

**Rad/Schiene-Verschleiß und -Spannungen  
bei Fahrzeugen mit steifen und  
selbststeuernden Drehgestellen**

W. Kik, ArgeCare, Templin

H. Scheffel, Railway Dynamic Systems CC, Pretoria

Gabriele Ferrarotti, Mauro Cavalletti, VI-grade, Marburg-Turin

## 1. Teil: Entwicklung der

- Verschleiß-Simulation, der
- Spannungsberechnung und der
- direkten Radsatzkopplung

## 2. Teil: Simulationsergebnisse verglichen eines Fahrzeugmodells mit Drehgestellen die:

- steif geführte oder
- direkt gekoppelt und relativ weich geführte Radsätze haben

## Problem der Verschleiß-Simulation:

- Dynamik im Sekundenbereich
- Verschleiß Monate oder Jahre, hier 32Tkm

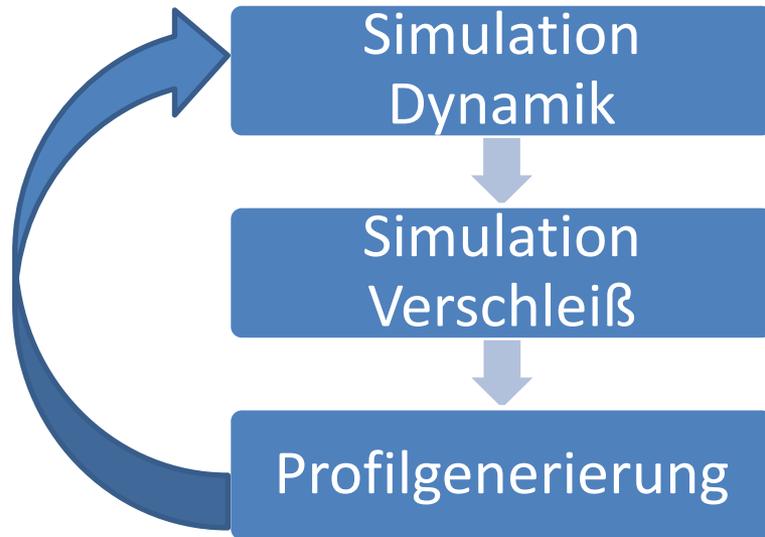


# Aufgaben bei Verschleißsimulation

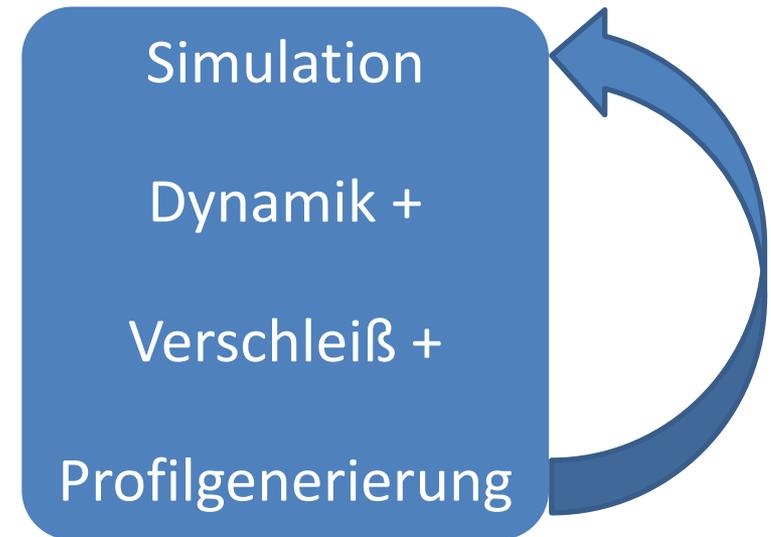
1. Organisation Simulation Dynamik / Verschleiß
2. Berechnung des Abtrags (abrasiven Verschleiß)
3. Generierung des Profils

# Organisation Simulation Dynamik / Verschleiß:

Sequentielles  
Vorgehen

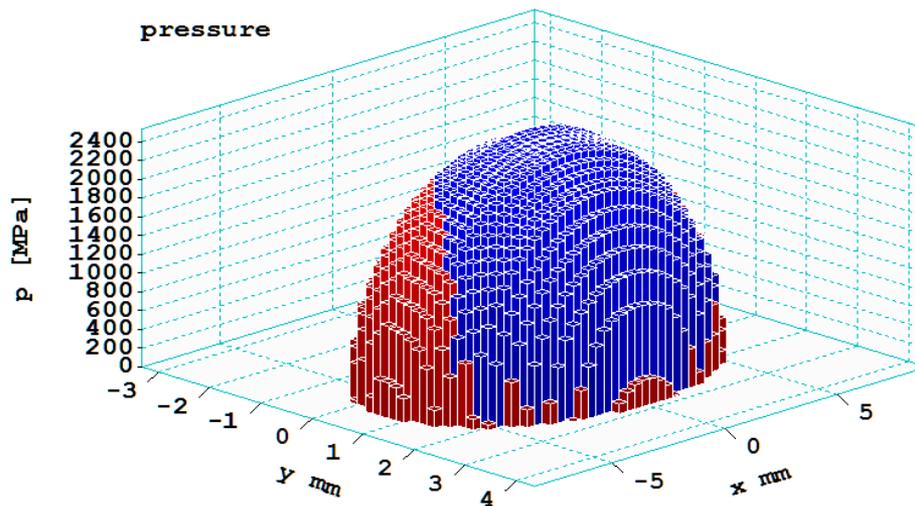


Paralleles  
Vorgehen



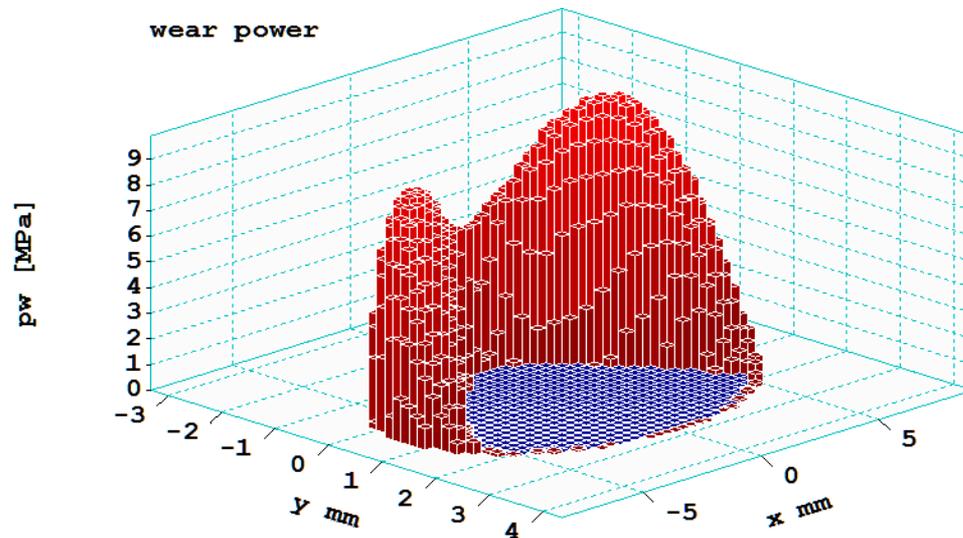
# Abrasiver Verschleiss

- Abtrag als Funktion der Normalspannungsverteilung, Gleitlänge und Härte des Materials mit einem schlupfabhängigen Proportionalitätsfaktor



# Abrasiver Verschleiss

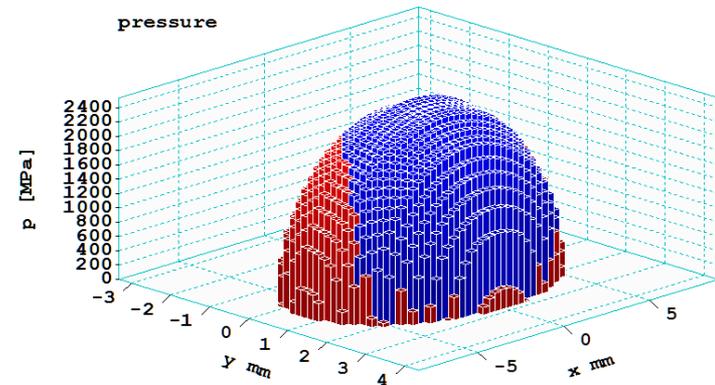
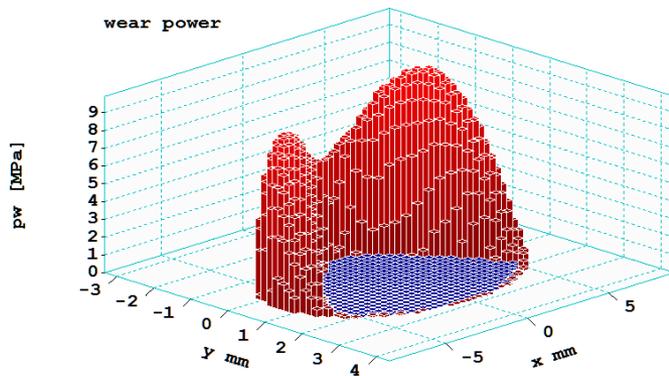
- Abtrag als Funktion der Reibarbeit und einem schlupfabhängigen Proportionalitätsfaktor formuliert als Funktion des Schlupfes mal Schlupfkraften.



# Profilgenerierung / Verteilung des Abtrags

Proportional lokaler  
Reibleistung

Normalspannung

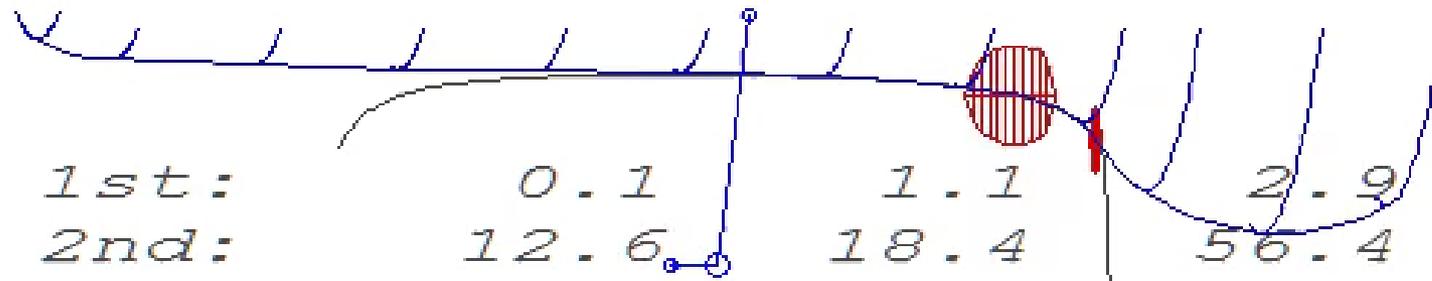


Echtzeit: → Sehr viele Simulationen

Beschleunigt: → Mulden - Glätten

# MEDYNA / VI-Rail Verfahren

- Abtrag über Reibleistung
- Verteilung proportional extrapoliierter Normalspannung

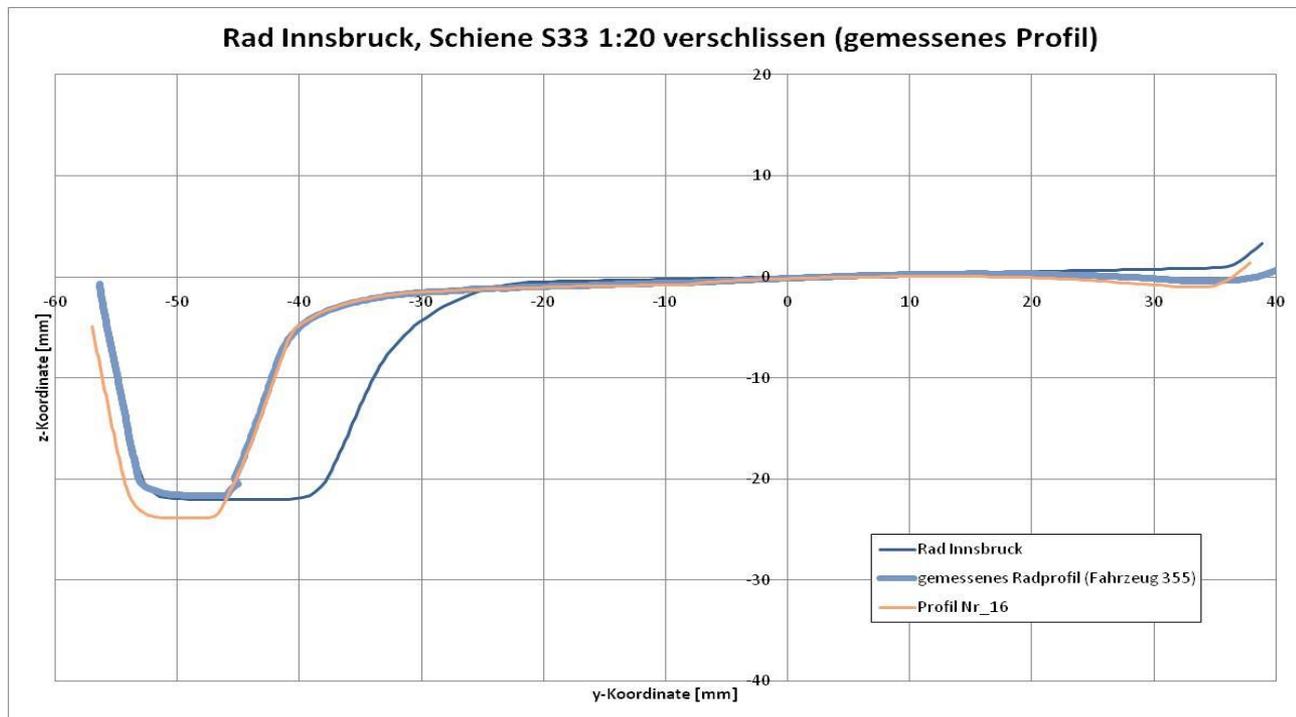


Video: [rad.mp4](#)

**Keine Glättung notwendig**

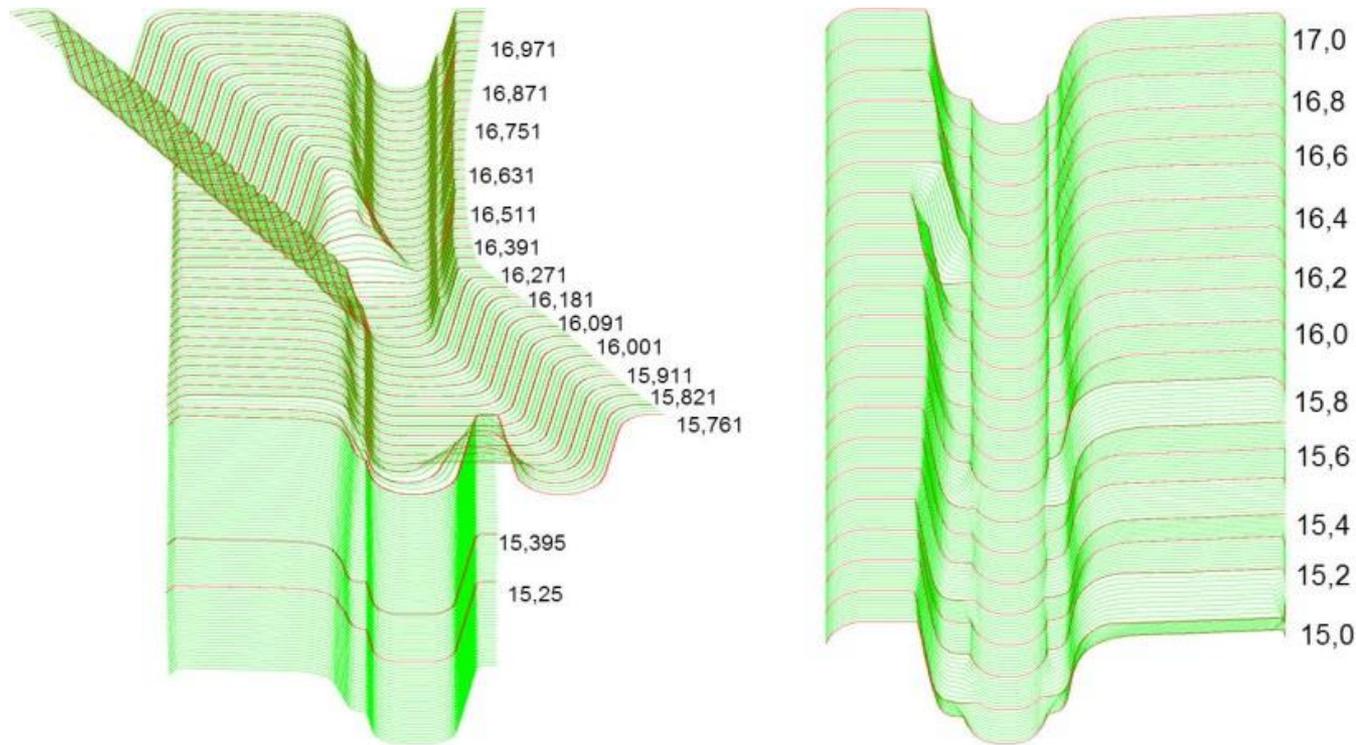
# Verifizierung

- Beispiel: Verschleißsimulation Dr. Dédé (Bombardier Transportation GmbH, Netphen)



# Extrapolationsverfahren:

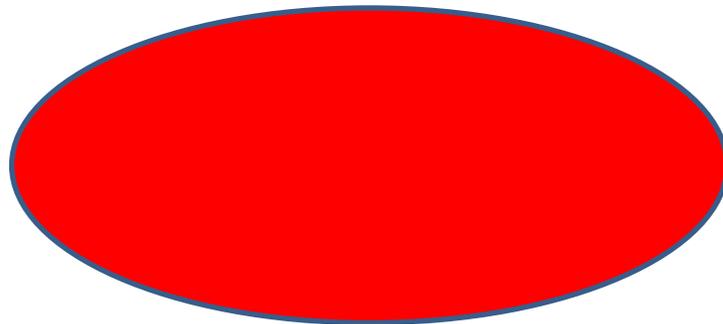
## Verschleißsimulation von Weichenschienen



# Spannungsberechnung / Kontaktermittlung

## Verfahren 1:

- Kontakt als Zwangsbedingung  
Aus Zwangskraft -> Kontaktfläche
- Kontaktform aus Profilkrümmungen  
-> Kontaktellipsen

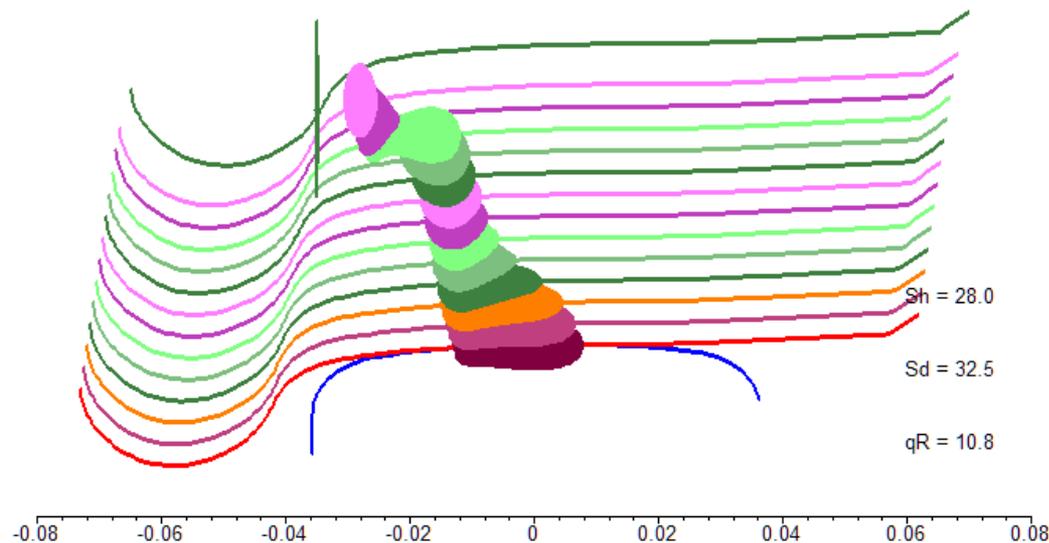


schnell, kein Mehrpunktkontakt

# Spannungsberechnung / Kontaktermittlung

## Verfahren 2:

- Kontaktfläche und Normalkraft aus Durchdringung der starren Profile  
-> beliebige Kontaktflächen

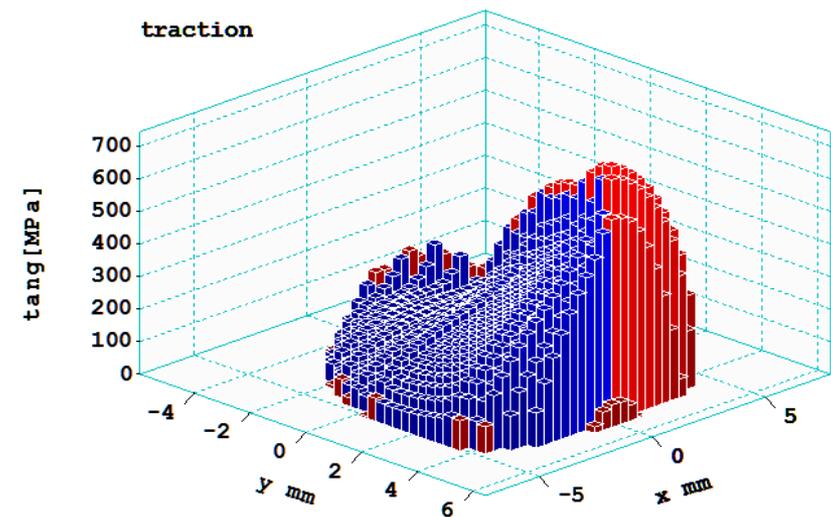
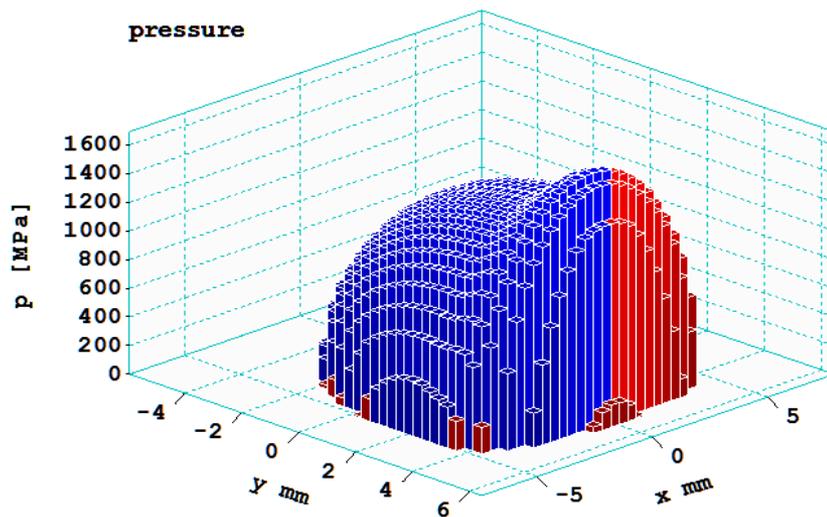


aufwendiger, Mehrpunktkontakt

# Spannungsberechnung / Kontaktermittlung

## Verfahren 3: „exakte“ Methode, BEM-Verfahren

- Kontaktfläche aus Durchdringung der starren Profile oder
- Durchdringung aus Normalkraft  
-> beliebige Kontaktfläche



„exakte“ Methode, zu aufwendig für Simulation

# Direkte Radsatzkopplung

- Ende der 60ziger Jahre in Südafrika aus Bissel-Lenkradsatz entwickelt

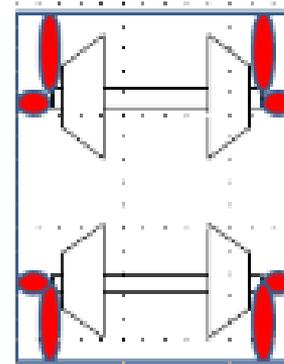


## Gegenargument:

- Antiradiale Steuerung bei Überhöhungsfehlbedarf und sehr engen Bögen

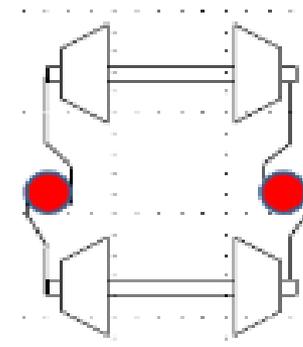
# Vergleich der Verschleiß- und Spannungssimulation eines Fahrzeugmodells mit Drehgestellen deren Radsätze

steif geführt

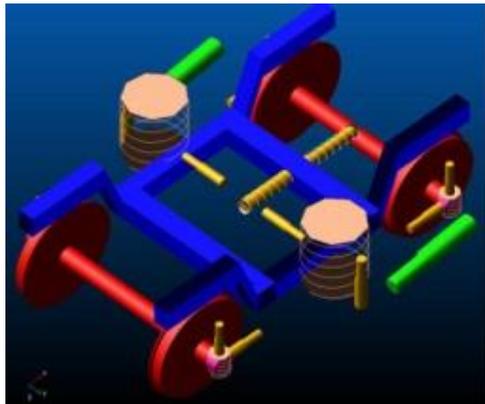
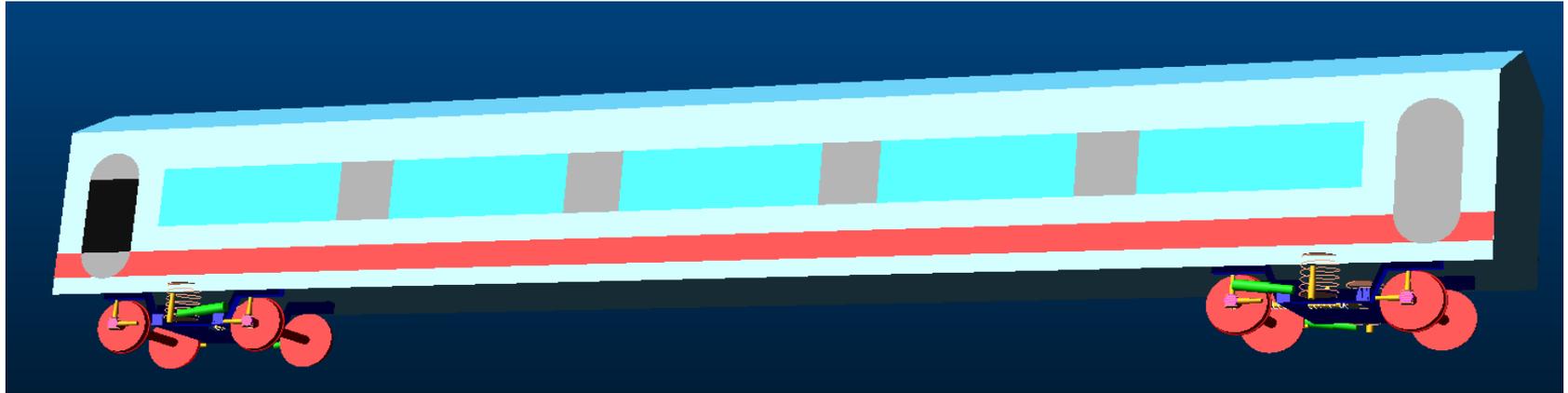


oder

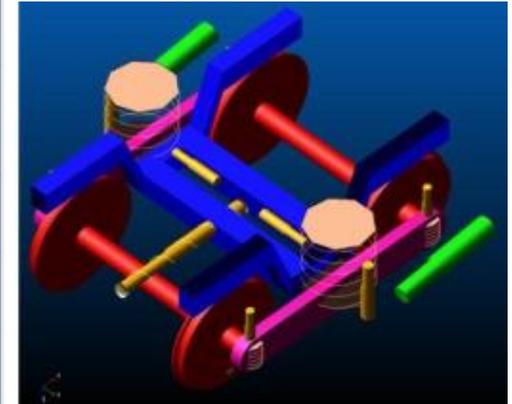
direkt gekoppelt und relativ weich geführt



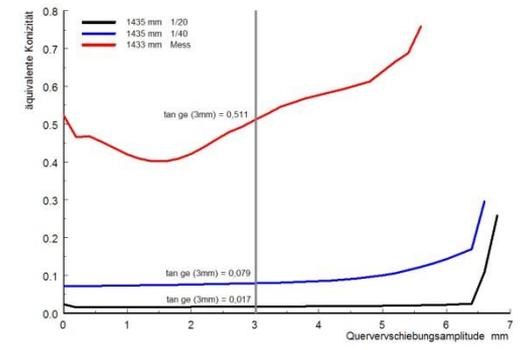
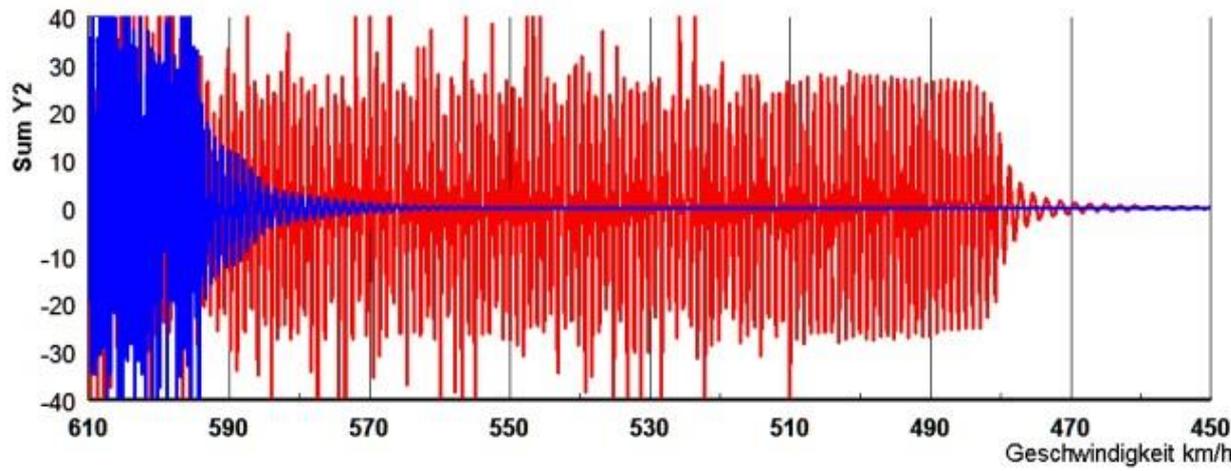
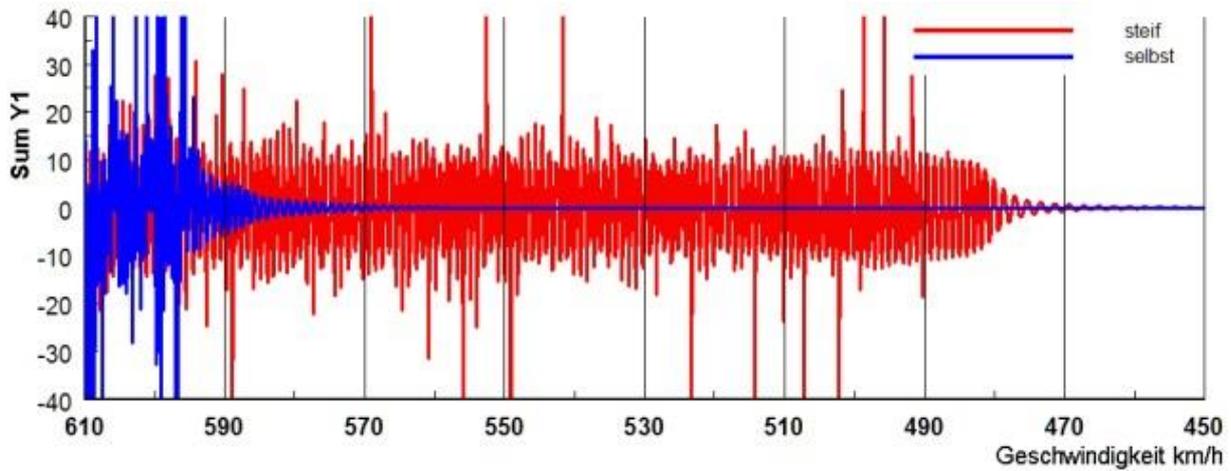
# Fahrzeugmodell / Drehgestelle



steif	Parameter	selbst
2,56	Radsatzabstand $m$	1,8
400	Schlingerdämpfer $c_s$ $kNs/m$	85
31,4	Primärfeder $k_x$ $kN/m$	3,8
3,2	Primärfeder $k_y$ $kN/m$	0,8
15; 2	Primärdämpfer $c_x; c_y$	-



# Stabilität: Profilpaarung $\tan \gamma_e / 3\text{mm} = 0,079$



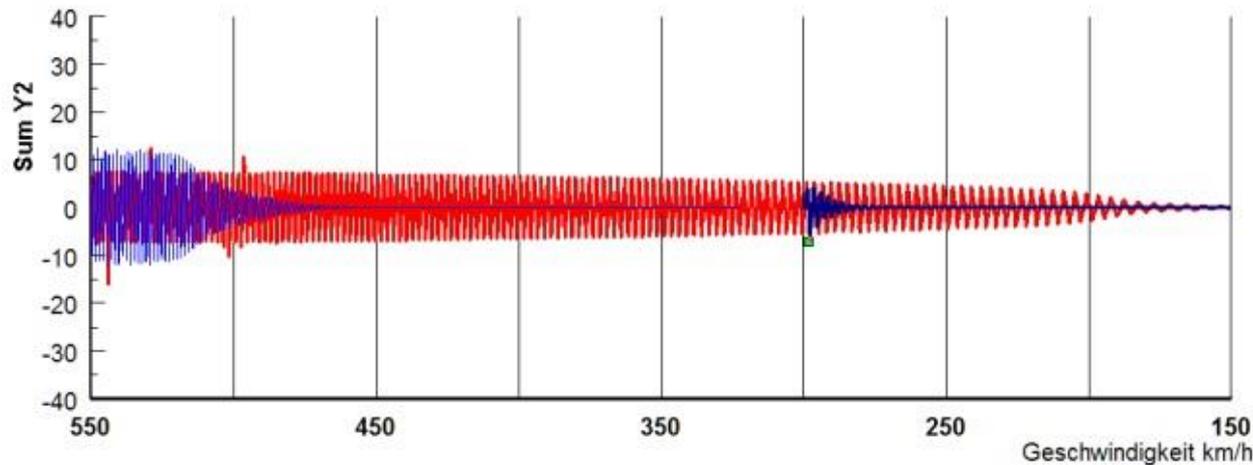
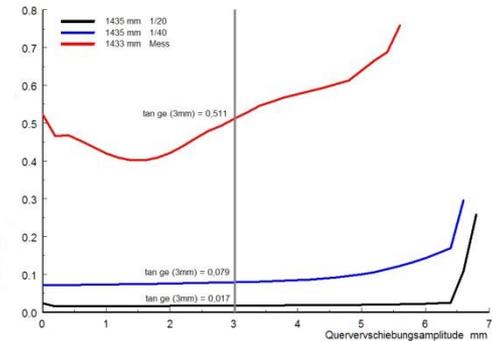
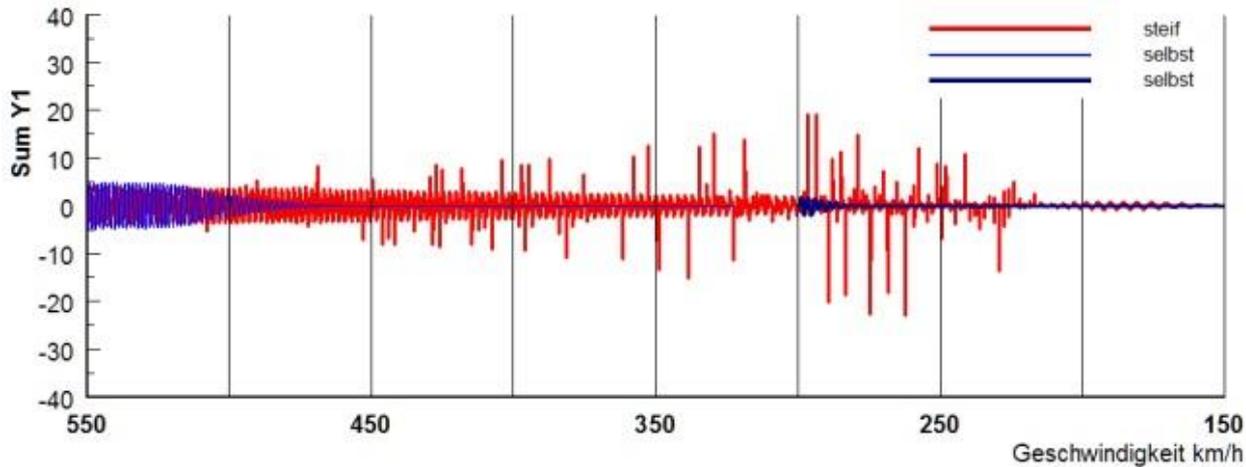
Blaue Konizitätsfunktion

$V_{\text{grenz}} \approx 470 \text{ km/h}$

$V_{\text{grenz}} \approx 560 \text{ km/h}$



# Stabilität: Profilpaarung $\tan \gamma_e / 3\text{mm} = 0,017$

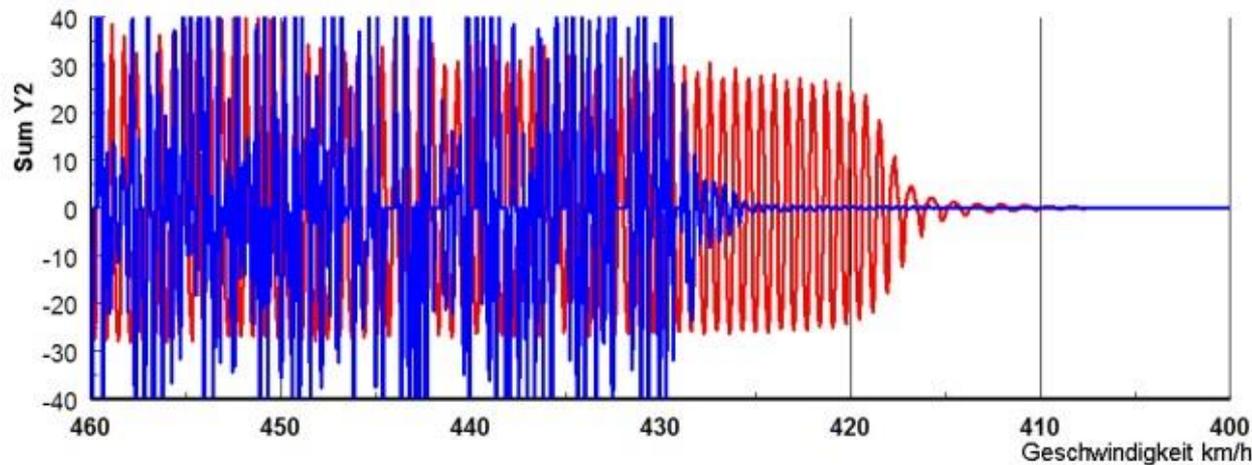
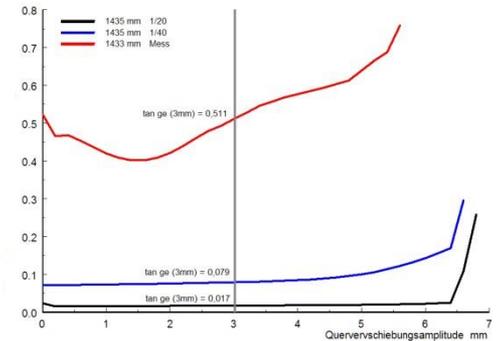
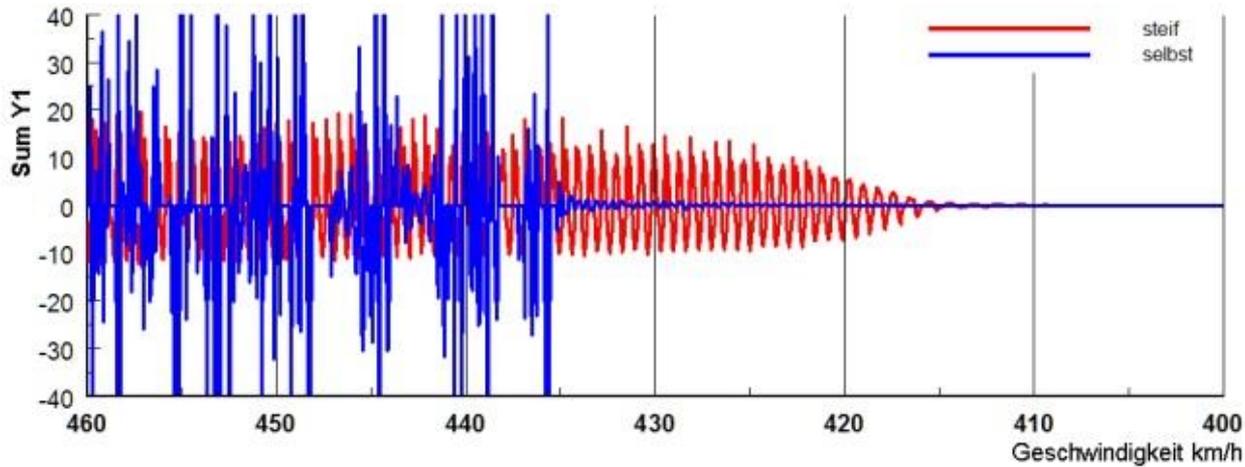


schwarze  
Konizitätsfunktion

$$V_{\text{grenz}} \approx 160 \text{ km/h}$$

$$V_{\text{grenz}} \approx 460 \text{ km/h}$$

# Stabilität: Profilpaarung $\tan \gamma_e / 3\text{mm} = 0,511$



Rote Konizitätsfunktion

$V_{\text{grenz}} \approx 415 \text{ km/h}$

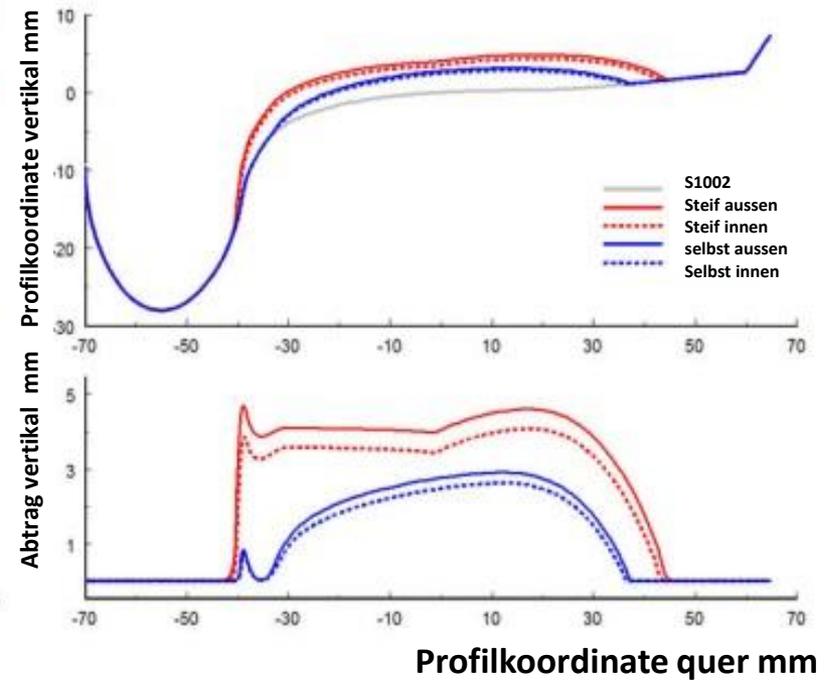
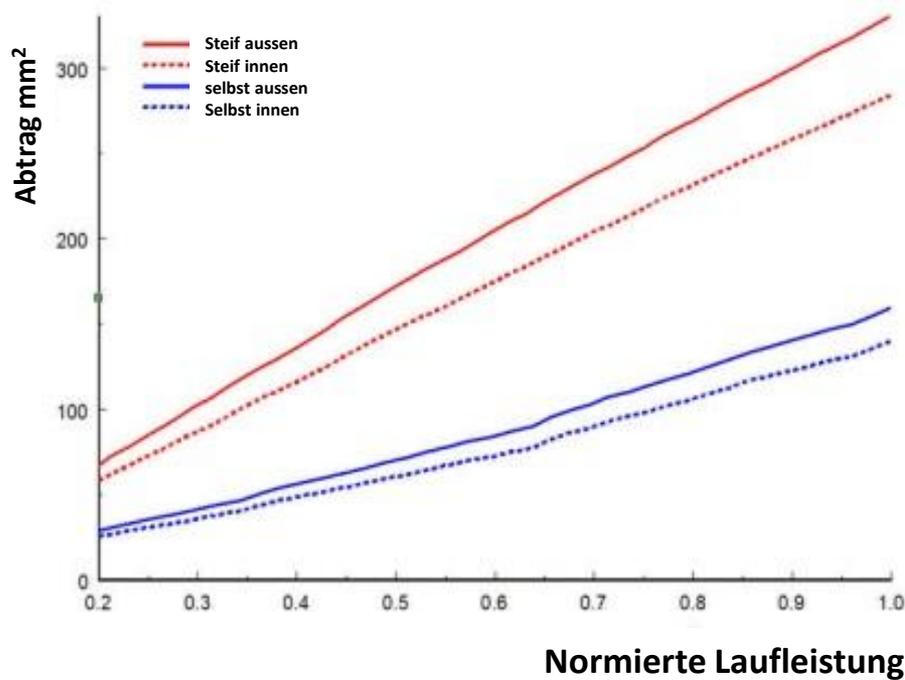
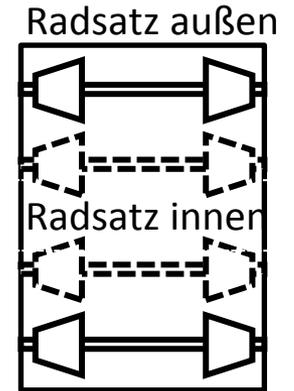
$V_{\text{grenz}} \approx 425 \text{ km/h}$

# Verschleißsimulation: Lastfälle

Fall	Radius in m	Überhöhung in mm	unausgeglichene Querbeschleunigung in $m/s^2$	Fahrgeschwindigkeit in km/h	Spurweite in mm
1	2 400	92	0,8	209	1435
2	900	150	0,8	144	1435
3a	350	150	0,8	90	1445
3b	350	150	-0,8	29	1445
4	190	0	0,8	44	1455
5	60	0	0,8	29	1455

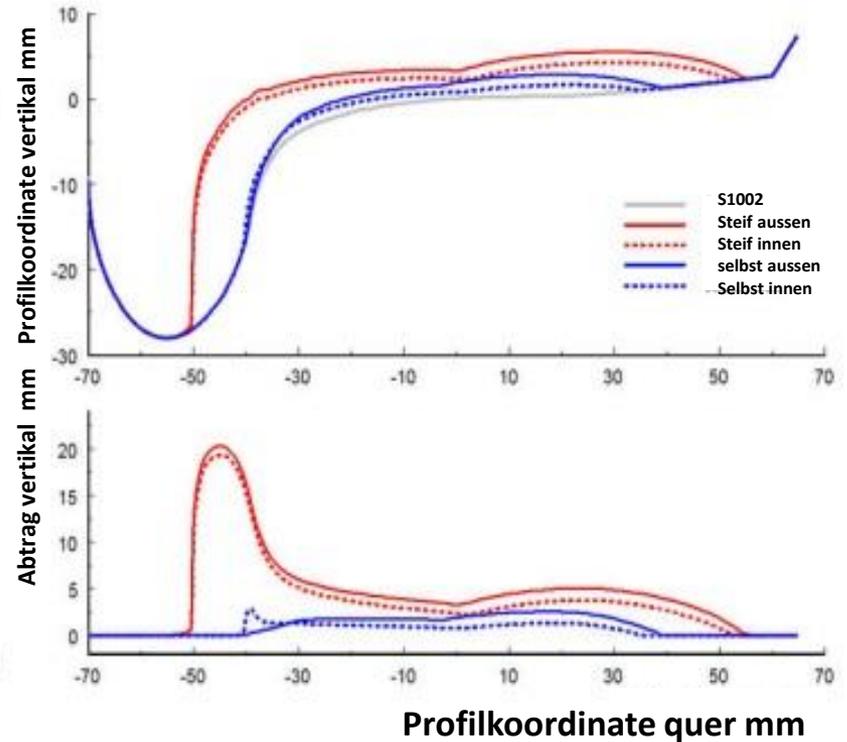
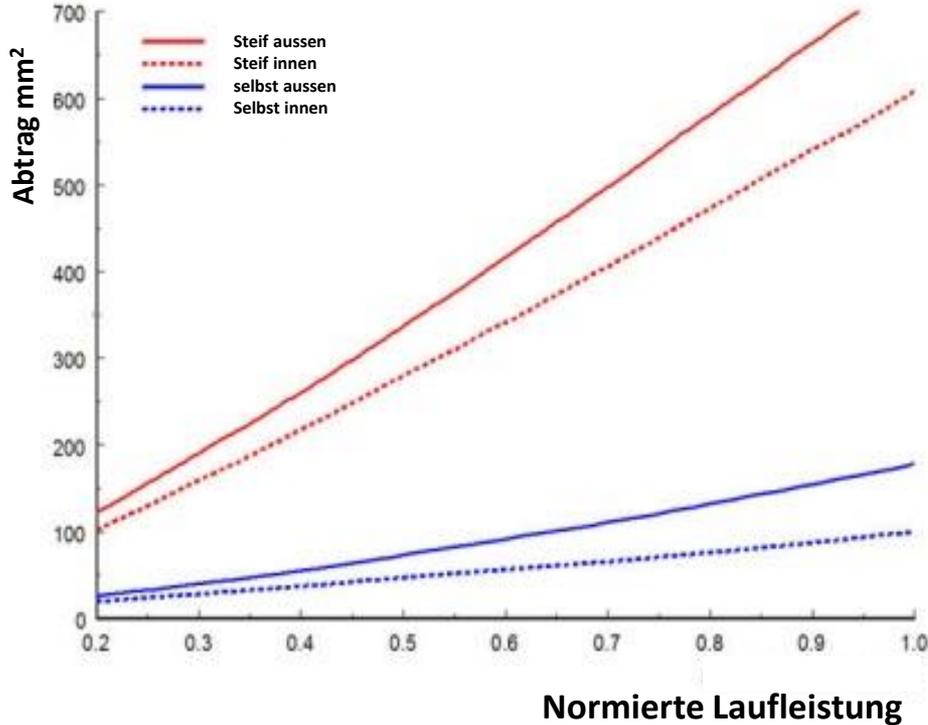
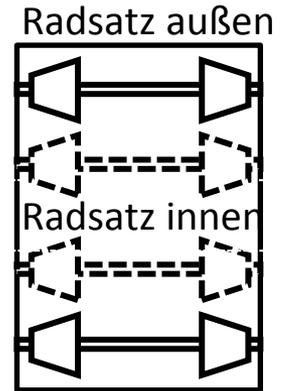
# Verschleissimulation: Lastfall 1

Bogenradius 2400 m,  $a_q = 0,8 \text{ m/s}^2$ , Spurweite 1435 mm



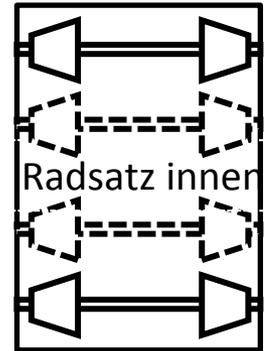
# Verschleissimulation: Lastfall 2

Bogenradius 900 m,  $a_q = 0,8 \text{ m/s}^2$ , Spurweite 1435 mm

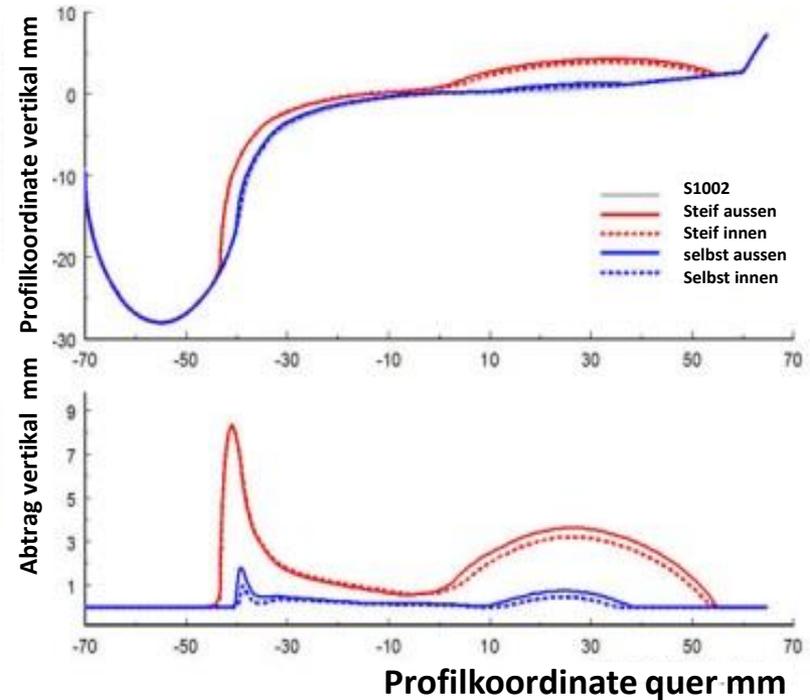
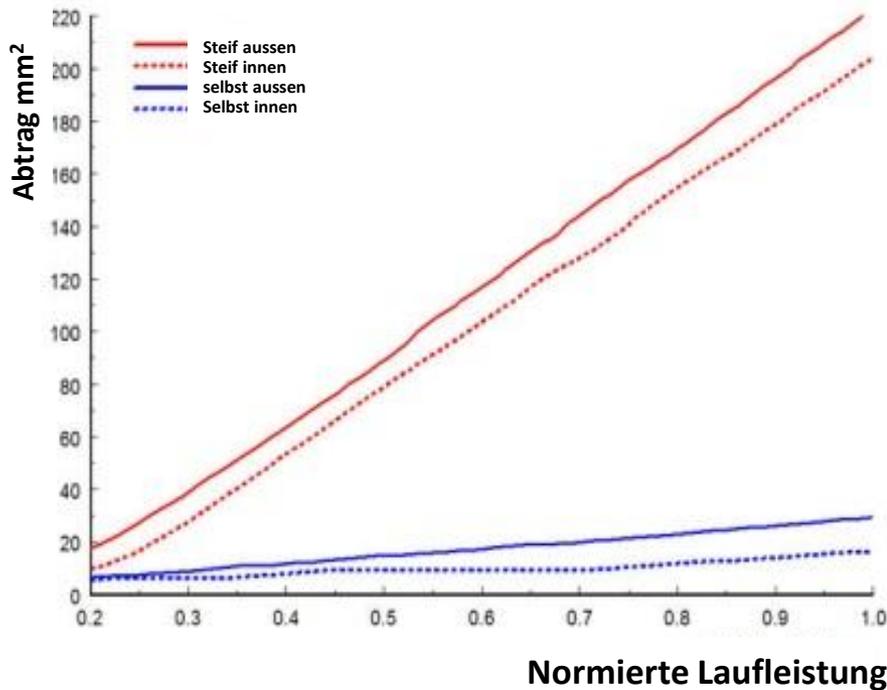


# Verschleissimulation: Lastfall 3b

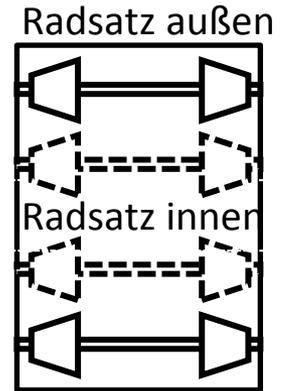
Radsatz außen



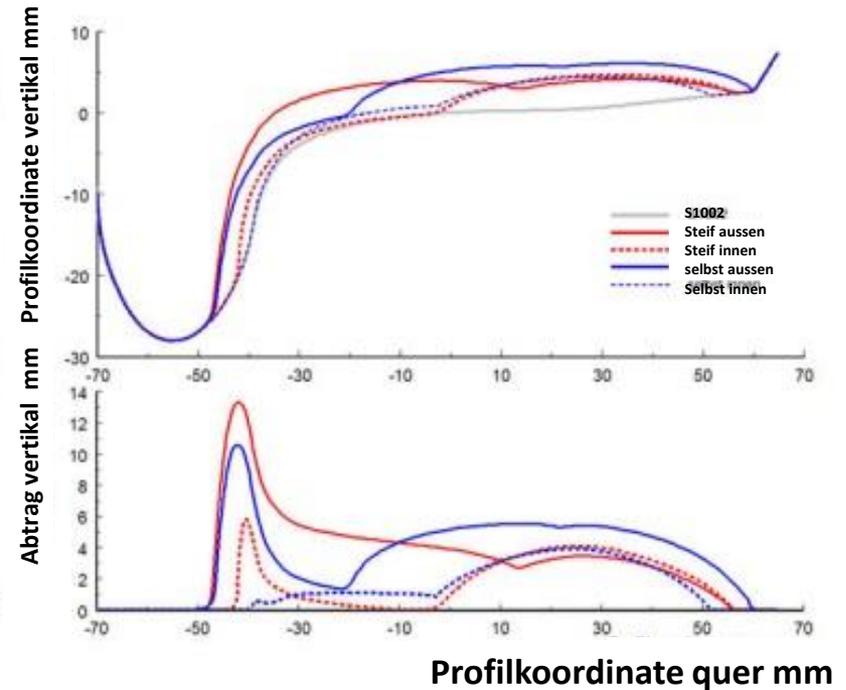
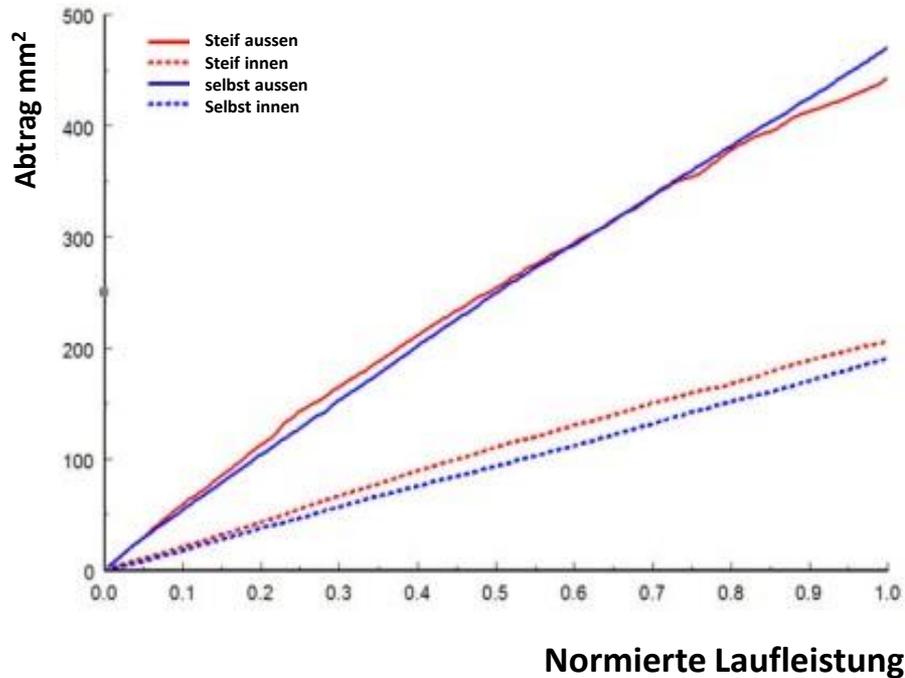
Bogenradius 350 m,  $a_q = -0,8 \text{ m/s}^2$ , Spurweite 1445 mm



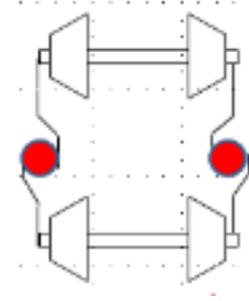
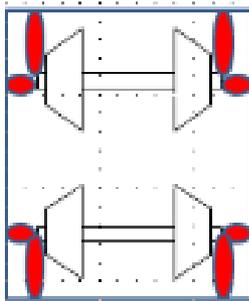
# Verschleissimulation: Lastfall 5



Bogenradius 60 m ,  $a_q = 0,8 \text{ m/s}^2$  , Spurweite 1455 mm

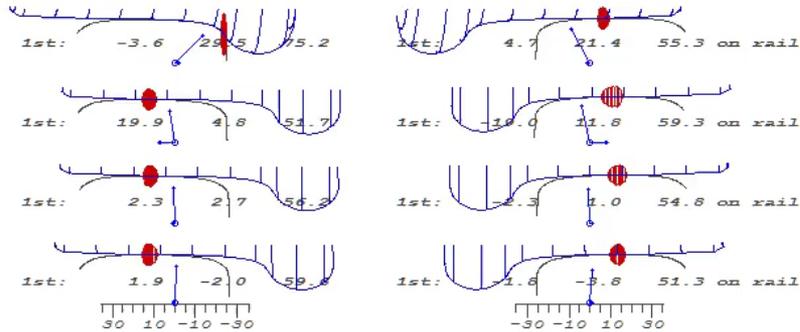


# Bogenradius 60 m



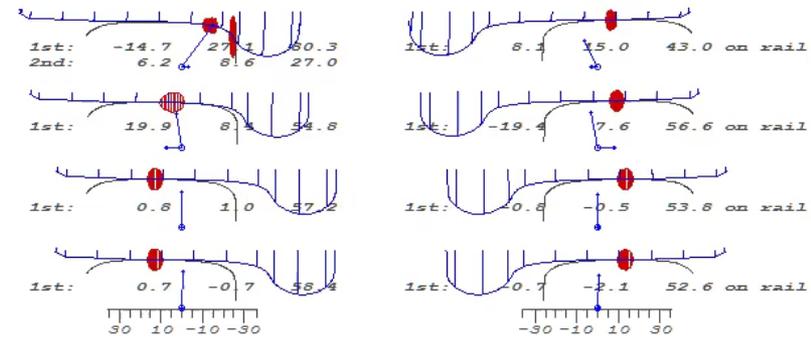
MOD9009

Distance= 2.6960E+01m, time= 3.37s, v= 29km/h



MOD9109

Distance= 2.3600E+01m, time= 2.95s, v= 29km/h



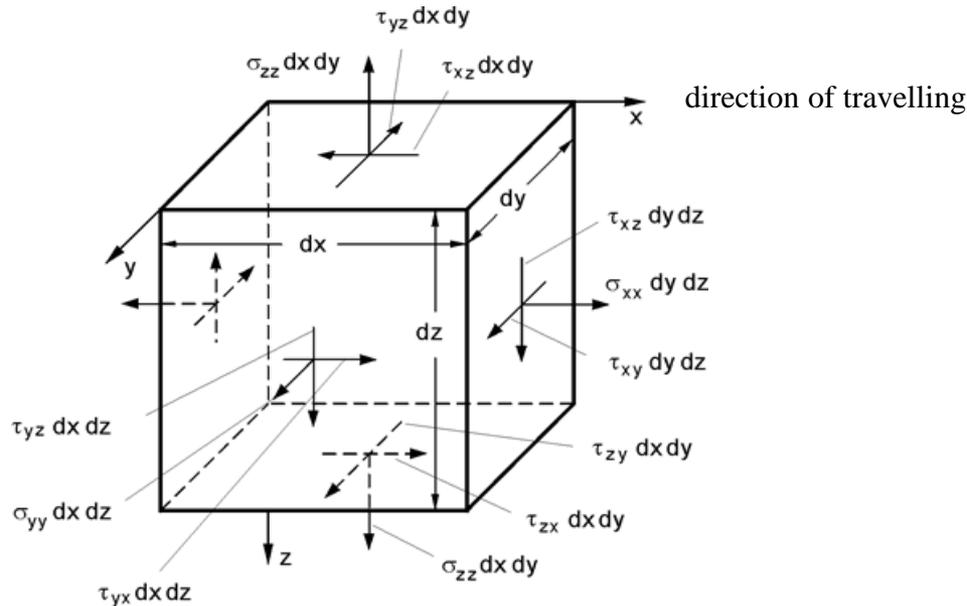
Video: [Bogen 60 m steif-selbst.mp4](#)

Spurweite 1455 mm



Moderne Schienenfahrzeuge, Graz, 7.-10. September 2014

# Spannungsberechnung



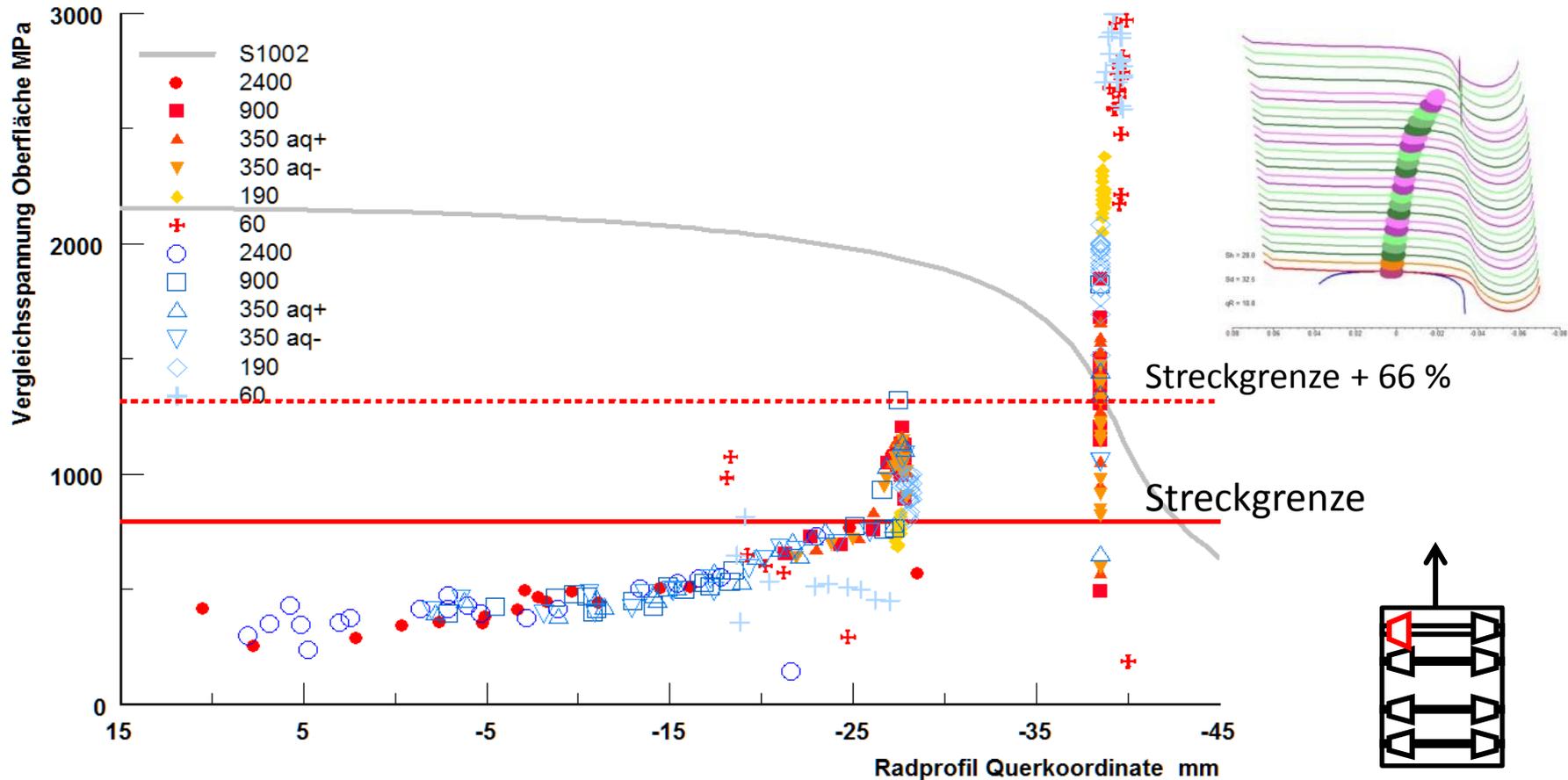
## Äquivalente Spannung $\sigma_v$ nach von Mises

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 \right] + 3 \left[ \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2 \right]}$$

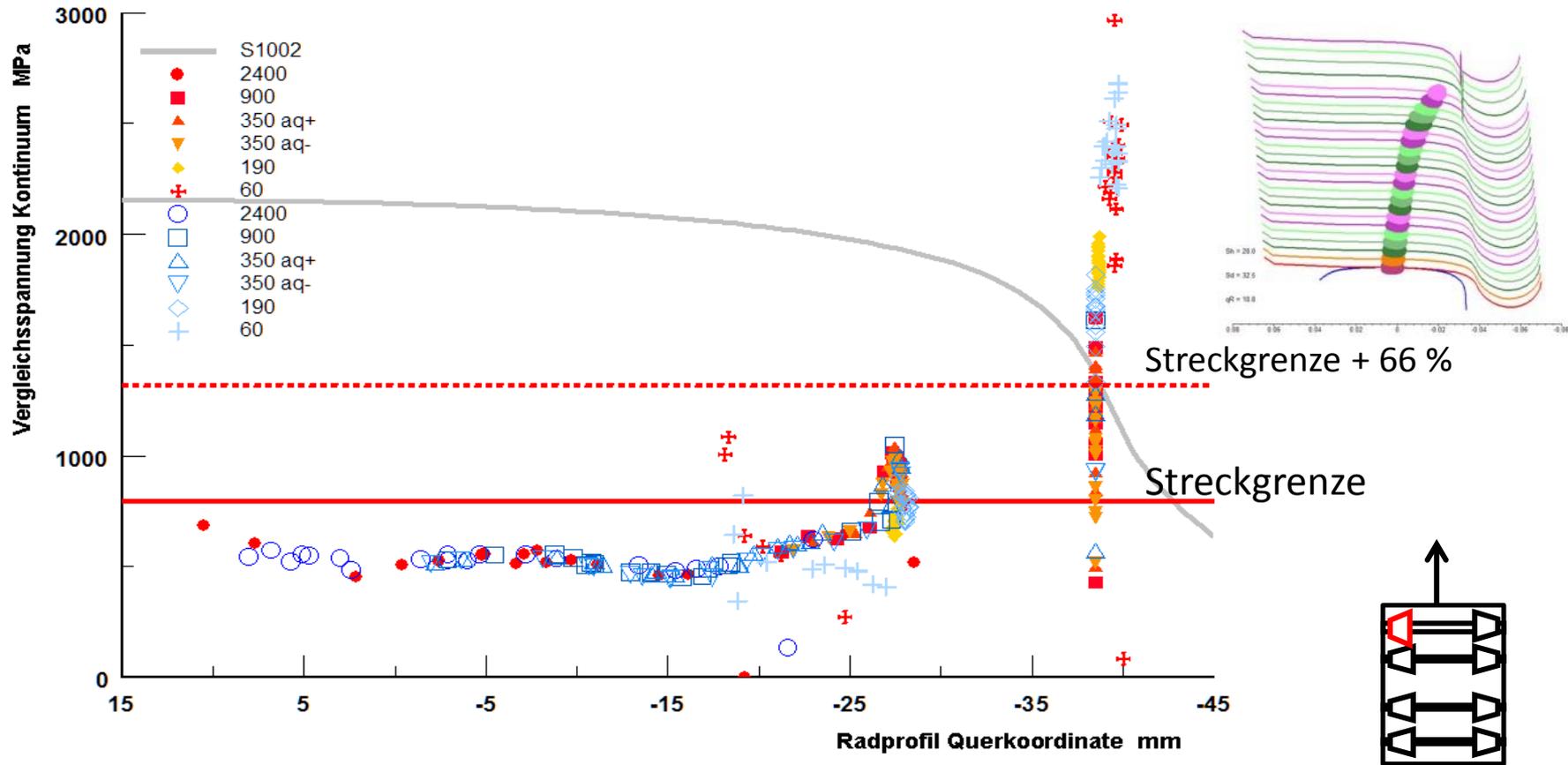
# Spannungsberechnung

Lastfall Bogenradius	$a_q$ m/s <sup>2</sup>	Grenze Übergangs- bogen - konstanter Bogen m	Wegstrecke Anfang - Ende Ausgabe m	Inkrement m
1 – 2 400 m	0,52	200	180 - 280	5
2 – 900 m	0,8	130	110 - 210	5
3 – 350 m	±0,8	100	90 - 130	2
4 – 190 m	0,8	50	40 - 80	2
5 – 60 m	0,8	50	40 - 80	2

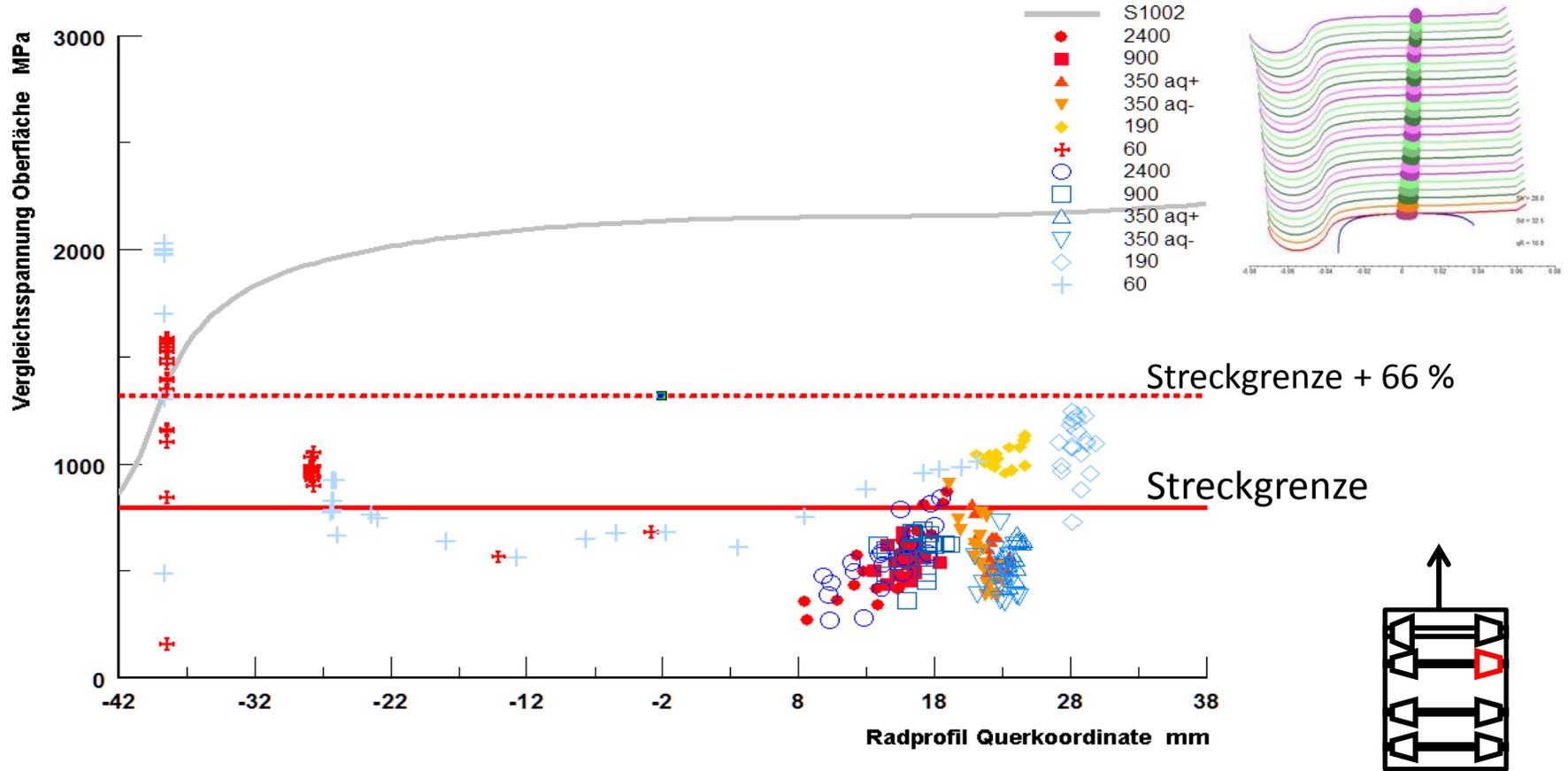
# Spannungsberechnung / Oberfläche



# Spannungsberechnung / Kontinuum



# Spannungsberechnung / Oberfläche

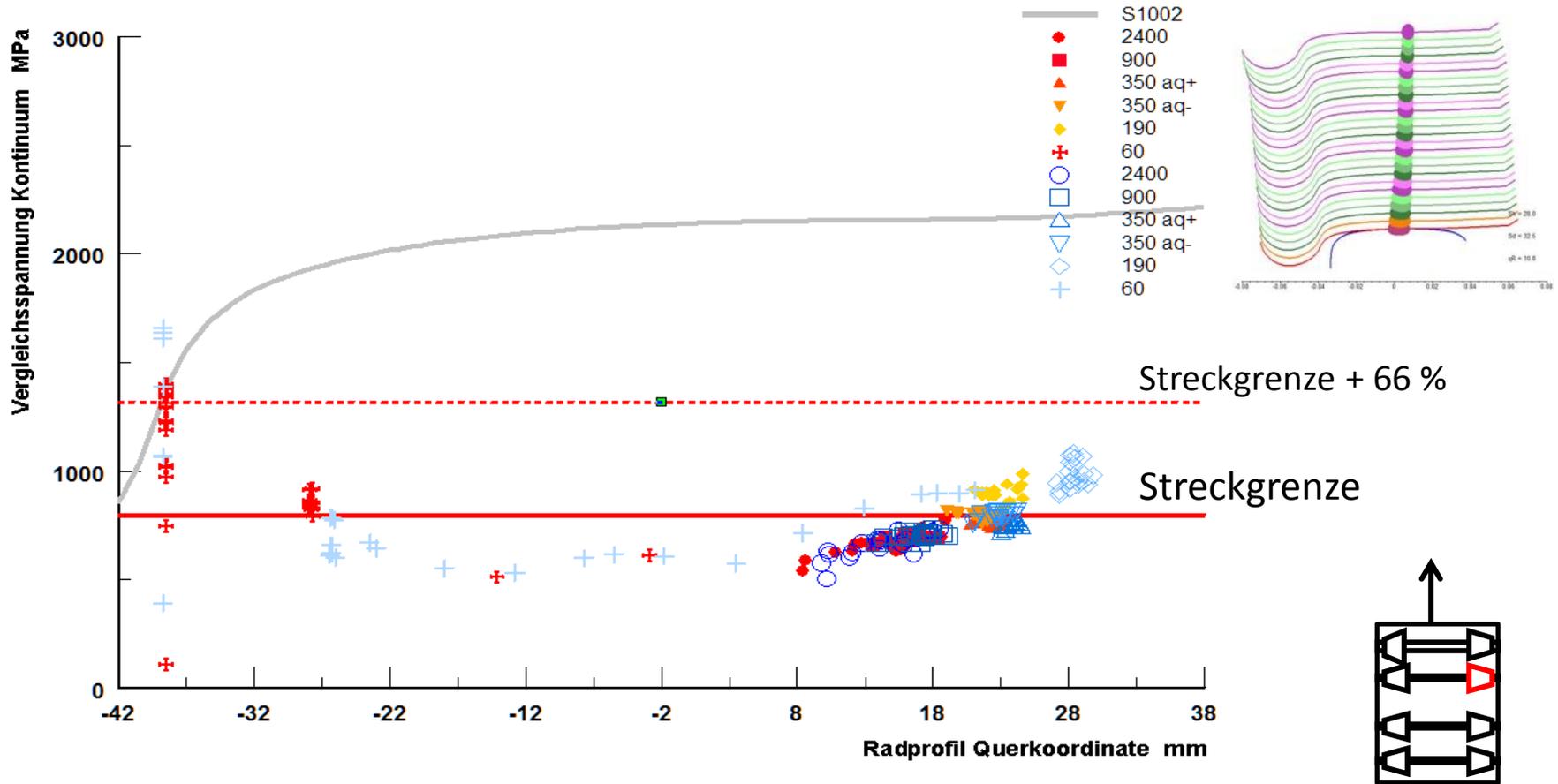


Nachlaufendes Rad innen



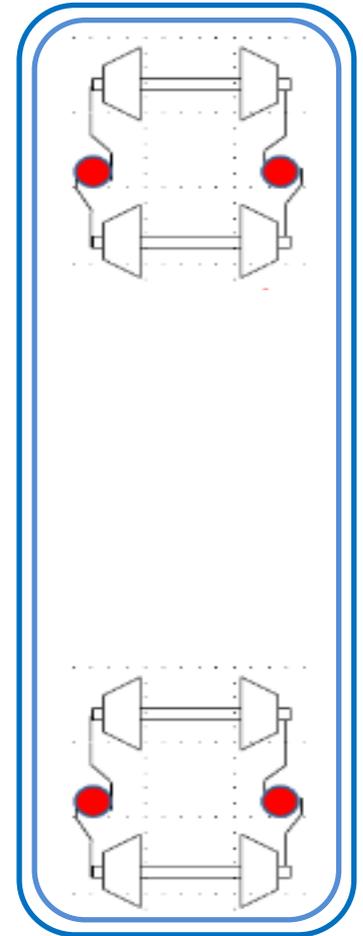
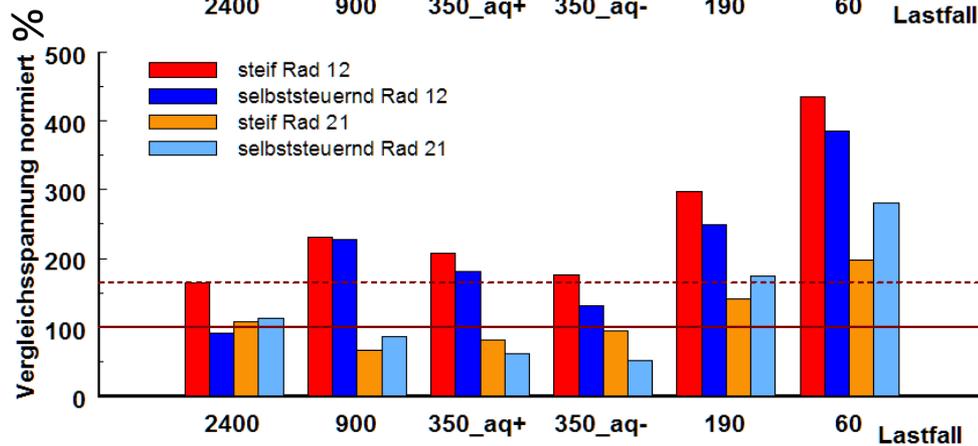
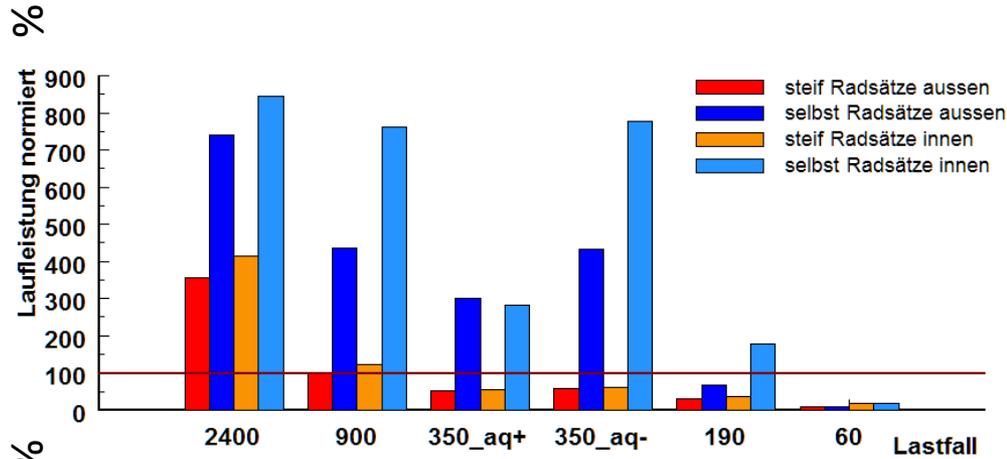
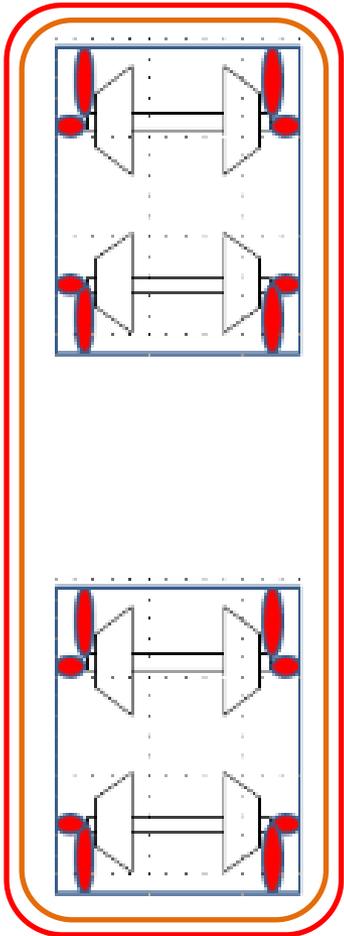
Moderne Schienenfahrzeuge, Graz, 7.-10. September 2014

# Spannungsberechnung / Kontinuum



Nachlaufendes Rad innen

# Zusammenfassung



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

