

Kontakt zwischen Rad und Schiene - das Kernelement der Dynamik der Schienenfahrzeuge

Oldrich POLACH

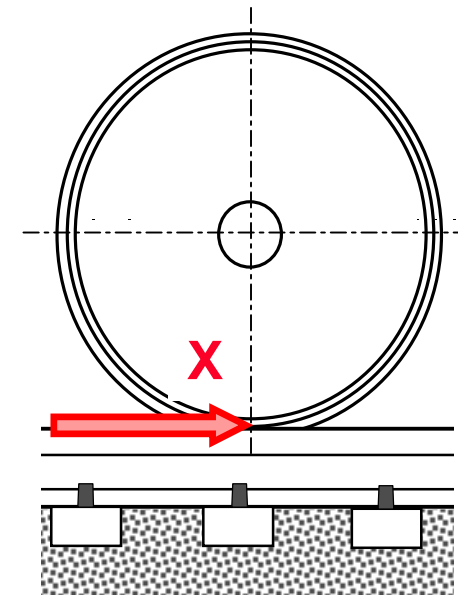
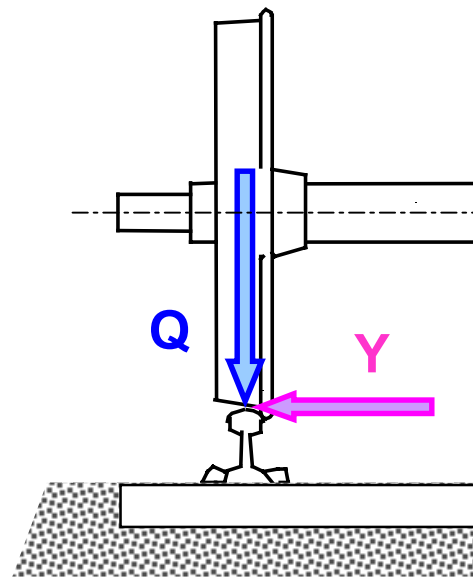
DaimlerChrysler Rail Systems (Schweiz) AG

Winterthur

- Einführung zum Thema Rad-Schiene-Kontakt
 - Funktionen
 - Geometrie
 - Normalproblem
- Tangentialproblem - Übersicht
- Berechnung der Tangentialkräfte in Simulationsprogrammen
- Zeitsparende Methode, Vergleiche
- Zusammenhang Kraftschluss - Reibbeiwert
- Beispiel der Anwendung: Fahrzeug- und Antriebsdynamik

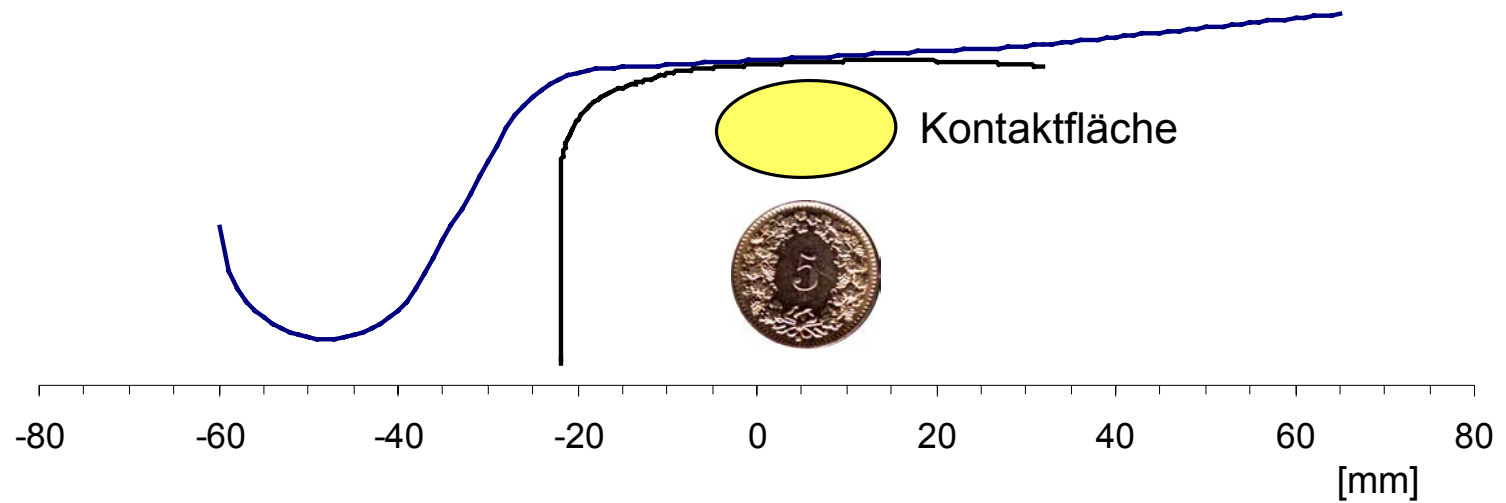
Rad-Schiene-Kontakt und seine Funktionen

- Tragen
- Führen
- Ziehen / Bremsen



Geometrie des Rad-Schiene-Kontaktes

- Rad-Schiene-Kontakt im Vergleich



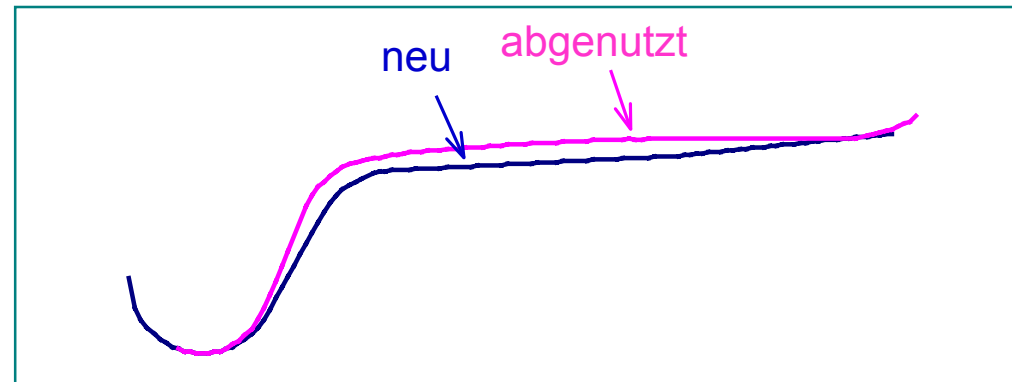
- Radprofil



Geometrie des Rad-Schiene-Kontaktes

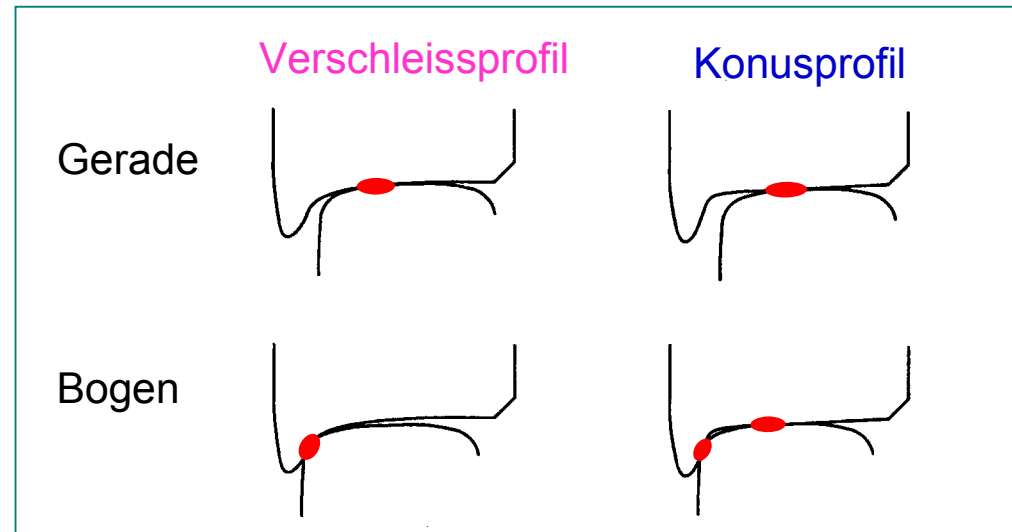
- Radprofil

- Konusprofil
- Verschleissprofil



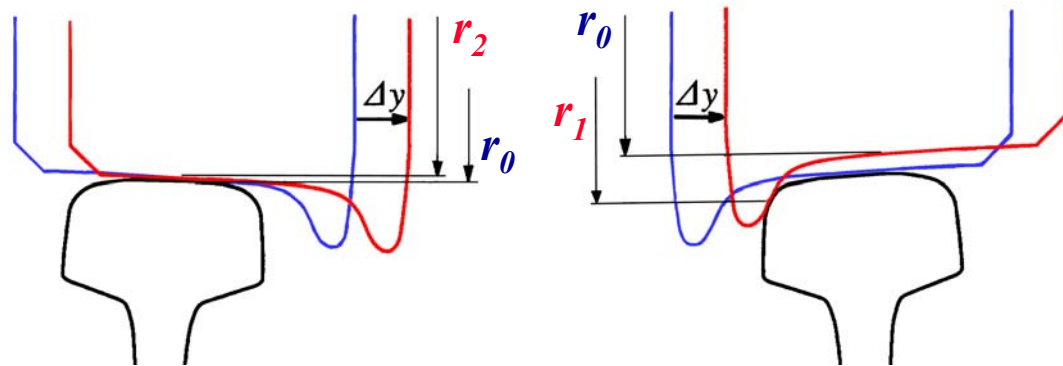
- Rad-Schiene-Kontakt

- 1-Punkt-Berührung
- 2-Punkt-Berührung



Linearisierung der Rad-Schiene-Geometrie

- Rollradiusdifferenz



- Konizität

- effektive



$$\lambda_{ef} = \frac{r_1 - r_2}{2 \cdot \Delta y}$$

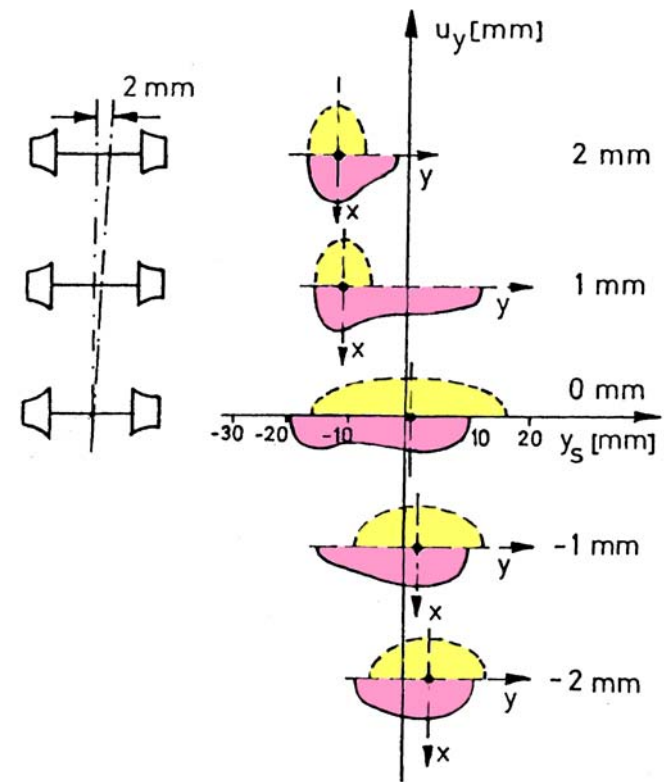
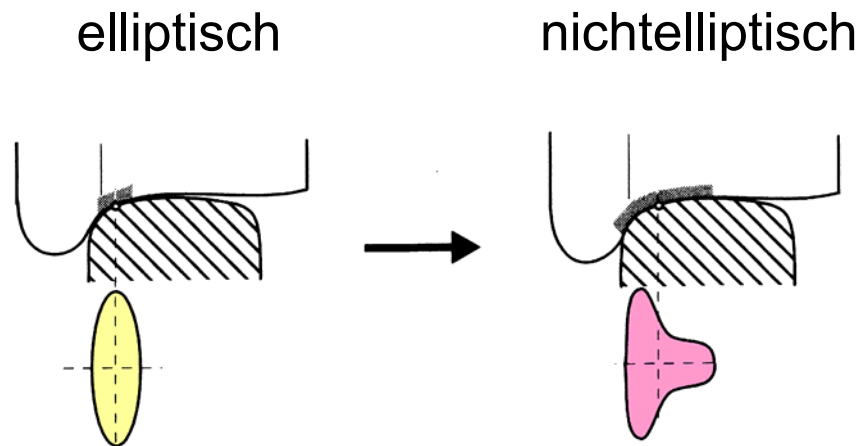
- äquivalente



$$\lambda_{eq} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot y_0} \int_0^{2\pi} \Delta r (y_0 \cdot \sin \xi) \sin \xi d\xi$$

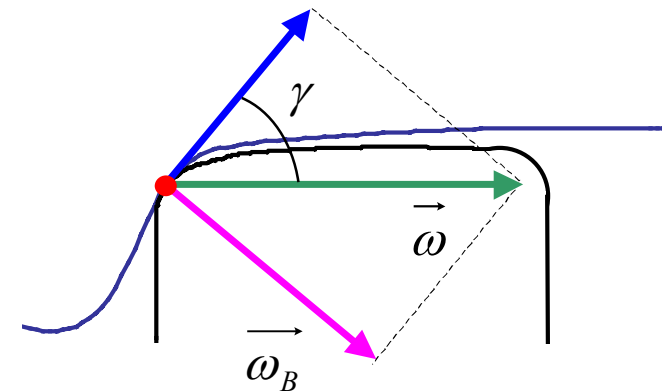
Normalproblem

- Elliptischer Kontakt (Hertz, 1882)
- Nichtelliptischer Kontakt



Tangentialproblem Schlüpfe (Creepages)

- Längsschlupf
 - Längsgleiten
 - Wenden um Hochachse
 - Rollradiusdifferenz
- Querschlupf
 - Quergleiten
 - Schräglauf
- Spin (Bohrschlupf)

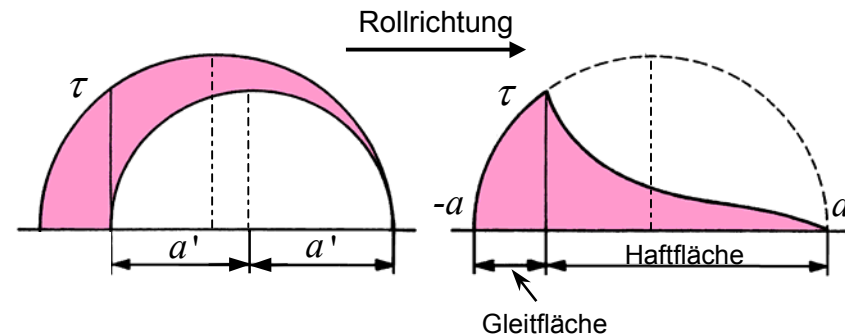


$$\omega_B = \omega \cdot \sin \gamma$$

Tangentialproblem Historie

- Carter (1926), Fromm (1927)

- zweidimensionale Lösung
- ohne Querschlupf, ohne Spin



- Tangentialspannung :

$$x' = x - a + a'$$

- Haftfläche



$$\tau_x = \frac{f \cdot \sigma_0}{a} \left(\sqrt{a^2 - x^2} - \sqrt{a'^2 - x'^2} \right) \quad \text{wenn} \quad |x| \leq a, |x'| \leq a'$$

- Gleitfläche

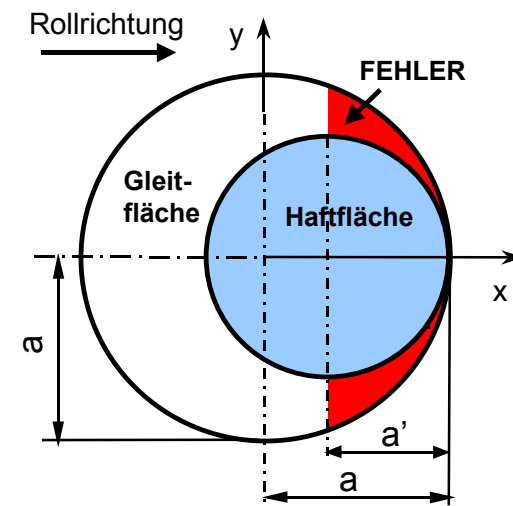


$$\tau_x = \frac{f \cdot \sigma_0}{a} \sqrt{a^2 - x^2} \quad \text{wenn} \quad |x| \leq a, |x'| > a'$$

Tangentialproblem Historie

- Vermeulen-Johnson (1964)

- Ohne Spin
- Haft- und Gleitfläche kreisförmig (elliptisch)
- Lösung : Elliptische Integrale
- Approximation der exakten Lösung: Sättigungsfunktion



$$F_S' = \sqrt{(F_x')^2 + (F_y')^2}$$


- Übergangsbereich

$$F_S = f \cdot Q \cdot \left[k - \frac{1}{3}k^2 + \frac{1}{27}k^3 \right], \quad k = \frac{F_S'}{f \cdot Q}, \quad \text{für } k \leq 3$$

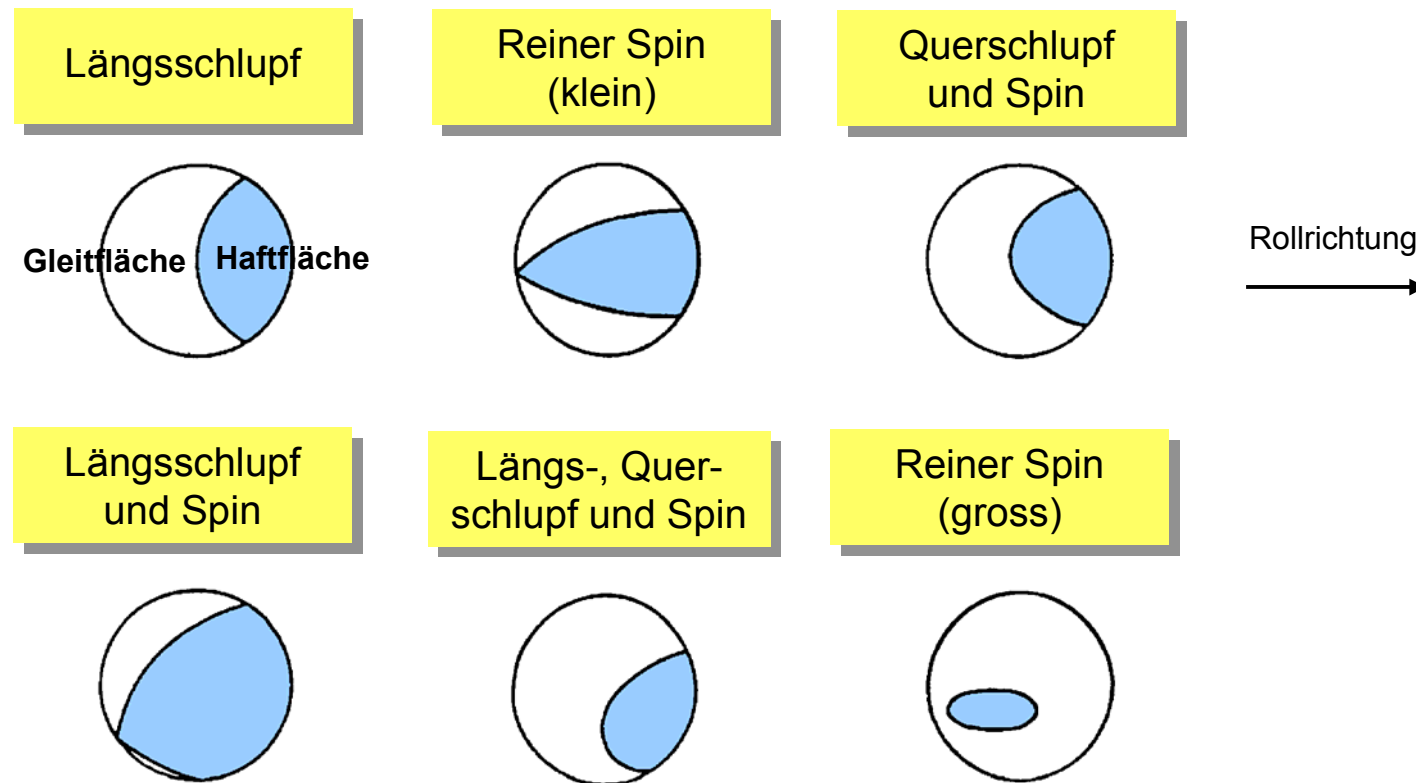
- Sättigung

$$F_S = f \cdot Q \quad \text{für } k > 3$$

- Exakte Theorie (1969)

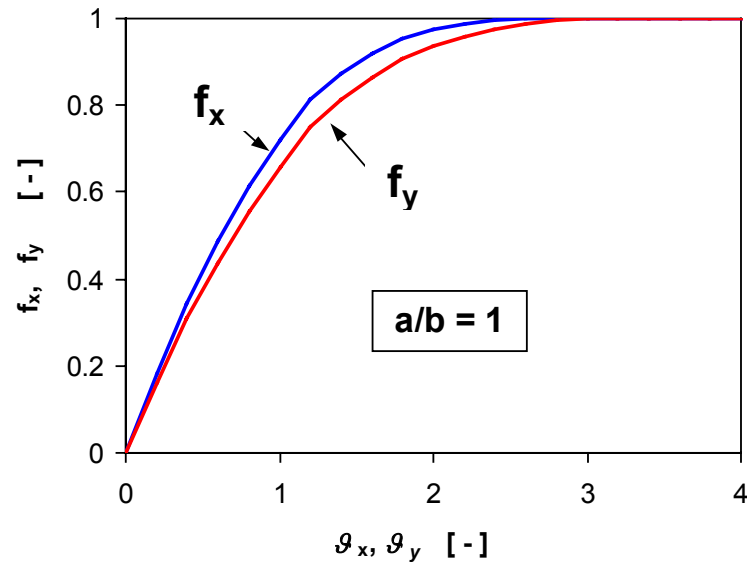
- allgemeine Theorie (Längs- + Querschlupf + Spin)
- Änderung der Tangentialspannung ohne Einfluss auf die Verteilung der Normalspannung
- Reibbeiwert konstant
- Haft- und Gleitfläche
- Maximale Tangentialspannung  $\tau_{\max} = f \cdot \sigma$
- Programme DUVOROL (veraltet) und CONTACT (1979)

- Aufteilung der Kontaktfläche

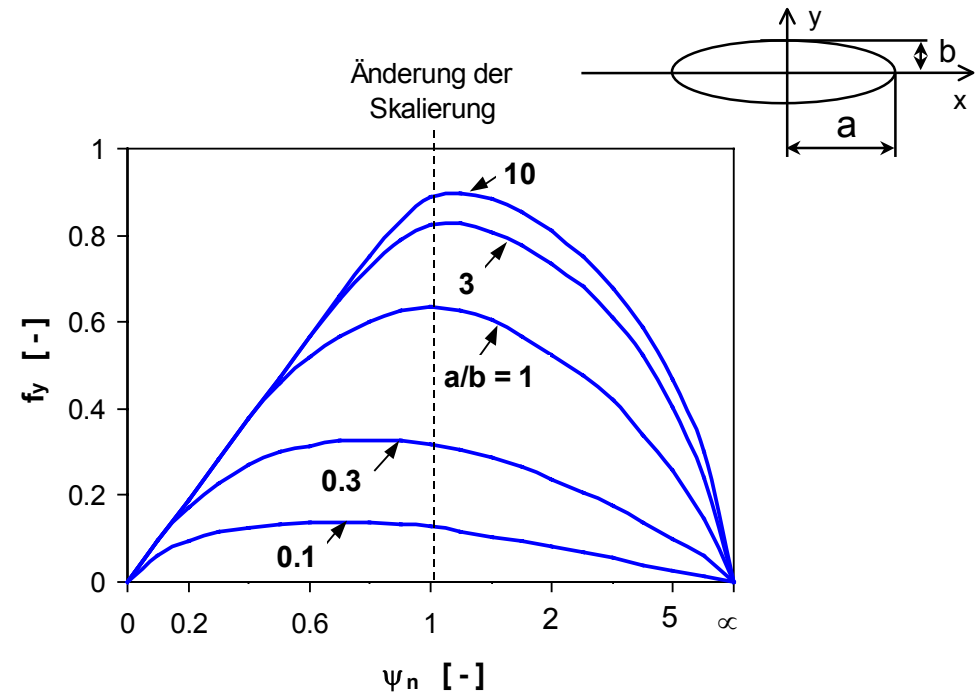


- Tangentialkräfte

Längs- und Querkraft



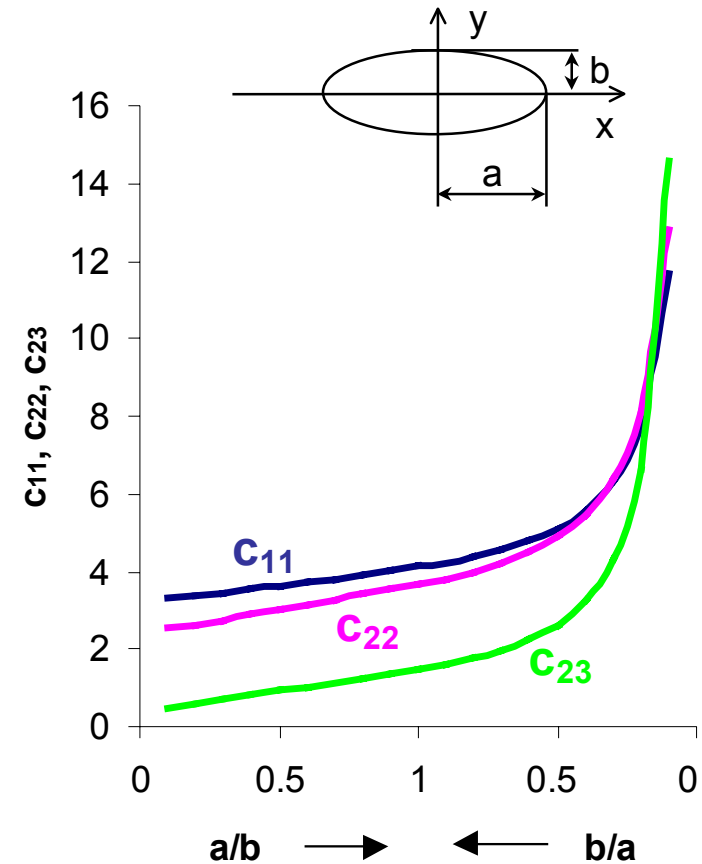
Querkraft durch Spin



● Koeffizienten von Kalker

- c_{11} - Längskraft
- c_{22} - Querkraft
- c_{23} - Querkraft durch Spin
- c_{33} - Moment um Normalachse

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} = -G \cdot a \cdot b \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & c_{23} \sqrt{a \cdot b} \\ 0 & -c_{23} \cdot \sqrt{a \cdot b} & a \cdot b \cdot c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ \psi \end{bmatrix}$$



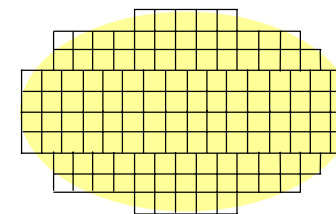
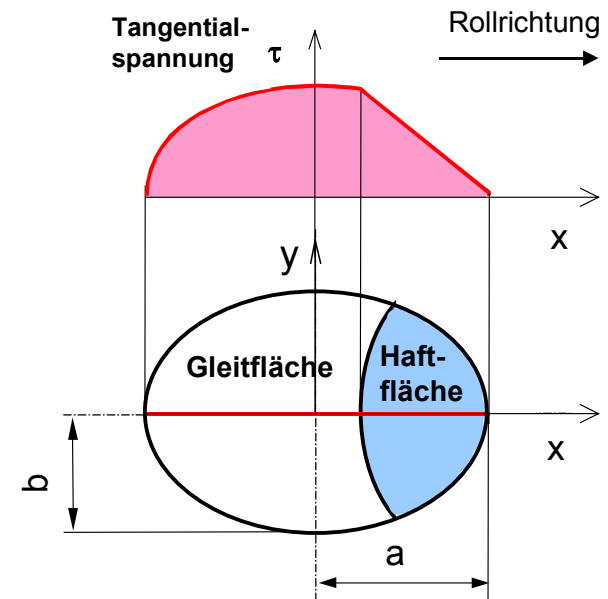
Weitere Methoden geeignet für Simulationsprogramme

- FASTSIM (Kalker, 1982)

- Tangentialspannung
 - Haftfläche: linear
 - Gleitfläche:

$$\tau_{\max} = f \cdot \sigma$$

- Segmentierung der Kontaktfläche



Weitere Methoden geeignet für Simulationsprogramme

- Shen-Hedrick-Elkins (1983):

$$F_x' = - G \cdot a \cdot b \cdot c_{11} \cdot s_x$$

- lineare Theorie von Kalker



$$F_y' = - G \cdot a \cdot b \cdot c_{22} \cdot s_y - G \cdot \sqrt{(a \cdot b)^3} \cdot c_{23} \cdot \psi$$

- Gesamtkraft



$$F_S' = \sqrt{(F_x')^2 + (F_y')^2}$$

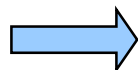
- Approximation nach Vermeulen-Johnson verwendet auch für Spin



$$F_S = f \cdot Q \cdot \left[k - \frac{1}{3}k^2 + \frac{1}{27}k^3 \right], \quad k = \frac{F_S'}{f \cdot Q}, \quad \text{für } k \leq 3$$

$$F_S = f \cdot Q \quad \text{für } k > 3$$

- Vektorzerlegung auf die Komponenten F_x, F_y



$$F_x = \frac{F_x'}{F_S'} F_S$$

$$F_y = \frac{F_y'}{F_S'} F_S$$

Methoden zur Berechnung der Tangentialkräfte zwischen Rad und Schiene

- Exakte Theorie von Kalker (CONTACT)
- Vereinfachte Theorie von Kalker (FASTSIM)
Angewendet in: ADAMS, MEDYNA, GENSYS, SIMPACK, VOCO
- Look-up Tabellen
Angewendet in: ADAMS, VAMPIRE
- Vereinfachte Methoden und Funktionen
Angewendet in: MEDYNA, VAMPIRE, SIMPACK

Nachteile der bekannten Methoden

- Exakte Theorie von Kalker (CONTACT)
 - ➔ Sehr lange Rechenzeit
- Vereinfachte Theorie von Kalker (FASTSIM)
 - ➔ Lange Rechenzeit im Vergleich mit anderen Methoden
- Look-up Tabellen
 - ➔ Limitierte Datenmenge, Vorberechnung notwendig
- Vereinfachte Methoden und Funktionen
 - ➔ Grosse Differenzen im Vergleich mit der exakten Theorie

Zeitsparende Methode (Polach, 1989)

Vorteile

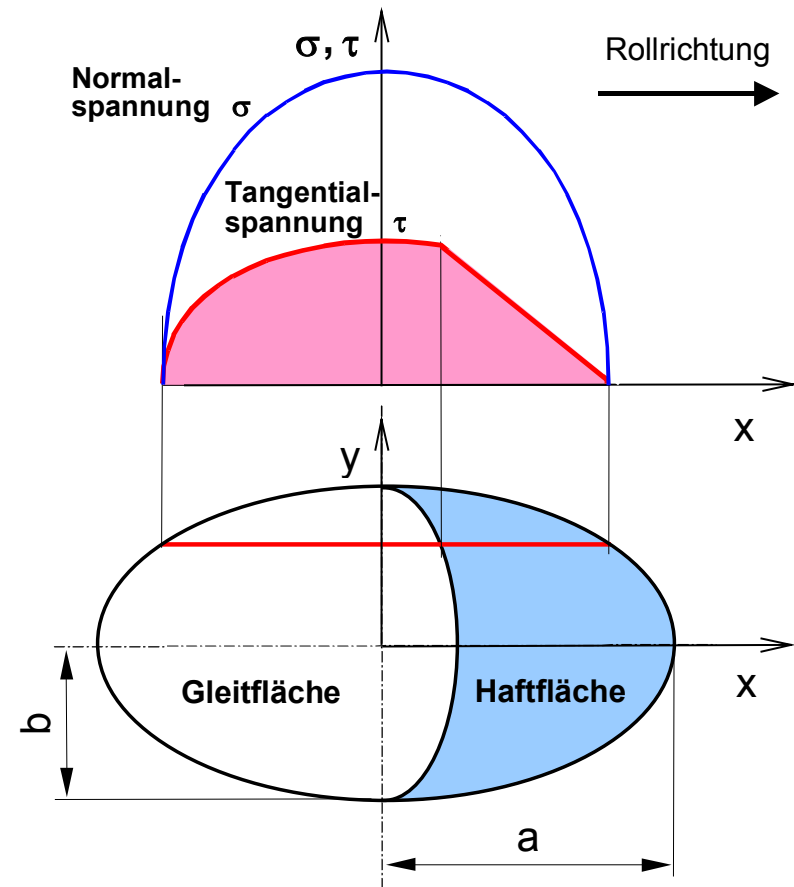
- Kompromiss zwischen der Rechenzeit und der benötigten Genauigkeit
- Spin berücksichtigt
- Rechenzeit vergleichbar mit vereinfachten Funktionen und mit Look-up Tabellen
- Vorberechnung überflüssig
- Genauigkeit vergleichbar mit FASTSIM oder Look-up Tabellen

Prinzip der Methode

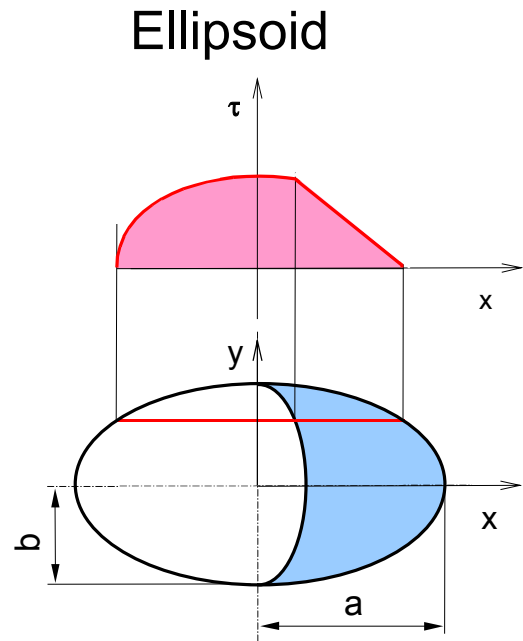
- Elliptische Kontaktfläche nach Hertz
- Reibbeiwert konstant
- Unterteilung der Kontaktfläche in Haft- und Gleitgebiet
- Maximale Tangentialspannung

$$\tau_{\max} = f \cdot \sigma$$

- Lineare Zunahme der Tangentialspannung in der Haftfläche



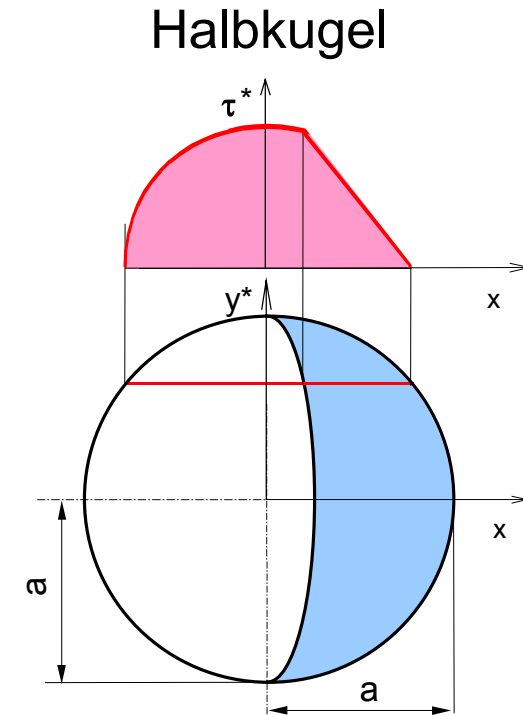
Prinzip der Methode Transformation



Transformation

$$y^* = \frac{a}{b} y$$

$$\tau^* = \frac{a}{\tau_0} \tau$$

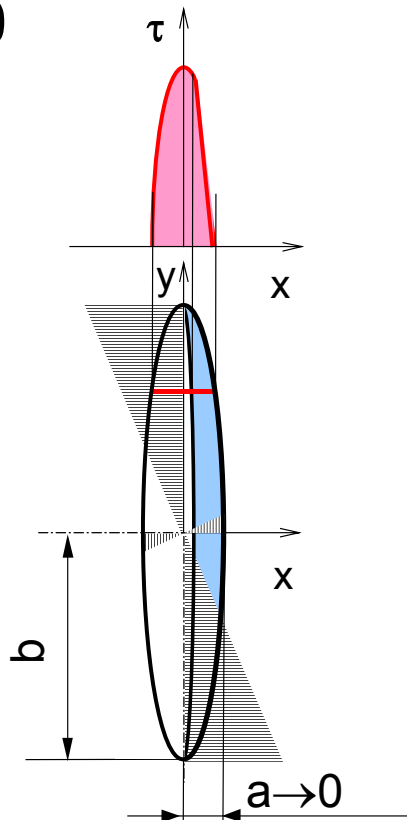


Tangentialkraft:

$$F = \iint_{(U)} \tau \, dx \, dy = - \frac{2 \cdot Q \cdot f}{\pi} \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon^2} + \arctan \varepsilon \right), \quad \text{wo} \quad \varepsilon = \frac{2}{3} \frac{C \cdot \pi \cdot a^2 \cdot b}{Q \cdot f} s$$

Prinzip der Methode Reiner Spin

$a \rightarrow 0$



Mit Hilfe der Transformation zur Halbkugel:

$$F_y = -\frac{3}{8} \pi \cdot \tau_0 \cdot a \cdot b \left[|\varepsilon| \left(\frac{\delta^3}{3} - \frac{\delta^2}{2} + \frac{1}{6} \right) - \frac{1}{3} \sqrt{(1-\delta^2)^3} \right]$$

$$\text{wo } \delta = \frac{\varepsilon^2 - 1}{\varepsilon^2 + 1}$$

Prinzip der Methode

Anwendung

- Auf der Basis vom Experiment

Die Konstante C bestimmt durch Experiment

- Als Rechenzeit sparende Lösung mit den Konstanten von Kalker

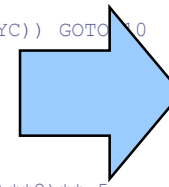
$$C = \frac{3}{8} \frac{G}{a} c_{jj} \quad \text{wo} \quad c_{jj} = \sqrt{\left(c_{11} \frac{s_x}{s} \right)^2 + \left(c_{22} \frac{s_y}{s} \right)^2}$$

$$C_s = \frac{4}{\pi} \frac{G \cdot \sqrt{b}}{\sqrt{a^3}} c_{23}$$

INPUT :

- Radlast
- Reibbeiwert
- Schubmodul
- Halbachsen der Kontaktellipse
- Konstanten von Kalker
- Längs- und Querschlupf
- Spin

```
SUBROUTINE ADH(Q,F,A,B,SX,SY,OM,C1,C2,C3,FX,FY)
C *****
C * Computation of Wheel/Rail Forces *
C * (c) O. Polach, 1989-1992 *
C *****
REAL MI
REAL KS
G=8.4E+10
PI=3.14159
FX=0
FY=0
MI=0
SYC=SY
IF (ABS(SY+OM*A) .LE. ABS(SYC)) GOTC 10
SYC=SY+OM*A
10 CONTINUE
SC=(SX*SX+SYC*SYC)**.5
IF (SC.EQ.0) GOTO 999
IF (S.EQ.0) GOTO 20
CJ=((C1*SX/S)**2+(C2*SY/S)**2)**.5
EP=PI*G*A*B*CJ*SC/(4.*Q*F)
MT=(EP/(1.+EP*EP)+ATAN(EP))*2.*F/PI
DE=1.+6.3*(1.-EXP(-A/B))
EPM=8.*B*((A*B)**.5)*G*C3*ABS(SYC)/(3.*KS*Q*F)
DE=((EPM)**2-1.)/((EPM)**2+1.)
FYS=Q*A*F*KS*(EPM*(-DE**3/3.+DE**2/2.-1./6.)
+1./3.*(1.-DE**2)**(1.5))/16.
FX=Q*MI*SX/SC
FY=Q*(MI*SY+FYS*OM)/SC
999 CONTINUE
PRINT FX, FY
RETURN
END
```

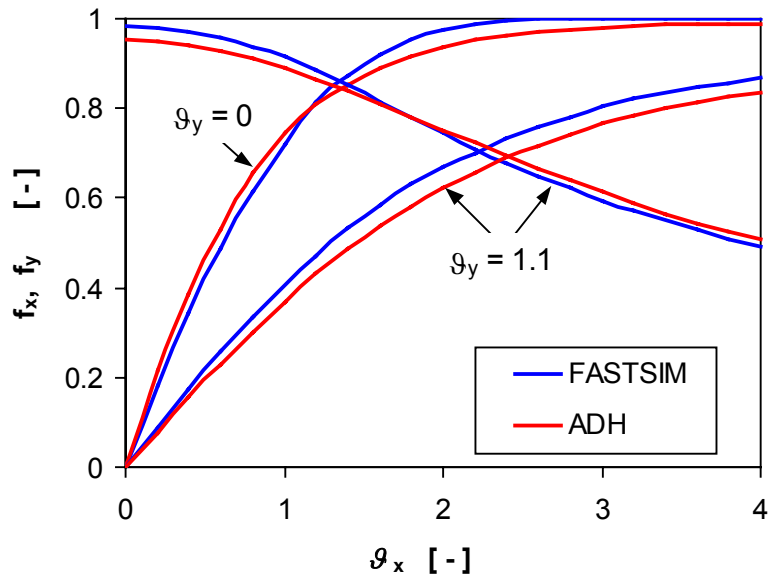


OUTPUT :

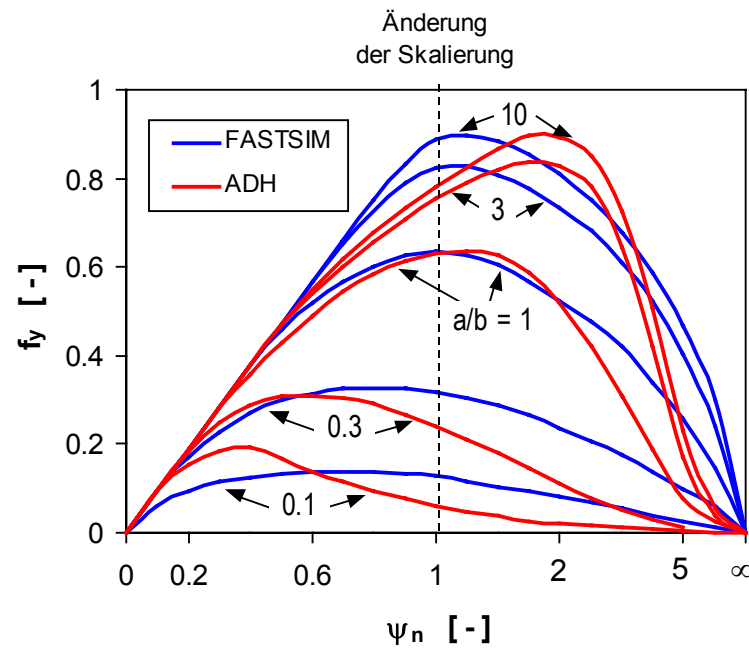
- Längskraft
- Querkraft

Vergleich mit Programm FASTSIM

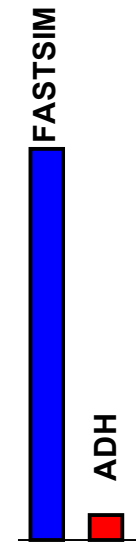
Längs- und Querschlupf



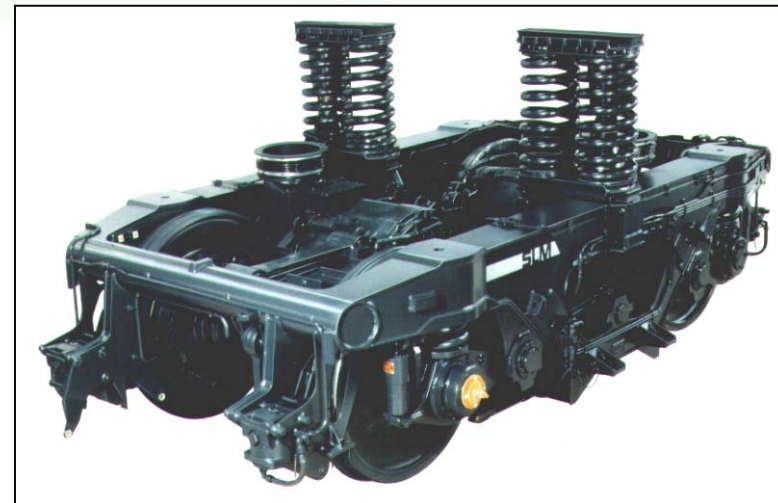
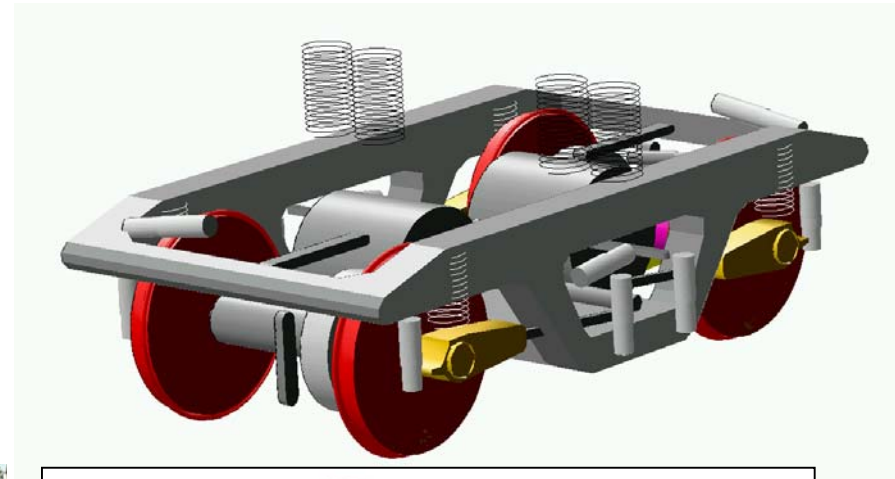
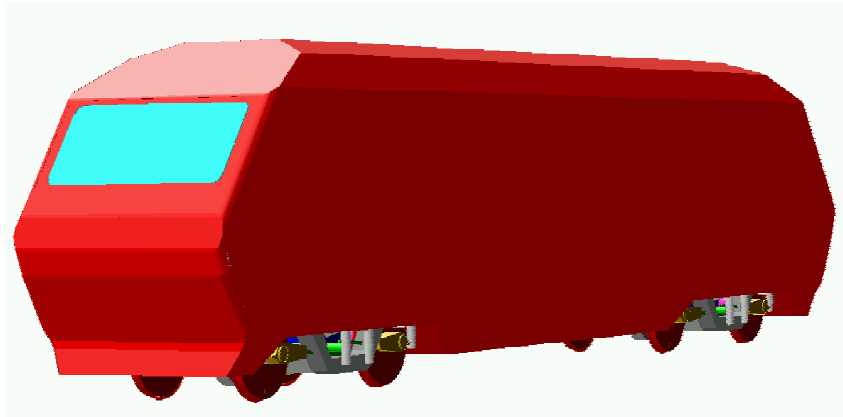
Reiner Spin



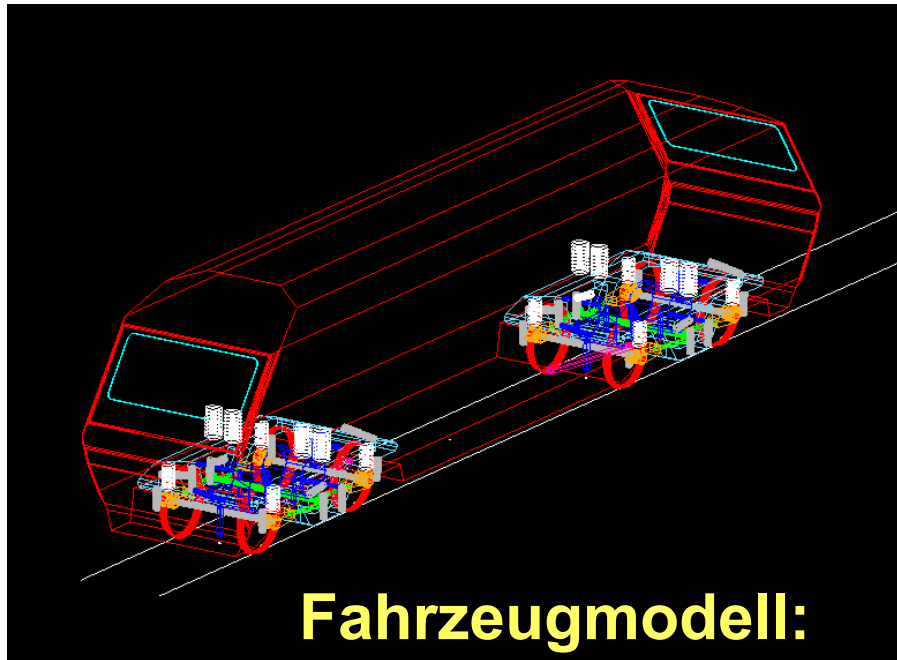
Rechenzeit



Vergleich der Simulationen ADAMS/Rail Modell der Lok 2000

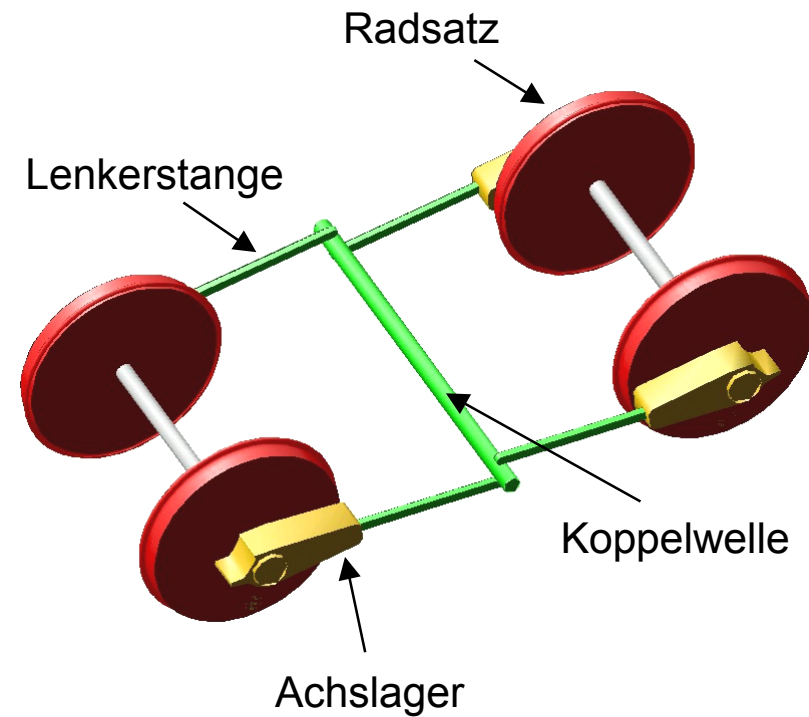


Vergleich der Simulationen ADAMS/Rail Modell der Lok 2000

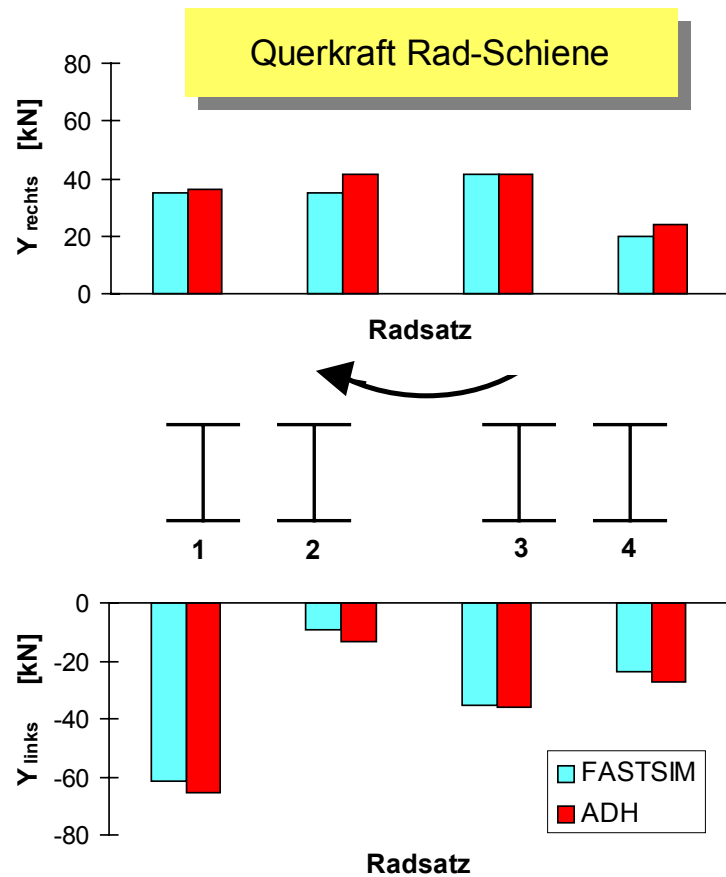


- 51 Körper
- 84 Bushings
- 4 Anschläge
- 24 Dämpfer

Mechanismus der Radsatz-Kopplung:



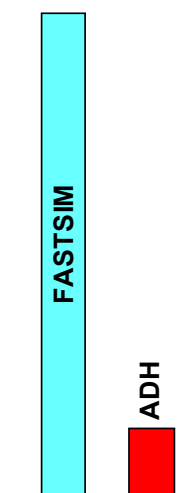
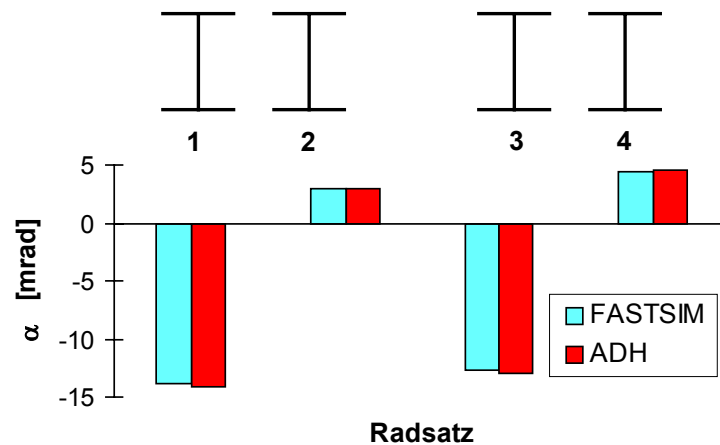
Vergleich der Simulationen mit Programmen FASTSIM und ADH



R = 150 m, a_{lat} = 0 m/s²
Steife Achsführung

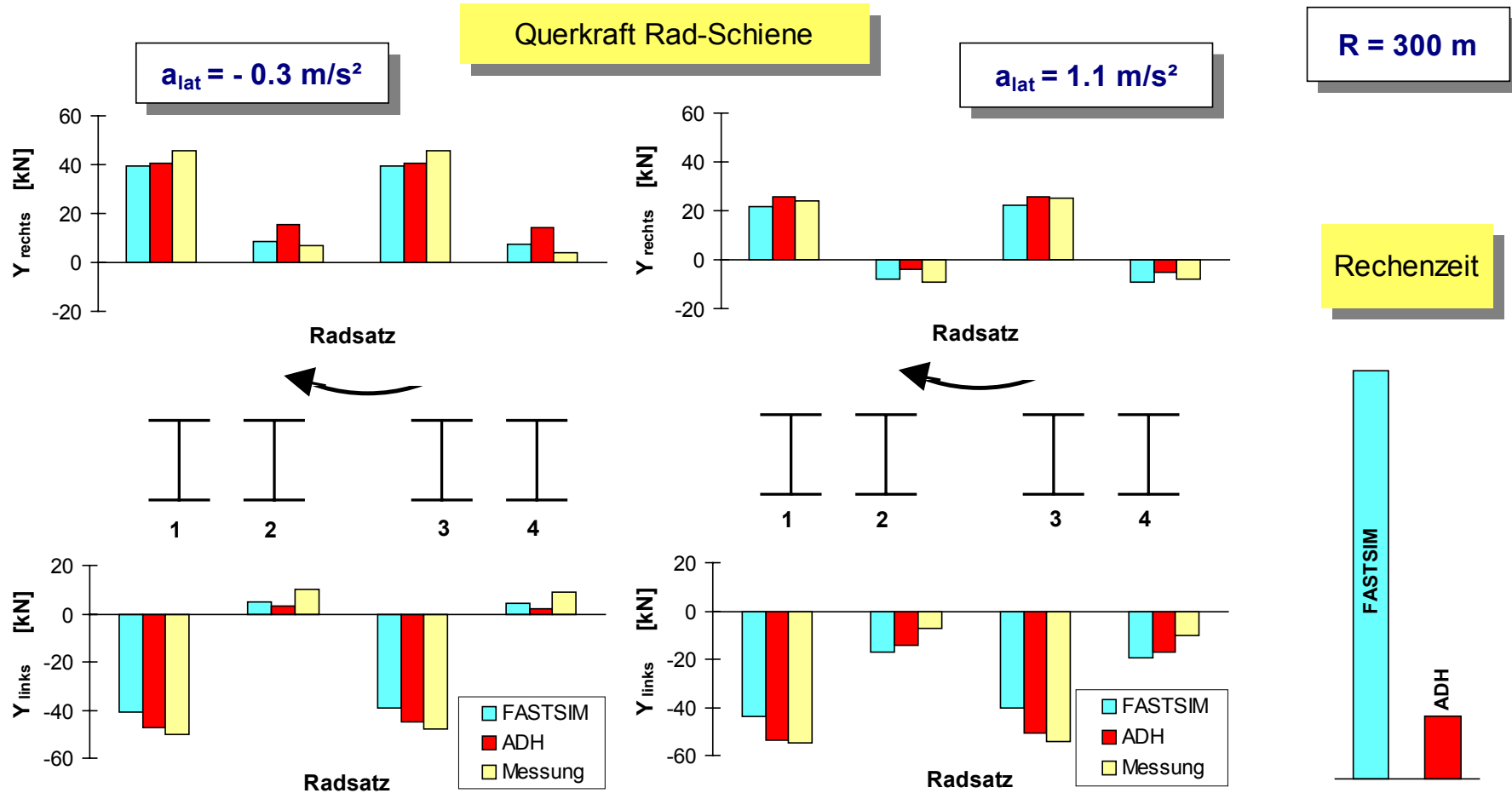
Anlaufwinkel

Rechenzeit

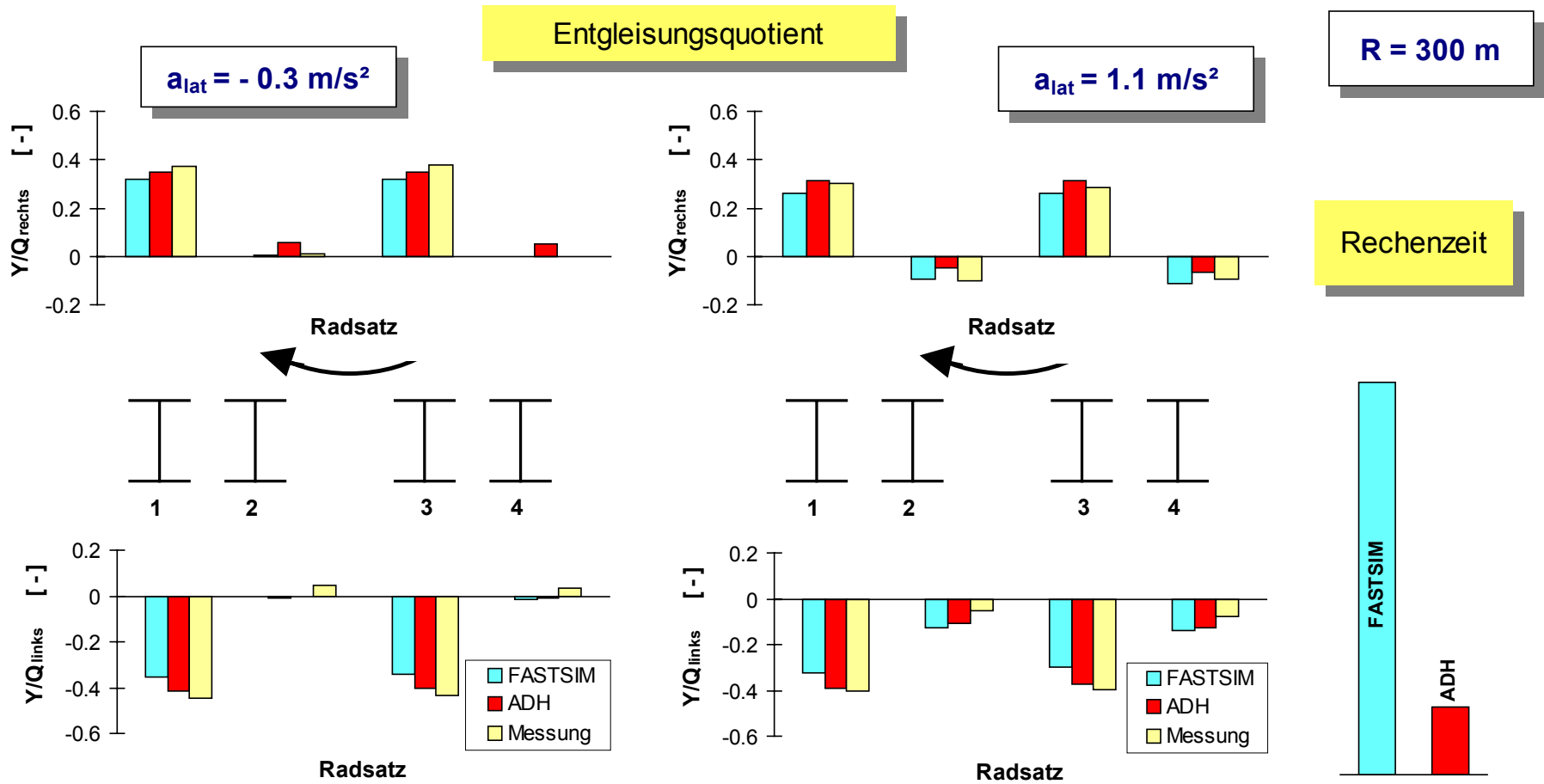


Vergleich mit Messung

Querkraft Rad-Schiene



Vergleich mit Messung



Erfahrungen mit dem Programm ADH

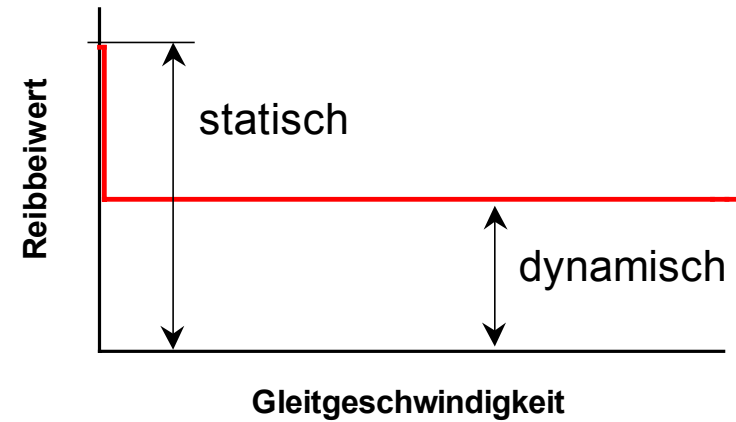
- Algorithmus in Anwendung in verschiedenen Programmen seit 1990
- Positive Erfahrungen sowohl in der Forschung als auch im industriellen Einsatz
- Angewendet als Standardmethode im Programm ADAMS/Rail
- Getestet und benutzt als Anwender-Routine in Programmen: SIMPACK, MEDYNA, SIMFA

Zusammenhang Kraftschluss-Reibbeiwert

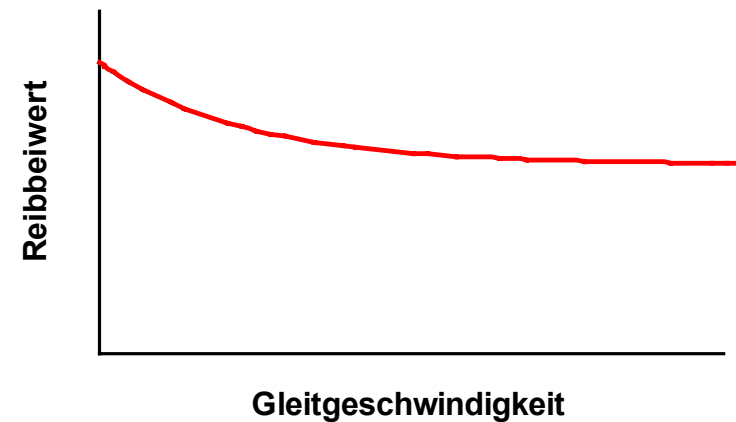
Verlauf des Reibbeiwertes

● Reibung

- statisch
- dynamisch



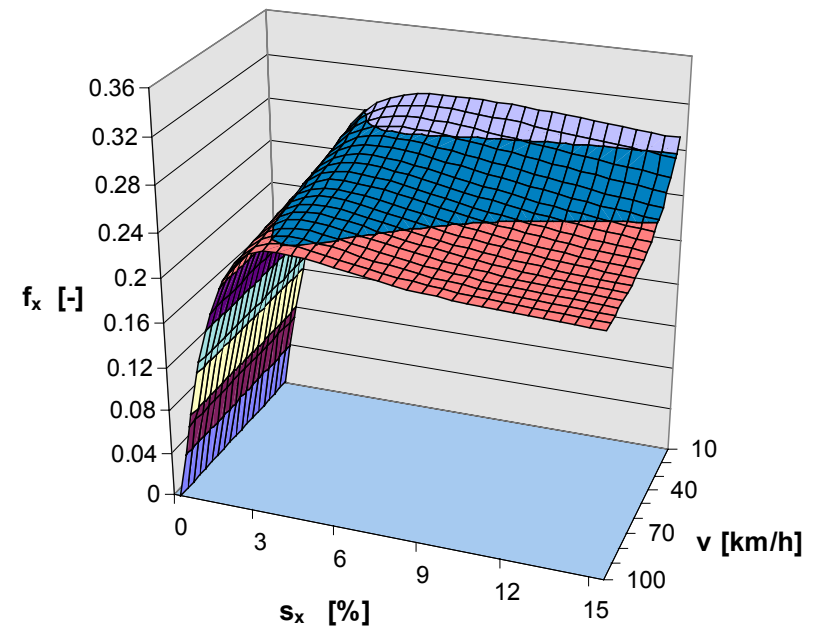
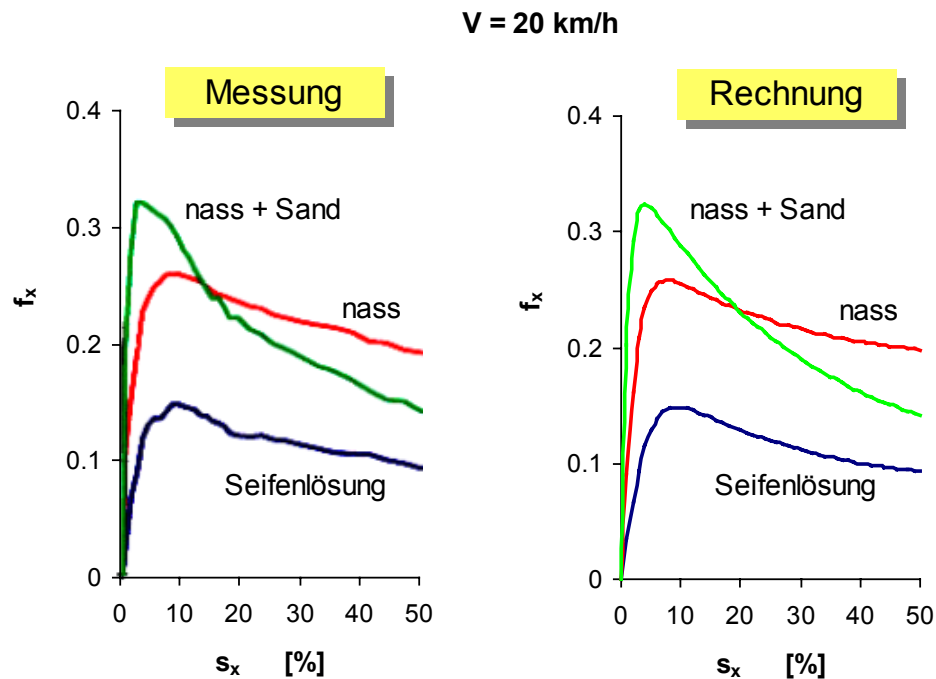
● Reibbeiwert als Funktion der Gleitgeschwindigkeit



Kraftschluss mit einem von der Schlupfgeschwindigkeit abhängigen Reibbeiwert

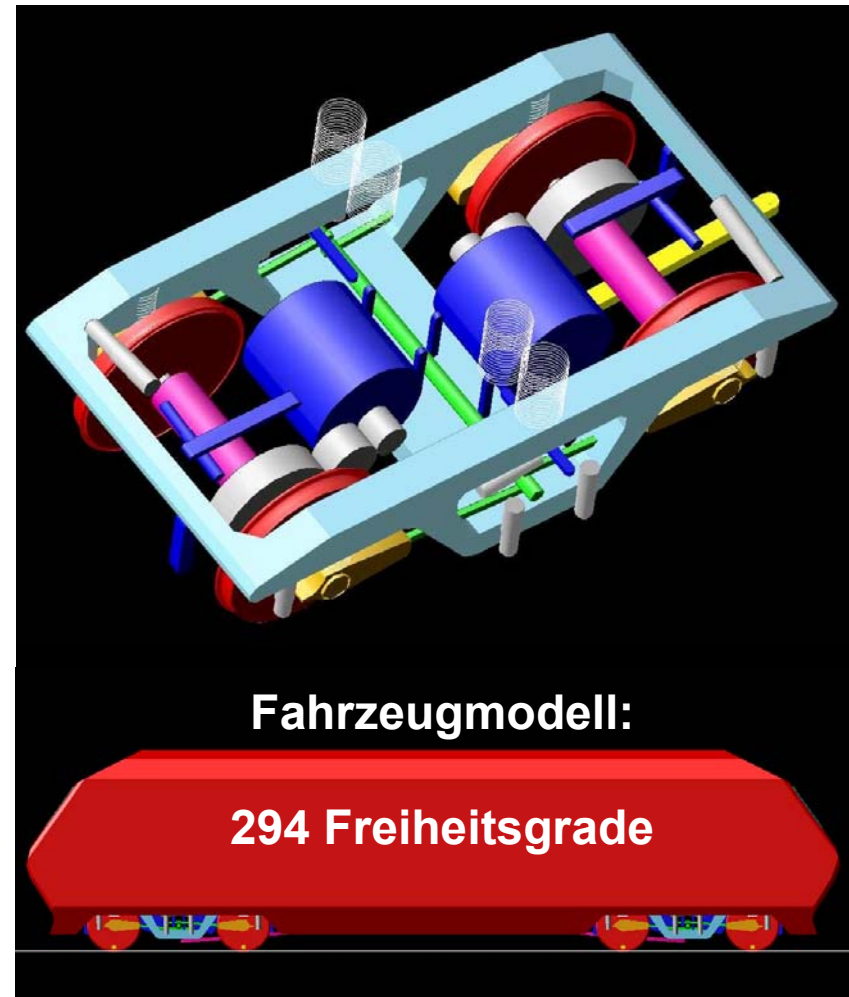
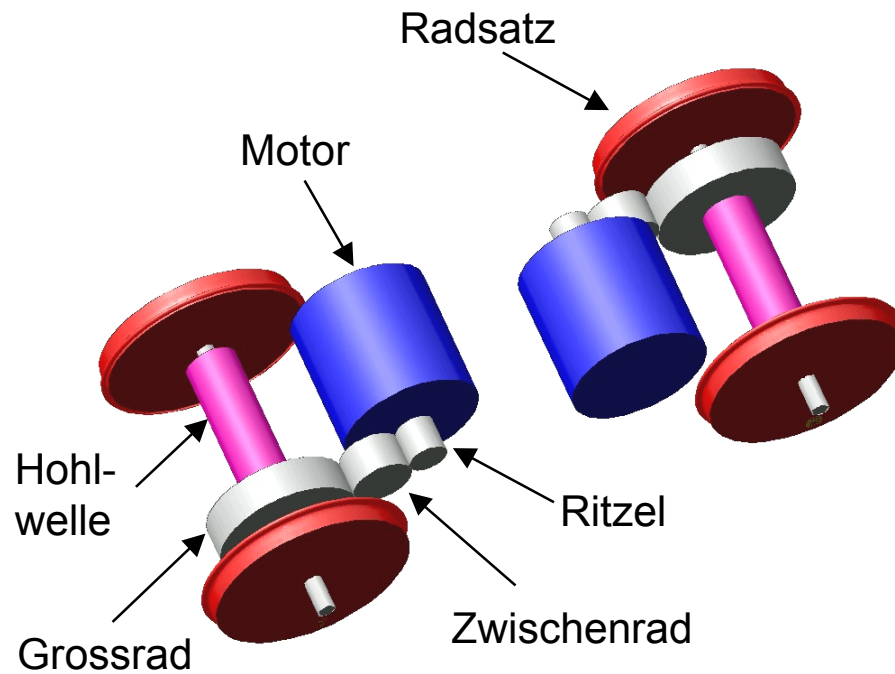
- Einfluss des Oberflächenzustands (Messung Lok SBB 460)

- Einfluss der Fahrgeschwindigkeit



Simulation der Fahr- und Antriebsdynamik Modell der Lok 2000 mit Antriebsstrang

Antrieb:

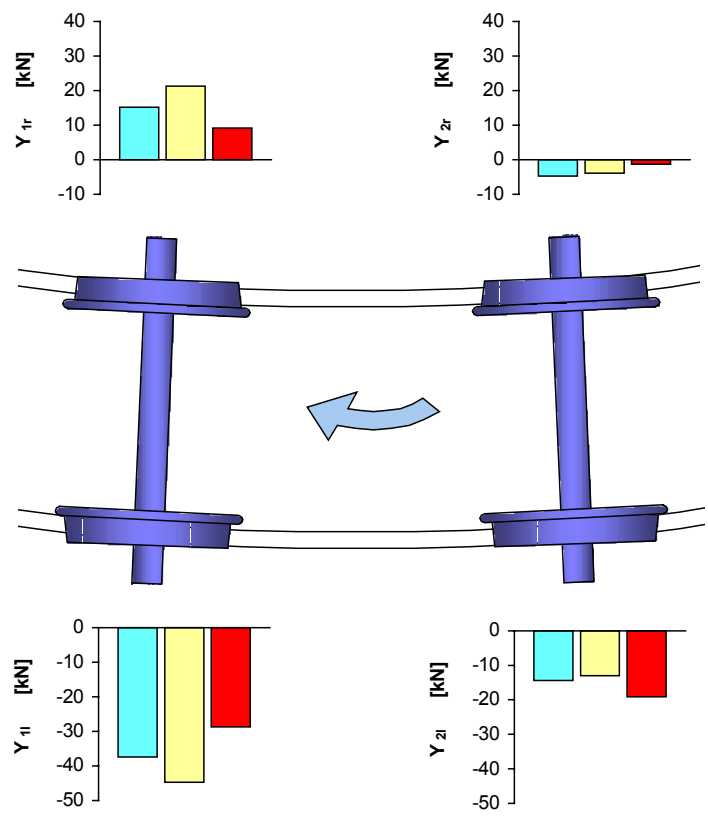
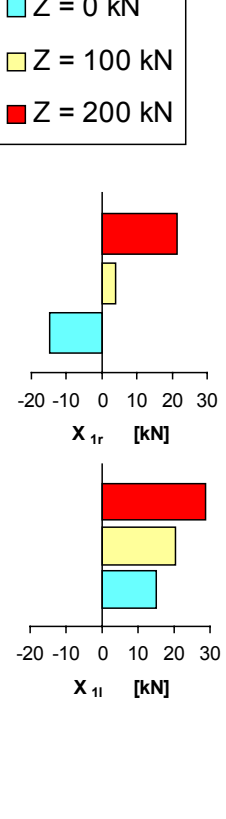


Simulation der Fahr- und Antriebsdynamik

Einfluss der Zugkraft

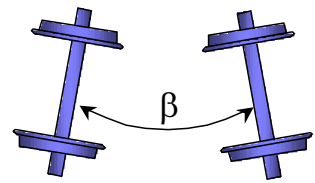
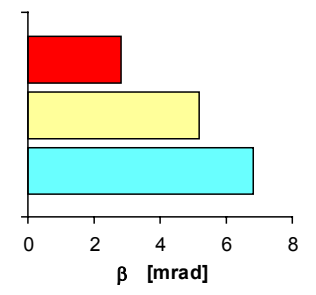
Kräfte zwischen Rad und Schiene

Zugkraft :
 ■ Z = 0 kN
 ■ Z = 100 kN
 ■ Z = 200 kN



R = 300 m, $a_{lat} = 1 \text{ m/s}^2$
 nass, Reibkoeffizient als Funktion
 der Schlupfgeschwindigkeit

Einstellwinkel

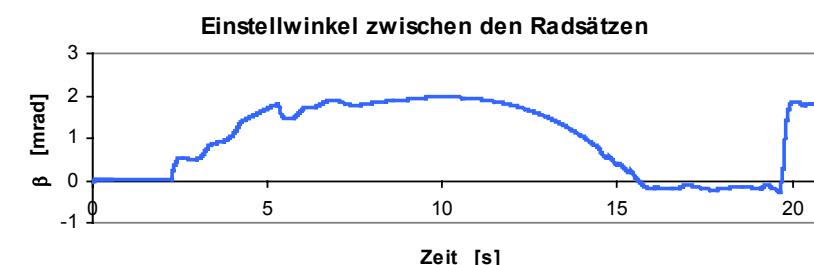
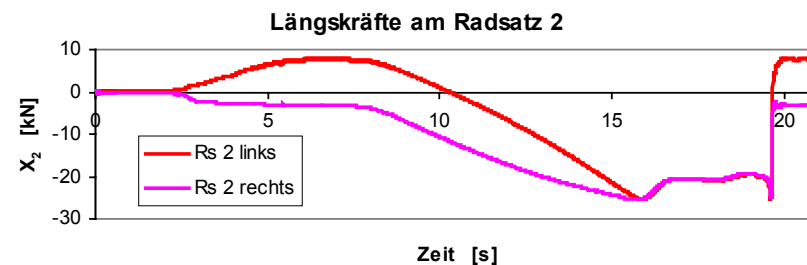
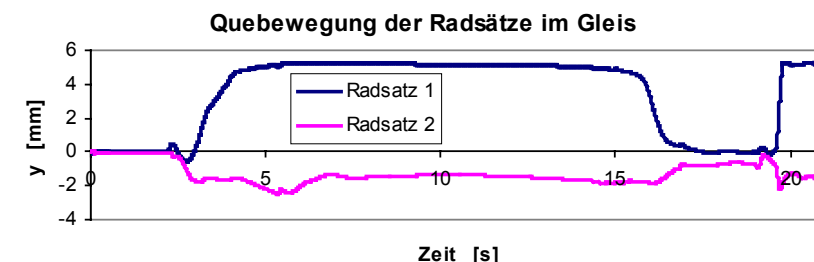
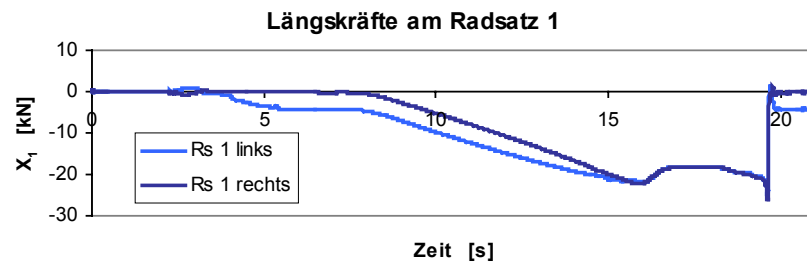
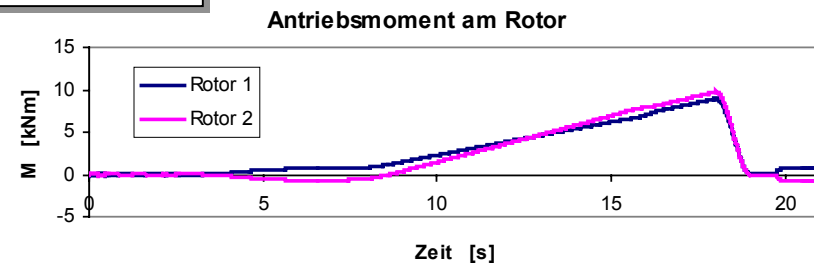
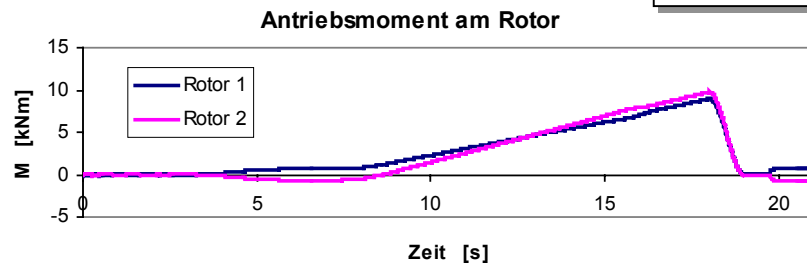


Simulation der Fahr- und Antriebsdynamik

Dynamische Änderung der Antriebsmomente

- Zeitverläufe der Grössen am vorlaufenden Drehgestell

R = 400 m, V = 70 km/h, nass



Modellierung des Rad-Schiene-Kontaktes

- Spielt eine entscheidende Rolle in der Dynamik der Schienenfahrzeuge
- Beinhaltet starke geometrische und physikalische Nichtlinearitäten
- Ist anspruchsvoll auf die Rechenzeit
- Kann mit der präsentierten Methode bezüglich der Rechenzeit optimiert werden
- Soll je nach der Aufgabe mit einem konstanten oder variablen Reibbeiwert berechnet werden