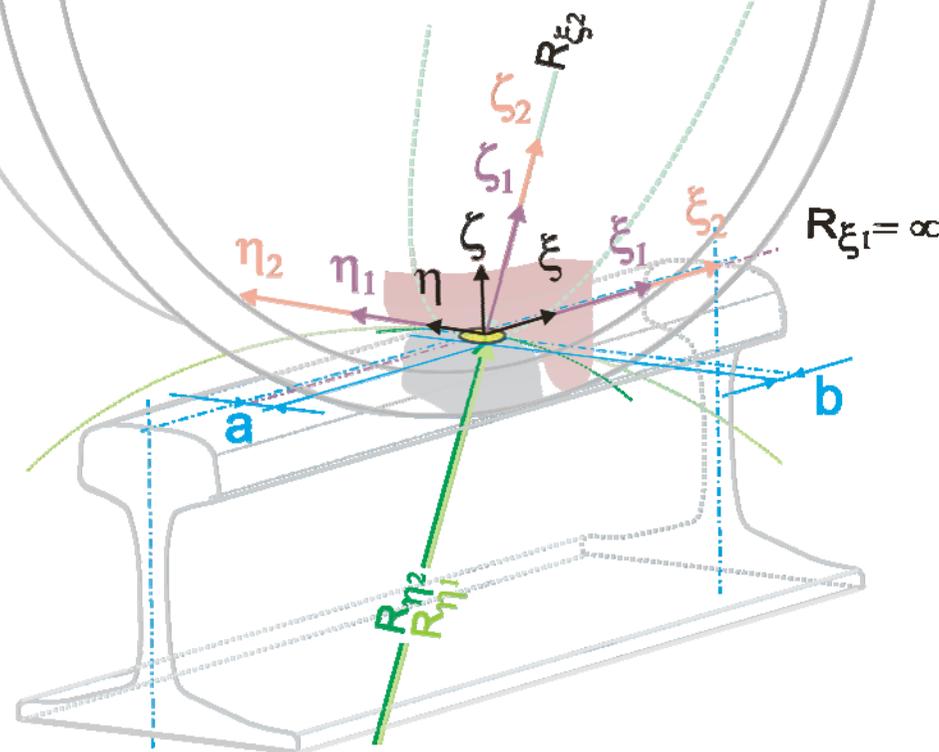


# Kontaktmechanik

## Rad-Schiene

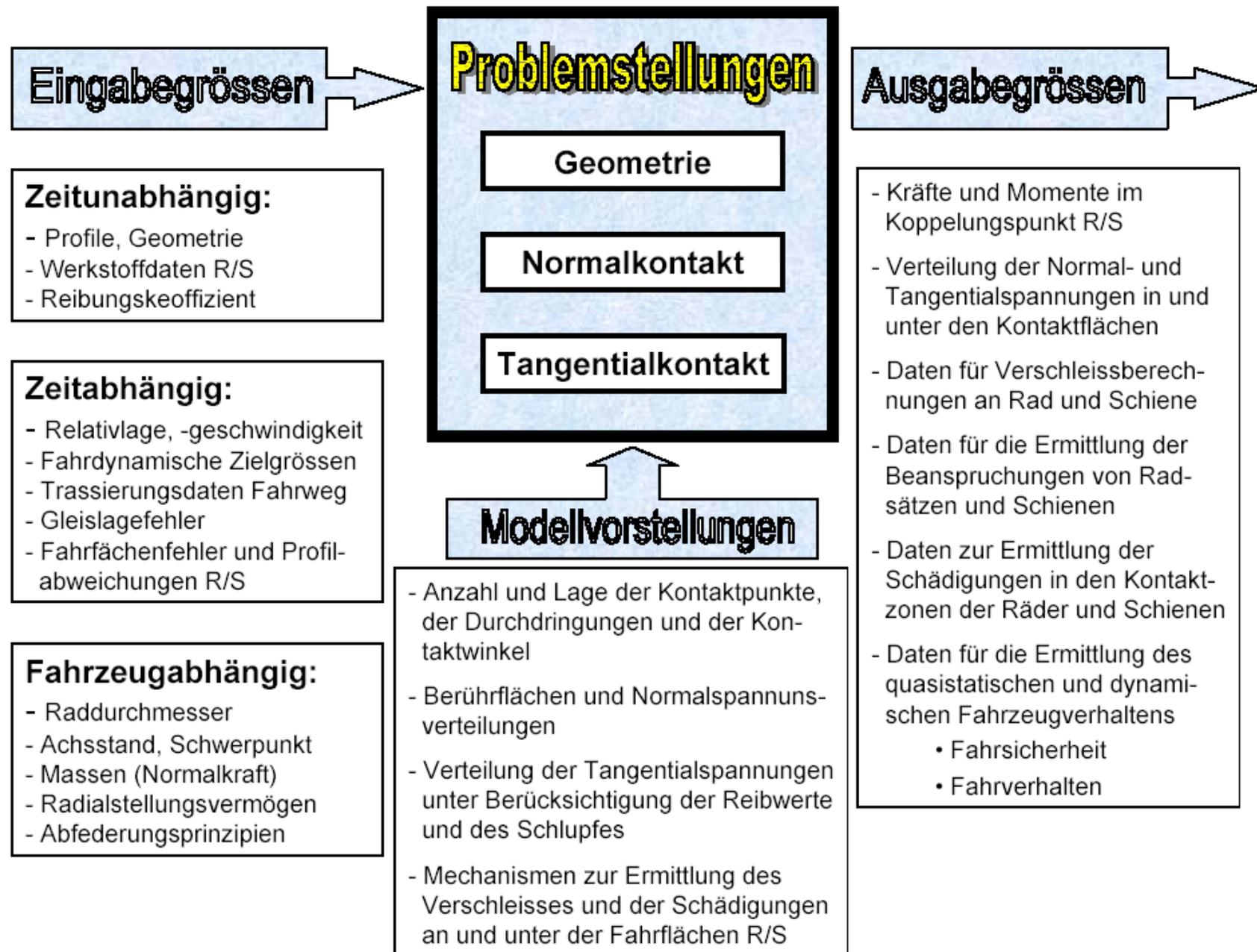
Die Kontaktmechanik ist ein Teilgebiet der Mechanik und beschreibt das mechanische Verhalten von elastischen Körpern unter Einwirkung von Kräften und Drehmomenten in der Kontaktzone zwischen zwei Körpern.



# **Die Aufgaben der Kontaktmechanik können in die nachstehenden Bereiche unterteilt werden:**

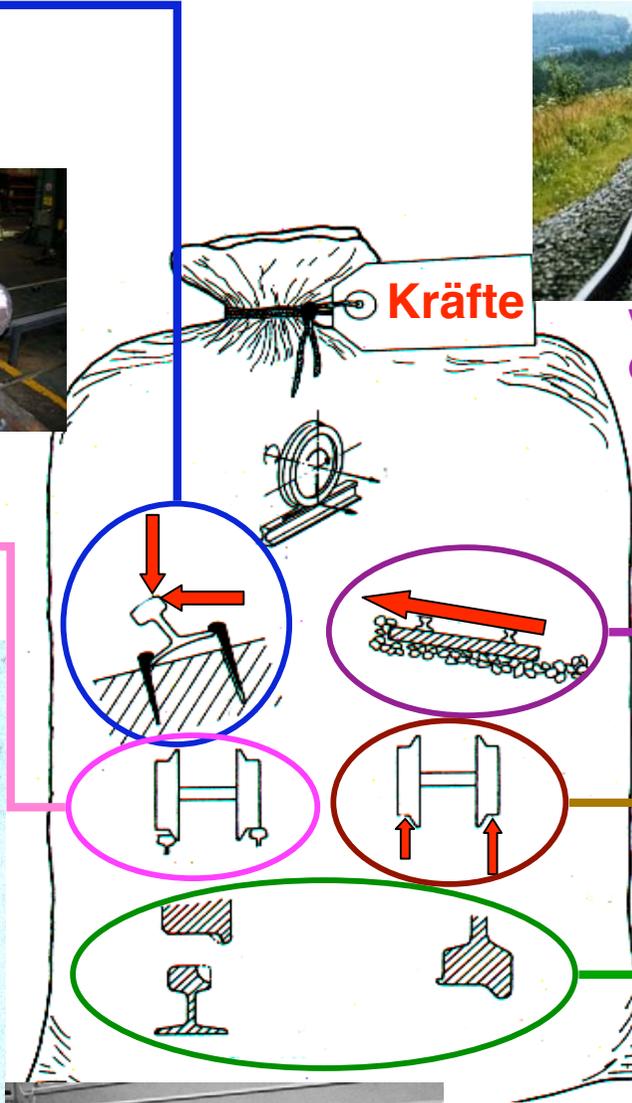
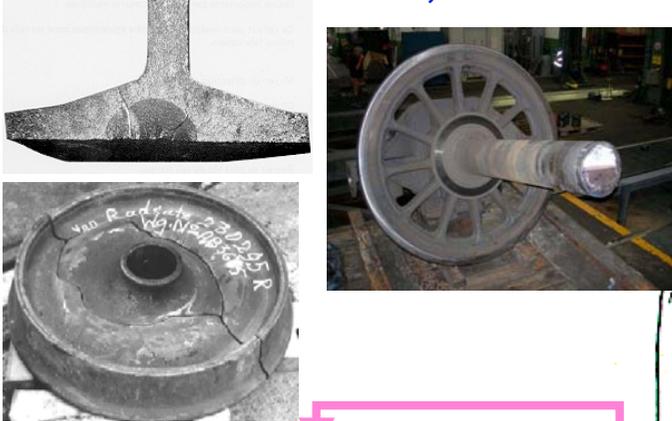
- **Die Ermittlung der Normalkontaktspannungen.**
- **Die Ermittlung der daraus und aus dem rollenden Kontakt sich einstellenden komplexen Spannungsverteilungen in den Kontaktbereichen von Rädern und Schienen und die daraus resultierenden Beanspruchungen und Schädigungen.**
- **Die Entwicklung von Modellvorstellungen zum Versagen der Materialien von Rad und Schiene durch Schlupfkkräfte und erhöhte Temperaturen im Kontakt Rad/Schiene.**
- **Die Entwicklung von Modellvorstellungen zum Verschleißabtrag an Rad und Schiene.**
- **Die Ermittlung der Kraftschlusskräfte, welche auf einen konventionellen Radsatz einwirken.**

# Problemstellungen und Lösungen aus der Kontaktmechanik



# Kontaktmechanik, Berührungsgeometrie R/S und Lauftechnik als Grundlage für die Ermittlung der Kräfte zwischen Rad und Schiene

Beanspruchung von Schienen, Rädern, Radsatzwellen, usw.

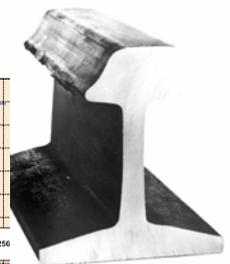
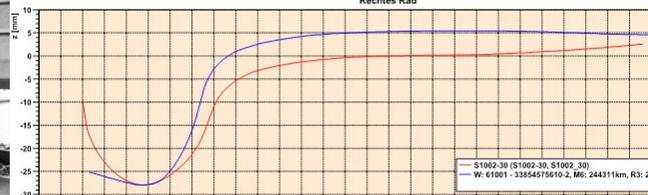
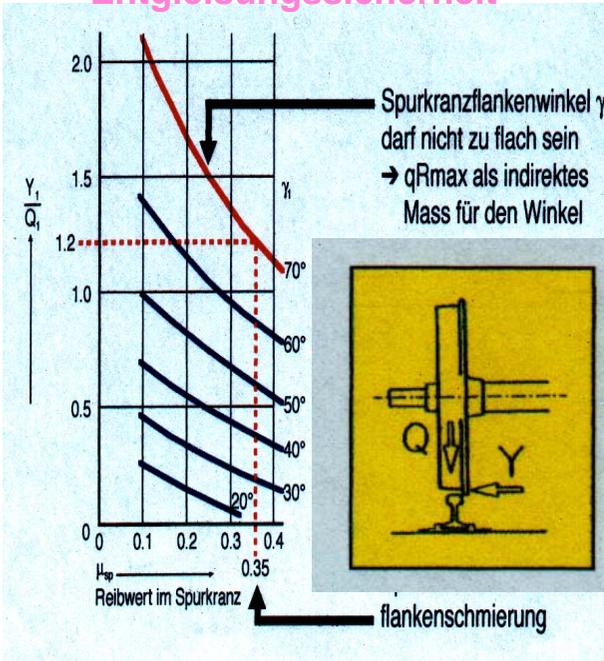


Verschiebung Gleisrost

Radlastausgleich  
Ladeverschiebungen

Verschleiß an Rad und Schiene

Entgleisungssicherheit



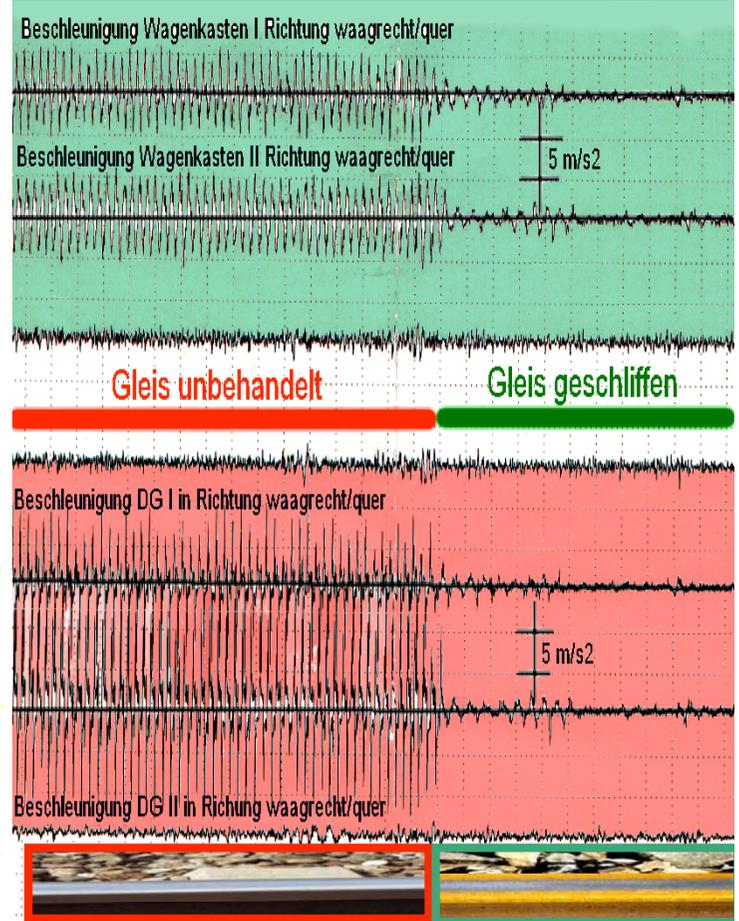
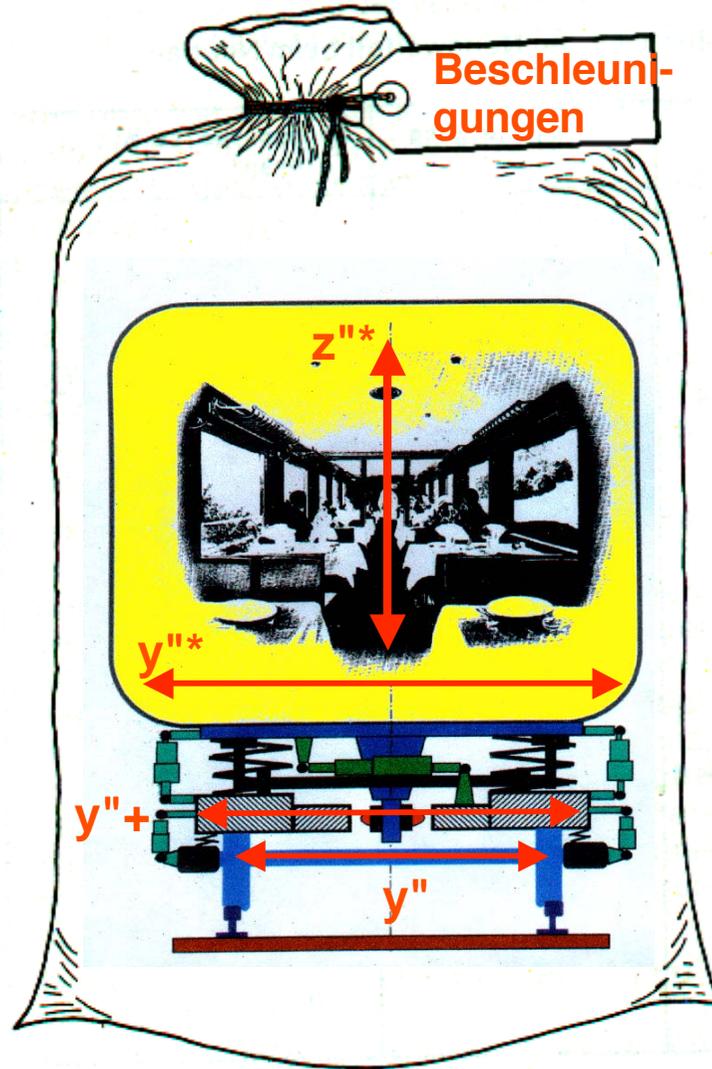
# Kontaktmechanik, Berührungsgeometrie R/S und Lauftechnik als Grundlage für die Ermittlung der Beschleunigungen an Kasten, Fahrwerk und Radsatz

Fahrkomfort  
bei Fahrzeugen  
des Reiseverkehrs

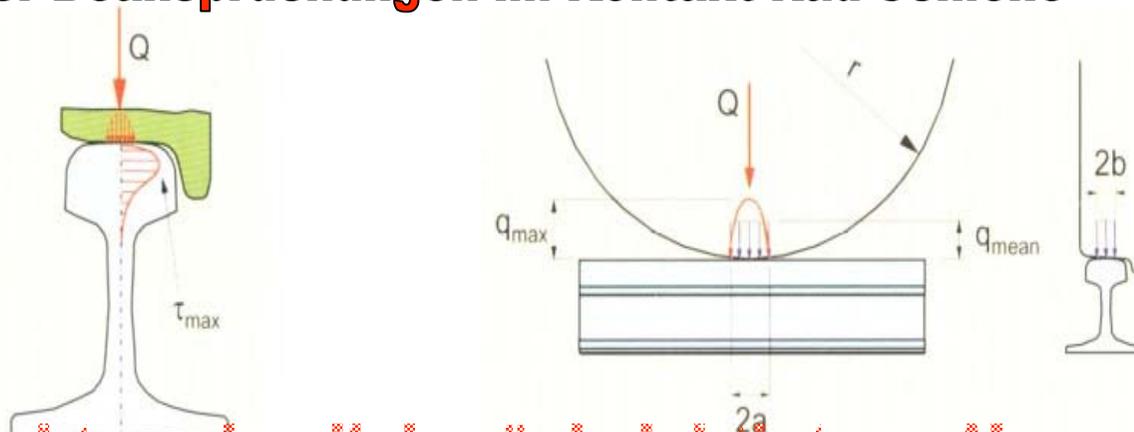
Fahrverhalten

Fahrsicherheit

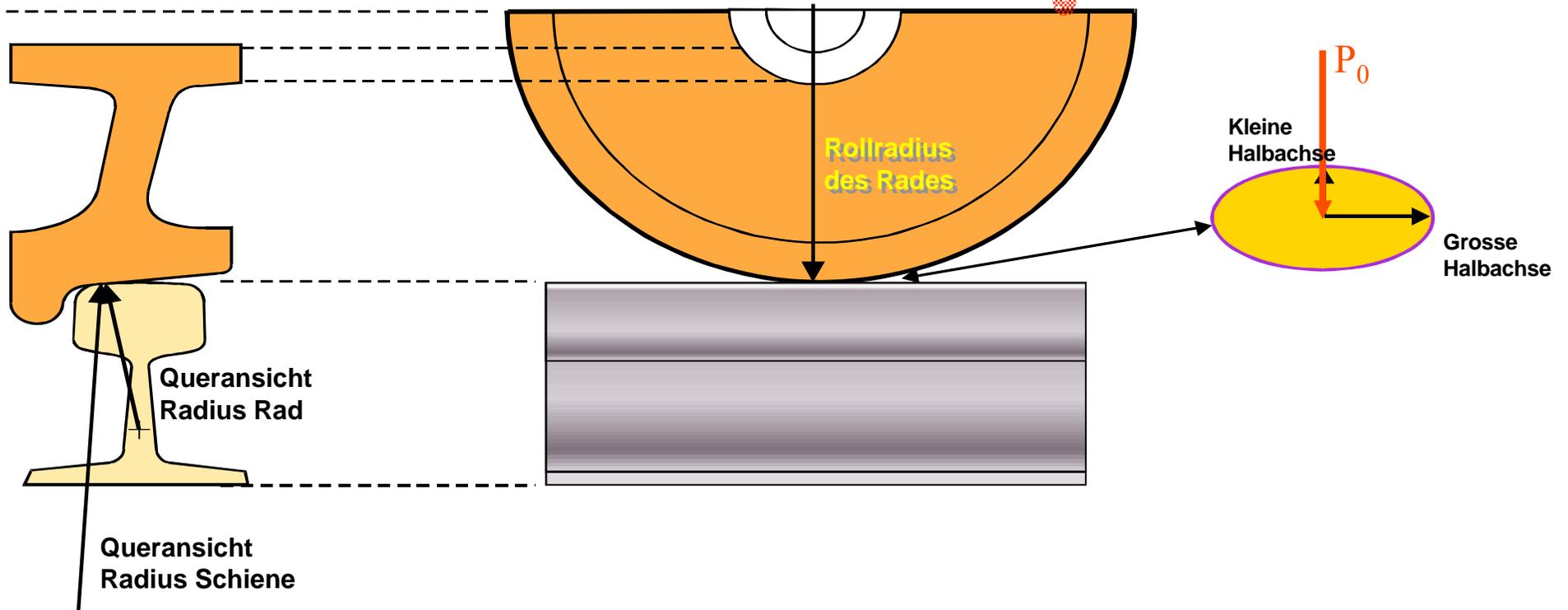
Fahrzeugstabilität



# Kontaktmechanik, Berührungsgeometrie R/S und Lauftechnik als Grundlage für die Ermittlung der Beanspruchungen im Kontakt Rad-Schiene



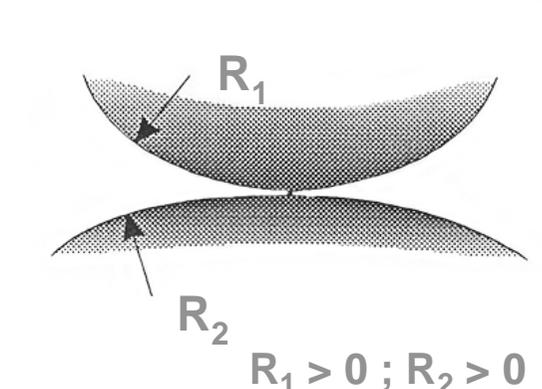
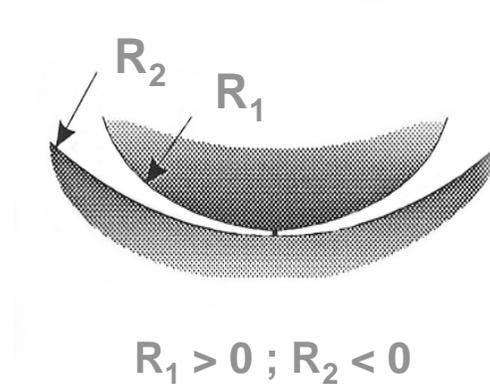
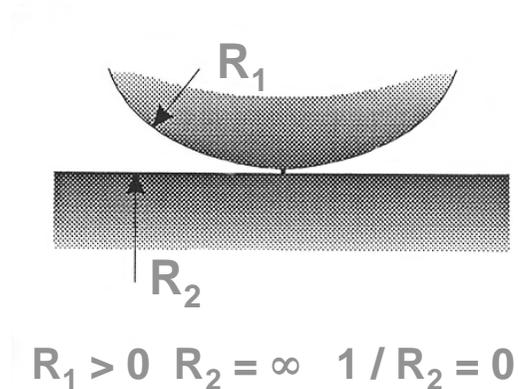
Hertz'sche Kontaktmechanik berücksichtigt nur Normalkräfte



# Hertz'scher Kontakt

- Unendlicher Halbraum
  - Kontaktflächen sind klein im Vergleich zu den Abmessungen der Körper und den Krümmungsradien
- Oberflächen sind kontinuierlich und Kontaktverhältnisse nicht konform
- Ohne Reibung

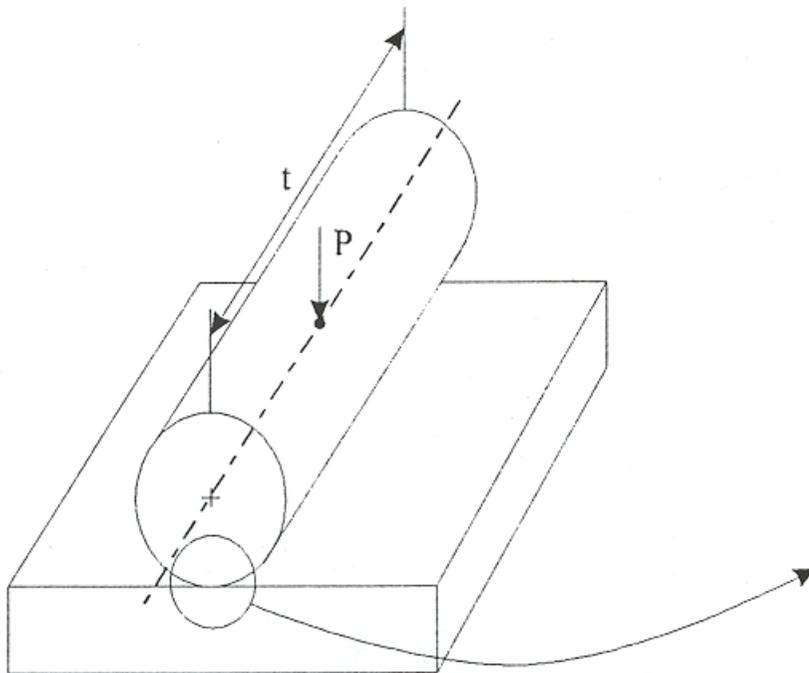
## Vorzeichenregel zu den Radien im Kontakt



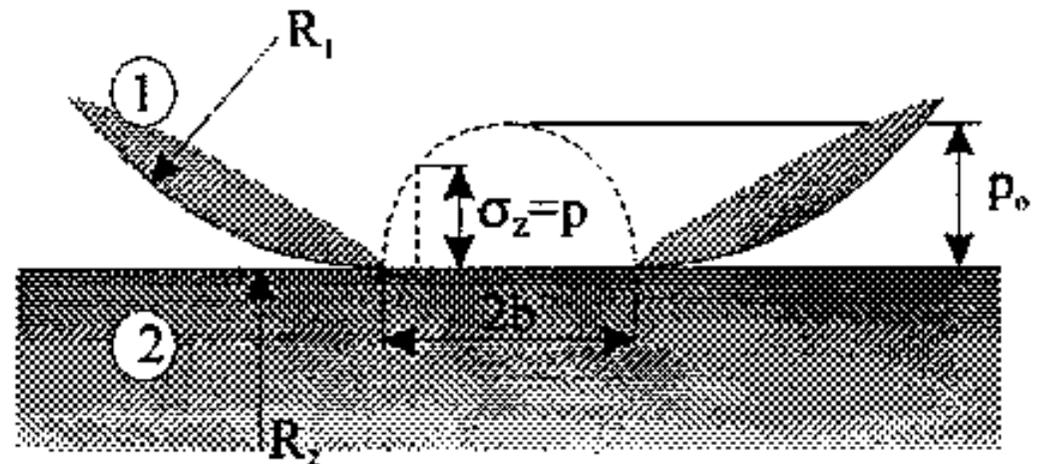
# Hertz'scher Linienkontakt

$P_0$  ist die maximale Spannung im System:  
Normal zur Kontaktfläche

$$P_0 = \left[ \frac{P' E^*}{\pi R} \right]$$



$P' = P/t =$  Last pro Längeneinheit  
 $R = (1/R_1 + 1/R_2)^{-1} =$  effektiver Radius  
 $E^* =$  kombinierter E-Modul

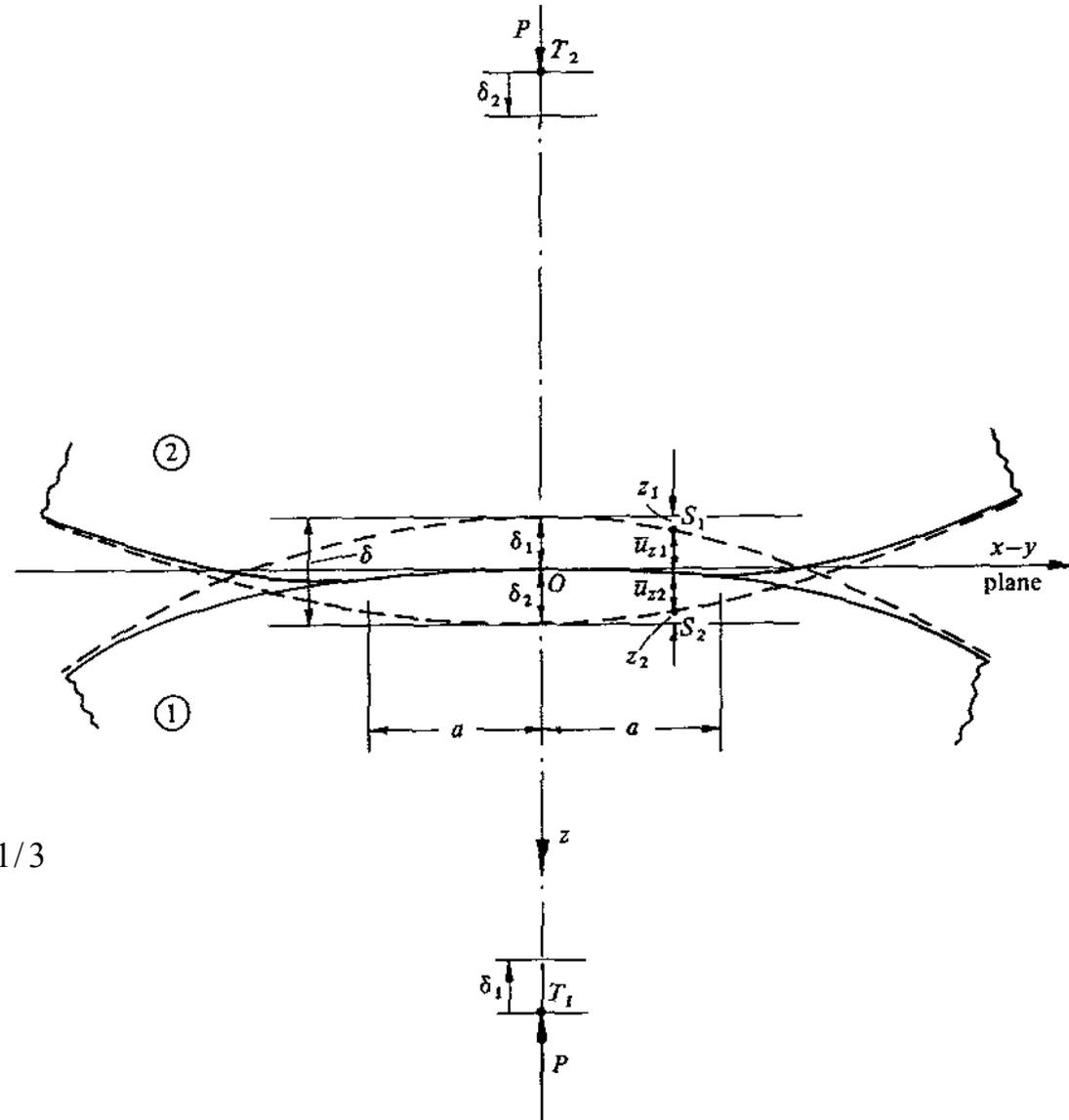


# Hertz'scher Punktkontakt

- Zum Beispiel:
  - Kugel auf Fläche
  - Fläche auf Fläche
  - Zwei Zylinder im rechten Winkel zueinander

$$P_o = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{6PE^{*2}}{R'^2} \right]^{1/3}$$

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \left( \frac{9P^2}{16RE^{*2}} \right)^{1/3}$$



# Berechnungen

## Landläufige Annahmen

- Einfache Geometrien
- Hertz'scher Kontakt
  - Kreis oder Ellipse
- Glatte Oberflächen

## Realität

- Komplexe Geometrien
- Nicht Hertz'scher Kontakt
  - Etwas ähnliches
- Raue Oberflächen

**Ist es zulässig, einfache Annahmen zu treffen?**

**Im Allgemeinen sind Hertz'sche Annahmen nicht zu schlecht:  $\pm 20\%$**

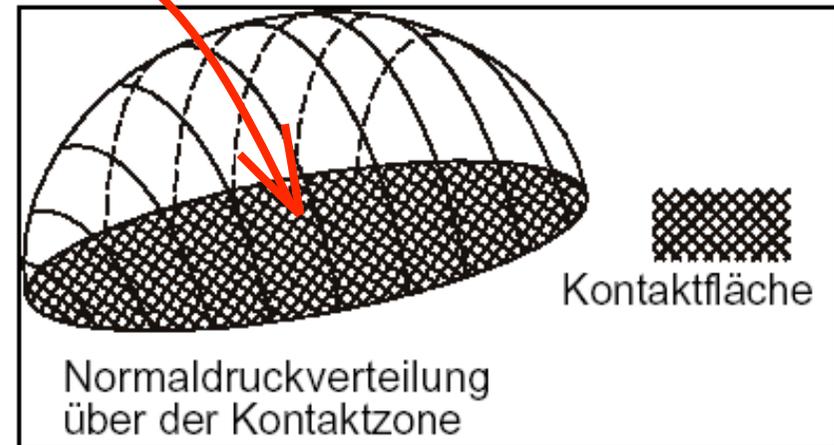
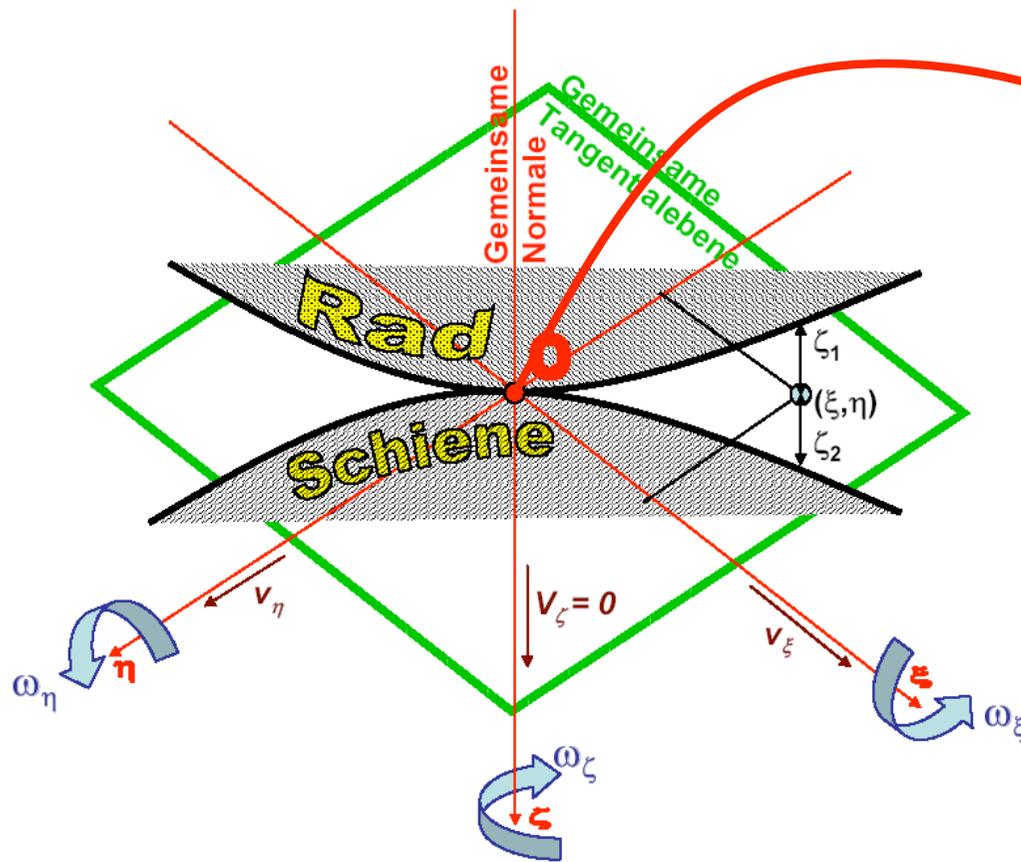
# Hertz'sche Formeln

	<b>Linienkontakt</b> Breite $2b$ , Last $P'$ pro Längeneinheit	<b>Kreiskontakt</b> (Durchmesser $2a$ , Last $P$ )
<b>Halbe Kontaktbreite oder Kontaktradius</b>	$b = 2 \left[ \frac{P' R}{\pi E^*} \right]^{1/2}$	$a = \left[ \frac{3 PR}{4 E^*} \right]^{1/3}$
<b>Maximale Kontaktspannung</b>	$P_o = \left[ \frac{P' E^*}{\pi R} \right]^{1/2}$	$P_o = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{6 P E^{*2}}{R^2} \right]^{1/3}$
<b>Annäherung der Körper (Zentum)</b>	$\delta = \frac{2P'}{\pi} \left\{ \frac{1-\nu_1^2}{E_1} \left[ \ln \frac{4R_1}{b} - \frac{1}{2} \right] + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \left[ \ln \frac{4R_2}{b} - \frac{1}{2} \right] \right\}$	$\delta = \frac{a^2}{R} = \frac{1}{2} \left[ \frac{9 P^2}{2 R E^{*2}} \right]^{1/3}$
<b>Mittlere Kontaktspannung</b>	$\bar{p} = \frac{P'}{2b} = \frac{\pi}{4} P_o$	$\bar{p} = \frac{P}{\pi a^2} = \frac{2}{3} P_o$
<b>Maximale Kontaktspannung</b>	$\tau_{\max} \cong 0.300 P_o$ at $(x=0, z=0.79b)$	$\tau_{\max} \cong 0.300 P_o$ at $(r=0, z=0.48a)$ for $\nu=0.3$
<b>Maximale Zugspannung</b>	zero	$\frac{1}{3} (1 - 2\nu) P_o$ at $(r=a, z=0)$

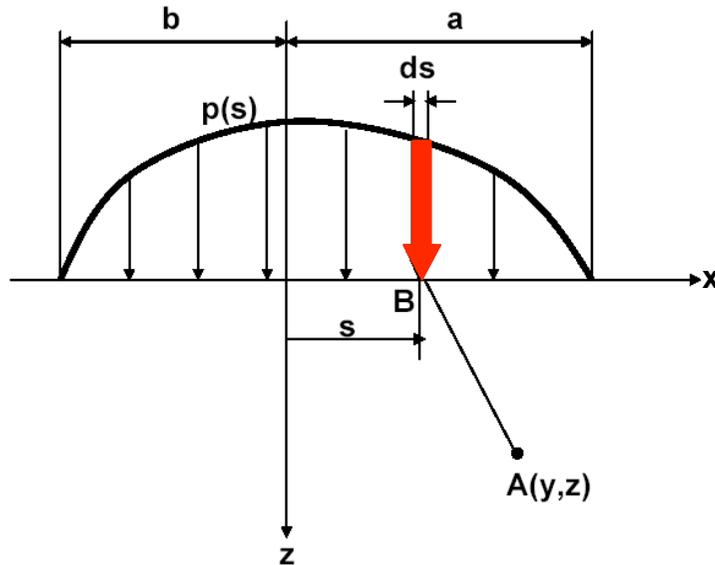
# Normalkontakt

Punktkontakt Rad-Schiene  
ohne Last

Ausbildung einer Kontaktfläche  
unter Last



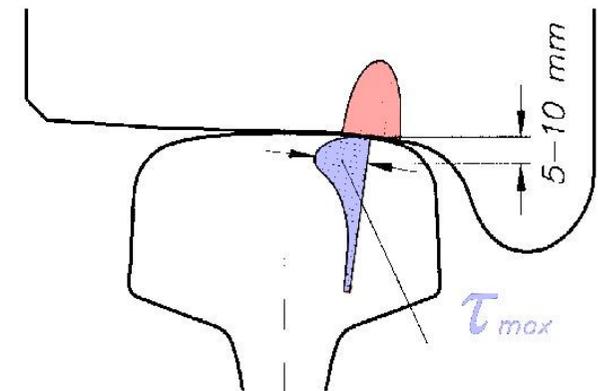
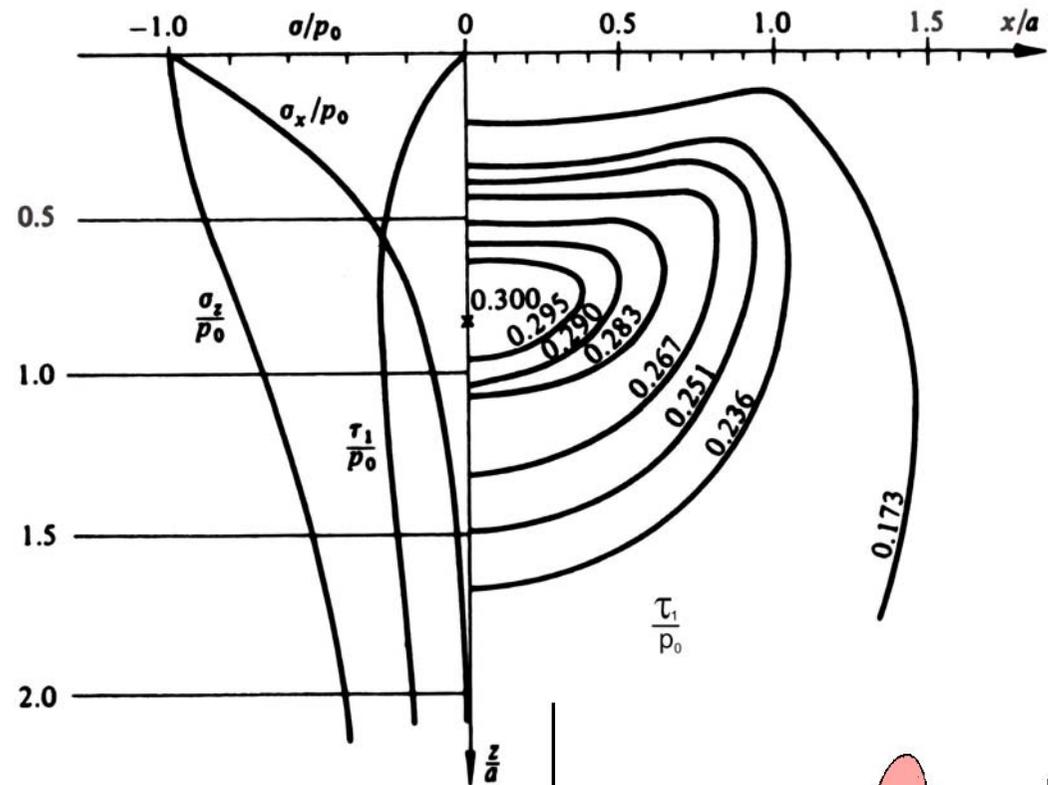
# Spannungen unter der Oberfläche bei Einwirkung einer Normalkraft



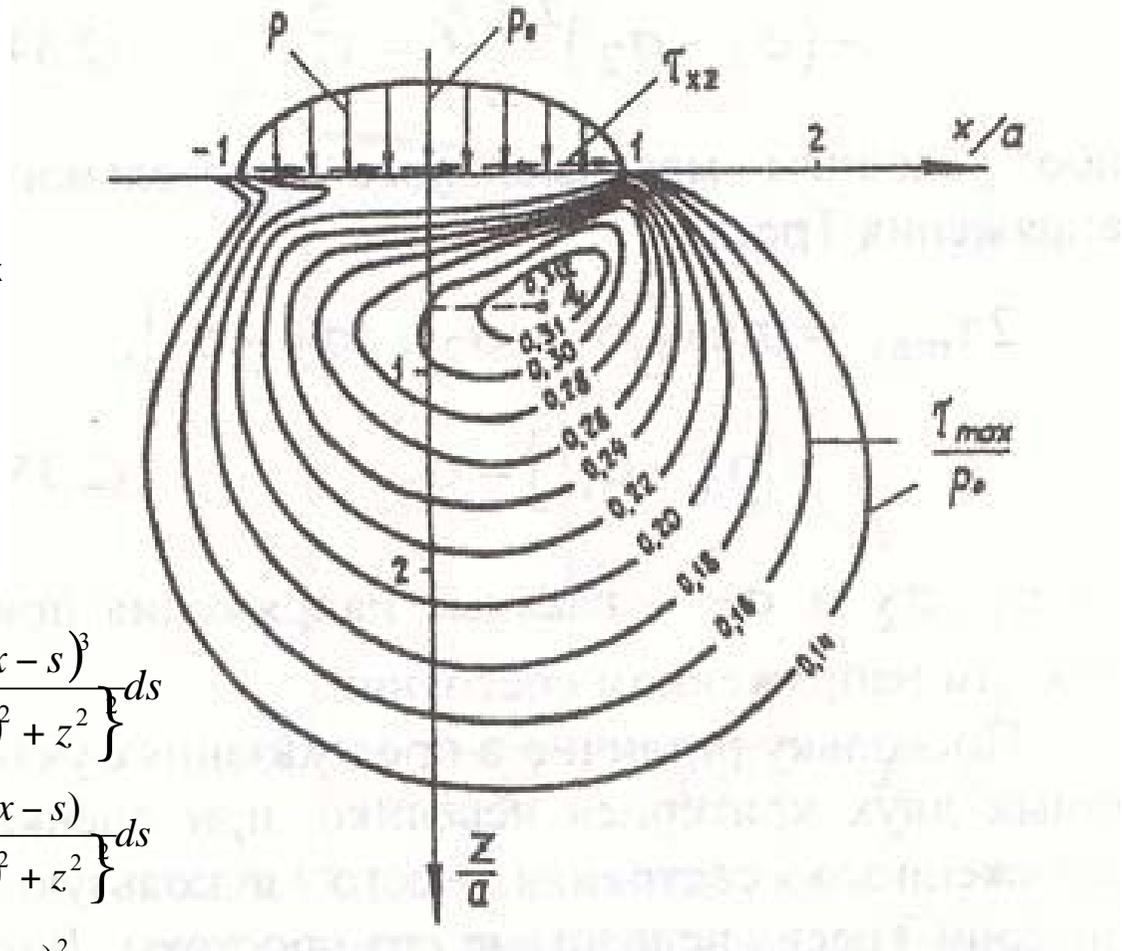
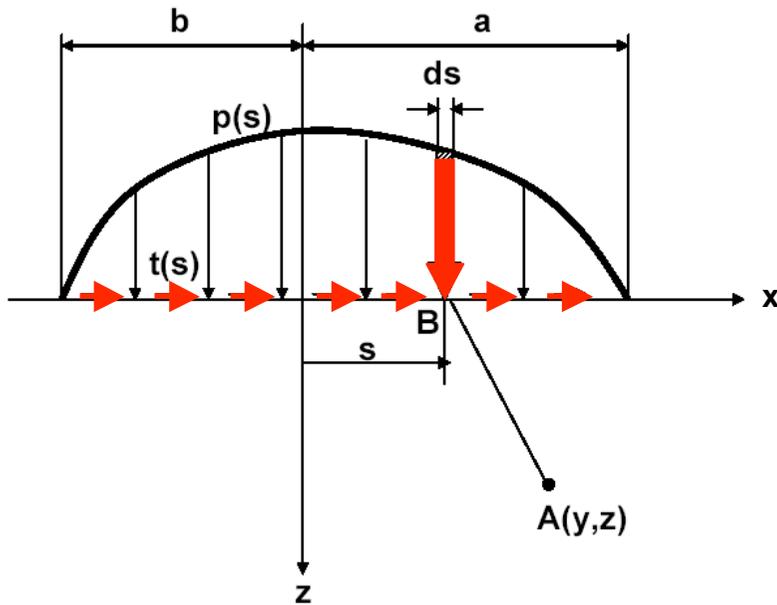
$$\sigma_x = -\frac{2z}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s)(x-s)^2}{\{x-s\}^2 + z^2} ds$$

$$\sigma_z = -\frac{2z^3}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s)}{\{x-s\}^2 + z^2} ds$$

$$\tau_{xz} = -\frac{2z^2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s)(x-s)}{\{x-s\}^2 + z^2} ds$$



# Spannungen unter der Oberfläche bei Einwirkung einer Normalkraft und einer Tangentialkraft



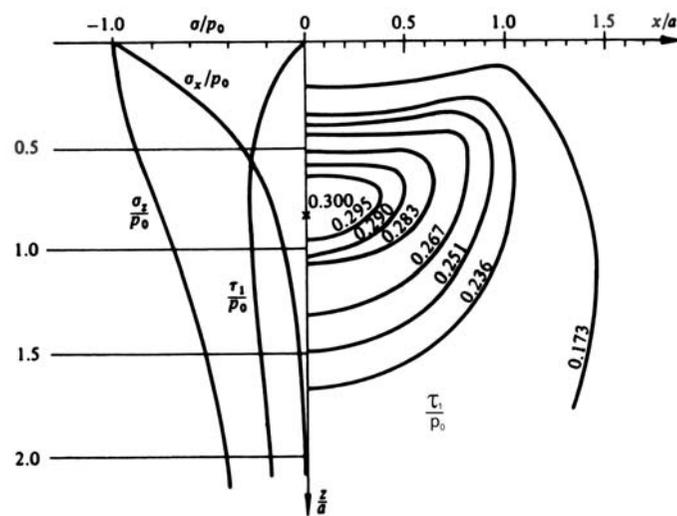
$$\sigma_x = -\frac{2z}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s)(x-s)^2}{\{x-s\}^2 + z^2} ds - \frac{2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{t(s)(x-s)^3}{\{x-s\}^2 + z^2} ds$$

$$\sigma_z = -\frac{2z^3}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s)}{\{x-s\}^2 + z^2} ds - \frac{2z^2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{t(s)(x-s)}{\{x-s\}^2 + z^2} ds$$

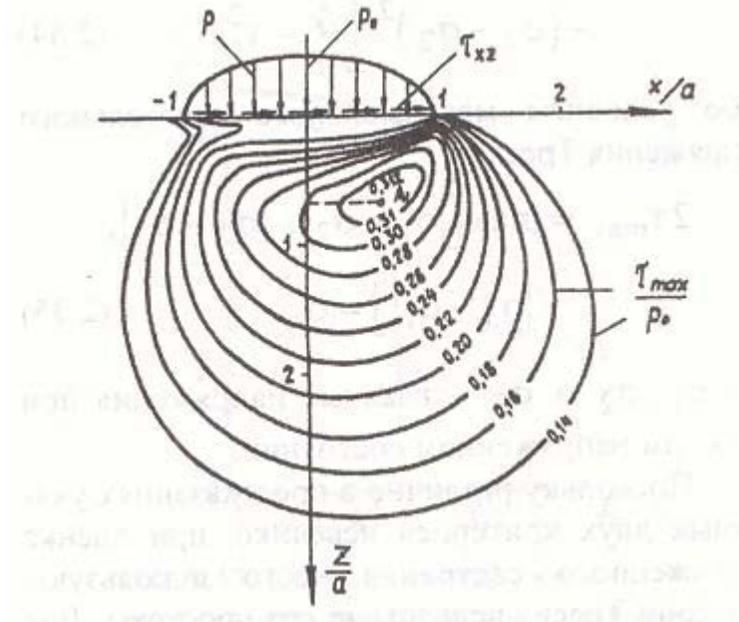
$$\tau_{xz} = -\frac{2z^2}{\pi} \int_{-b}^a \frac{p(s)(x-s)}{\{x-s\}^2 + z^2} ds - \frac{2z}{\pi} \int_{-b}^a \frac{t(s)(x-s)^2}{\{x-s\}^2 + z^2} ds$$

# Auswirkung unterschiedlicher Krafteinleitung an der Kontaktfläche auf die Ausbildung von Rissen und Dauerbrüchen

## Nur Normalkraft

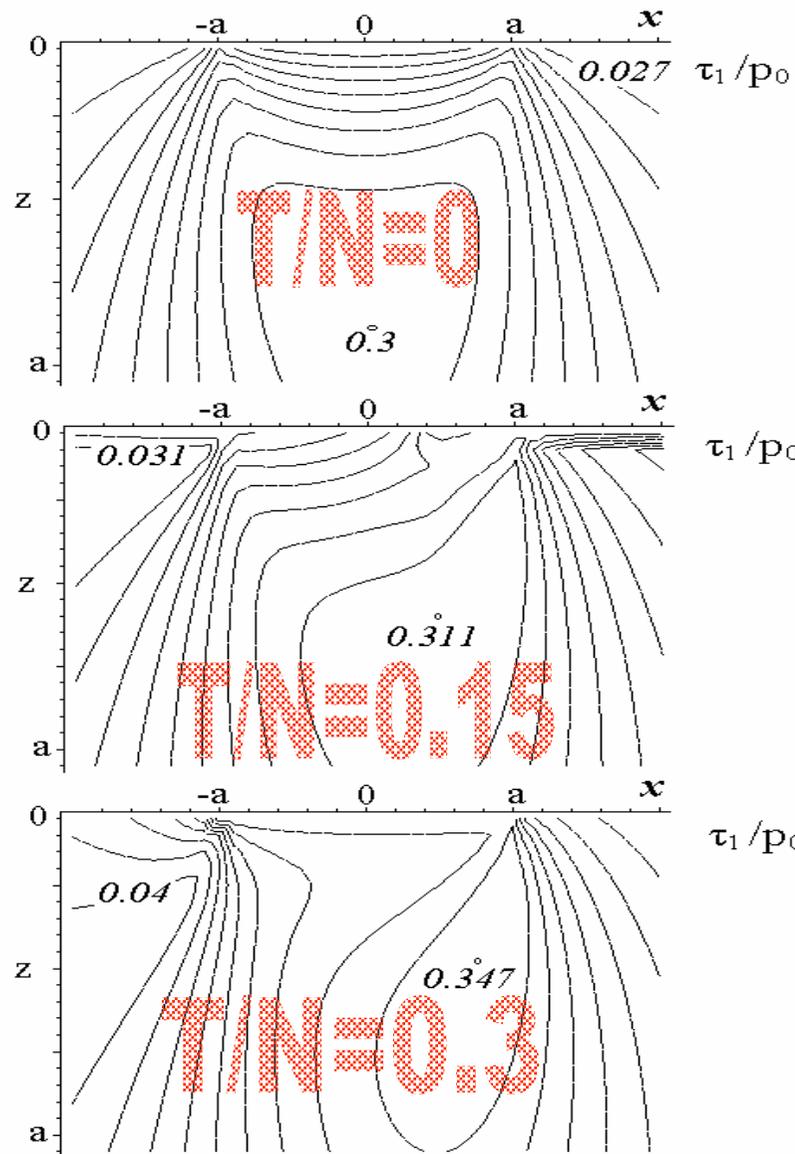


## Normal- und Tangentialkraft



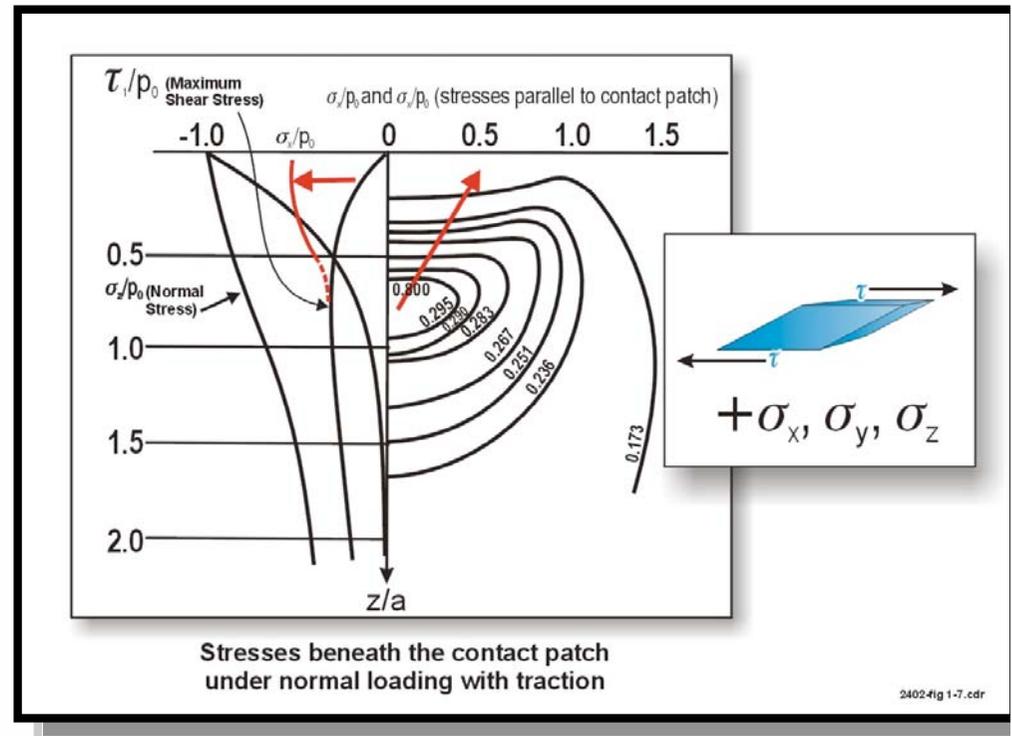
Wirken neben Normalkräften auch Tangentialkräfte, so verschieben sich die maximalen Spannungen vergleichsweise zur reinen Normalkraftbeanspruchung in Richtung der Oberfläche. Damit verfügen die beiden Lastfälle über unterschiedliche Auslösemechanismen für die Rissentstehung und damit für die Auslösung von Dauerbrüchen in Radkränzen und in den Schienenköpfen

# Spannungsverteilungen unter verschiedenen Traktionskoeffizienten



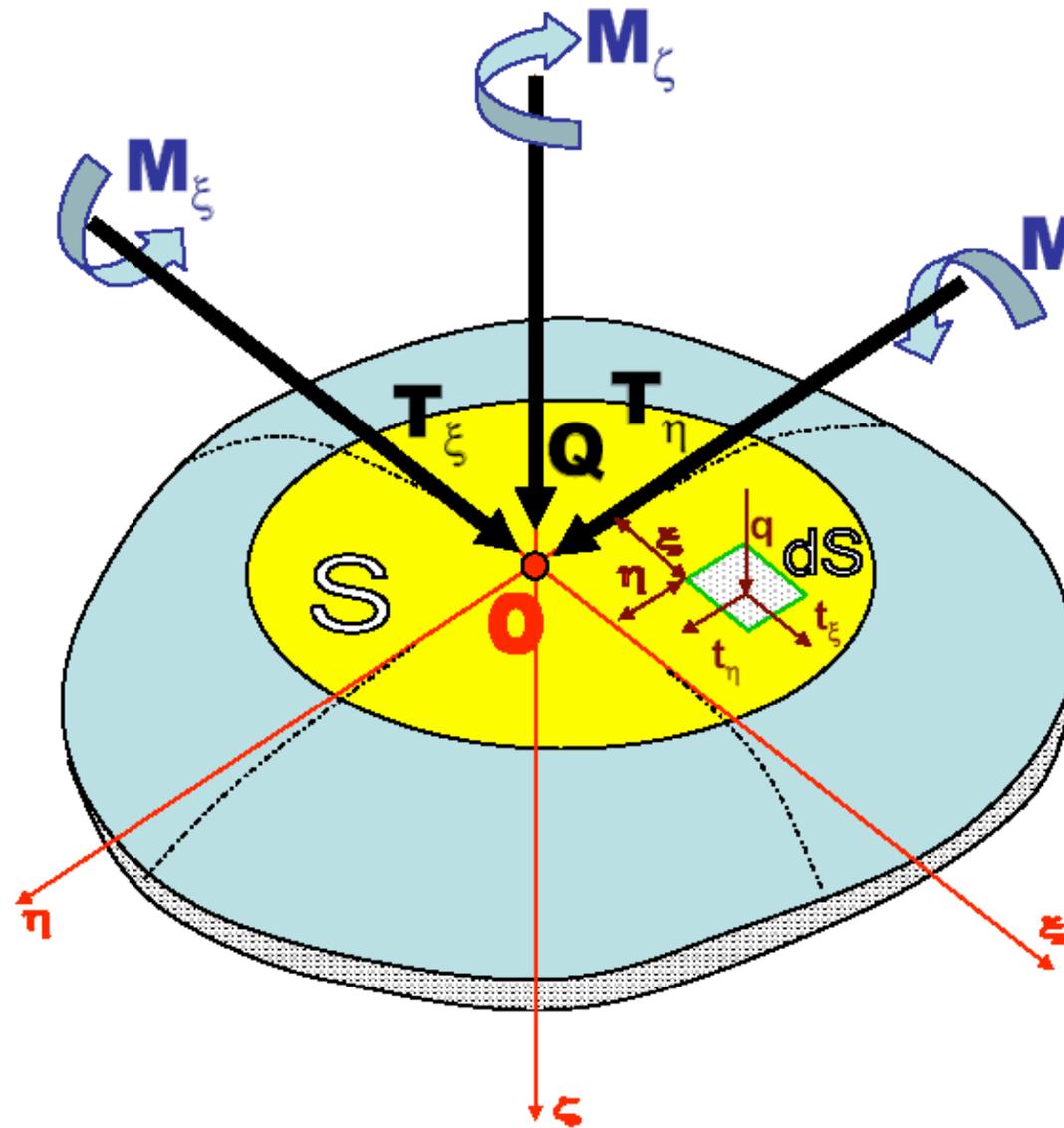
распределение максимальных касательных напряжений по глубине при  $\mu = 0.3$

Quelle: Zacharow

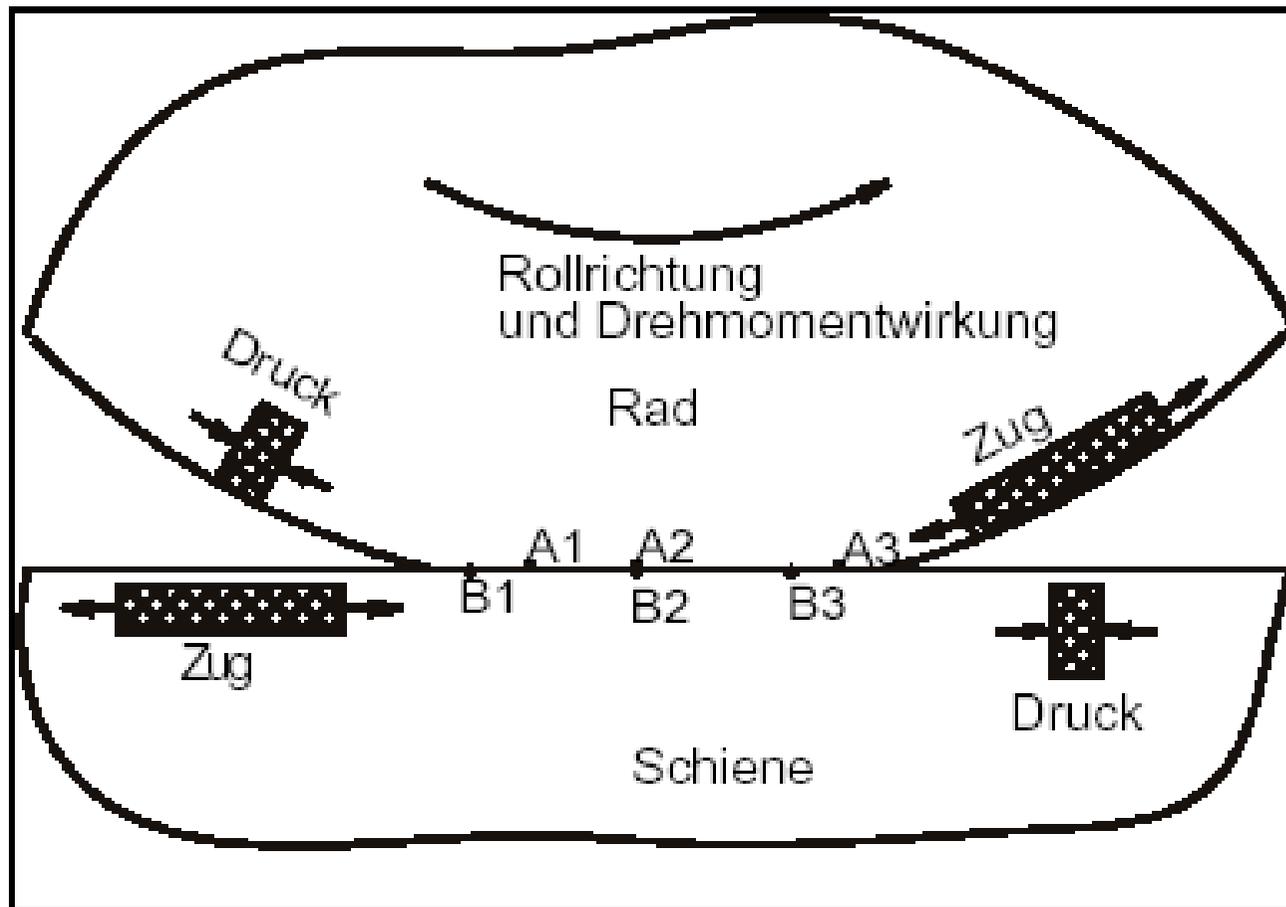


Quelle: Tournay

# In der Kontaktfläche wirksame Kräfte und Momente

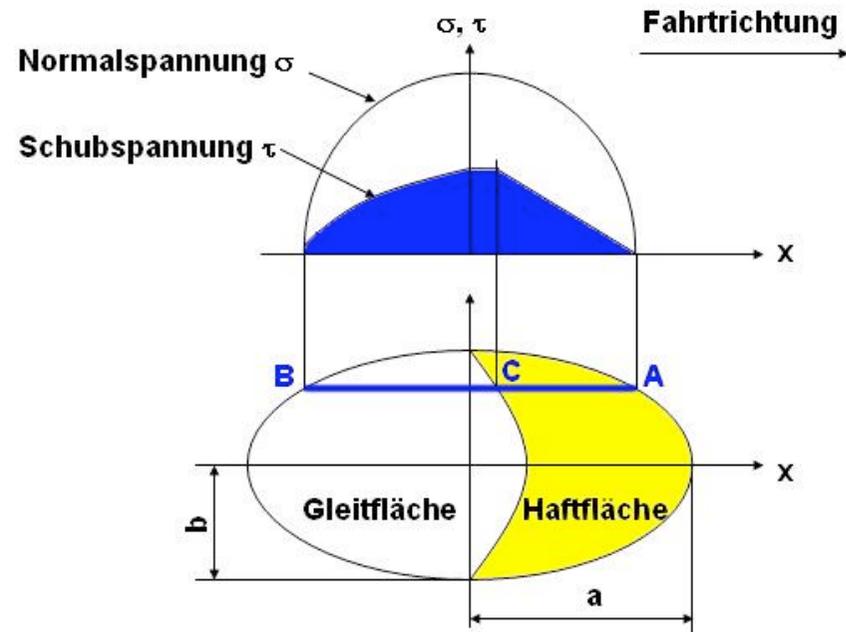
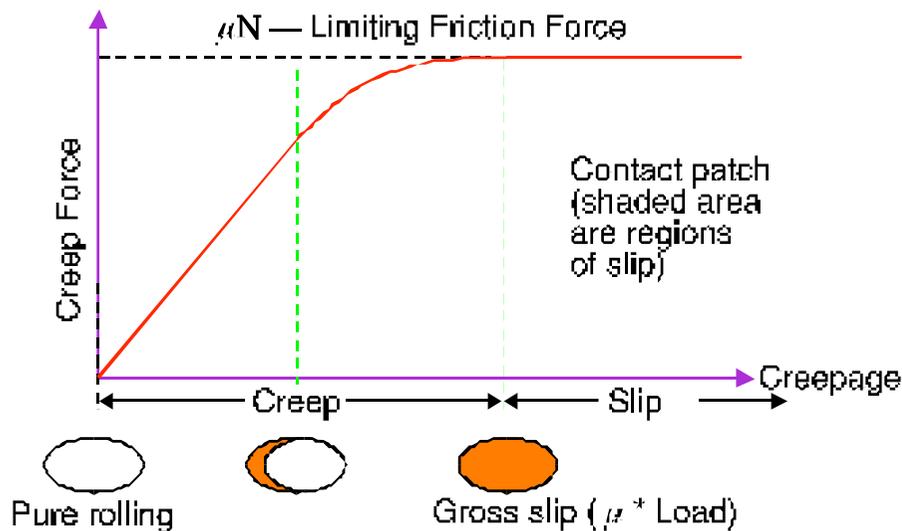
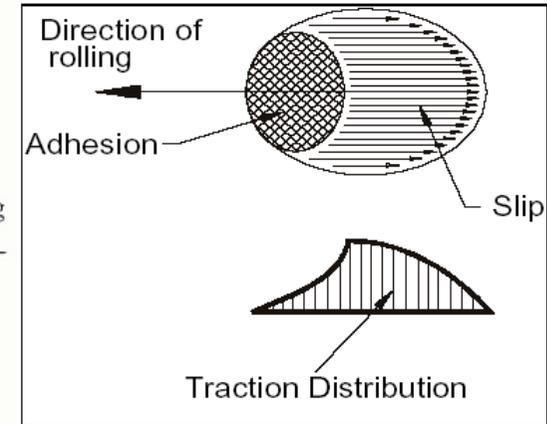
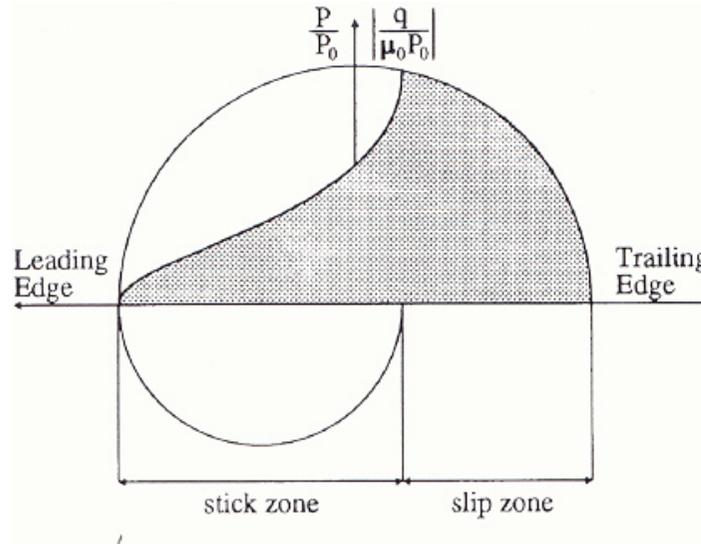
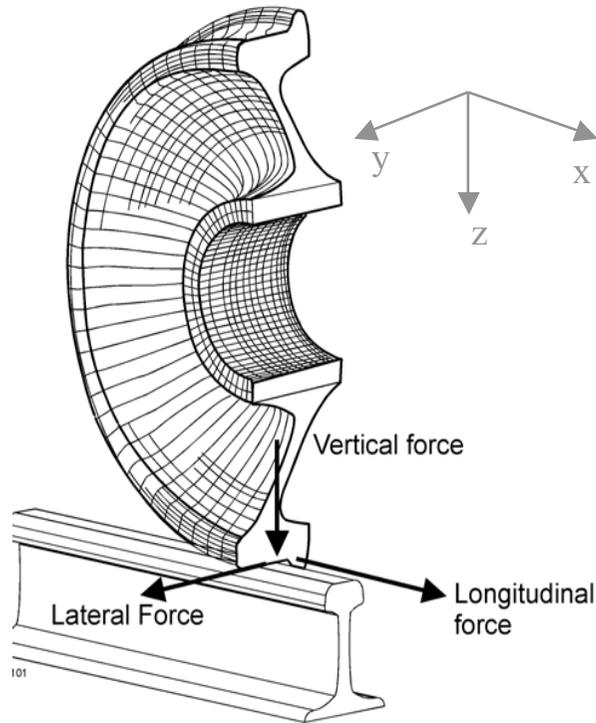


# Auswirkung von Tangentialkräften auf den Spannungszustand in der Kontaktfläche von Rad und Schiene

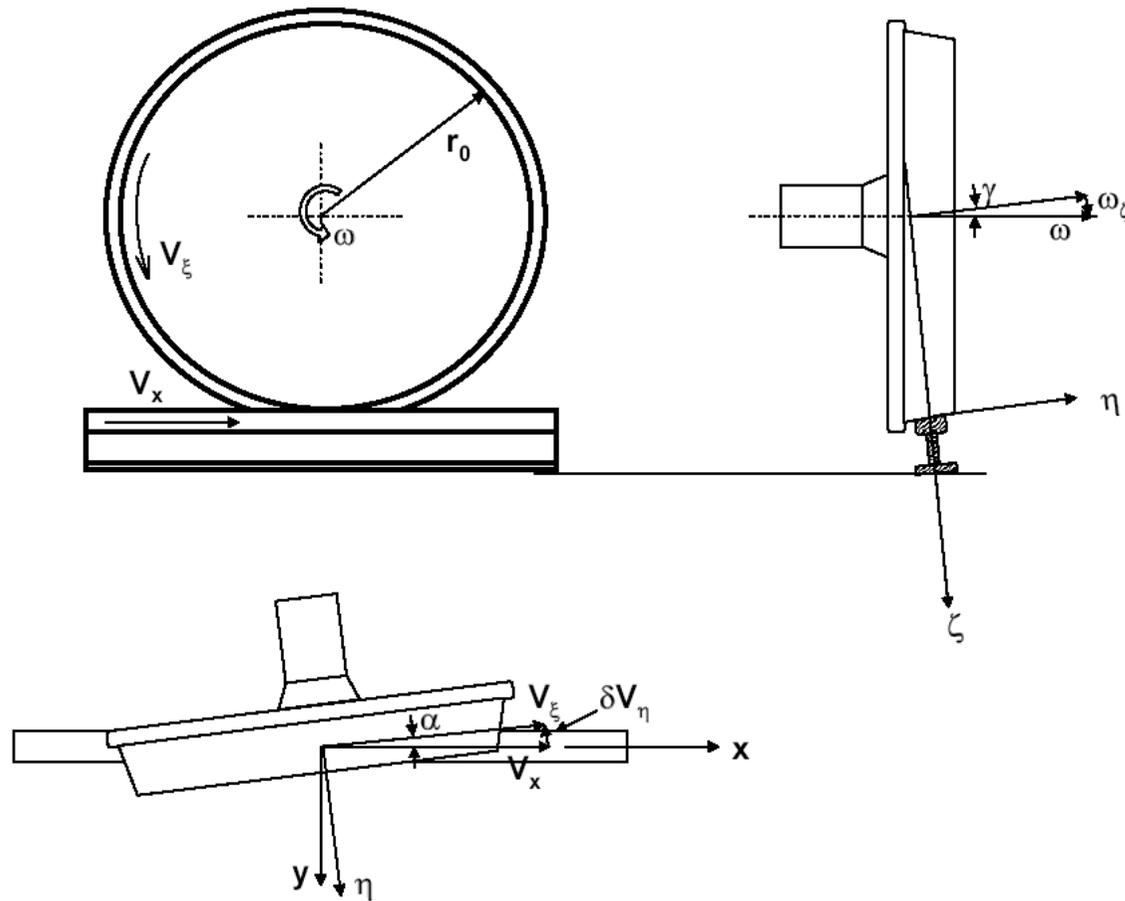


# Kraftschluss-Schlupf-Kräfte in der Kontaktzone Rad-Schiene

Carter's Tangential Stress Distribution over the Contact Length

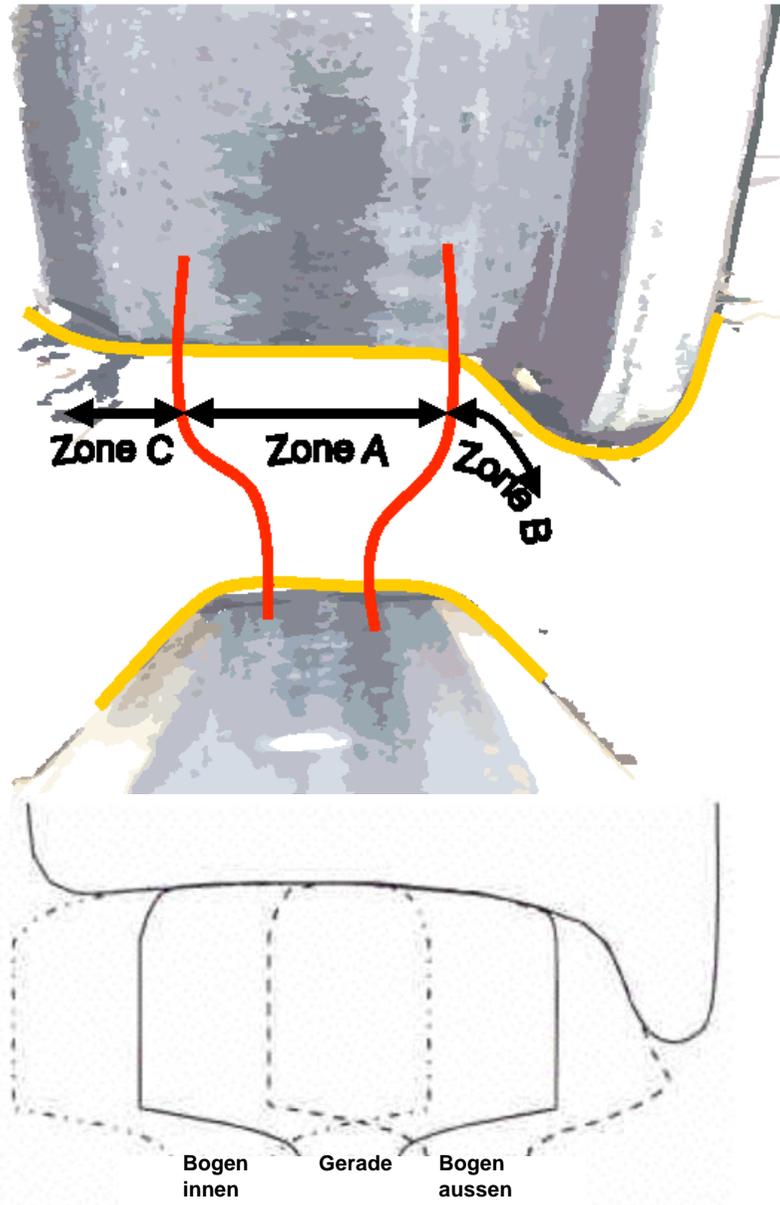


# Kräfte Rad-Schiene nach der linearen Theorie von Kalker



$$\begin{Bmatrix} T_{\xi} \\ T_{\eta} \\ T_{\zeta} \end{Bmatrix}_{lin} = Gab \begin{bmatrix} C_{11} & 0 & 0 \\ 0 & C_{22} & \sqrt{ab}C_{23} \\ 0 & -\sqrt{ab}C_{32} & abC_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_{\xi} \\ v_{\eta} \\ v_{\zeta} \end{Bmatrix}$$

# Die drei Hauptzonen der Berührung Rad-Schiene

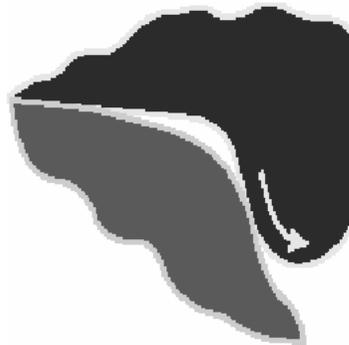
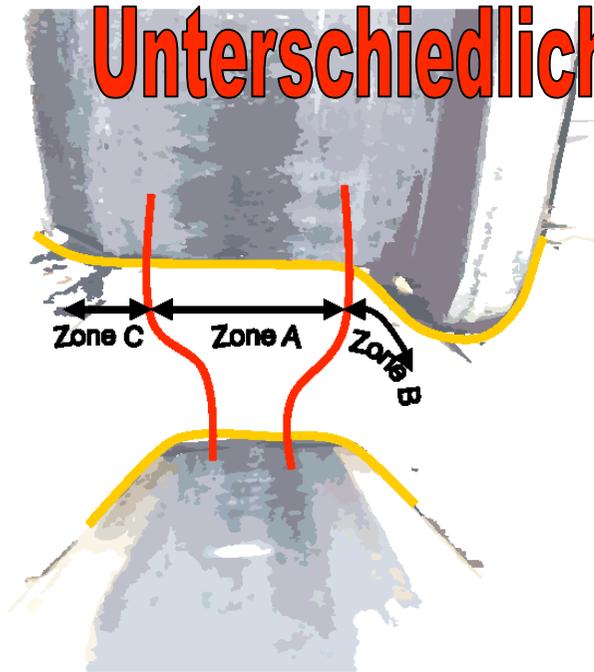


In der **Zone A** konzentriert die Berührung Rad/Schiene vor allem bei Fahrt auf geraden Strecken und in großen bis sehr großen Bogenhalbmessern.

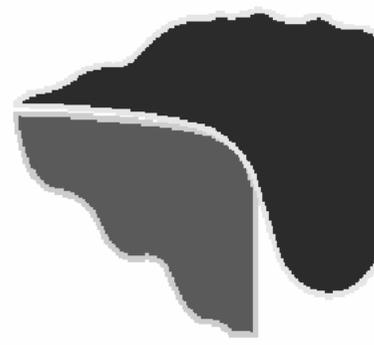
Die **Zone C** wird im Bereich der Weichen (Flügel- und Backenschienen) sowie in den engen Bögen durch die bogeninneren Räder angefahren.

Die Berührung in der **Zone B** erfolgt in den Bögen mit kleinen bis mittleren Bogenhalbmessern durch die bogenäußeren Räder sowie an den Weichenzungen und an den Herzstückspitzen bei den Weichen und Kreuzungen.

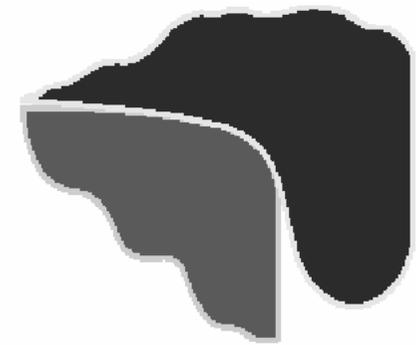
# Unterschiedliche Berührverhältnisse in der Zone B



Zweipunktberührung



Einpunktberührung

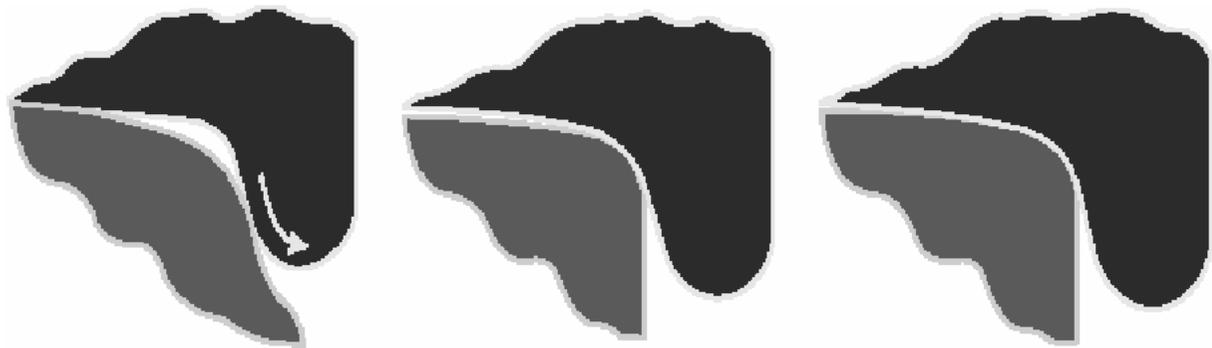


Konformer Kontakt

**Zweipunktberührung:** Wenn sich ein Radsatz in einem Bogen mit Zweipunktberührung bewegt, stellen sich zwei Berührungsbereiche ein. Einer in der Zone A und ein zweiter an der Schienenflanke. Wegen des Anlaufwinkels in engen Bögen ist der zweite Berührungspunkt vor verlagert. Er gleitet quer und unterliegt in Anwesenheit von Spurkranzquerkräften und Schlupf dem Verschleiß. Unter diesen Bedingungen entsteht der Spurkranzverschleiß. Der Kontakt kann dabei derart ungünstig sein, dass am Spurkranz plastisches Fließen eintritt mit der Folge einer Gratbildung an der Kuppe oder sogar der Schmierfilm an der Schienenflanke unterwandert wird.

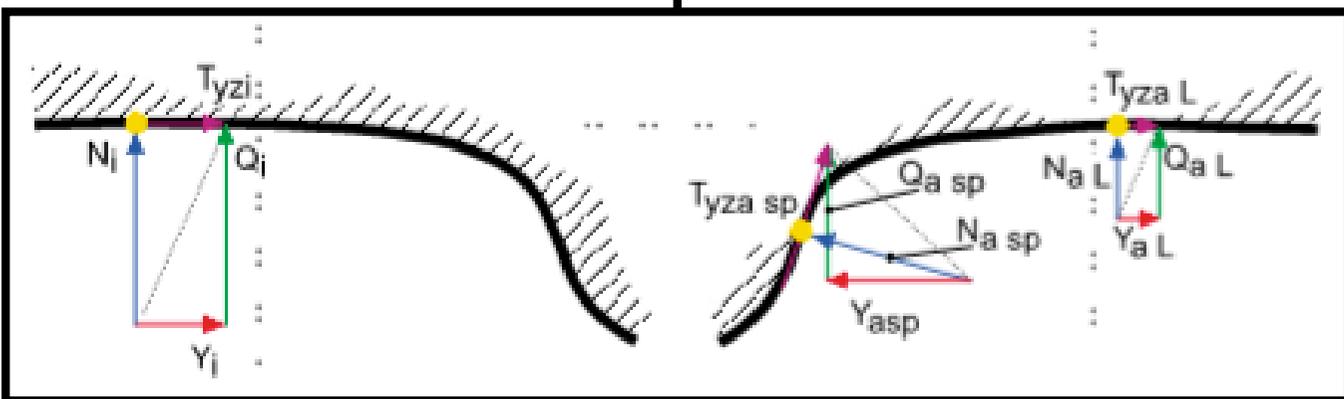
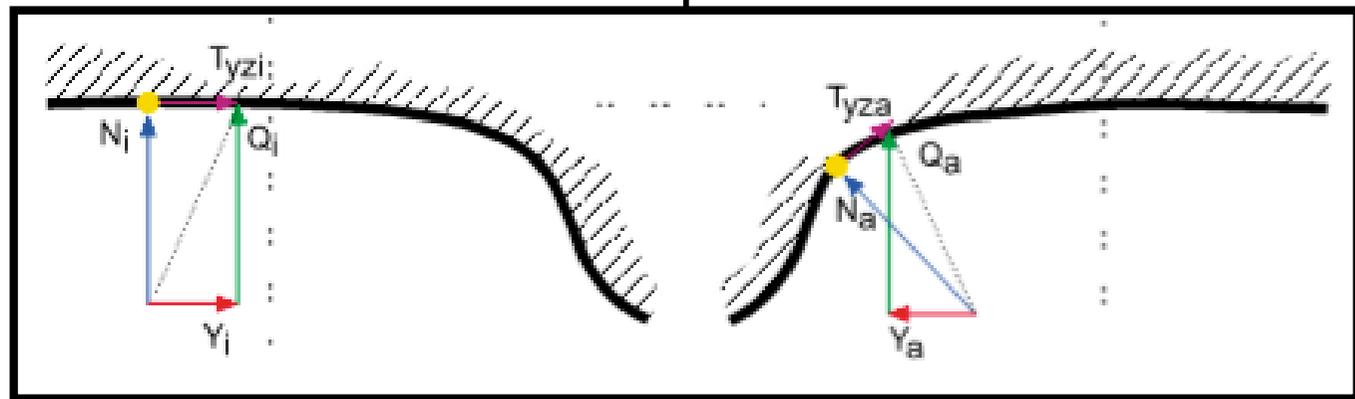
**Einpunktberührung:** Dies kann die für Rad und Schiene schädlichste Art der Berührung sein, wenn die Kontaktradien der Berührpartner zu unterschiedlich sind. Dadurch entstehen hohe Kontaktspannungen, die Ermüdungsschäden, Materialverschiebung und Shelling an den Schienenflanken verursachen bzw. sogar zu deren Ausbrechen führen können.

**Konformer Kontakt:** Diese Art des Kontaktes gewährleistet die größtmöglichen Kontaktflächen und reduziert vergleichsweise zu den anderen Kontaktformen die Maximalspannungen und den Verschleiß an Rad und Schiene. Gemäß dem National Research Council of Canada ist konformer Kontakt gegeben, wenn sich bei der formschlüssigen Paarung der Schiene am Spurkranz des Rades im unbelasteten Zustand nirgends ein Spalt größer als 0.1 mm bildet. Im belasteten Zustand wird dieser Spalt aufgehoben.



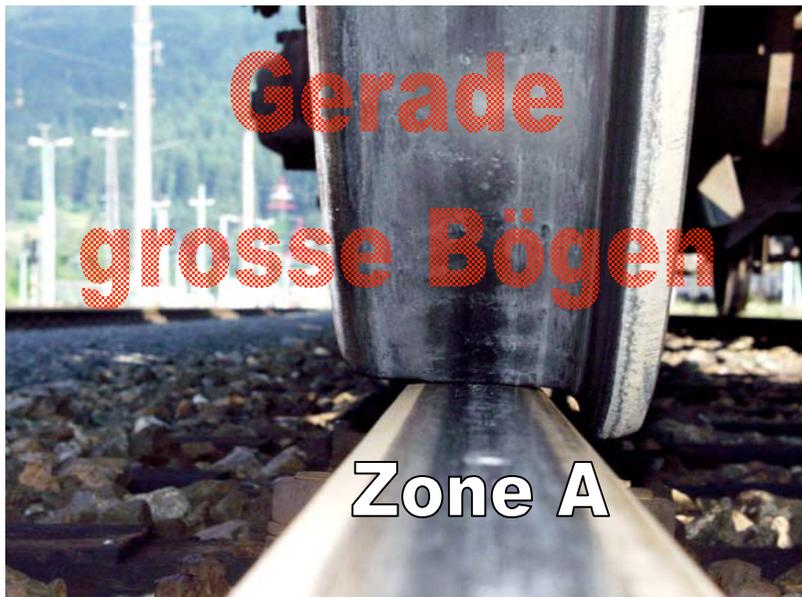
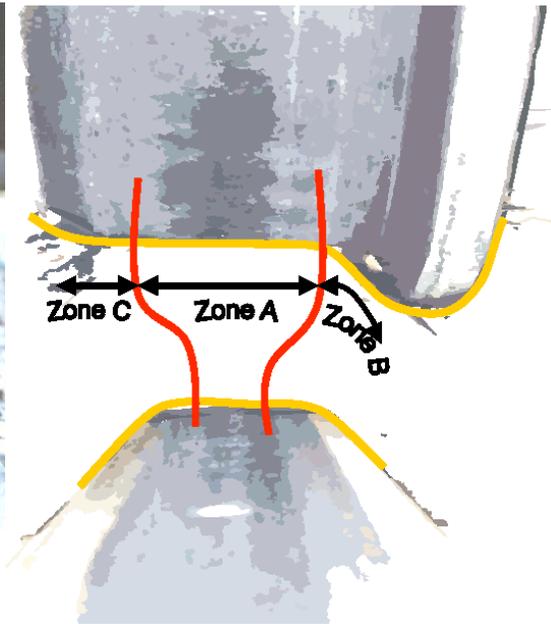
Kräfte in der Querebene bei  
 - Einpunktberührung  
 - Zweipunktberührung

Zweipunktberührung Einpunktberührung Konformer Kontakt

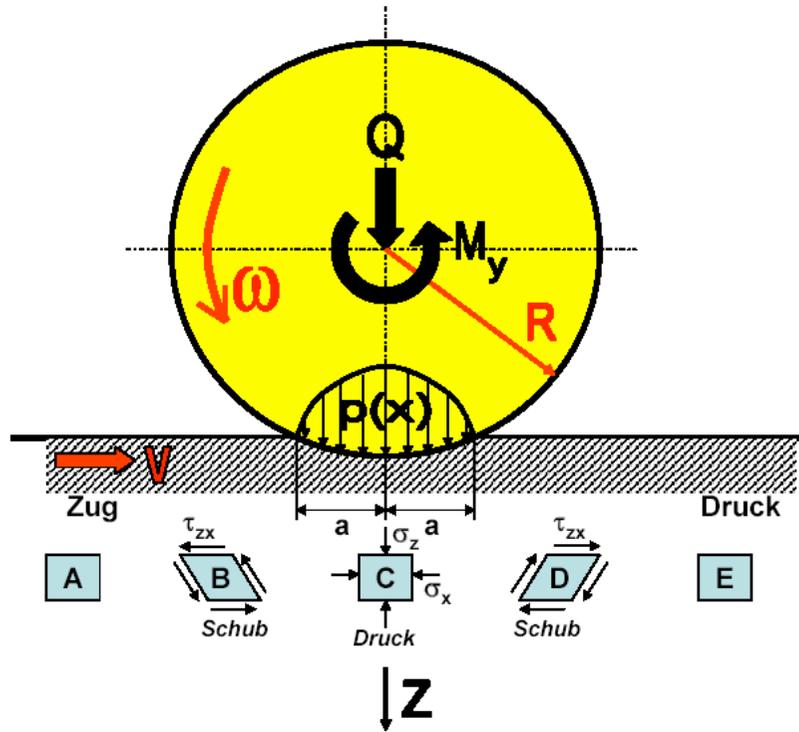


N = Normalkraft  
 Tyz = Kraftschlußkraft in der yz-Ebene  
 Q = Vertikalkraft  
 Y = Horizontalkraft

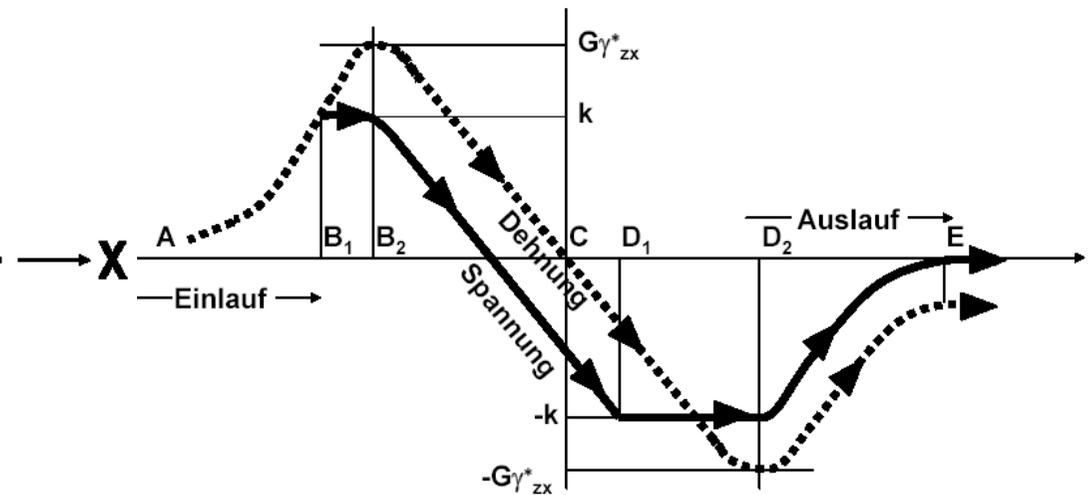
Index: Sp = Spurkranz  
 L = Lauffläche  
 a = bogenäußeres Rad  
 i = bogeninneres Rad



# Mechanismen der Rollkontaktermüdung

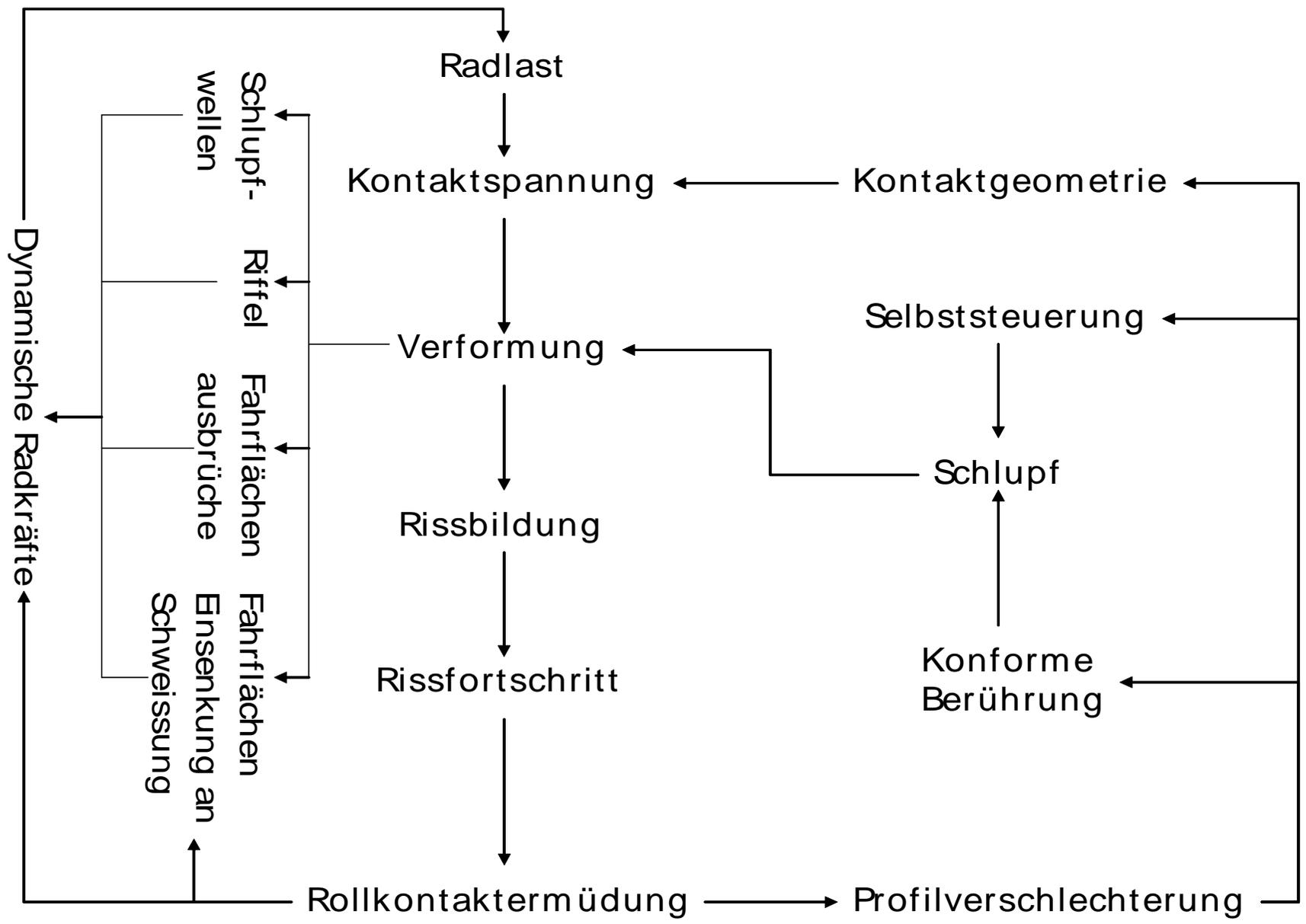


Spannungszustand im Halbraum des rollenden Kontaktes von Rad und Schiene

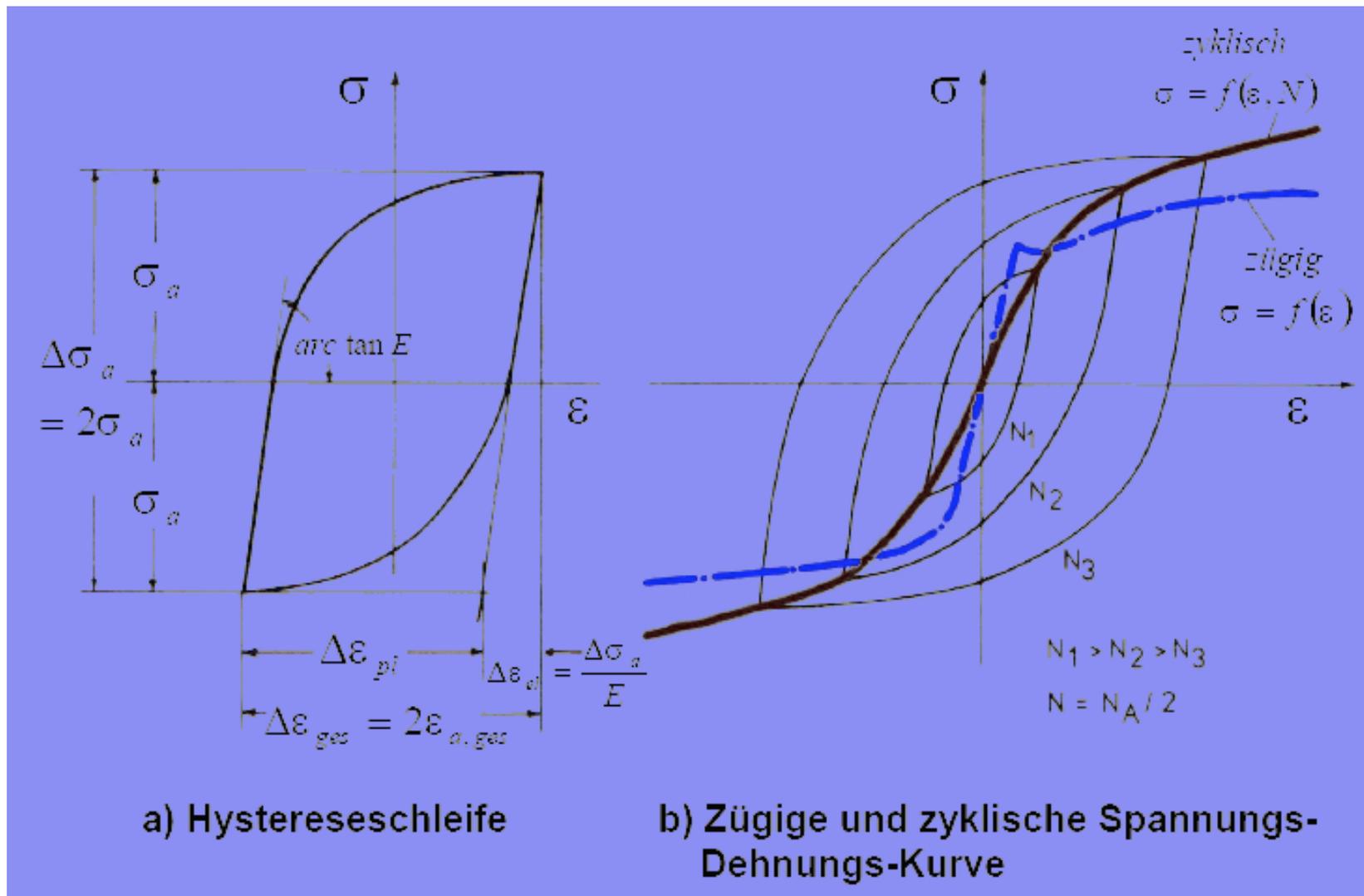


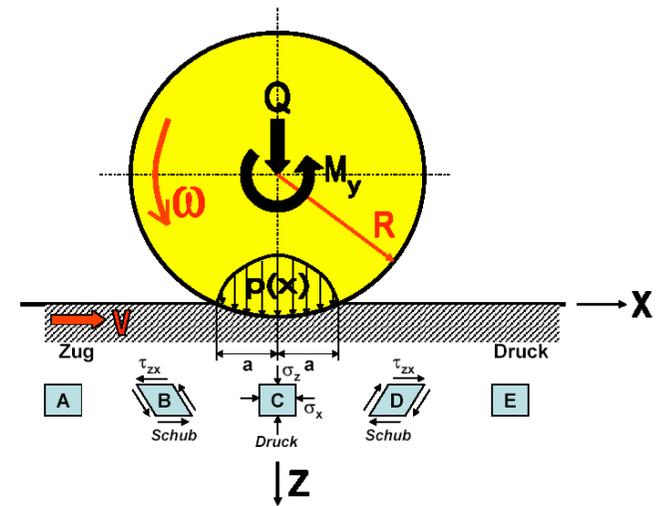
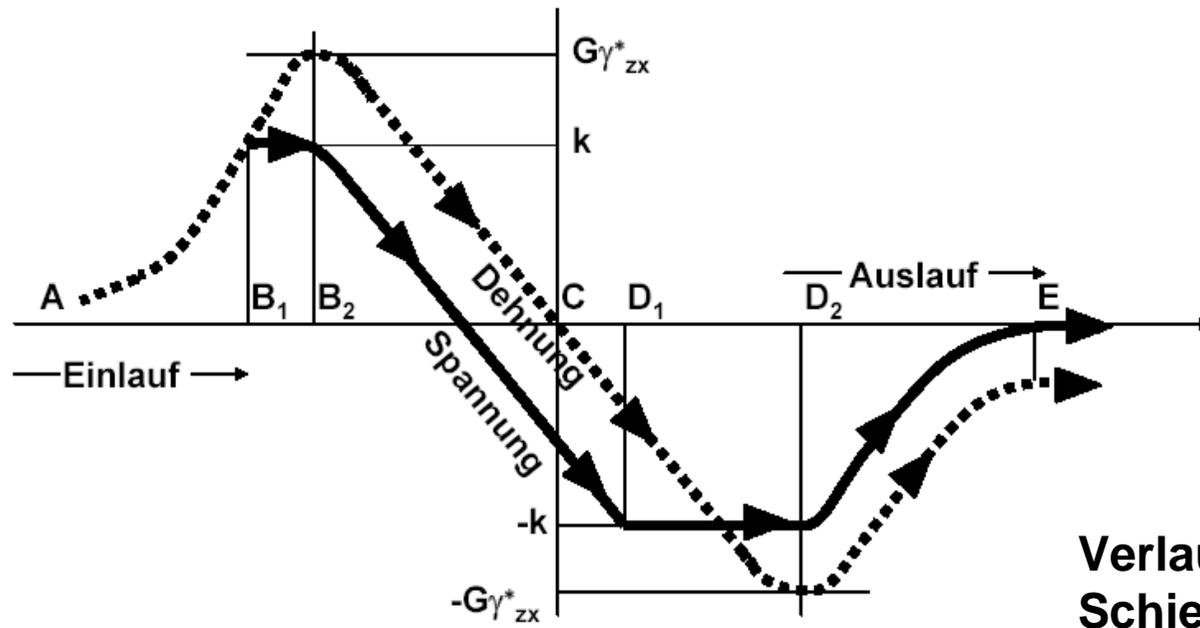
Verlauf von Schubspannung und Schiebung beim Überrollvorgang

# Rollkontaktermüdung durch fremderregte dynamische Radlasten und Rückkopplungen aus Veränderungen des Rad-Schienen-Kontaktes

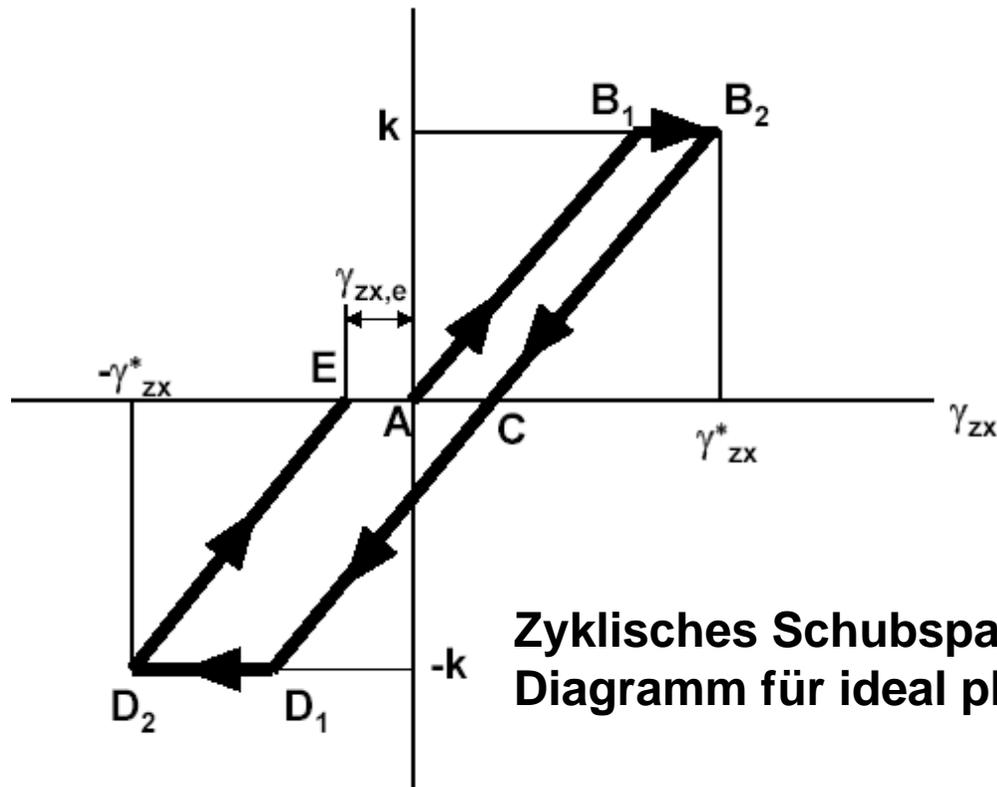


Materialkennwerte werden in der Zugprobe zügig ermittelt  
 Im Rad-Schienenkontakt ist die Beanspruchung zyklisch



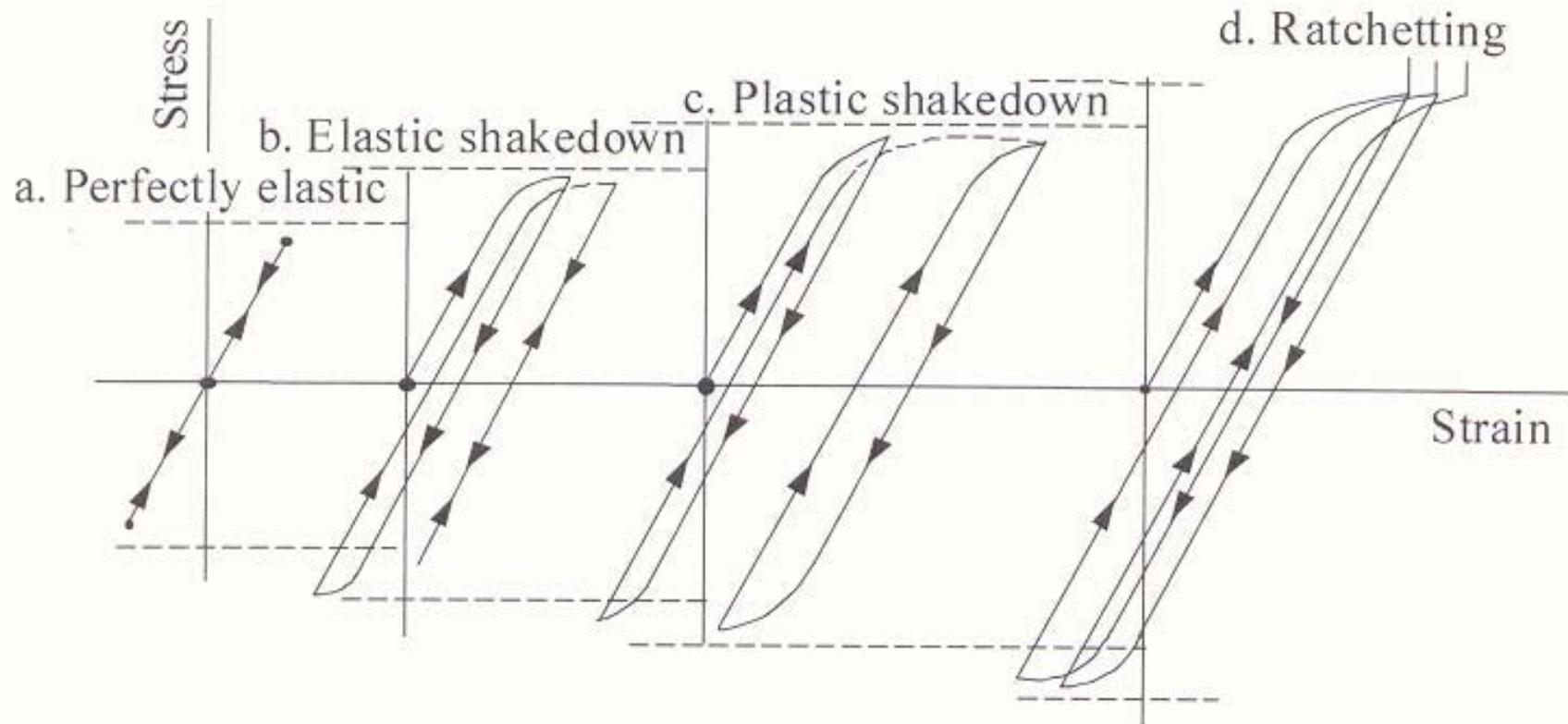


Verlauf von Schubspannung und Schiebung beim Überrollvorgang



Zyklisches Schubspannungs-Schiebungs-Diagramm für ideal plastisches Materialverhalten.

# Strukturantwort des Werkstoffs auf zyklische Beanspruchung



**Materialverhalten bei unterschiedlichen zyklischen Belastungen**

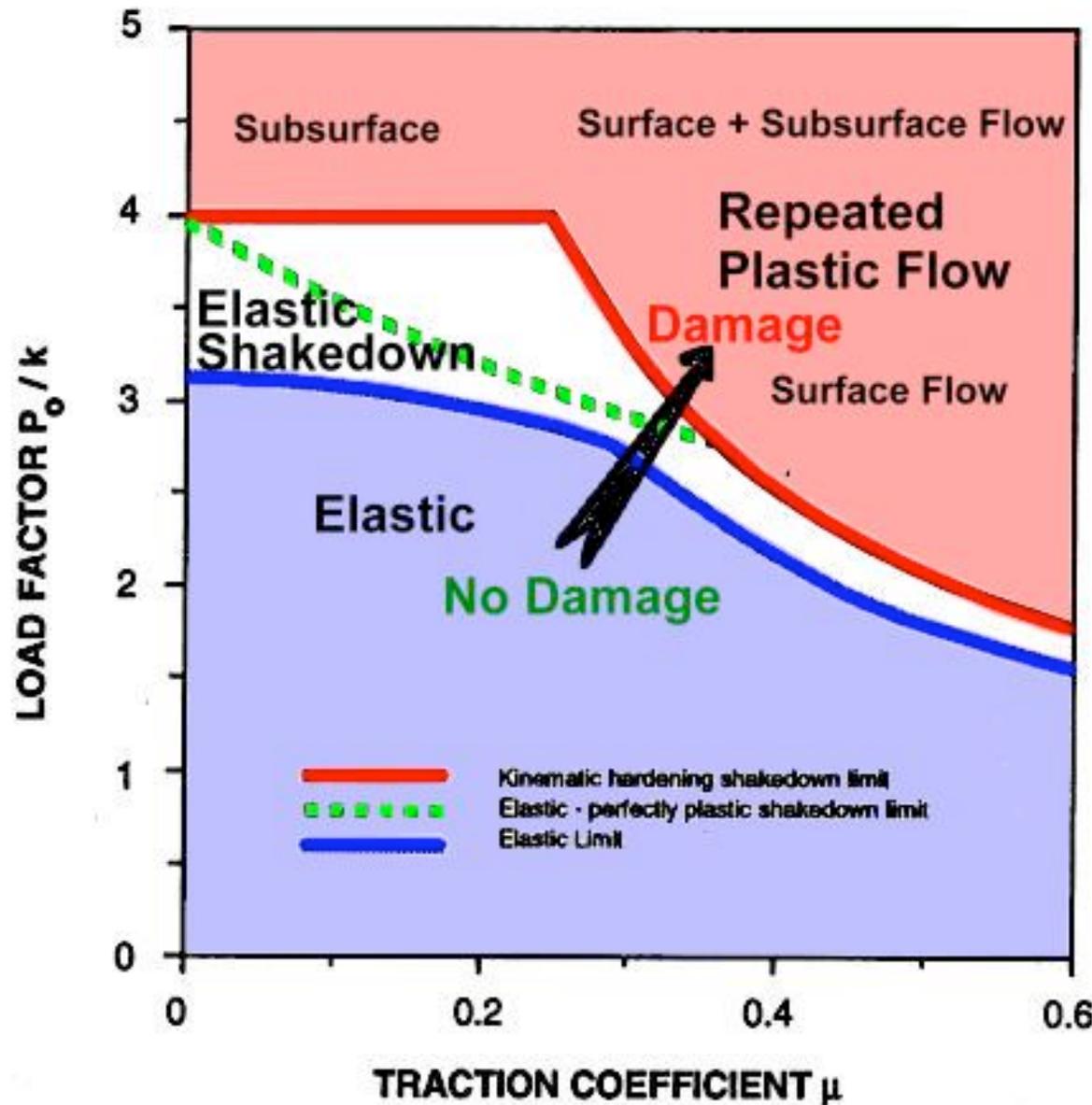
**a: rein elastisches Verhalten**

**b: elastische Einspielgrenze**

**c: plastische Einspielgrenze**

**d: Überschreitung der Dehnbarkeit des Materials mit Schädigung  
(ratchetting im englischen Sprachgebrauch)**

# Shakedown-Diagramm zur Beurteilung der Kontaktbeanspruchung Rad-Schiene



$p_0$ : max. Kontaktspannung

$k$ : Schubfliessspannung

$$\mu = \frac{T}{N}$$

$T$ : Tangentialkraft

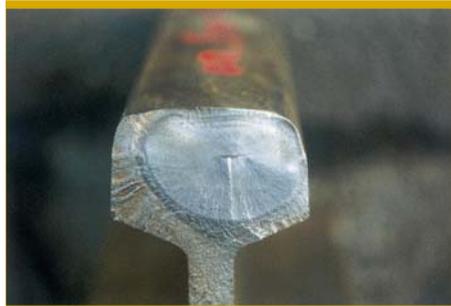
$N$ : Normalkraft

# Einflussgrößen auf die Rollkontaktermüdung

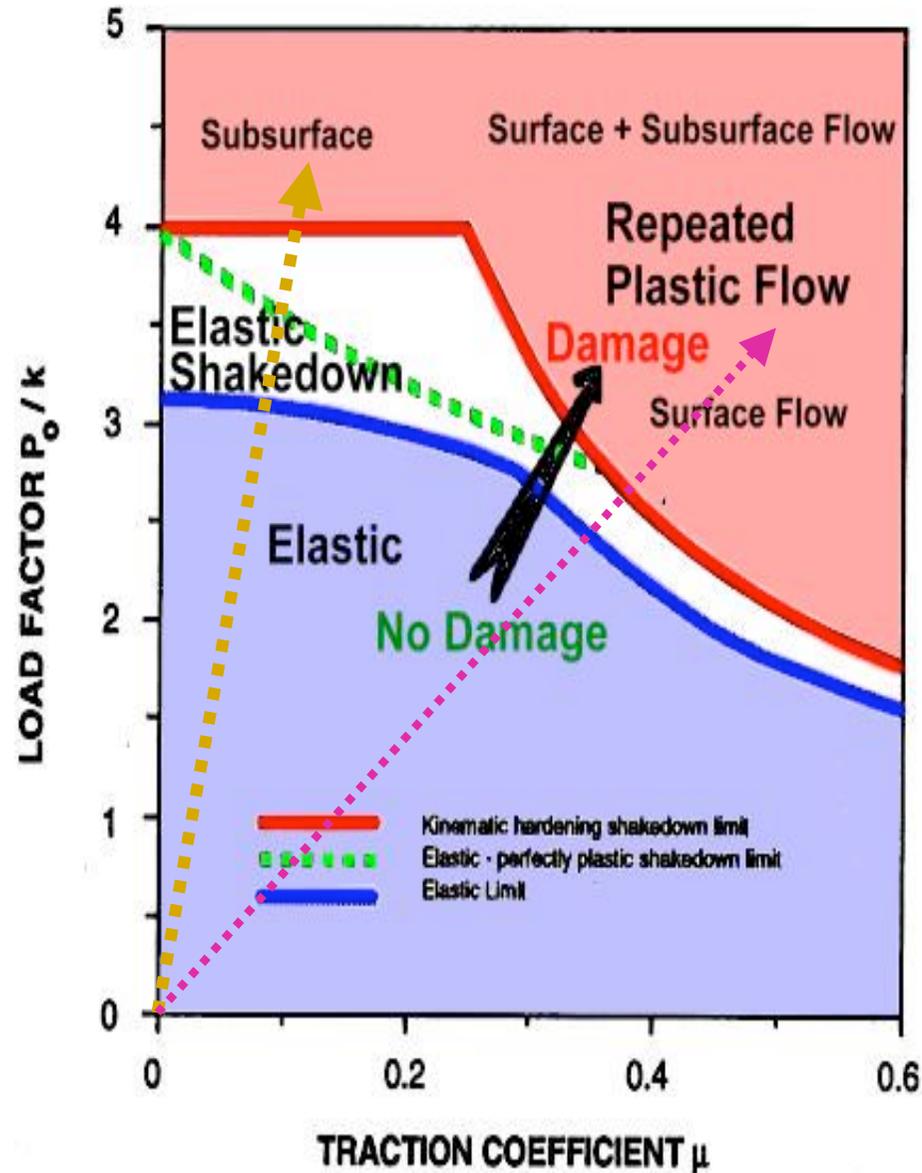
Die Entwicklung der Rollkontaktermüdung hängt ab vom Wechselspiel zwischen der Rissvergrößerung, welche durch die Kontaktspannungen und Tangentialkräfte in der Kontaktfläche dominiert wird und dem Verschleiss, welcher abhängig ist von den Tangentialkräften und dem Schlupf in der Kontaktfläche. Diese Parameter sind Abhängig von einer grösseren Anzahl von Parametern, im Speziellen von:

- Bogenhalbmesser
- Fahrzeugkonfigurationen – Radstand, Radlast, Raddurchmesser
- Laufwerksprinzipien, im Speziellen der Radialeinstellbarkeit der Radsätze
- Radprofilen – Nominalprofile und deren Verschleisszustand
- Schienenprofilen – Nominalprofile und deren Verschleisszustand
- Reibwert Rad/Schiene
- Überhöhungsfehlbetrag (abhängig von Geschwindigkeit, Bogenhalbmesser und Überhöhung)
- Traktions- und Bremskräften
- Gleislagequalität
- Eigenschaften der Rad- und Schienenwerkstoffe

## Rissentstehung unter der Oberfläche



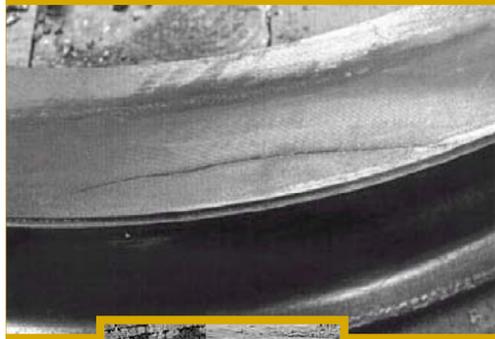
# Schienenschäden infolge Rollkontaktermüdung



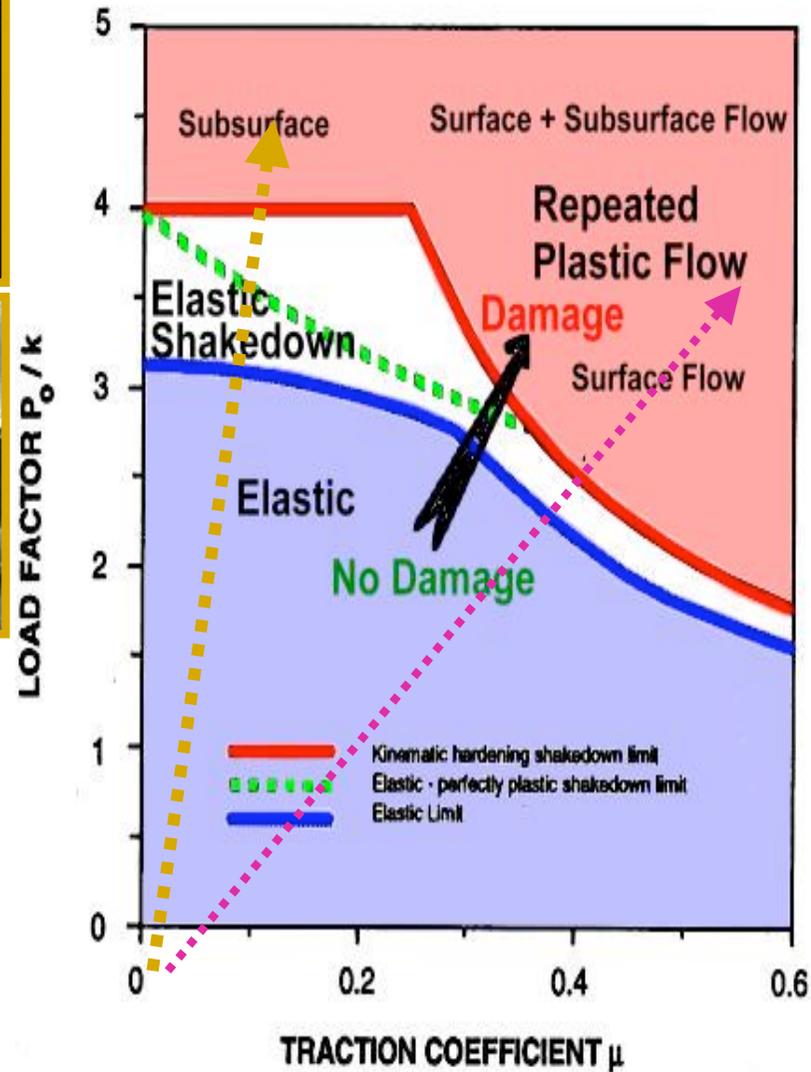
## Rissentstehung an der Oberfläche



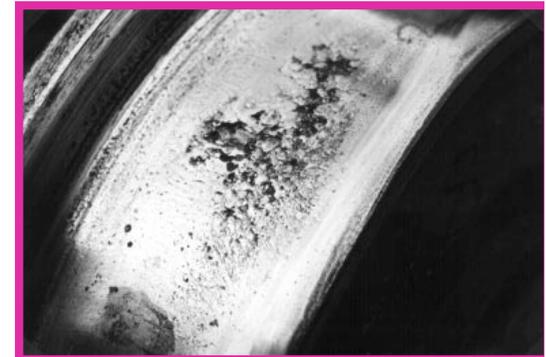
## Rissentstehung unter der Oberfläche



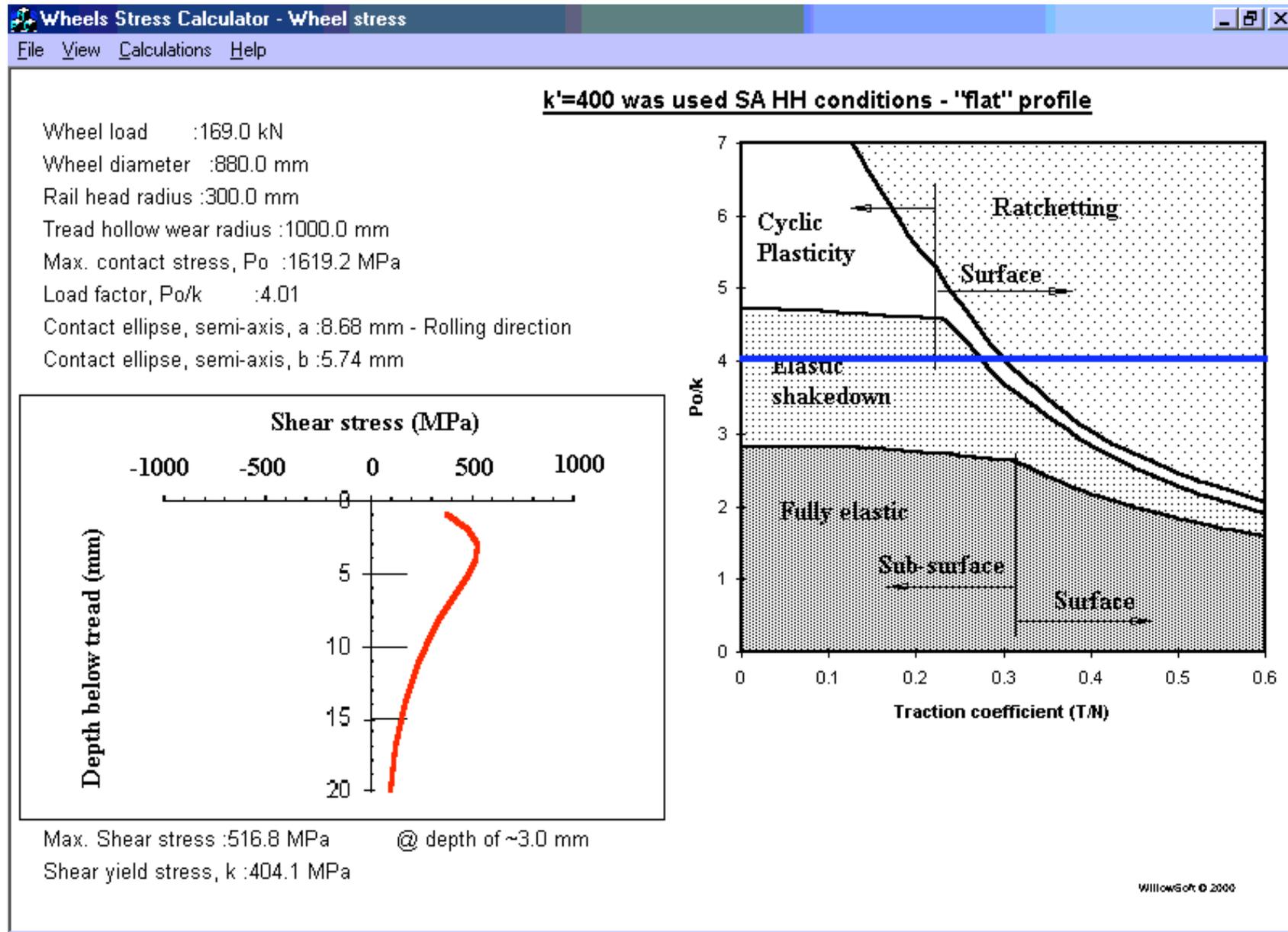
# Radschäden infolge Rollkontaktermüdung



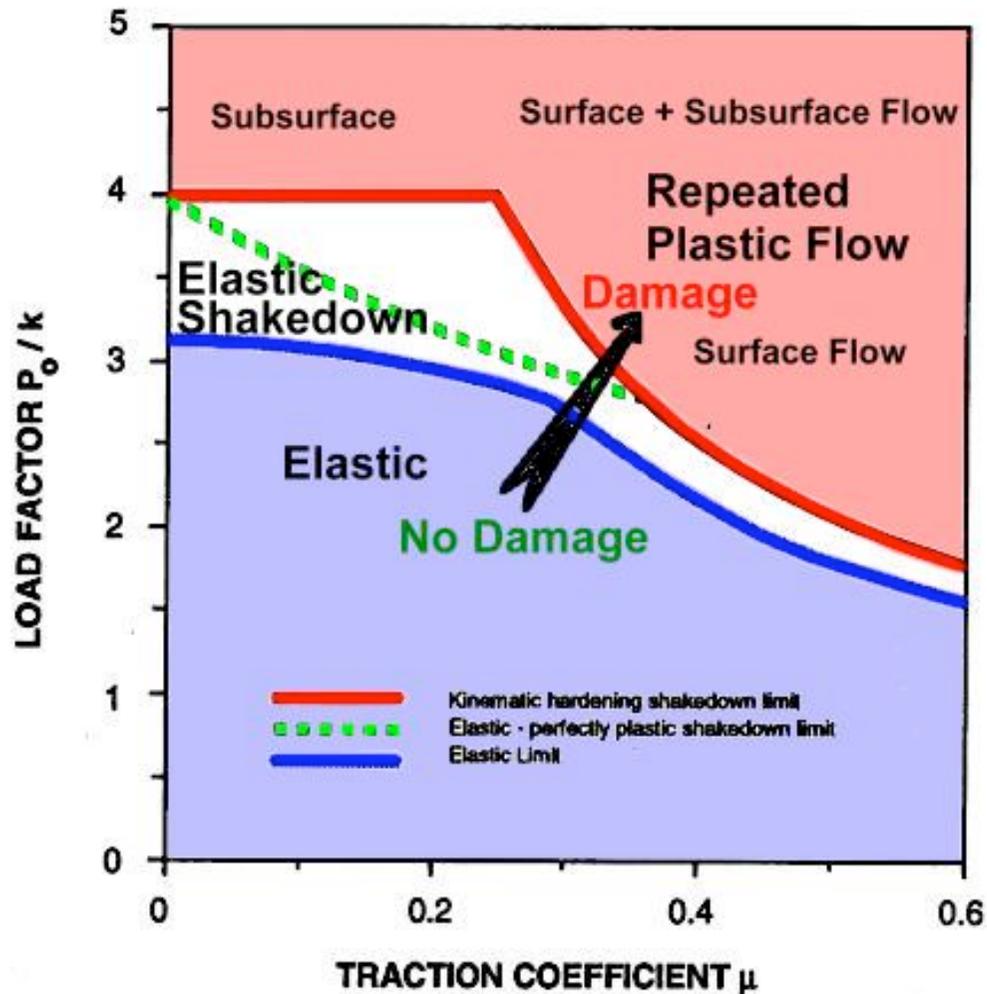
## Rissentstehung an der Oberfläche



# Beispiel für die Ermittlung des Einsatzbereichs des Rad-Schienen-Kontaktes aus dem Gesichtspunkt der Kontaktbeanspruchung



# Mit dem Shakedown-Diagramm wird die Beanspruchung des R-S-Kontaktes für einen bestimmten Einsatzfall ermittelt



## Einflussgrößen:

- Mechanische Materialkennwerte von Rad und Schiene zur Ermittlung von  $k$
- Profile von Rad und Schiene zur Ermittlung der Kontaktgeometrie
- Trassierung mit den Bogenhalbmessern zur Ermittlung der Kontaktgeometrie
- Laufwerksprinzip zur Ermittlung der Tangentialkräfte
- Traktionskräfte bei angetriebenen Radsätzen zur Ermittlung der Tangentialkräfte
- Radsatzlast zur Ermittlung der Normalkräfte
- Raddurchmesser

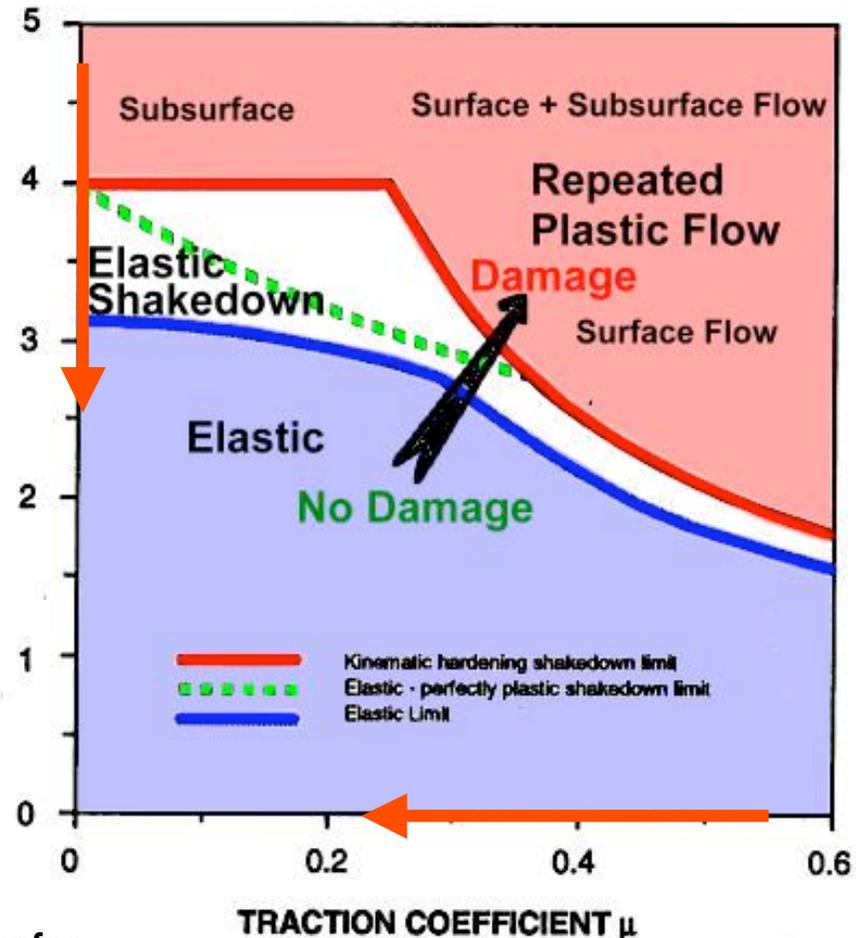
# Problembehandlung mit Shakedown-Diagramm

## Mögliche Massnahmen ( $p_0/k$ ):

- Anpassung der Kontaktradien Rad/Schiene „konformer Kontakt“
- Allenfalls Reprofilierung bei verschleissbedingt ungünstiger Veränderung der Berührung Rad/Schiene
- Verwendung von Werkstoffen mit erhöhter Streckgrenze
- Erhöhung Raddurchmesser
- Reduktion Radsatzlast
- Verbesserung der inneren Reinheit der Werkstoffe
- Vermeidung von unzulässigen Rundheitsabweichungen der Räder und Höhenabweichungen der Schienenfahrflächen
- Reduktion der dynamischen Radlasten

- Reduktion Kontaktschubfließspannung  
- Erhöhung Schubfließspannung

LOAD FACTOR  $P_0/k$



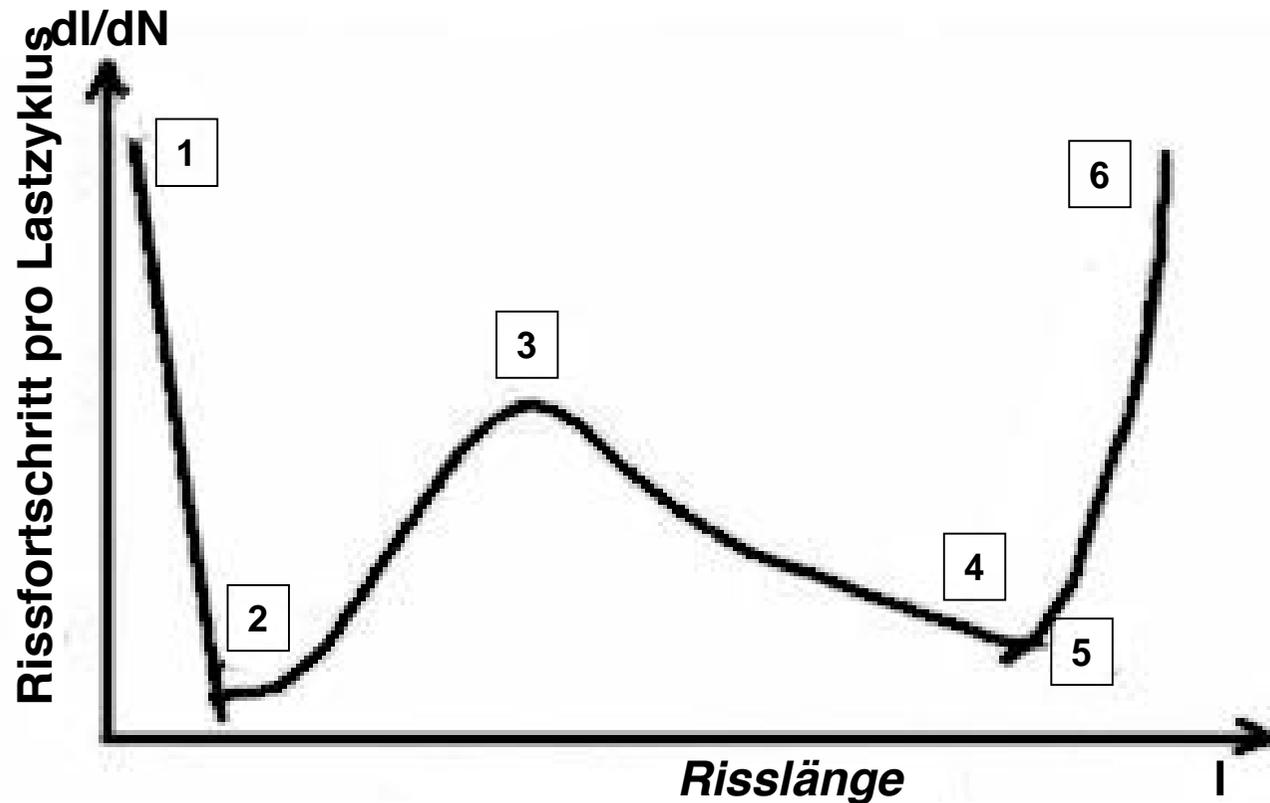
TRACTION COEFFICIENT  $\mu$

-Reduktion Kraftschlusskräfte  
-Reduktion Reibwert R/S

## Mögliche Massnahmen $\mu$ :

- Reduktion der Längsschlupfkräfte und/oder des Schlupfes bei angetriebenen Radsätzen
- Optimierung der Schlupfregelung bei angetriebenen Radsätzen
- Verwendung von radial einstellbaren Radsätzen bei Trassierungen mit vielen engen Bogenhalbmessern
- Reduktion des Reibwertes Rad/Schiene in engen Bögen durch Schmierung der Fahrflächen Rad/Schiene
- Verbesserung der Berührungsgeometrie Rad/Schiene

# Stadien der Rissentwicklung durch Rollkontaktermüdung



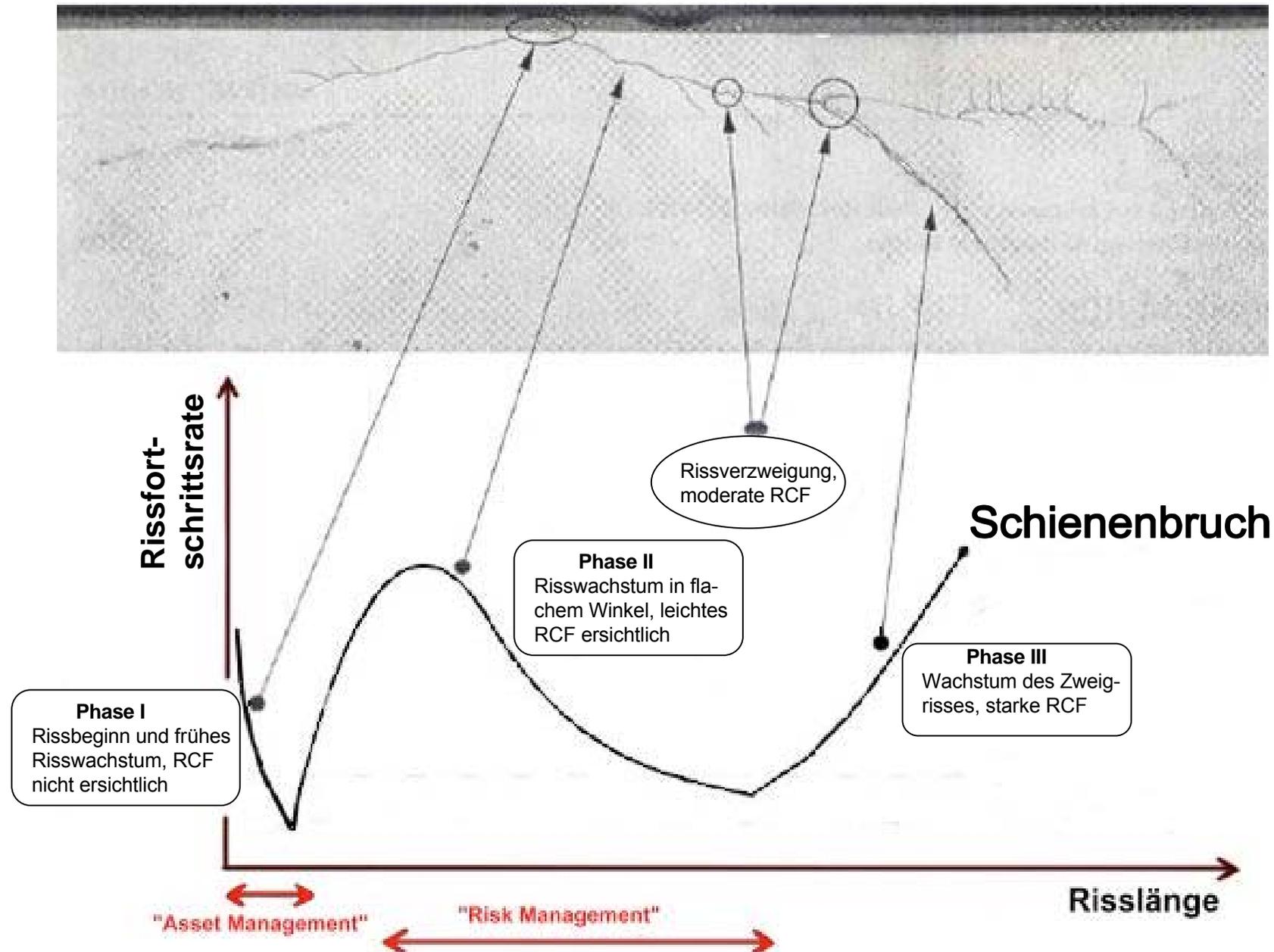
Kurve 1-2: Rissstart und Frühstadium der Rissentwicklung durch ratchetting

Kurve 2-3: Mit zunehmender Risslänge steigt die Rissfortschrittsgeschwindigkeit

Kurve 3-4: Längere Risse entfernen sich mit der Risspitze vom Kontaktspannungsfeld, wobei sich die Rissfortschrittsgeschwindigkeit reduziert

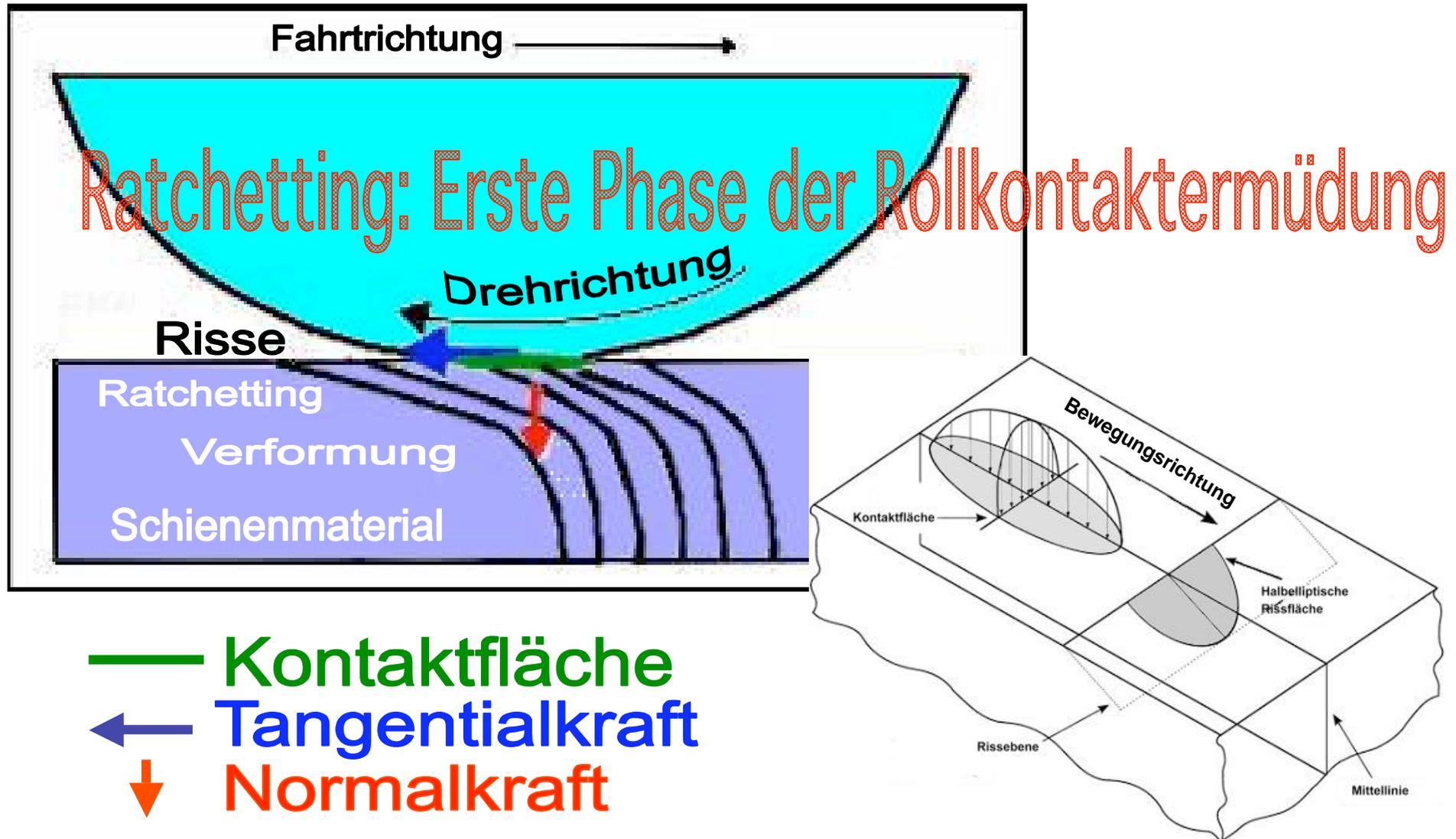
Kurve 5-6: Der weitere Rissfortschritt wird durch Biegung vorangetrieben

# Die Phasen der Rollkontaktermüdung (RCF)



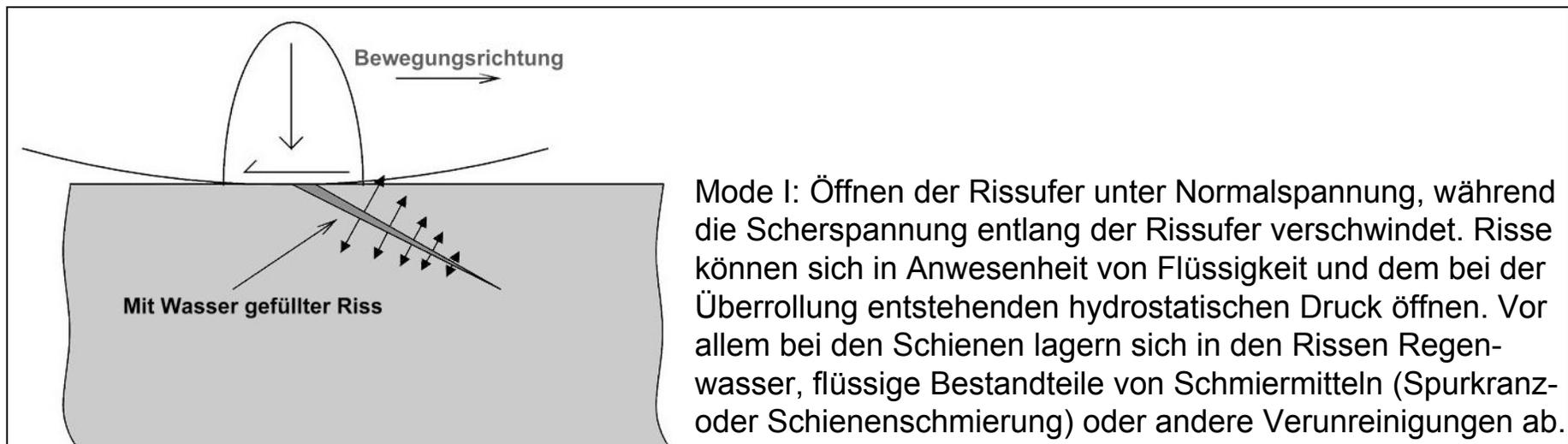
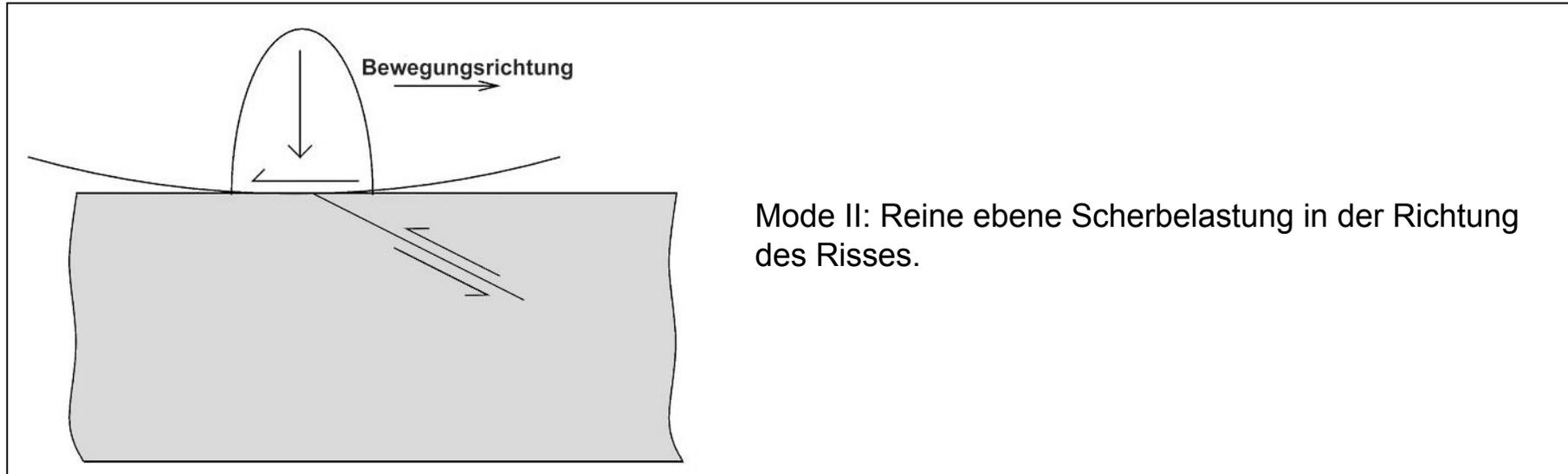
# Kontaktfläche und Kräfte Rad/Schiene

Die Kräfte verursachen elastische Verformungen des Schienenmaterials was Rollkontaktermüdung hervorrufen kann



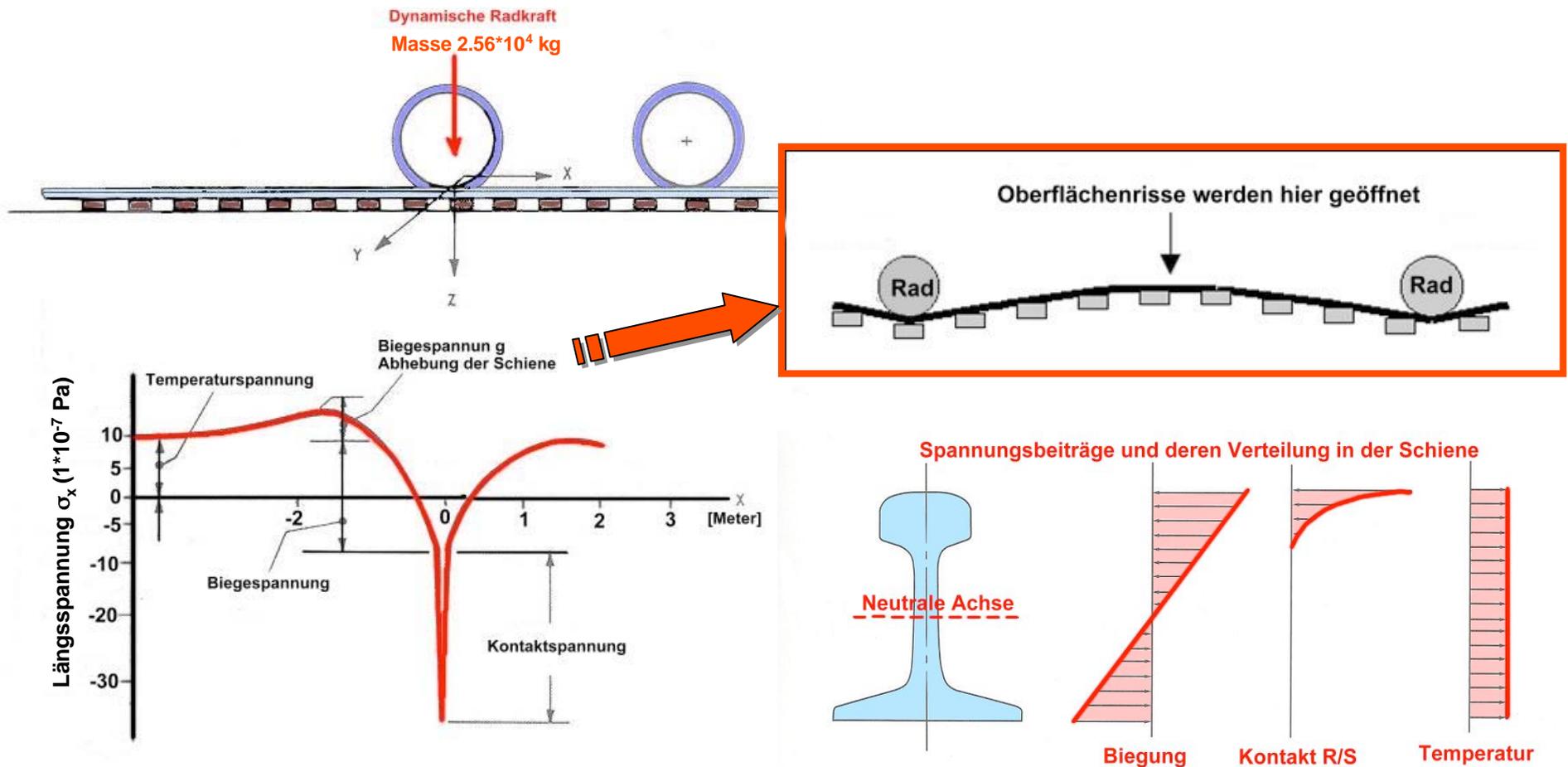
# Mechanismen der Rissfortpflanzung nach Entstehung der Risse durch Retchatting

## Zweite Phase: Mode der Rissfortpflanzung

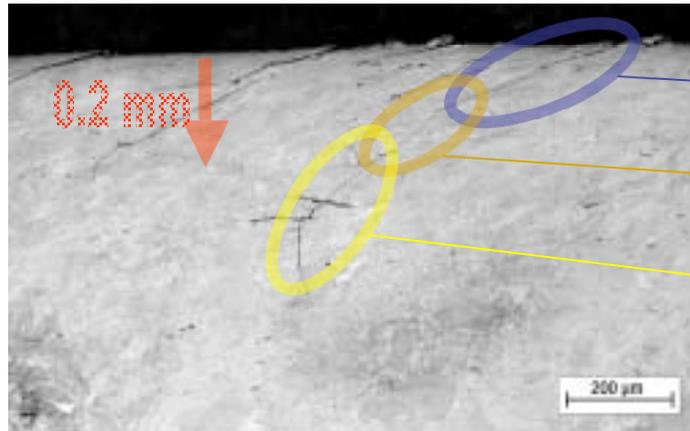


# Mechanismen der Rissfortpflanzung nach Entstehung der Risse durch Retchatting

## Dritte Phase: Rissfortpflanzung durch Biege- und Temperaturspannungen



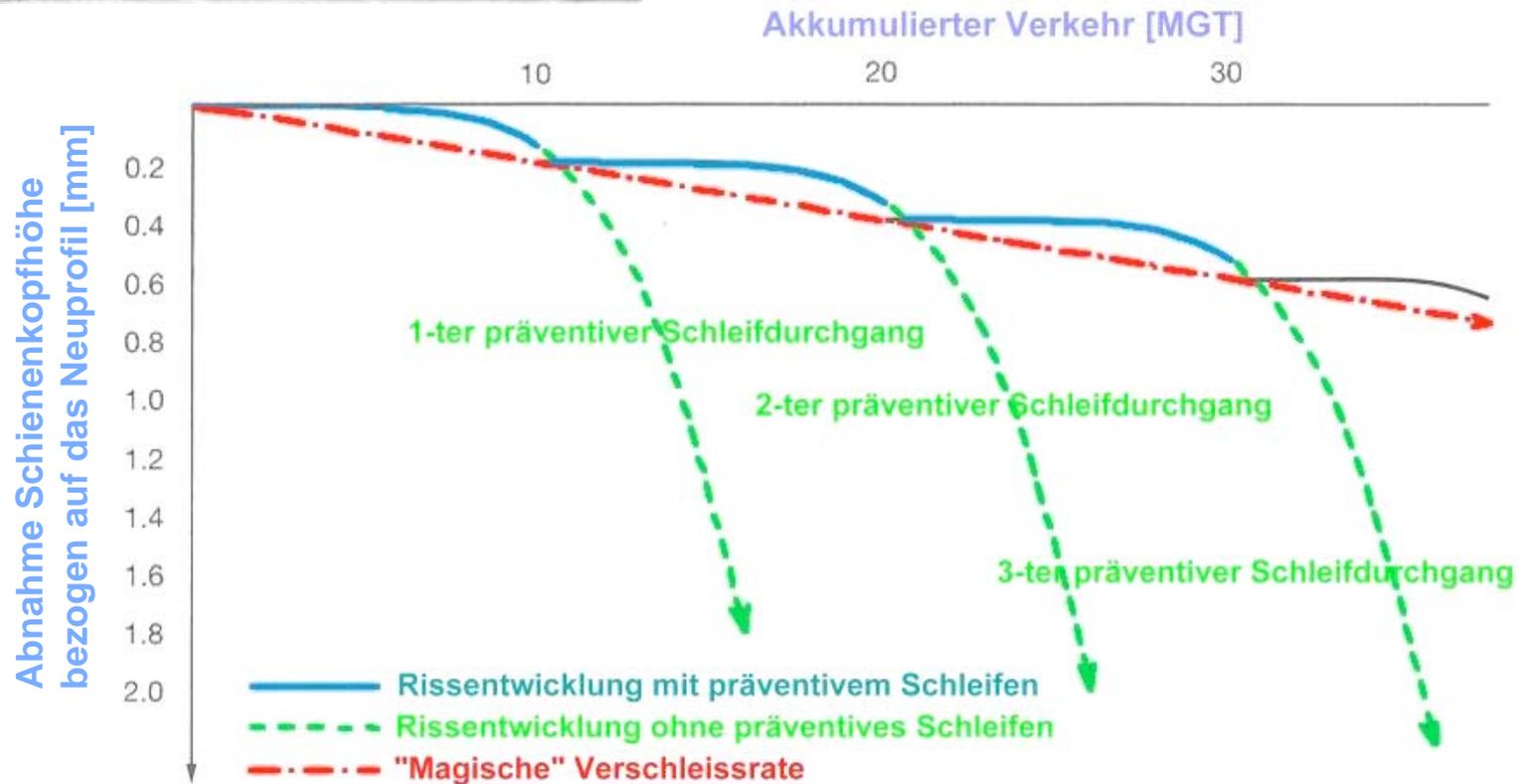
# Wirtschaftlicher Einsatz des Schienenschleifens bei Vorhandensein von Rollkontaktermüdung



Phase 1  
Rissbildung

Phase 2  
Frühstadium Risswachstum

Phase 3  
Rissvergrößerung und Wachstum



# **Beseitigung der Rollkontaktermüdung im Frühstadium reduziert Kosten und erhöht Sicherheit**



(Upward cracks :  
- Shelling on the Gauge face)



(Downward cracks:  
-Kidney under Gauge face)