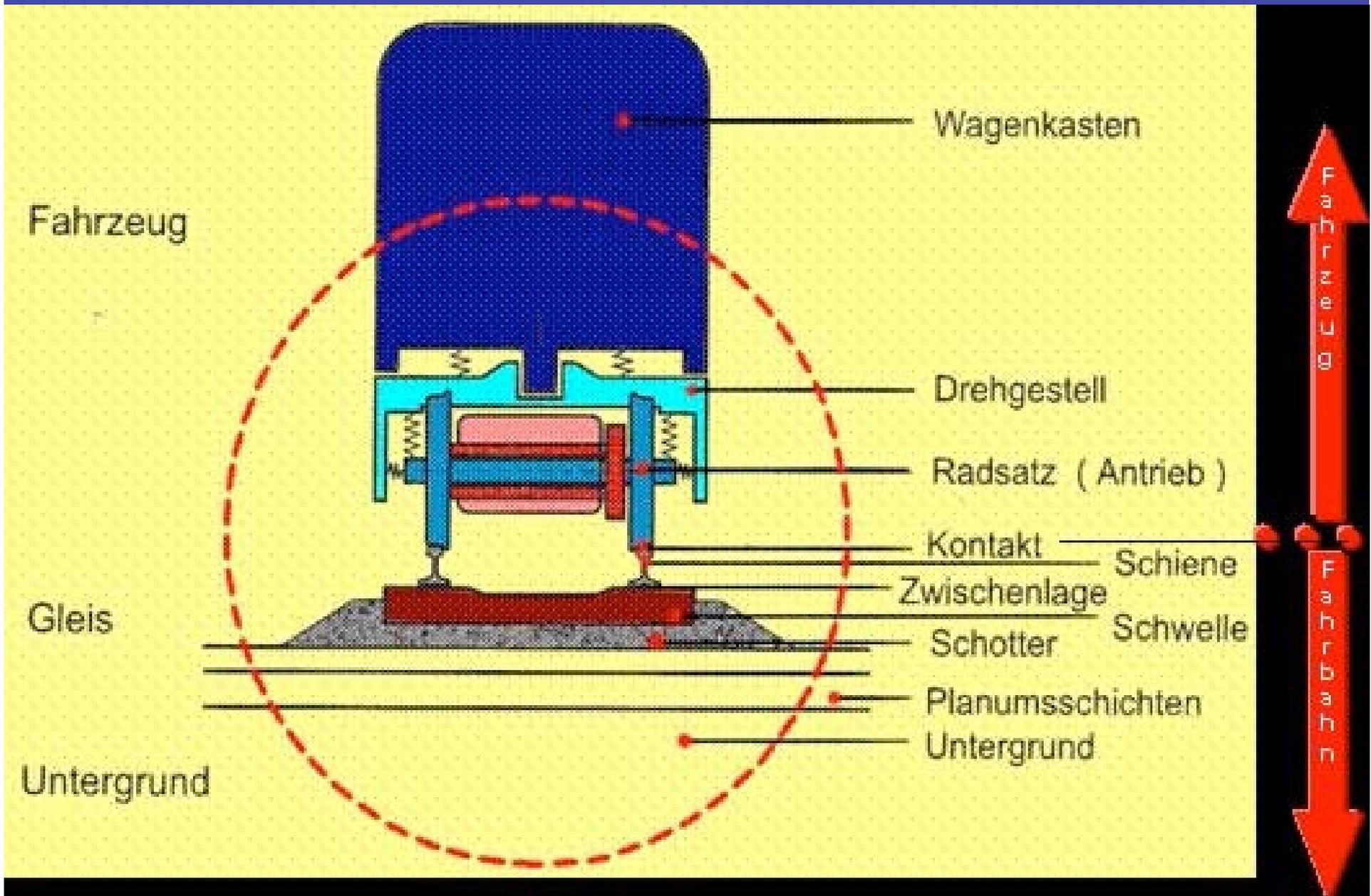


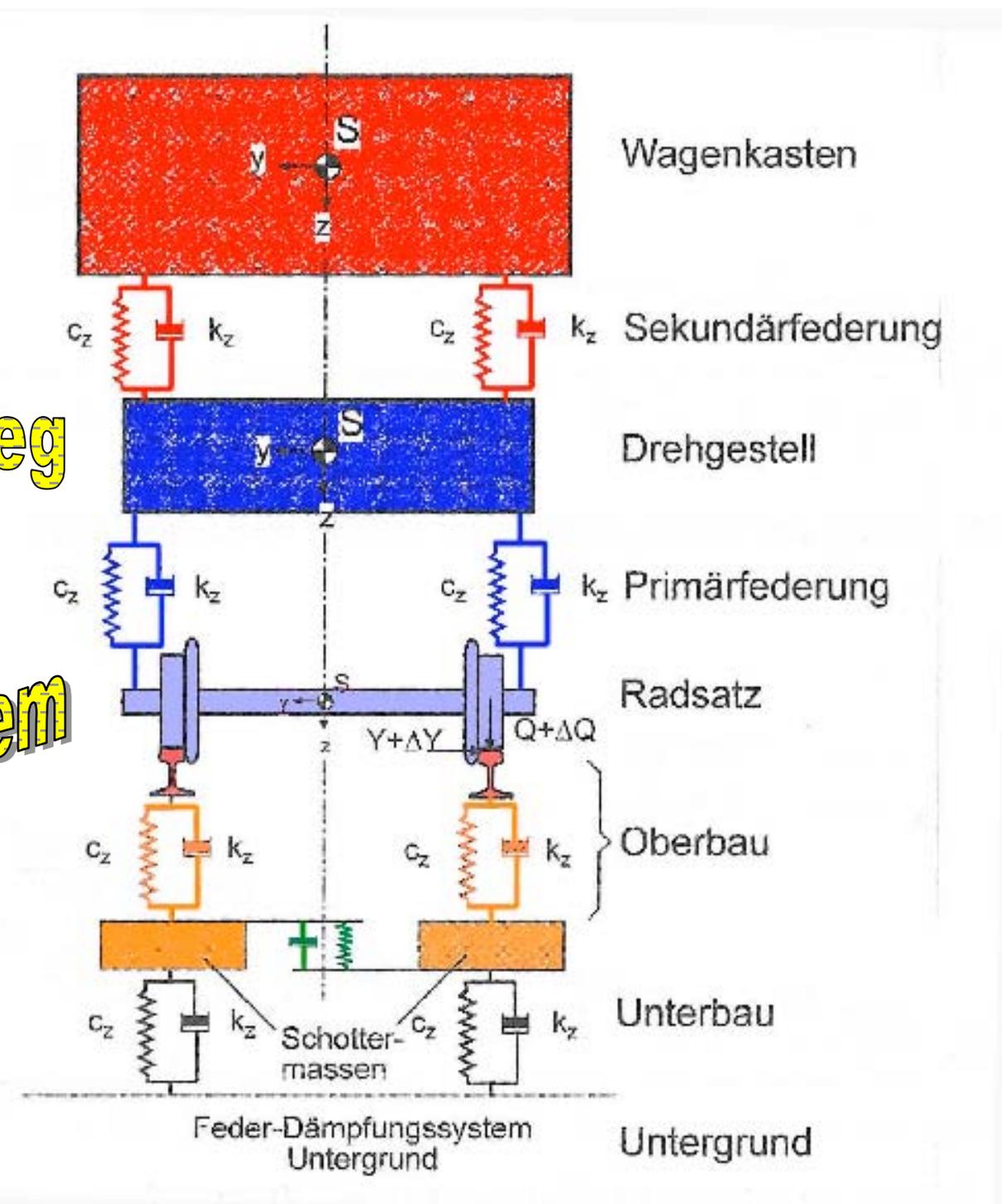
# Lauftechnik



# Elemente des Systems Fahrzeug-Fahrbahn

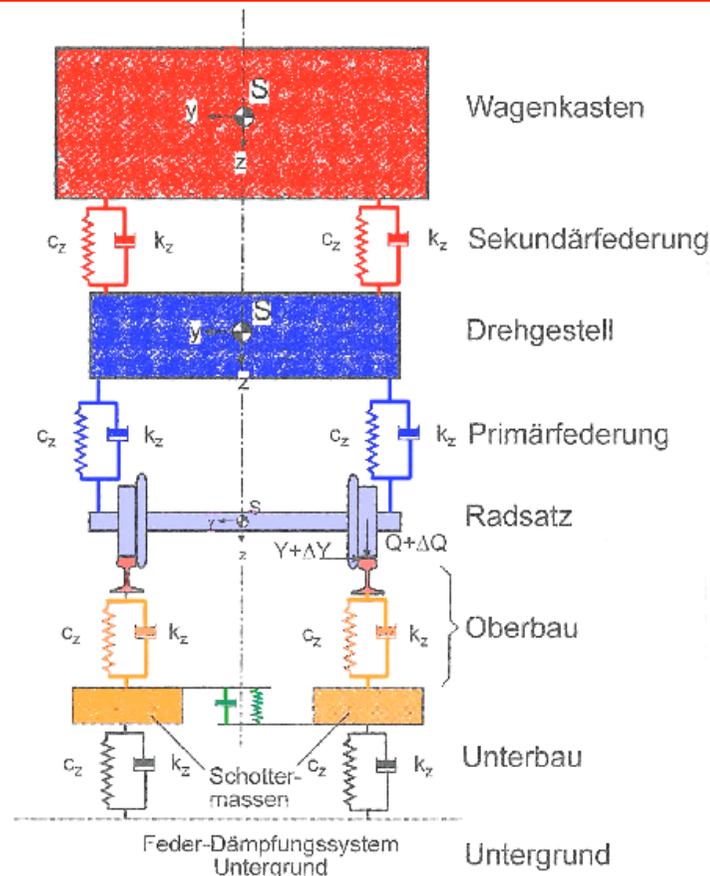


Die Interaktion  
 Fahrzeug/Fahrweg  
 ein  
 Schwingungssystem



## Das Fahrzeug soll

- die Fahrsicherheit und das Fahrverhalten gewährleisten
- die vertikalen und horizontalen Rad-Schienenkräfte so gering wie möglich halten
- im Reiseverkehr einen guten Fahrkomfort bieten.



**Die einzelnen Systemteile des Fahrzeugs** sind über Komponenten, die Feder- und Dämpferwirkung aufweisen, gekoppelt. Die Feder- und Dämpferelemente zwischen Fahrzeugkasten und Fahrwerk sowie zwischen Fahrwerk und Radsatz sind sehr gut bekannt und deren Verhalten ist mathematisch gut beschreibbar.

**Der Fahrweg** selber lässt sich in seinen elastoplastischen Eigenschaften, wegen des inhomogenen Verhaltens des Schotterbettes, der Planungsgrundschicht und des Untergrundes nicht analytisch genau beschreiben. Es werden empirische, durch Versuche ermittelte Kenngrößen und Zusammenhänge angewendet.

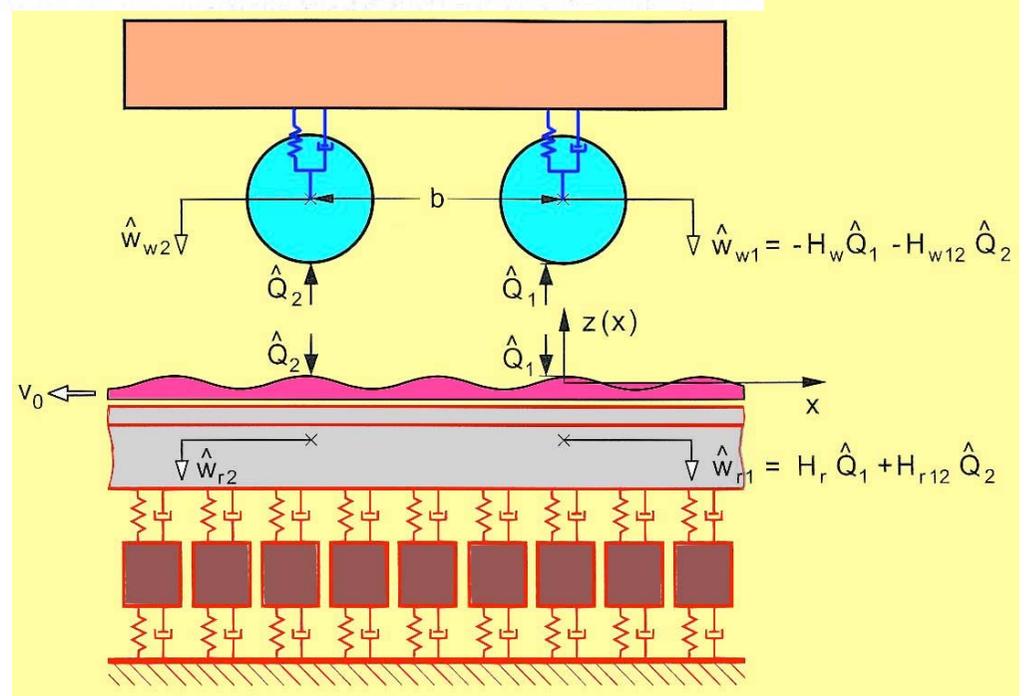
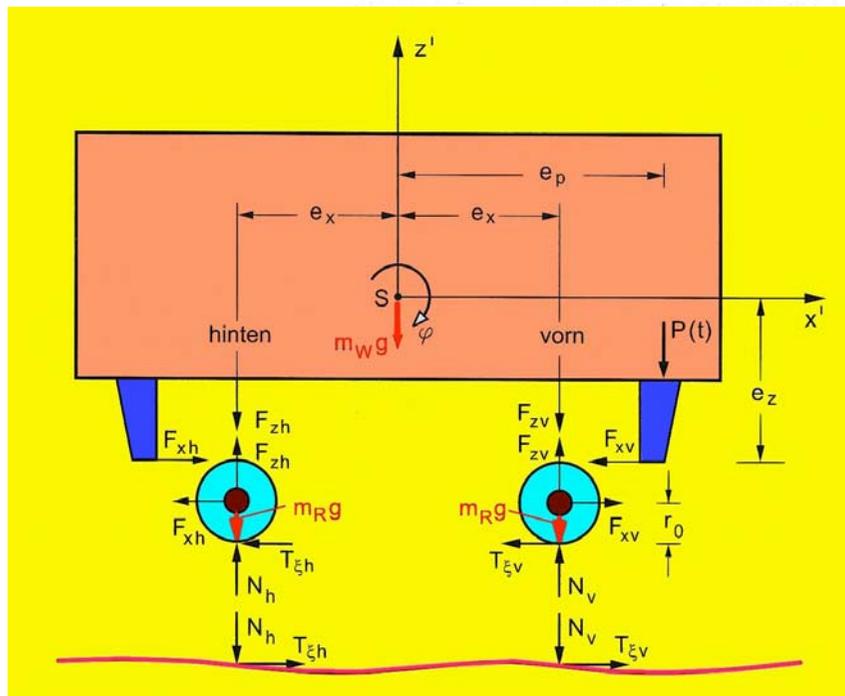
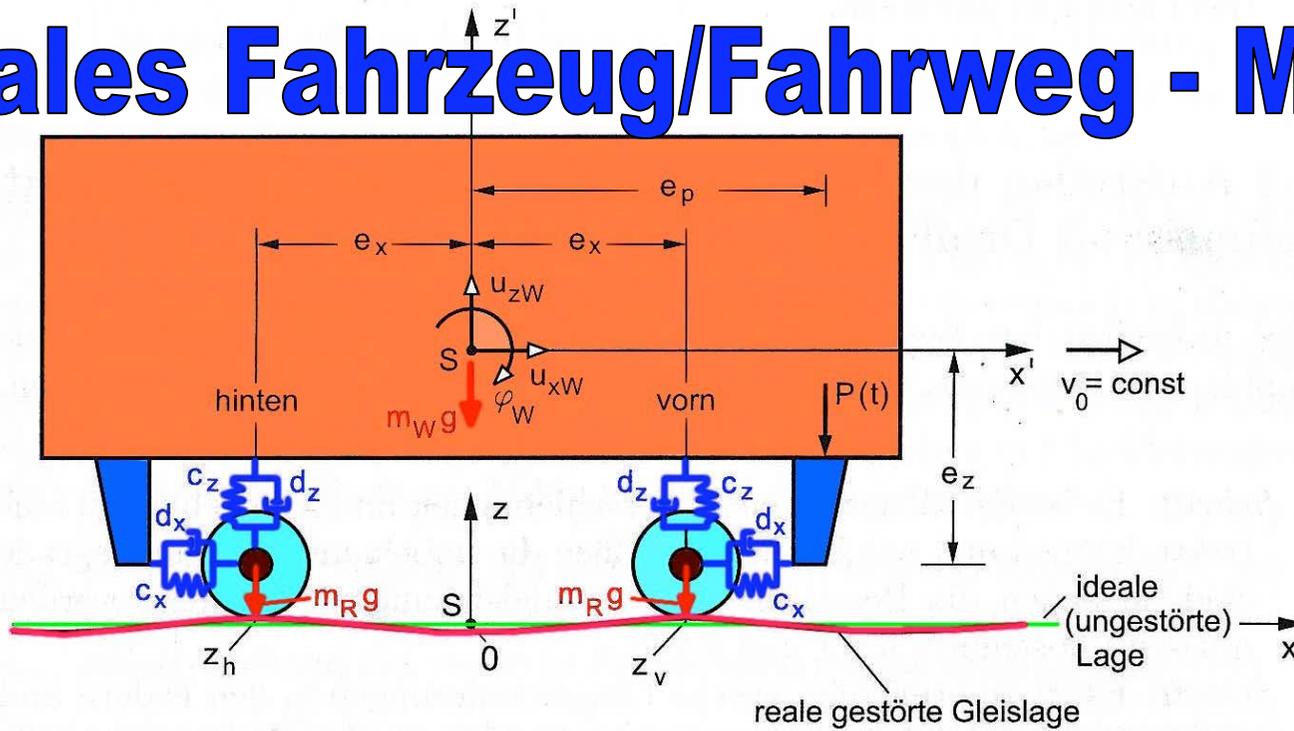
## Das Gleis soll

- die Fahrzeuge entgleisungssicher führen
- die vertikalen und horizontalen Fahrzeugkräfte aufnehmen
- diese Kräfte über Gleisrost und Schotterbett in den Untergrund ableiten
- einen guten Fahrkomfort sicherstellen
- eine hohe Verfügbarkeit für die Produktion sicherstellen.

# Dynamik von Schienenfahrzeugen

- Interaktion Fahrzeug/Gleis, Anregungen
- Kontakt Rad/Schiene, Interaktion Radsatz/Gleis
- Vertikaldynamik, freie Schwingungen
- Vertikaldynamik, erzwungene Schwingungen
- Regellose Schwingungen
- Lateraldynamik
  - **Bewegungsmechanismen**
  - **Eigenverhalten eines Radsatzes**
  - **Eigenverhalten und Stabilität von Fahrwerken**
  - **Stabilität von Fahrzeugen**
  - **Nichtlineare Stabilität**
- Bogenlauf

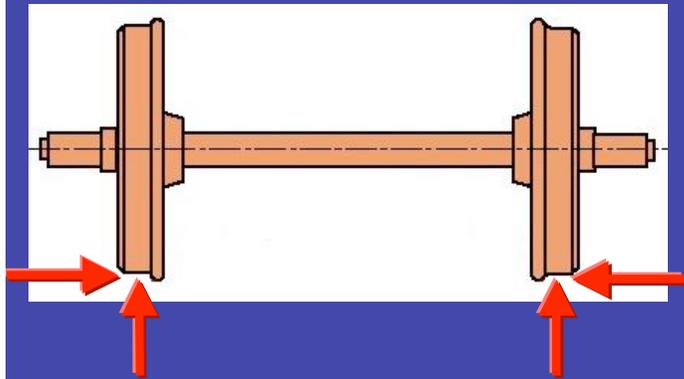
# Vertikales Fahrzeug/Fahrweg - Modell



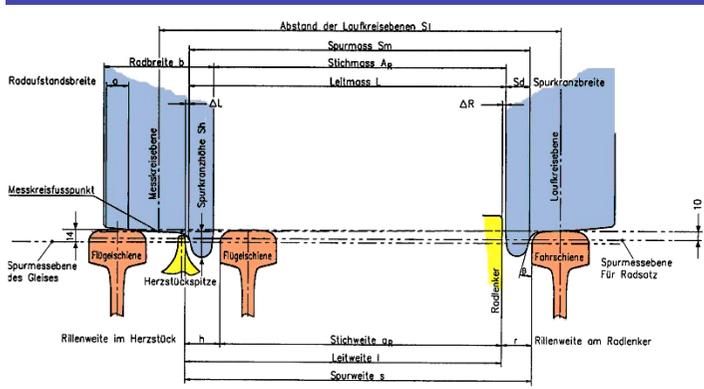
# Je nach Problemstellung zu beachtende Frequenzbereiche

Problembereich	Frequenzbereich [Hz]
<b>Fahrzeug</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kräfte Rad/Schiene, Fahrsicherheit</li> <li>• Fahrzeugverhalten</li> <li>• Fahrkomfort</li> </ul>	0 - 30
<b>Drehgestell und unabgefederte Massen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Radlager</li> <li>• Betriebsfestigkeit von Lagern, Bremsen und Drehgestellanbauteilen</li> <li>• Betriebsfestigkeit von Radsätzen</li> <li>• Betriebsfestigkeit von Drehgestellrahmen</li> </ul>	0 - 200
<b>Probleme von Rad- und Schienenlaufflächen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flachstellen (Rad)</li> <li>• Schleuderstellen (Schiene)</li> <li>• Unrunde Räder (Polygonisierung)</li> <li>• Radriffeln</li> <li>• Langwellige Höhenabweichungen Schienenfahrflächen (Schlupfwellen)</li> <li>• Kurzwellige Schienenriffel</li> <li>• Schienenstöße, schlecht geschliffene Schweissstellen</li> <li>• Rollkontaktermüdungsschäden (Head-Checks, Squats, usw.)</li> <li>• Rad- und Schienenverschleiss</li> </ul>	(50 – 200)  0 - 1500
<b>Gleiskomponenten</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Betriebsfestigkeit (Ermüdung von Schienen)</li> <li>• Zwischenlagenbeanspruchung, Alterung</li> <li>• Betonschwellen</li> <li>• Schottersetzung und Gleislageverschlechterung</li> <li>• Untergundsetzungen</li> </ul>	0 - 1500
<b>Rad-Schienen-Lärm</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rollgeräusch</li> <li>• Lärm bei stossender Beanspruchung (Schienenstöße)</li> <li>• Kurvenkreischen</li> </ul>	0 - 5000
<b>Körperschall und Erschütterungen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erschütterungsausbreitung im Untergrund</li> <li>• Erschütterung und Schallabstrahlung bei Brücken</li> <li>• Schallemission</li> <li>• Körperschall und Schallabstrahlung bei Wagenkästen</li> </ul>	0 - 500

# Führungsfunktion Radsatz



# Befahrbarkeit der Gleisanlagen



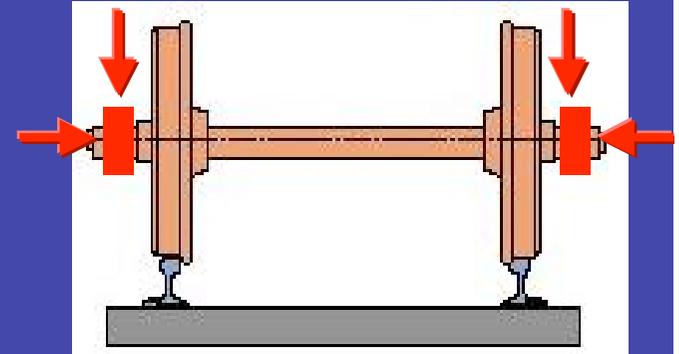
# Ausfall: Entgleisung



# Ausfall: Gleisverschiebung



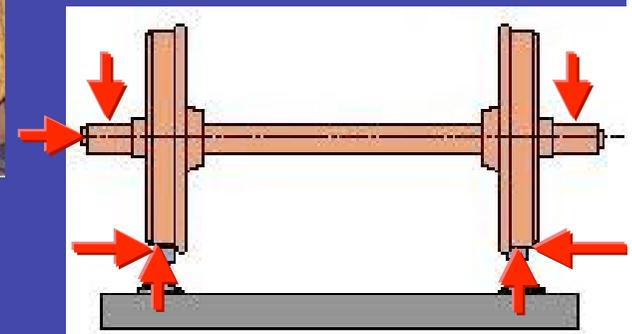
# Tragfunktion Radsatzlager



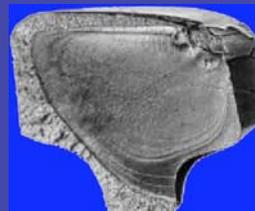
# Ausfall: Defekt im Lager



# Ausfall: Bruch Rad/Welle



# Ausfall: Bruch Schiene



# Führungs- und Tragfunktion Gleis und Schienen



# Auslegungsrechnung Fahrwerk

Das System Fahrzeug/Fahrweg besteht einerseits aus dem Fahrzeug mit dem Kasten sowie mit den Fahrwerken und andererseits aus der Fahrbahn mit ihren verschiedenen Bauteilen und Schichten beim Oberbau, Unterbau und Untergrund.

Mit der Auslegungsrechnung werden neben der mechanischen Festigkeitsdimensionierung und der Fahrzeugumgrenzung die Steifigkeitseigenschaften der Körper (Kasten, Fahrwerksrahmen) sowie der zwischen diesen angeordneten Koppellemente (Federn, Anbindungen, Dämpfer, usw.) festgelegt. Dabei sind die folgenden Randbedingungen und Anforderungen zu erfüllen:

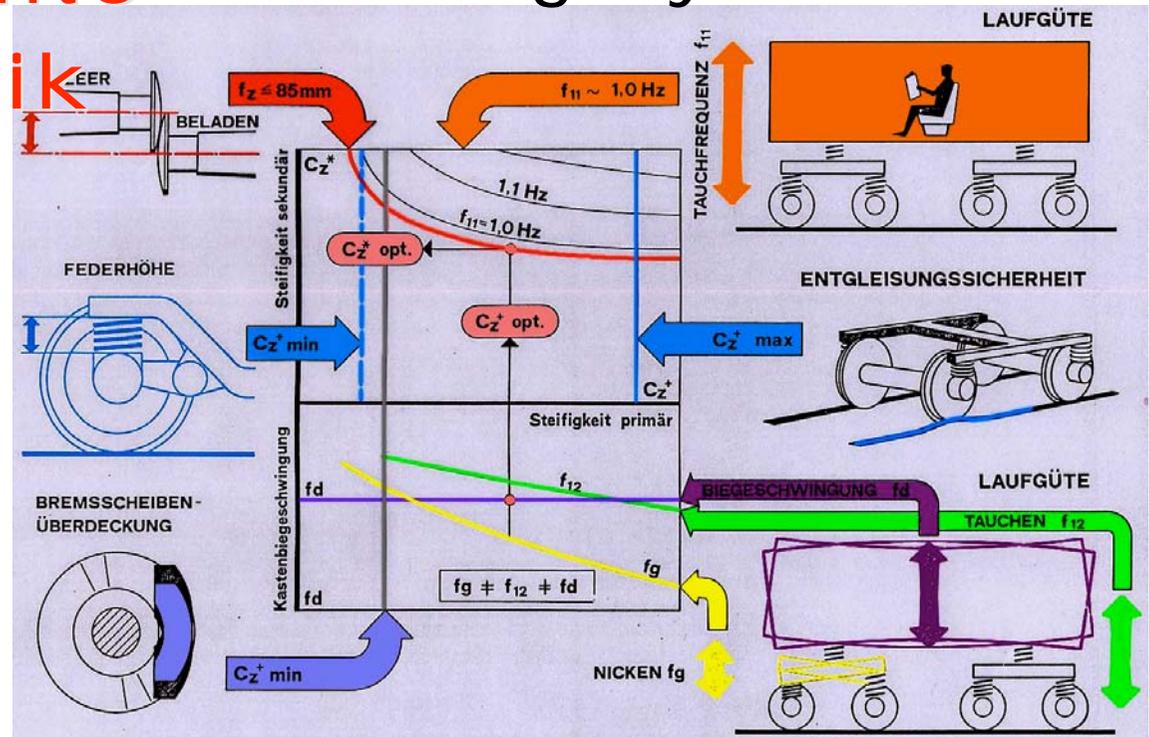
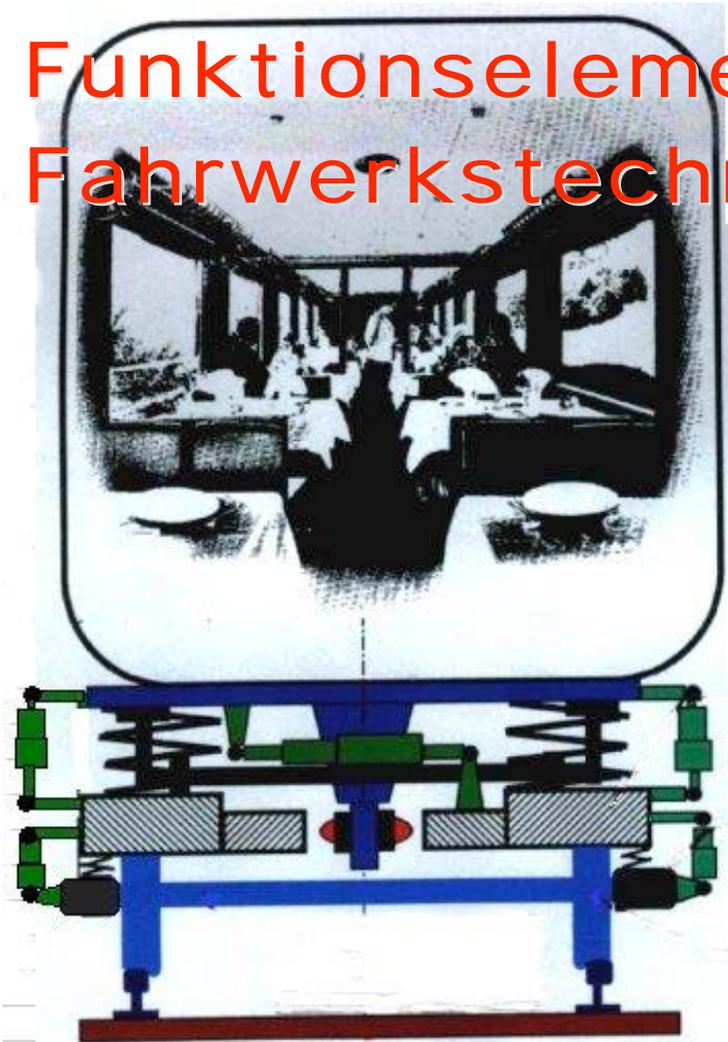
- **Hüllraum:** Das ist der vom Fahrweg zur Verfügung gestellte Bauraum für die Fahrzeuge.
- **Fahrdynamische Zielgrößen:** Darunter werden im Wesentlichen die maximalen Fahrgeschwindigkeiten, Überhöhungsfehlbeträge sowie der Ruck beim Befahren von Übergangsbögen und Weichen verstanden
- **Die dynamischen Eigenschaften des Systems Fahrzeug/Fahrweg:** Beim niederfrequenten Verhalten der Fahrzeuge geht es um Fragen der Stabilität des Fahrzeuglaufs, des Bogenlaufs- bzw. Führungsverhaltens um die Aspekte des Störverhaltens.
- **Die maximalen Radstände und Überhänge der Fahrzeuge:** Der maximale Radstand beträgt aufgrund der Anforderungen aus den Sicherheitsanlagen 17.5 m. Die Überhänge sollten wegen der gegenseitigen Beeinflussung der Seitenpuffer bei den Fahrzeugen wegen der Befahrbarkeit insbesondere von Weichen mit engen Ablenkungsradien nicht zu gross gewählt werden.
- **Geometrische Gestaltung der Fahrbahn:** Die Geraden, Übergangsbögen und Vollbögen sowie die unterschiedlichen Weichen- und Kreuzungstypen werden aufgrund der Interoperabilitätsanforderungen, wann immer möglich, nach international abgestimmten Regeln, gestaltet.
- **Die maximalen Radlasten, unabgefederten Massen und Meterlasten der Fahrzeuge:** Die Radsatzlasten sind in Verbindung mit den maximalen Fahrgeschwindigkeiten vor allen auf die Festigkeit der Schienen abzustimmen.

# Ergebnisse aus Auslegungsrechnungen liefern Aussagen zu:

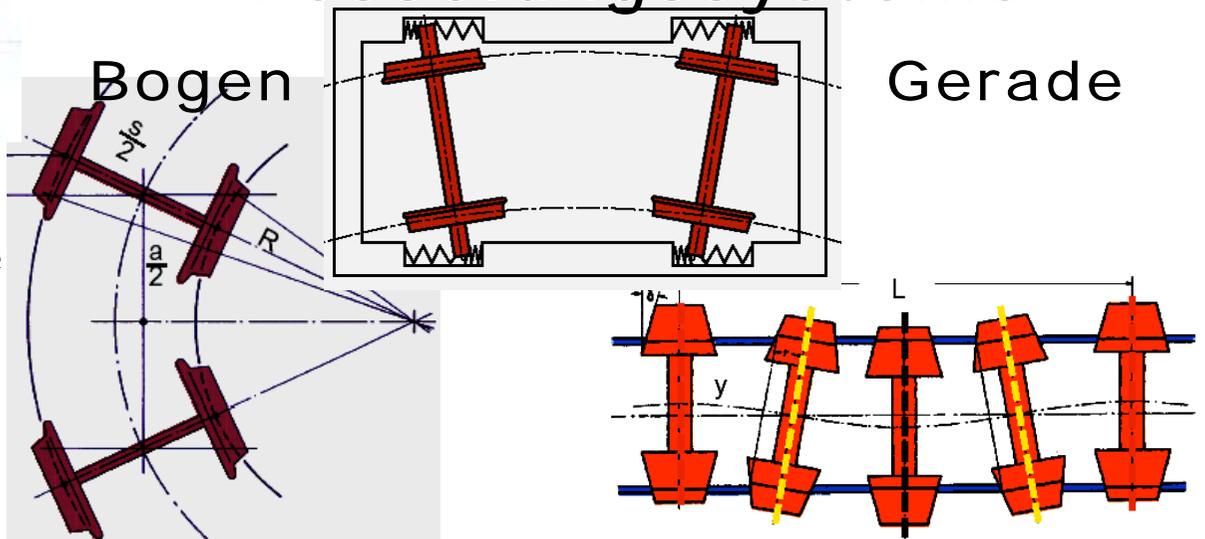
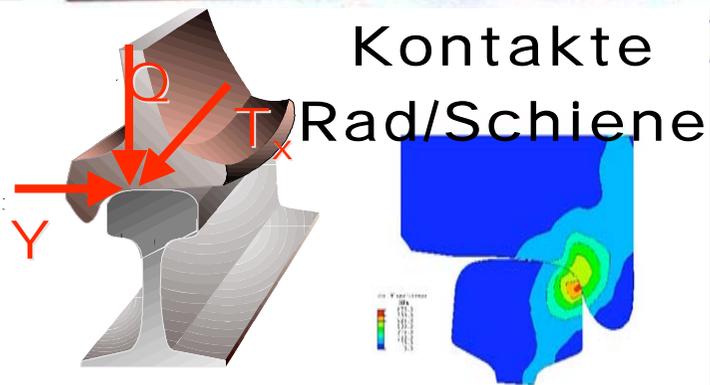
- Schersteifigkeit und Verdrehsteifigkeit zwischen den Radsätzen bei gegenseitig gekoppelten Radsätze ( $C_T, C_R$ )
- Steifigkeiten der Primärfederung ( $C_x^+, C_y^+, C_z^+$ )
- Steifigkeiten Sekundärfederung ( $C_\varphi^*, C_y^*, C_z^*$ ), Lage der Anlenkpunkte der Federn
- Zug-/Bremskraftübertragung zwischen den Drehgestell und Fahrzeugkasten mit Steifigkeit  $C_x^*$  und Höhe der Anlenkung über Schienenoberkante
- Steifigkeit der Wankstütze  $C_\varphi^*$
- Primärdämpfung  $d_z^+$ , Sekundärdämpfungen  $d_y^*, d_z^*$  und Lage der Anlenkpunkte der Dämpfer
- Drehdämpfung bzw. Drehhemmung mit dem Beiwert der Dämpfung, deren Endkraft, dem waagrechten Abstand der Dämpfer und der radialen Steifigkeit der Befestigungspunkte

# Funktionselemente Federungssysteme

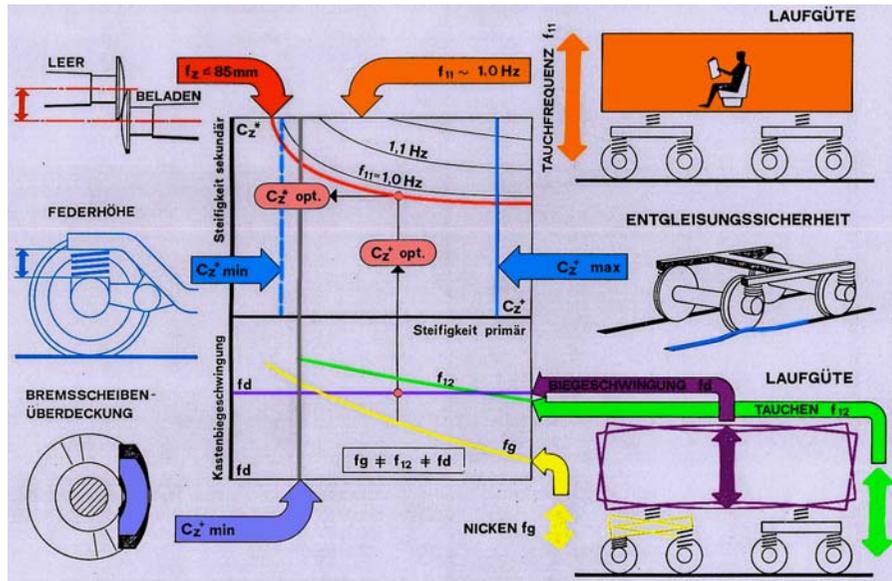
## Fahrwerkstechnik

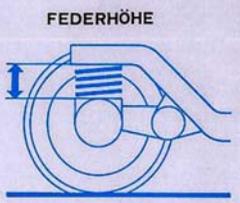
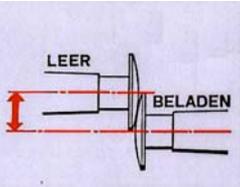
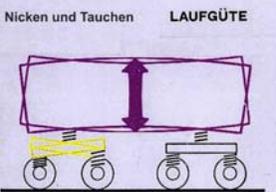
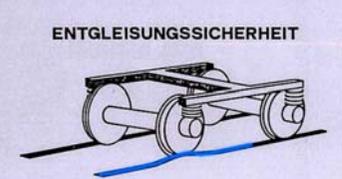


## Fesselungssysteme

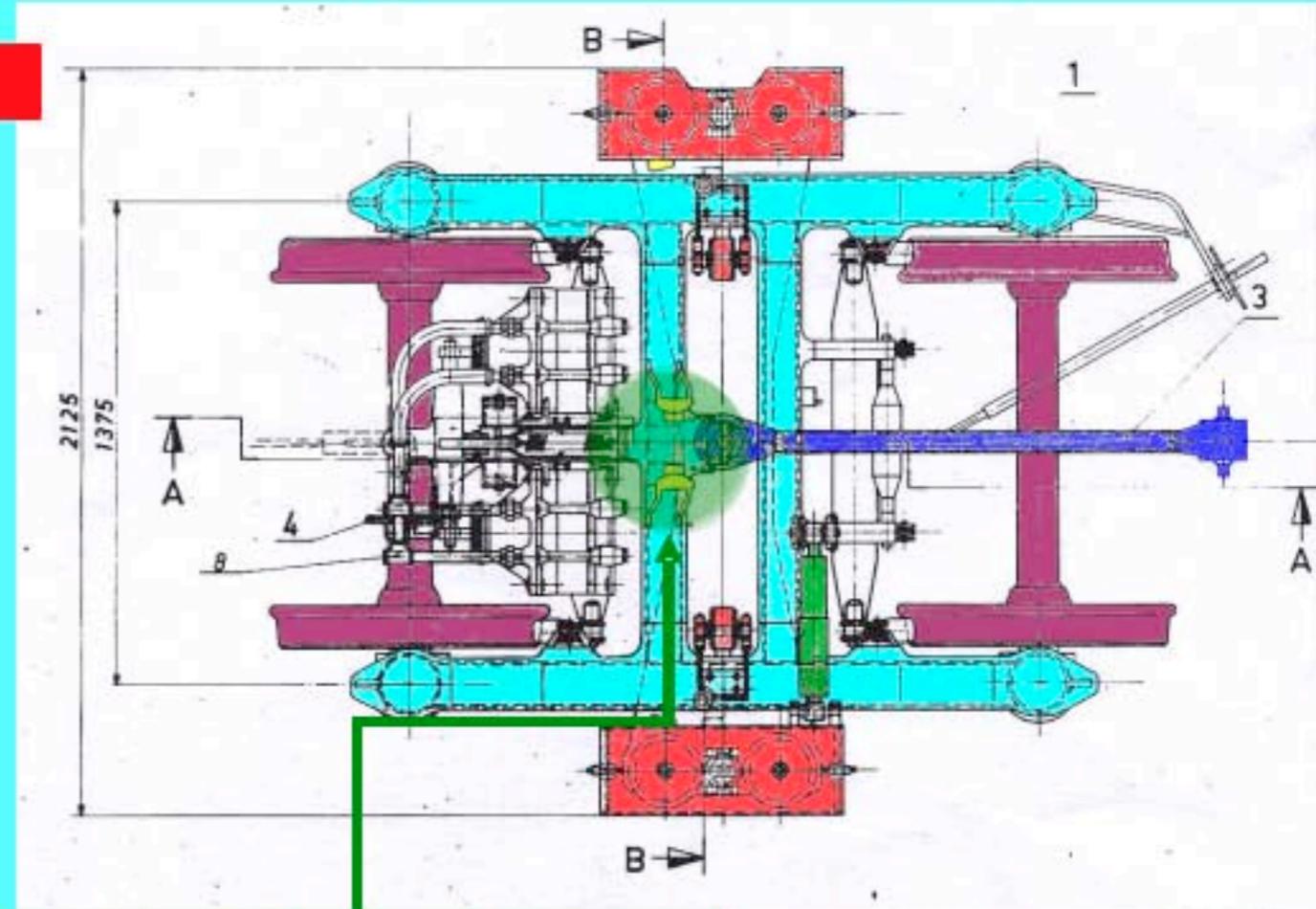
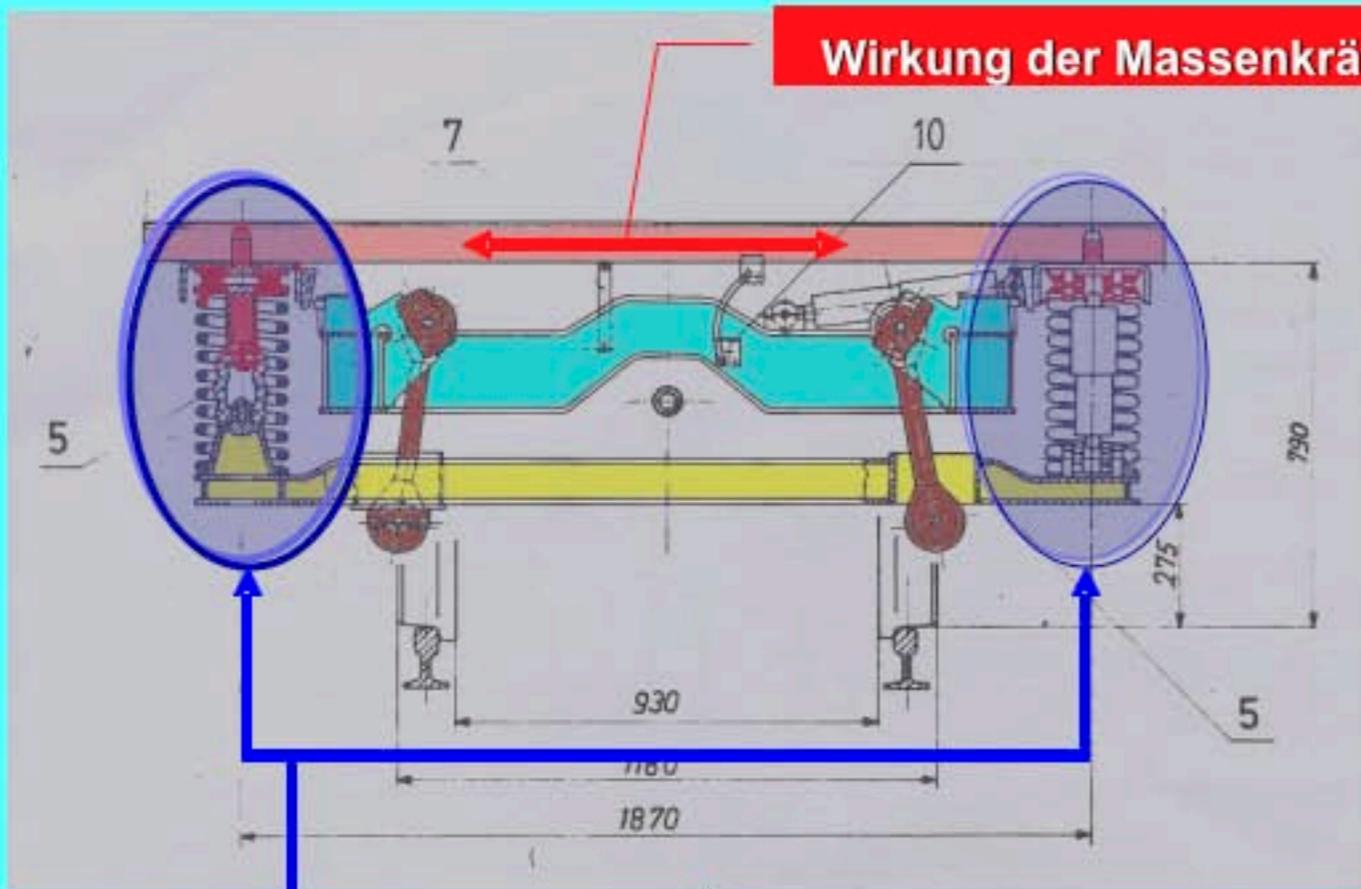


# Auslegung des Federungssystems in Richtung vertikal

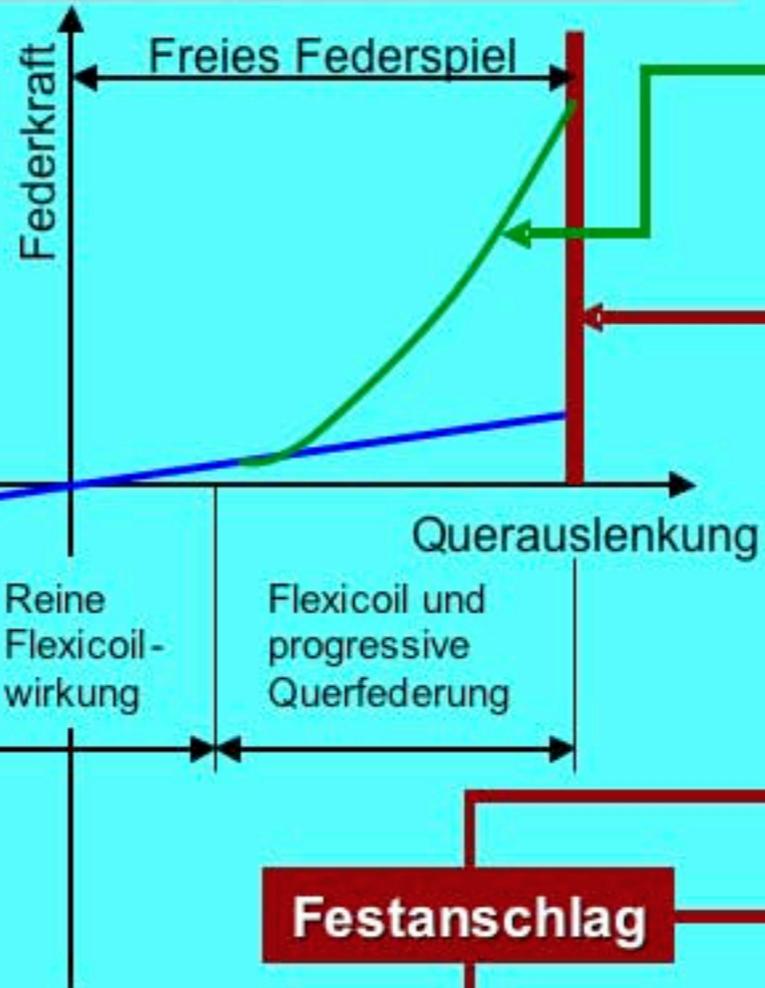


Geometrisch/physikalische Grössen	Physikalische Grössen
 <p>FEDERHÖHE</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Federhöhe primär</li> <li>- Komfort</li> <li>- Dynamik</li> <li>- Fahrzeugmasse</li> </ul>	 <p>LAUFGÜTE</p> <p>Abstimmung Feder-Steifigkeit primär und sekundär zur Erzielung hoher Laufruhe</p>
 <p>LEER / BELADEN</p> <p>Pufferüberlappung</p>	 <p>Nicken und Tauchen LAUFGÜTE</p> <p>Verstimmung der Eigenfrequenzen Fahrzeugkasten und Drehgestell</p>
 <p>BREMSSCHEIBEN-ÜBERDECKUNG</p> <p>Bremsscheibenüberdeckung</p>	 <p>ENTGLEISUNGSSICHERHEIT</p> <p>Gewährleistung der Sicherheit gegen Verwindungsentgleisungen</p>

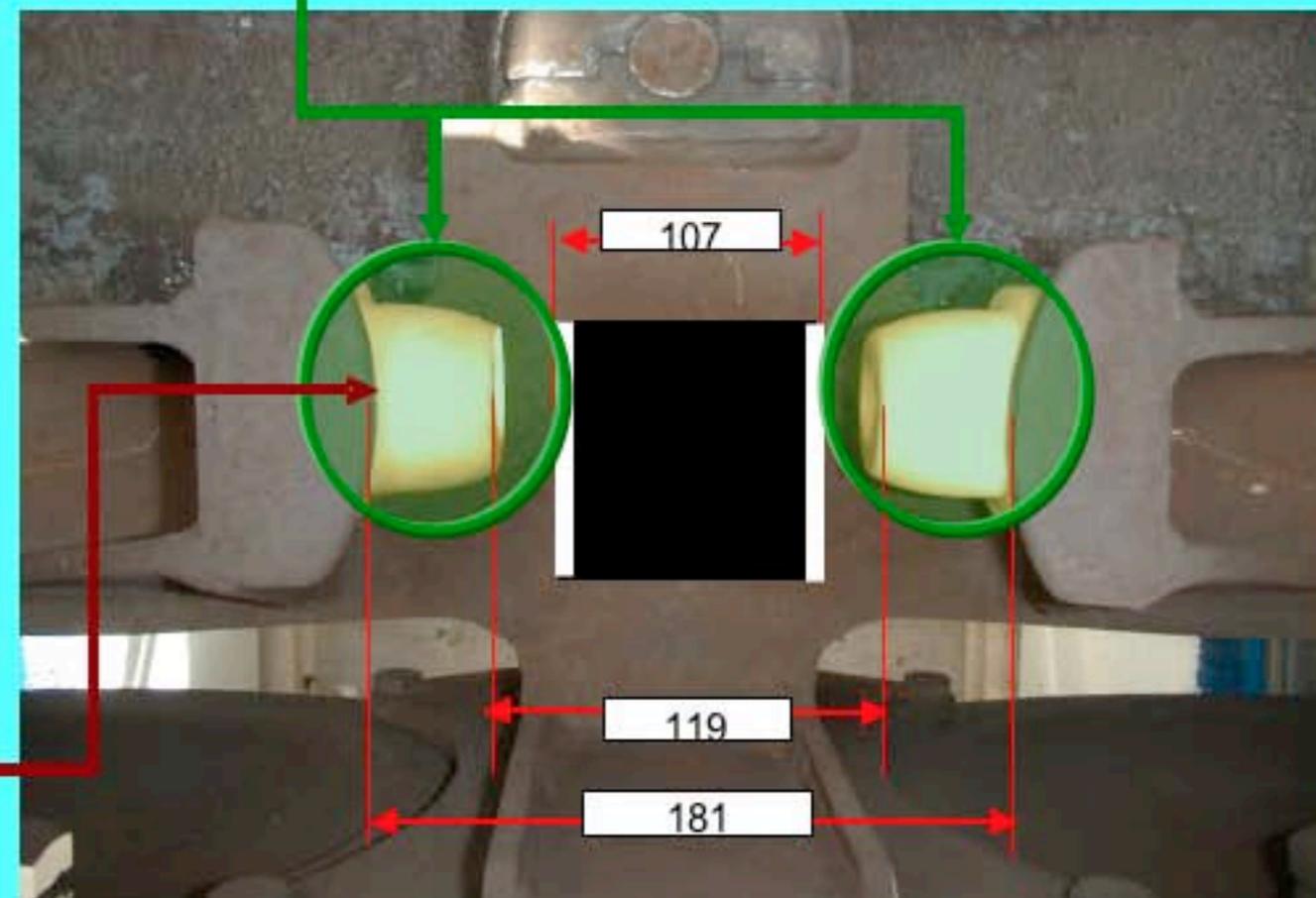
# Prinzip der Querverfederung zwischen Fahrzeugkasten und Drehgestell



**Flexicoilfeder mit Kennlinie**

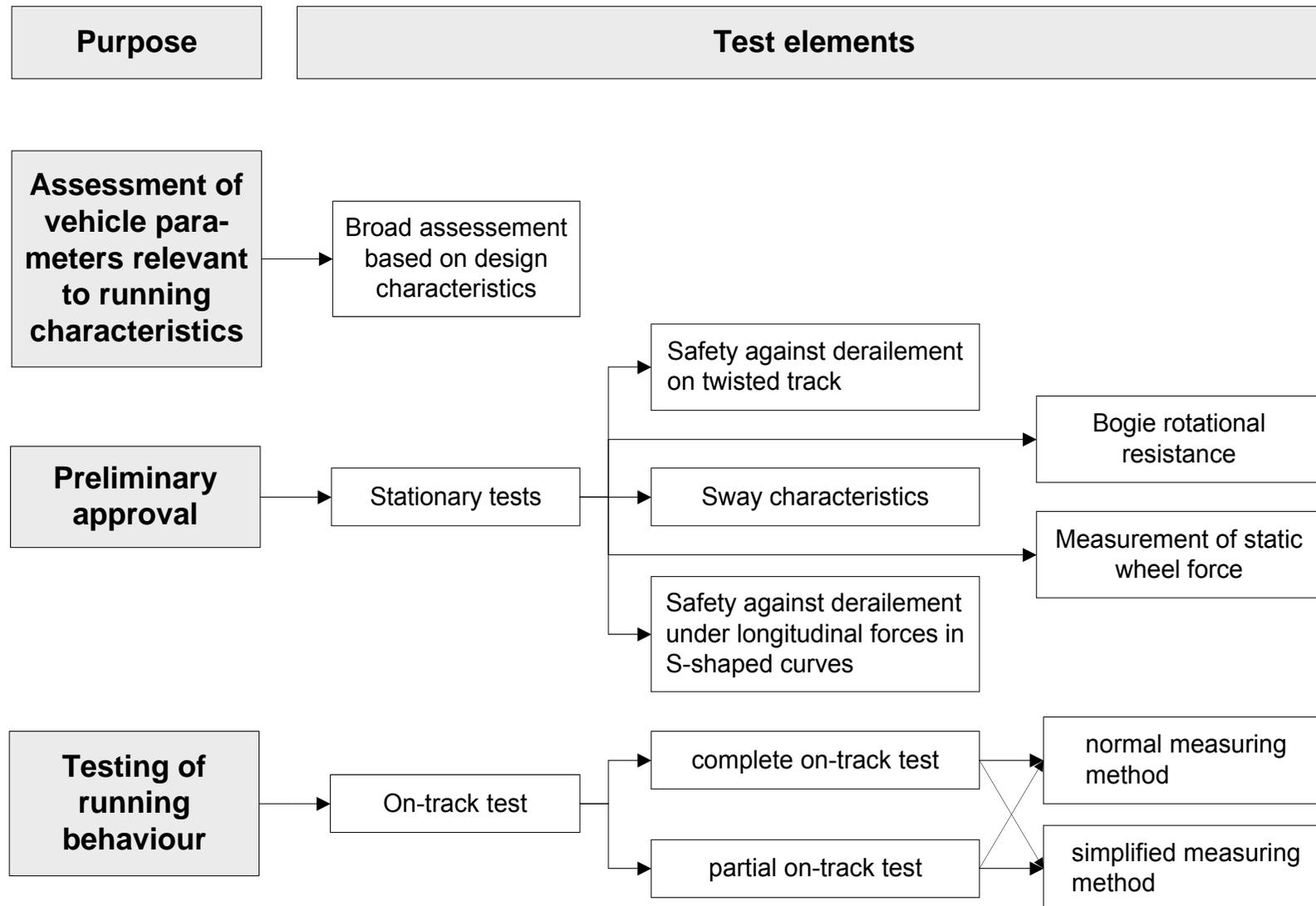


**Progressive Querverfederung**

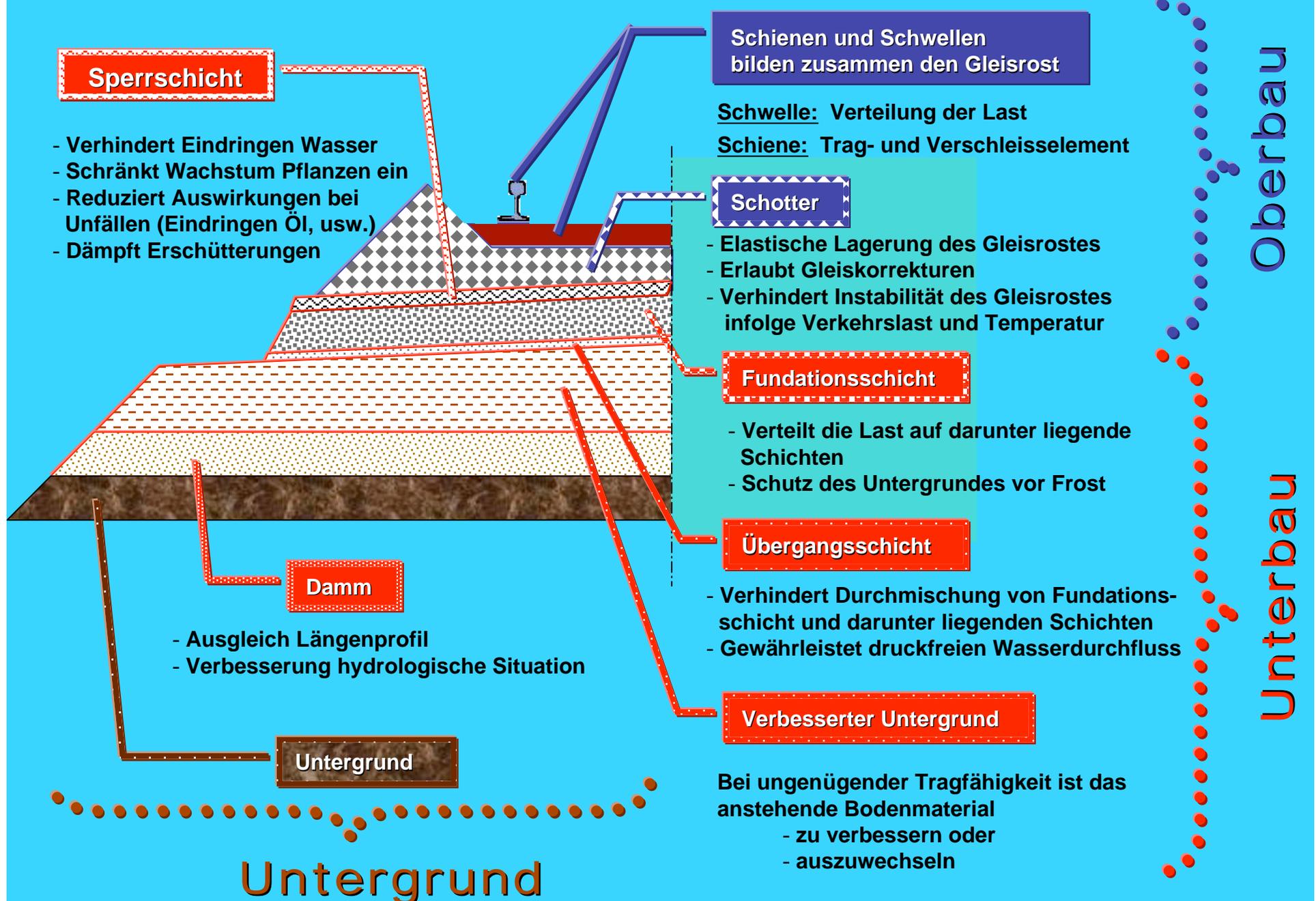


# Versuchsbereiche nach EN 14363

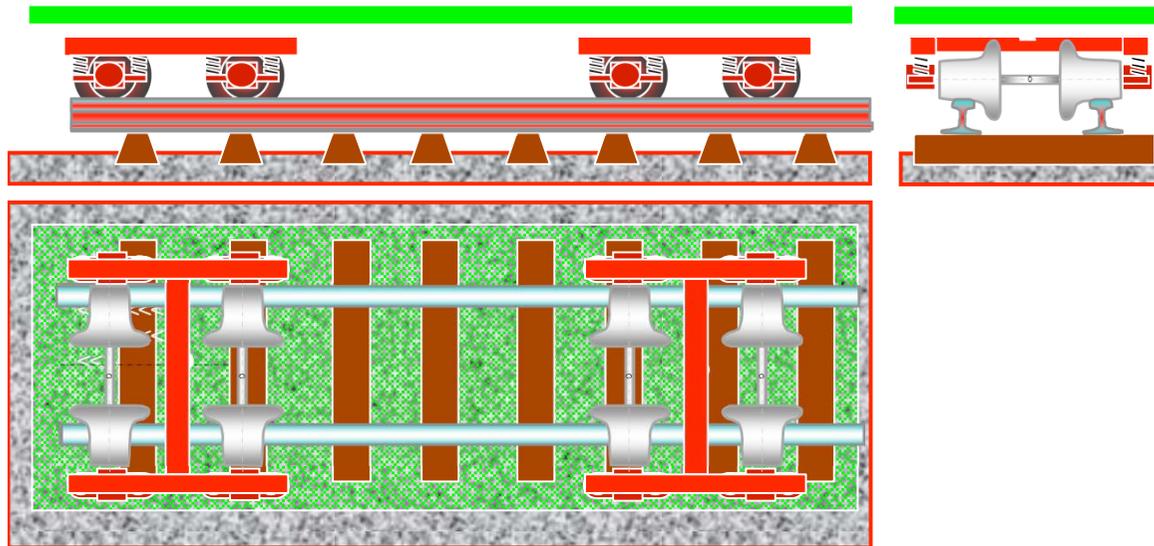
Durch Auslegungsrechnung festzulegende Fahrzeugparameter



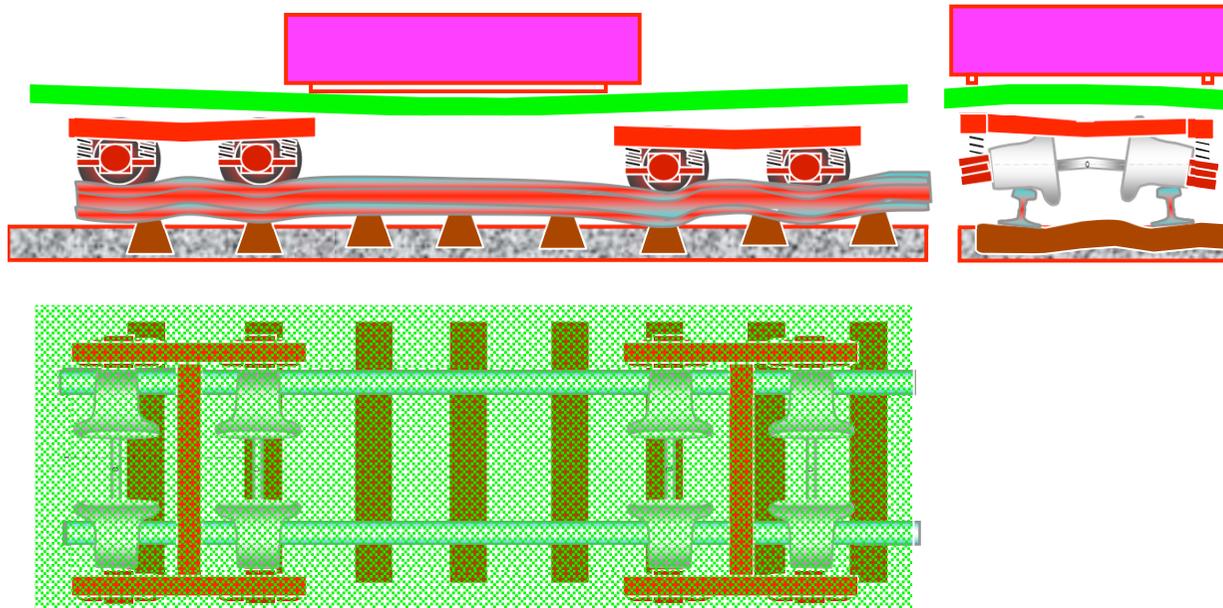
# Fahrbahn: Schichten und deren Hauptfunktionen



# Zusammenwirken Fahrzeug/Fahrbahn



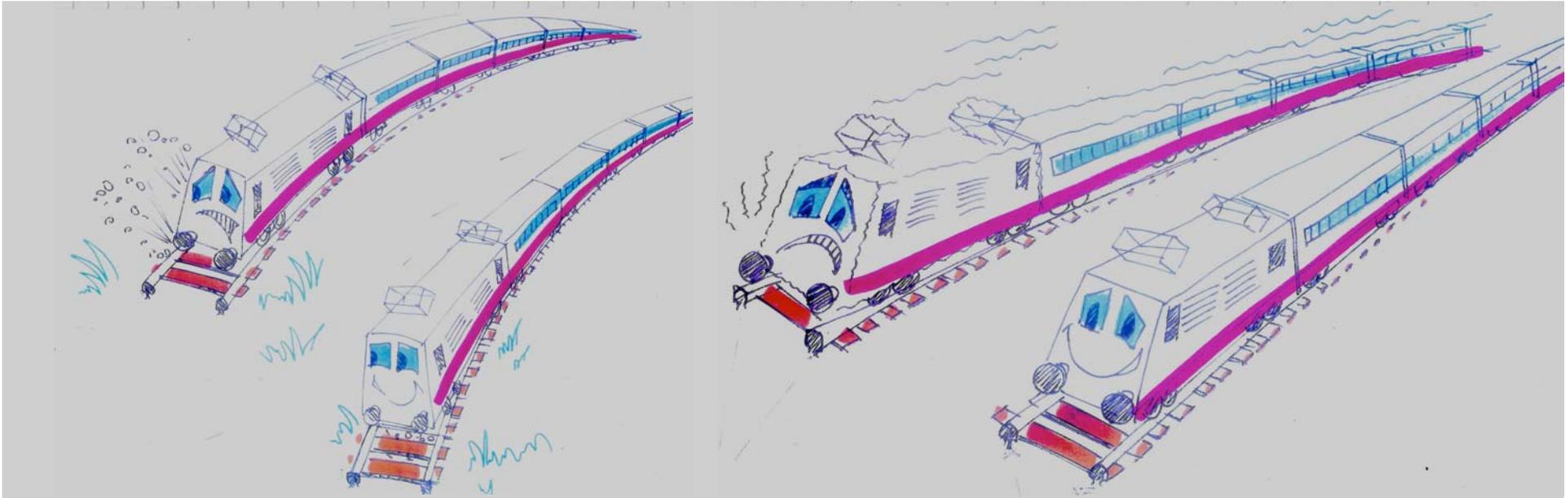
**starr**



**elastisch**



# Auslegungsbedingungen

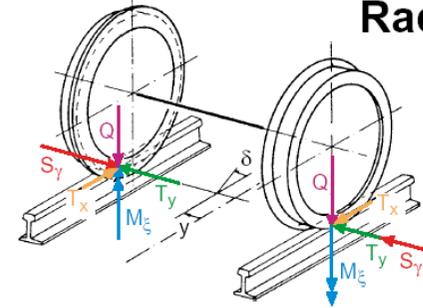


## Fahrweg

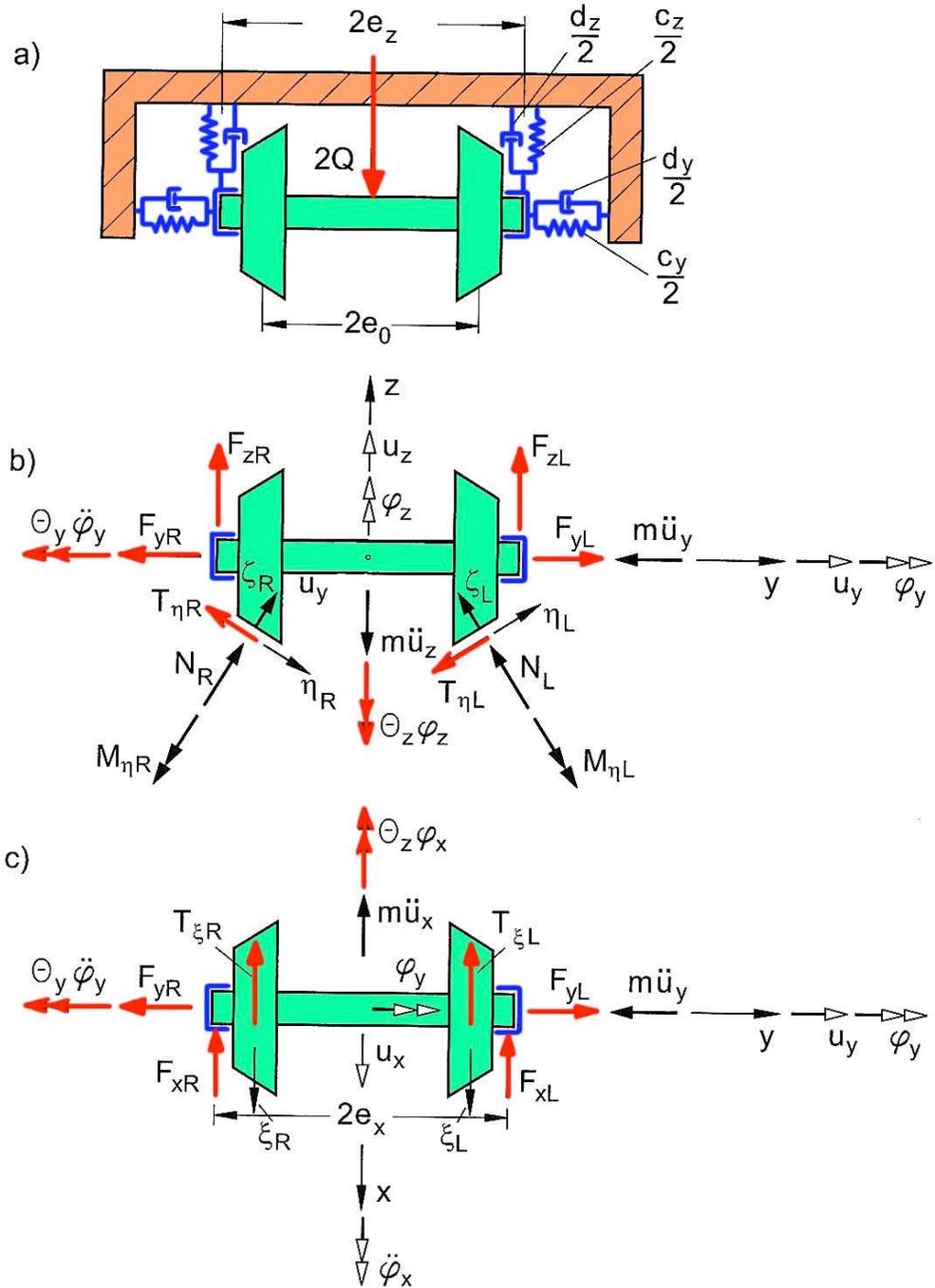
- Trassierungselemente (Bogenhalbmesser, Überhöhung, Überhöhungsfehlbetrag, kürzeste Weiche und Gegenbogenweiche, usw.)
- Regellose Gleislagefehler (Richtung, Längshöhe, Querhöhe)
- Steifigkeiten und Dämpfungen als Auslegungsparameter zur Gleisdynamik

## Profilpaarung von Rad und Schiene

# Rad/Schienen-Effekte am konventionellen Radsatz



- Q Radlast
- $S_y$  Profil-Seitenkraft
- $T_x$  Kraftschluß-Längskraft
- $T_y$  Kraftschluß-Seitenkraft
- $M_{\xi}$  Bohrmoment
- y Querversatz im Gleis
- $\delta$  Schräglaufwinkel



Auswirkungen	Ursache			
	Formschluß	Kraftschluß quer	Kraftschluß längs	spin
Mechanismus				
Wirkg.	$S_y$	$T_y$	$T_x$	$M_{\xi}$
Kraft				
Leistung				
Verschleiss				

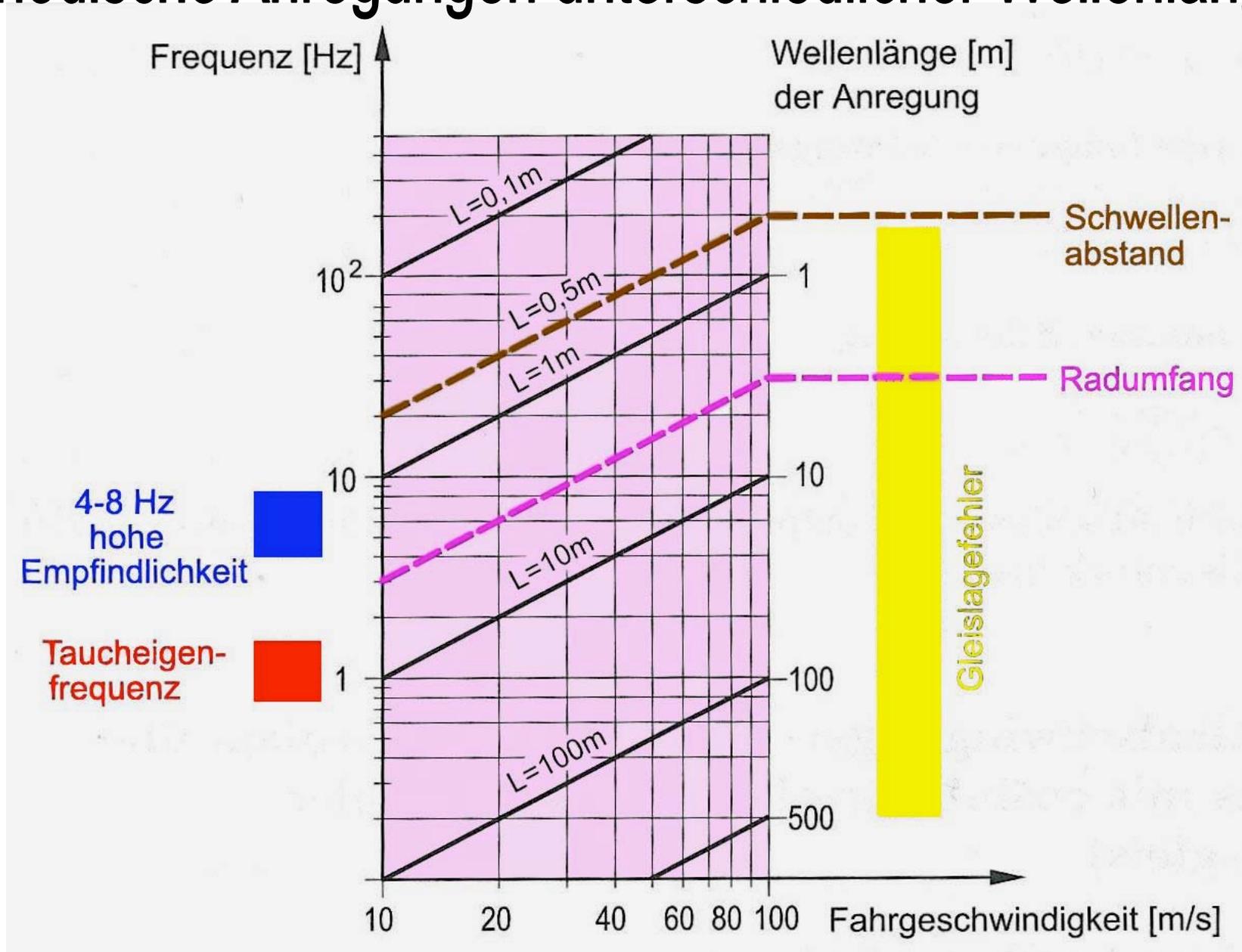
Ursache, Mechanismus, Wirkung des Rad/Schiene-Kontaktes und Auswirkungen auf entstehende Kräfte, Leistungsumsatz und Rad/Schiene Verschleiss

- |                                      |                                     |   |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---|
| $T_x$ Kraftschluß-Längskraft         | $V_y$ Verschleiß, quer              | $w_y$ Relativgeschwindigkeit, quer  |
| $T_y$ Kraftschluß-Seitenkraft        | $V_x$ Verschleiß, Seitenkraft       | $\gamma$ Laufflächenneigung   |
| $M_y$ Antriebs- bzw. Bremsdrehmoment | $V_{\xi}$ Verschleiß, spin          | $\delta$ Schräglauflinien   |
| $M_{\xi}$ Bohrmoment                 | $f_x$ Kraftschlußwert, längs        | $\xi$ Winkel zwischen Drehachse des Rades und Berührungsfäche Rad/Schiene |
| $P_x$ Kraftschlußleistung, längs     | $f_y$ Kraftschlußwert, quer         | $w_y$ Winkelgeschwindigkeit des Rades                                     |
| $P_y$ Kraftschlußleistung, quer      | $f_{\xi}$ Kraftschlußwert, spin     | $w_{\xi}$ spin  |
| $P_{\xi}$ Kraftschlußleistung, spin  | $s_x$ Längsschlupf                  |   |
| $S_y$ Profil-Seitenkraft             | $s_y$ Querschlupf                   |   |
| $V_x$ Verschleiß, längs              | $s_{\xi}$ Spinschlupf               |   |
|                                      | $w_x$ Relativgeschwindigkeit, längs |   |

# Beispiele von Anregungsmechanismen

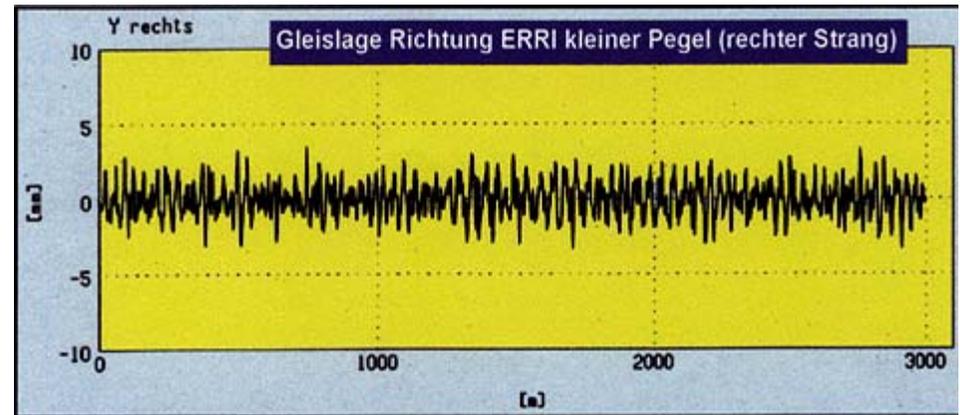
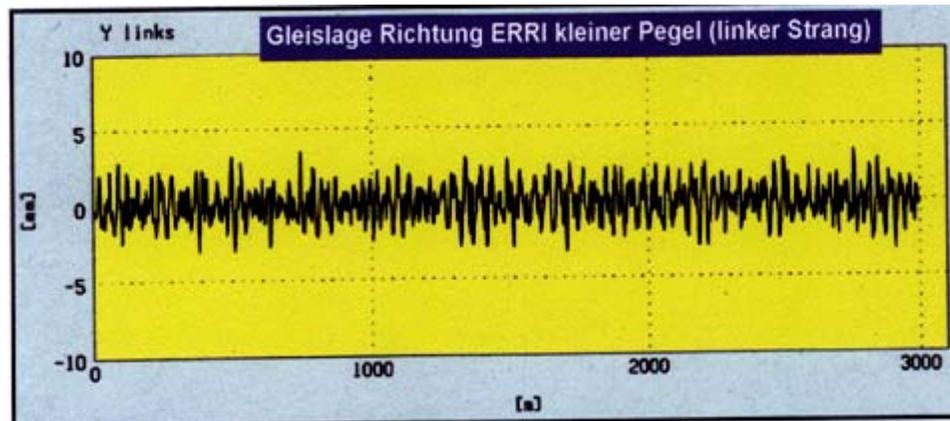
Erregungstyp	Differentialgleichung	Ursache beim Fahrzeug	Ursache beim Gleis
Fremderregung	$\tilde{M}\ddot{\vec{z}} + \tilde{D}\dot{\vec{z}} + \tilde{C}\vec{z} = \vec{p}(t)$	Rundheitsabweichungen bei den Radlauflächen und Höhenabweichungen bei den Schienenfahrflächen	
		- singulär - periodisch - stochastisch	- Riffel - Schlupfwellen - verlaschtes Gleis
Parametererregung	$\tilde{M}(t)\ddot{\vec{z}} + \tilde{D}(t)\dot{\vec{z}} + \tilde{C}(t)\vec{z} = \vec{p}(t)$	-	Schwellenüberrollung
Selbsterregung	$\tilde{M}\ddot{\vec{z}} + \tilde{D}\dot{\vec{z}} + \tilde{C}\vec{z} = 0$	Sinuslaufähnliche Bewegungsvorgänge	
		Radprofile und Spurmasse	Schienenprofile und Spurweiten

# Periodische Anregungen unterschiedlicher Wellenlängen

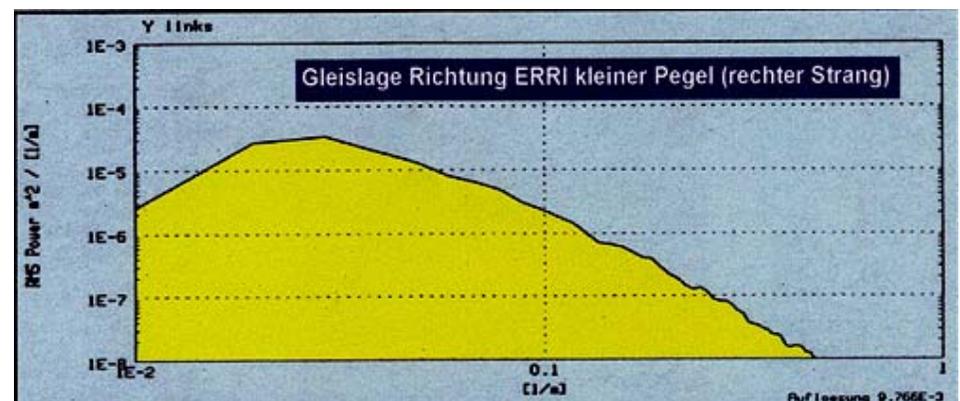
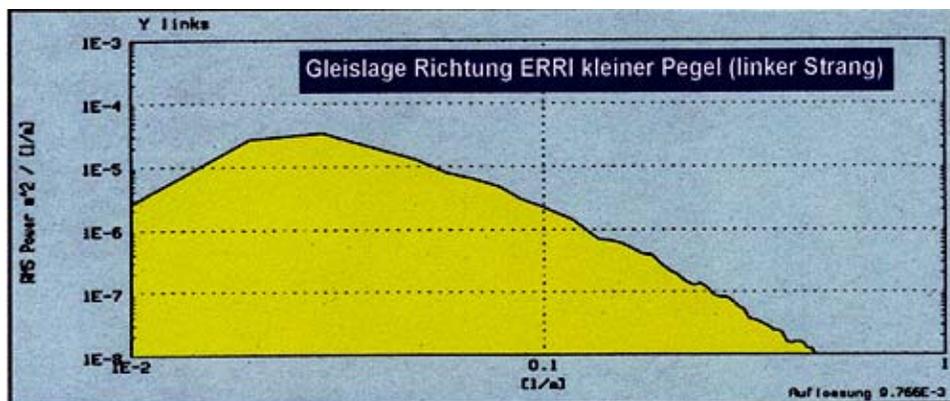


# Beispiel für Gleislage Richtung

## Darstellung als Analogschriebe

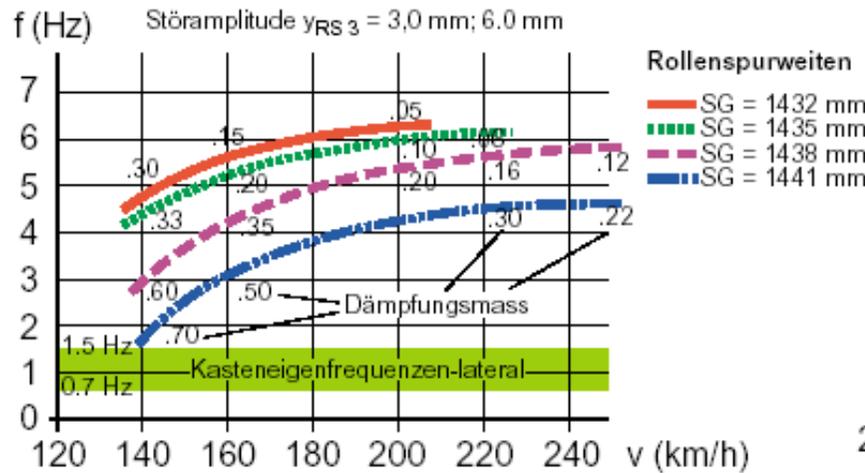


## Darstellung als Spektren

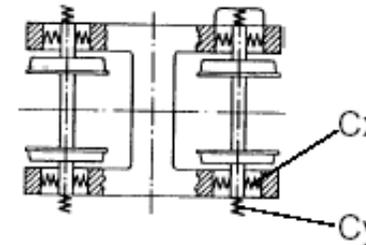


# Eigenverhalten Reisezugwagen auf Rollprüfstand

Eigenverhalten eines Fahrzeugs auf dem Rollprüfstand  
Kinematische Frequenz und Dämpfung der  
Radsatzquerbewegung (Sinuslauf)

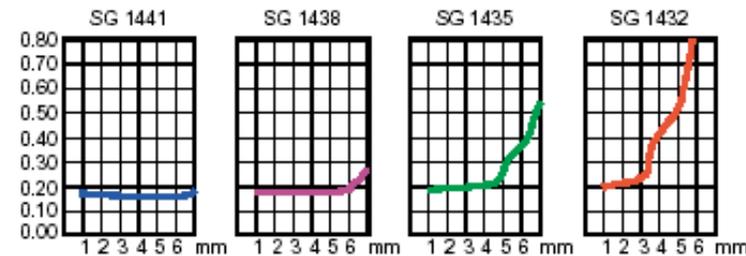


Stabilitätsverhalten unter Berücksichtigung der  
Fahrgeschwindigkeit und Berührungsverhältnisse,  
Darstellung der Eigenwerte und geringster Dämpfung  
(Stabilitätskarte)

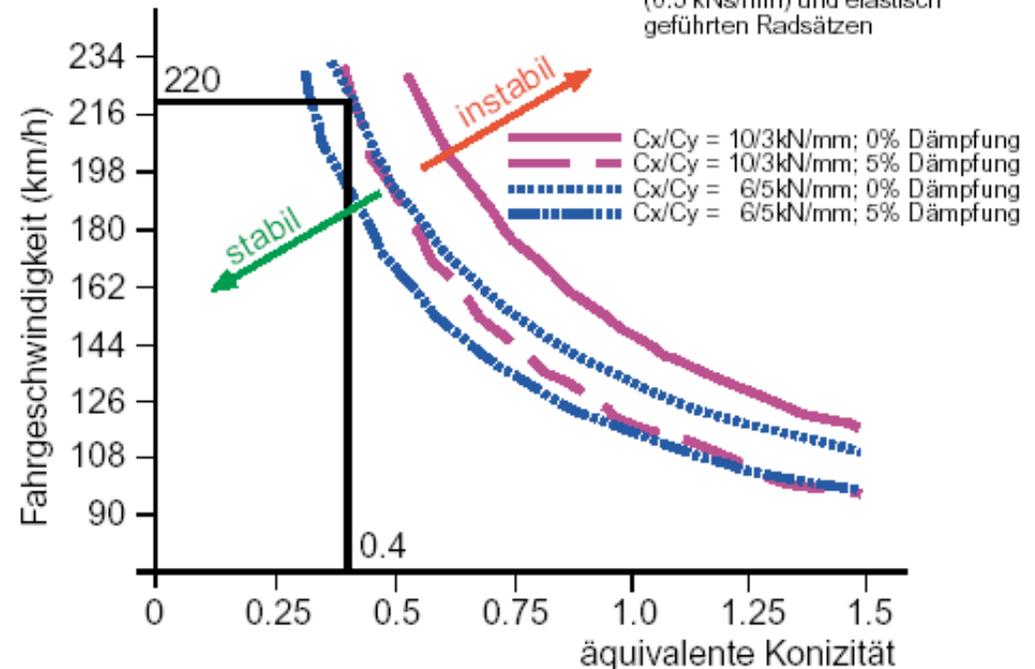
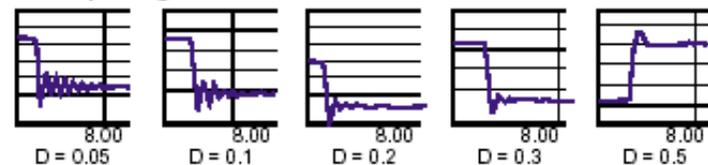


- Reibwert  $\mu = 0,3 \text{ mm}$
- Fahrzeug mit Schlingendämpfer (0,5 kNs/mm) und elastisch geführten Radsätzen

äquivalente Konizität



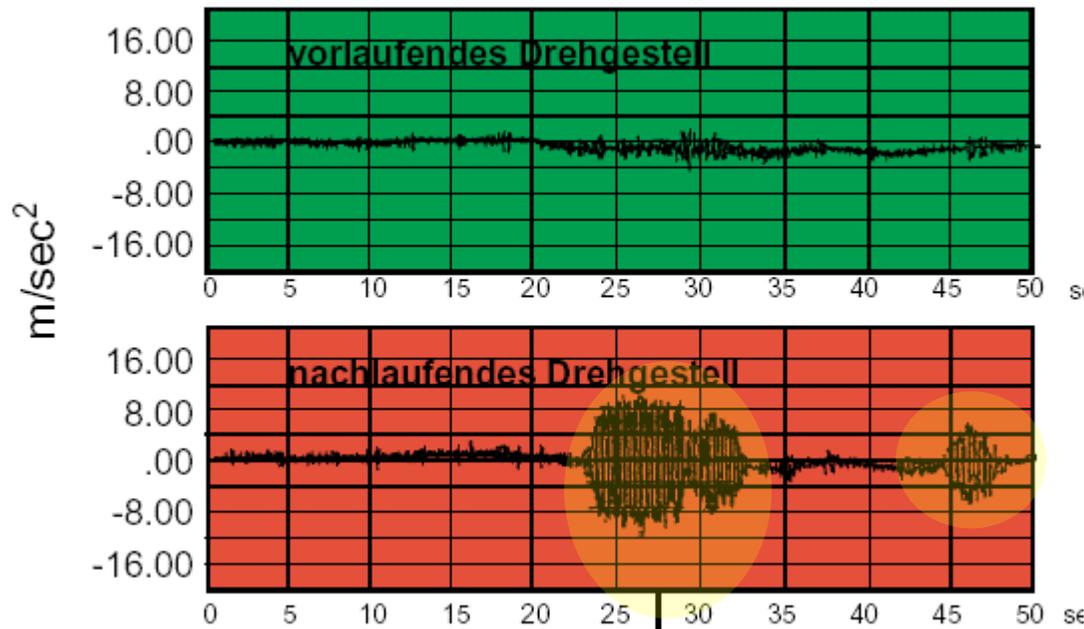
Dämpfungsmasse



# Instabilitäten bei niedrigen Geschwindigkeiten von Reisezugwagen

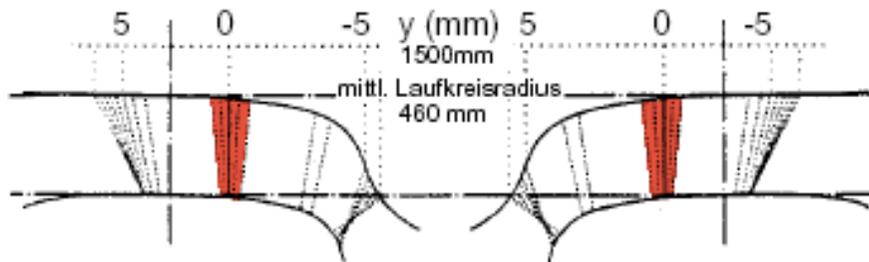
## Querbeschleunigung am Drehgestellrahmen

Km 64.97 - 66.68 Geschwindigkeit  $v = 116 \text{ km/h}$



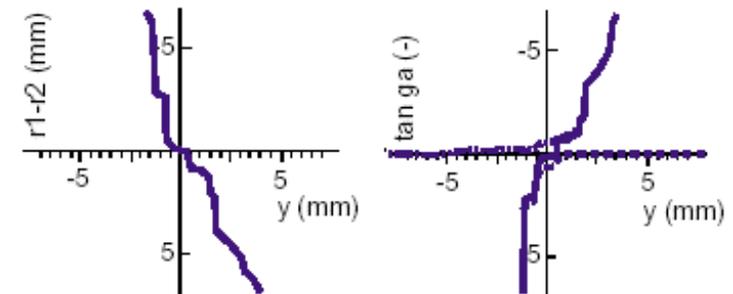
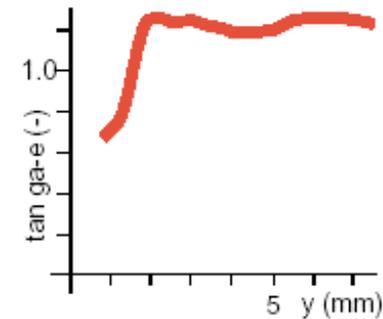
km 65.770

linkes Rad **Neue Schienen** rechtes Rad



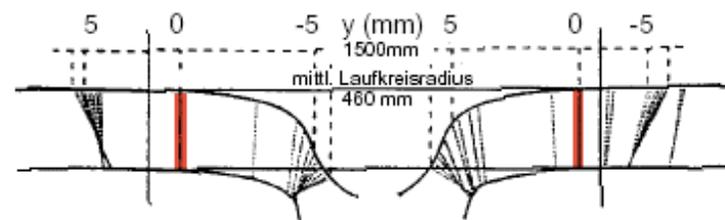
Spurweite 1430 mm

## Paarung der realen Schiene mit Radprofil ORE S1002 bei km 65.770



## Reale Schienen

linkes Rad **Reale Schienen** rechtes Rad



Spurweite 1430.1 mm

- Laufwerkprinzipien
- Trassierung
- Fahrdynamische Zielgrößen

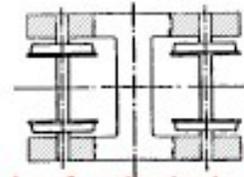
← Enge Bögen

↔ Mittlere Bögen

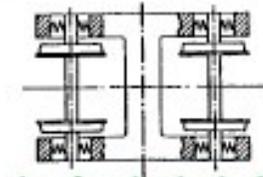
↔ Grosse Bögen

→ Geraden

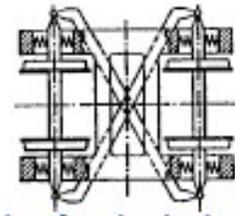
### Darstellung der Laufwerkprinzipien und des berechneten Radverschleisses in Abhängigkeit des Bogenhalbmessers



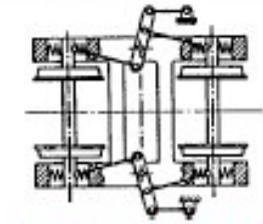
Laufwerkprinzip 1  
starrgeführte Radsätze



Laufwerkprinzip 2  
elastisch geführte Radsätze

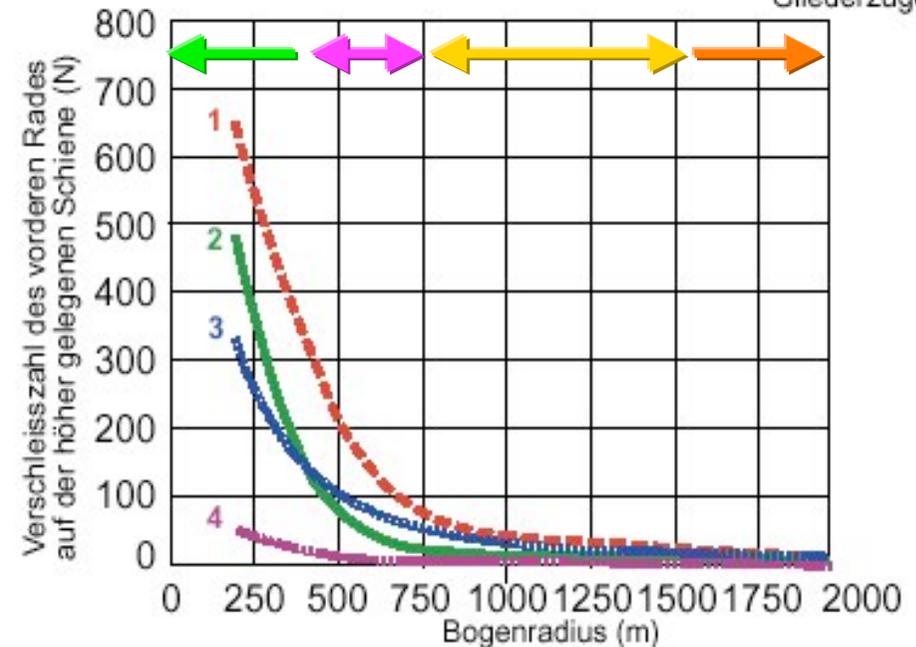
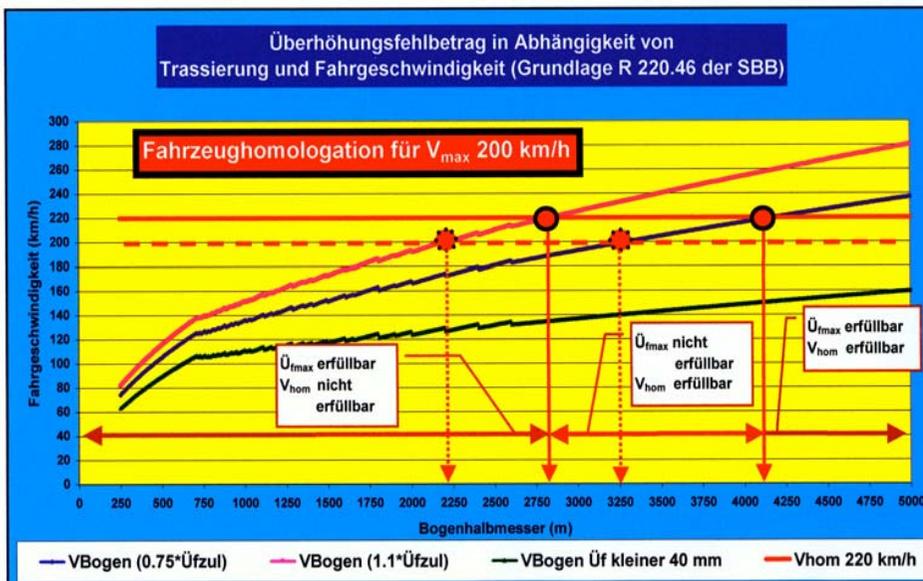


Laufwerkprinzip 3  
gegenseitig gekoppelte Radsätze

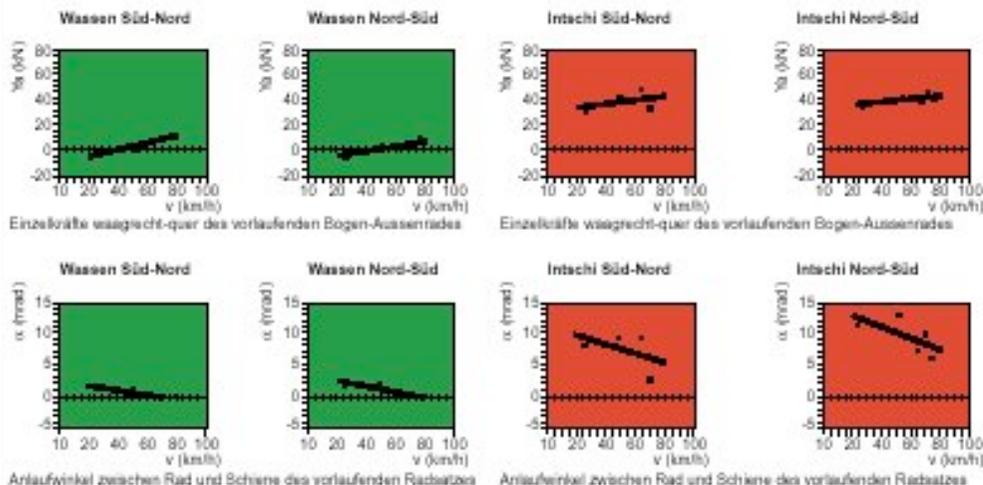


Laufwerkprinzip 4  
kastenseitig gesteuerte Radsätze

Laufwerkprinzip 5  
sonstige z.B.: Losräder  
Gliederzüge

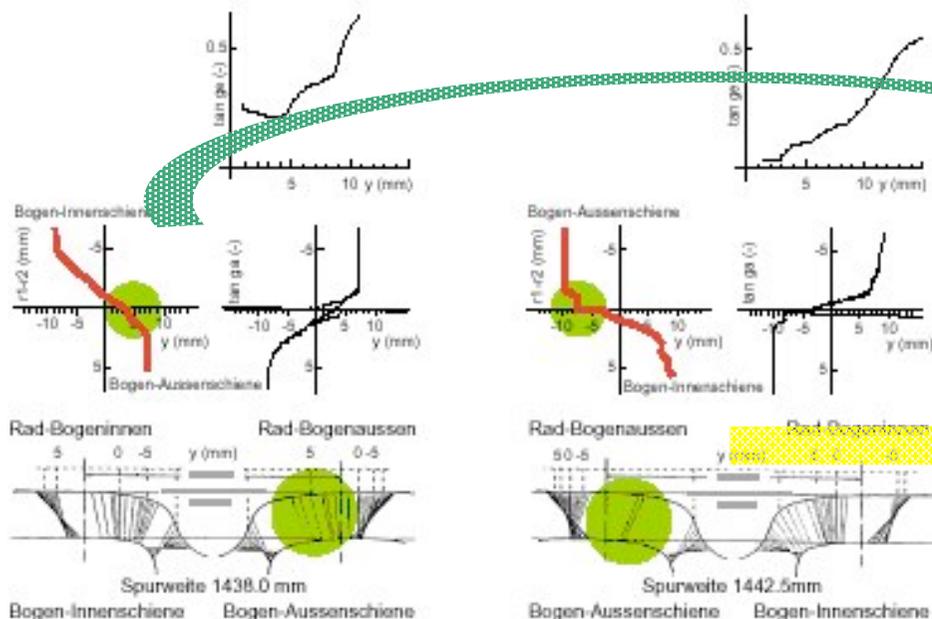


**Ortsfeste Messung der Rad-/Schienenkräfte und Anlaufwinkel  
 Rad/Schiene in zwei Bögen auf der Gotthard-Nordrampe  
 (Bogenhalbmesser R = 280 m)  
 Beispiel 2-achsiger Güterwagen Typ Hbbilms  
 mit 9m Achsstand**



**Berührungsgeometrie Rad/Schiene in Wassen**

**Berührungsgeometrie Rad/Schiene in Intschi**



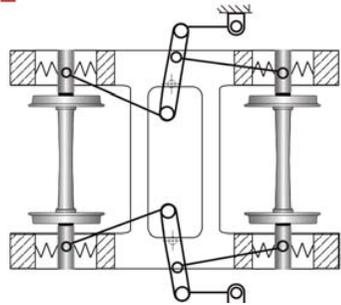
- **Berührungsgeometrie**
- **Kräfte in Richtung waagrecht/quer**
- **Anlaufwinkel Rad/Schiene**

**Gleiche Bogenhalbmesser und Überhöhungen in den beiden Bögen von Wassen und Intschi**

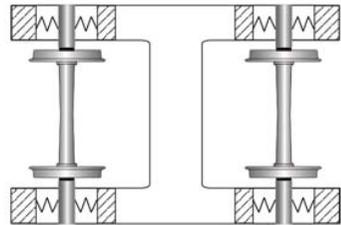
**Günstige Berührung in Wassen**

**Ungünstige Berührung in Intschi**

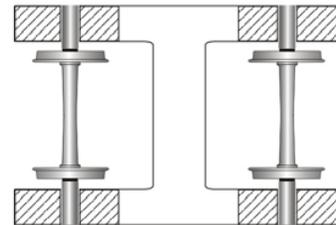
**1** Running gear with linkage-steered wheelsets



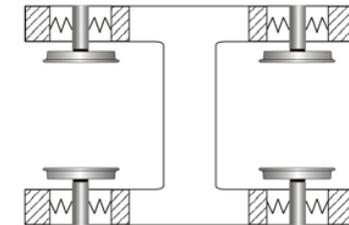
**2** Running gear with steered wheelsets (soft guidance)



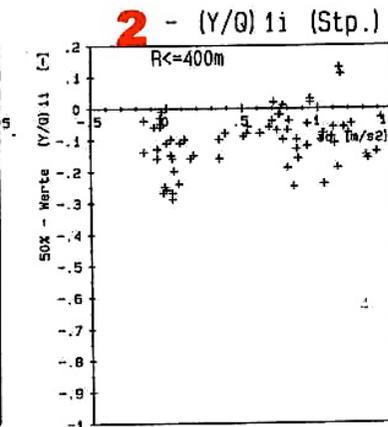
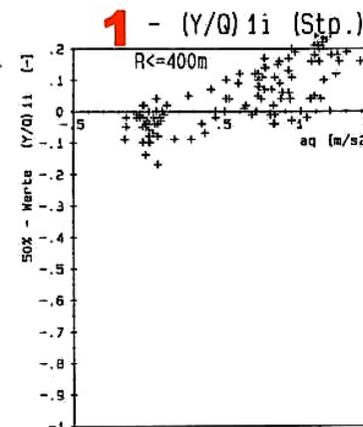
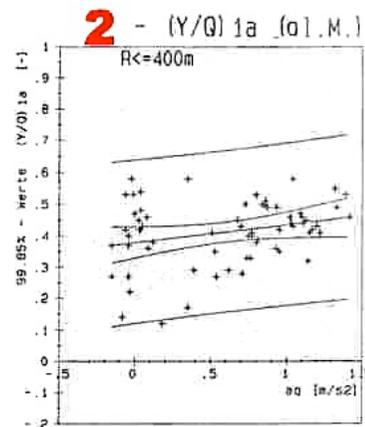
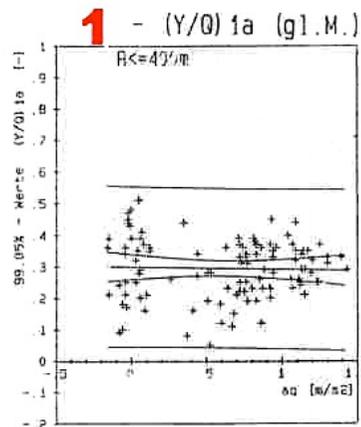
**3** Running gear with steered wheelsets (stiff guidance)



**4** Running gear with independent wheelsets



3022\_LeviMechanisms-3.25



**Quasistatische Werte (Y/Q)<sub>1a</sub>**

**Quasistatische Werte (Y/Q)<sub>1i</sub>**

