

Kontakt Rad-Schiene: Ein kleines Detail mit grossen Auswirkungen

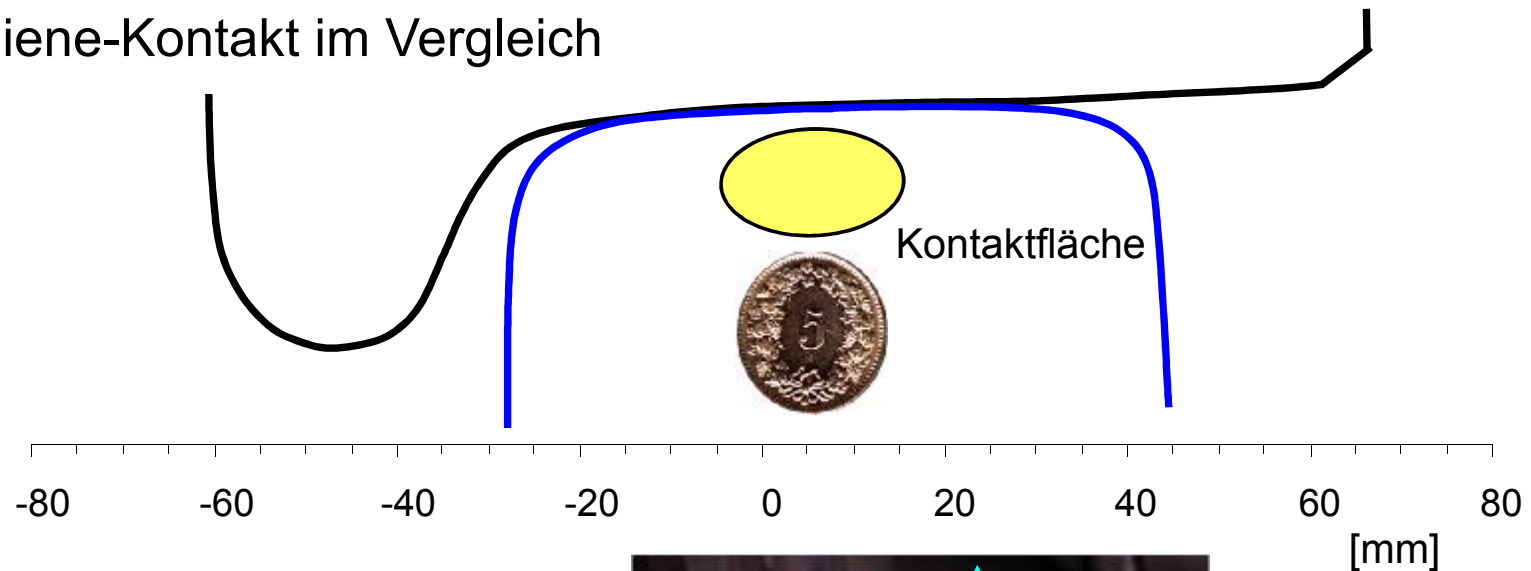
Oldrich Polach
Antrittsvorlesung
ETH Zürich, 22. November 2011

Inhalt

- **Kontakt Rad-Schiene – Das Kernelement der Eisenbahntechnik**
- **Berührgeometrie Radsatz-Gleis**
- **Berechnung der Kraftschlusskräfte**
- **Rad-Schiene-Kontakt und Stabilität**
- **Ausblick und Zusammenfassung**

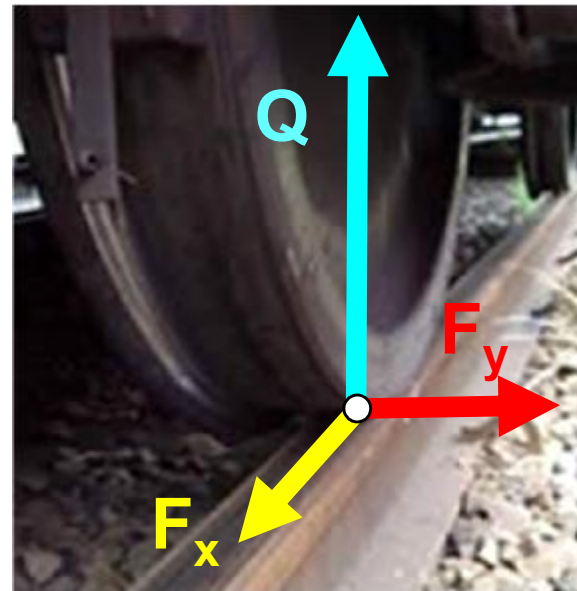
Kontakt Rad-Schiene – Das Kernelement der Eisenbahntechnik

■ Rad-Schiene-Kontakt im Vergleich



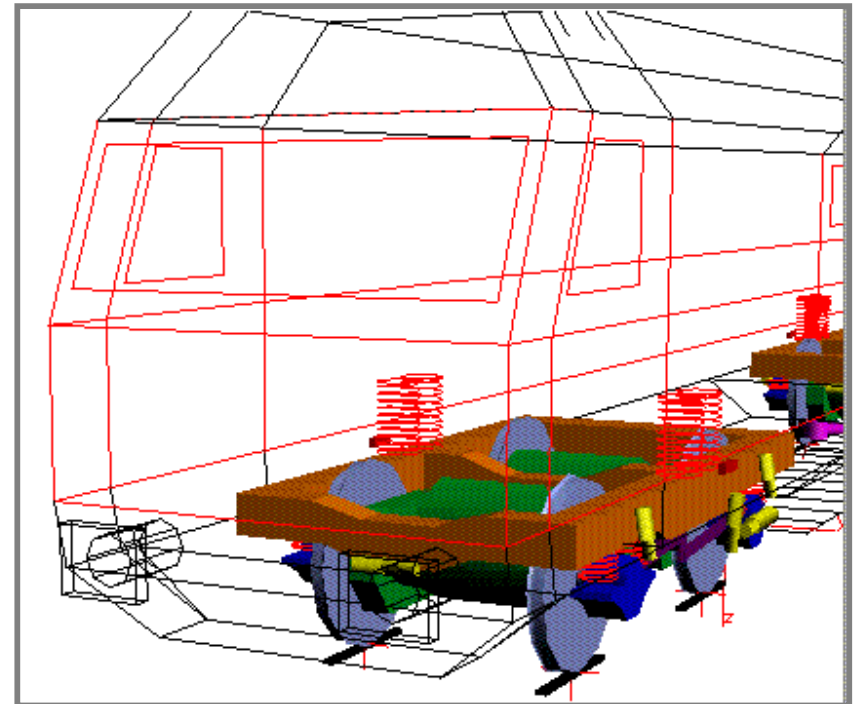
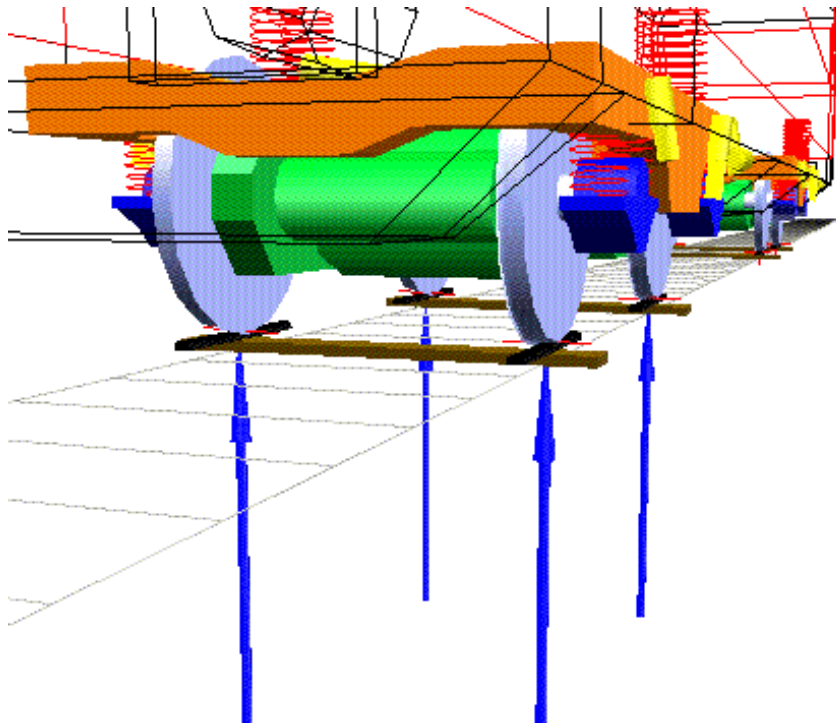
■ Funktionen des Rad-Schiene-Kontaktes

- tragen
- führen
- antreiben / bremsen



Auswirkungen des Rad-Schiene-Kontaktes

- Kontakt Rad-Schiene beeinflusst
 - Fahrsicherheit
 - Fahrkomfort
 - Beanspruchung von Fahrbahn und Fahrzeug
 - Verschleiss
- Kontakt Rad-Schiene hat grosse Auswirkungen auf das System Fahrzeug-Fahrweg



- Mehrkörper-Simulationen der Schienenfahrzeugdynamik tragen zur Optimierung der Eisenbahntechnik bei
- Eine detailtreue Modellierung der Berührung Rad-Schiene stellt das Kernelement der Schienenfahrzeugdynamik dar

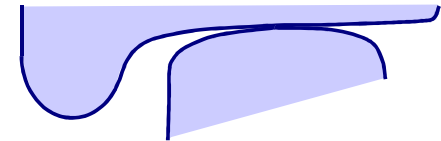
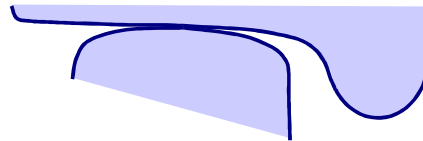
Inhalt

- **Kontakt Rad-Schiene – Das Kernelement der Eisenbahntechnik**
- **Berührgeometrie Radsatz-Gleis**
- **Berechnung der Kraftschlusskräfte**
- **Rad-Schiene-Kontakt und Stabilität**
- **Ausblick und Zusammenfassung**

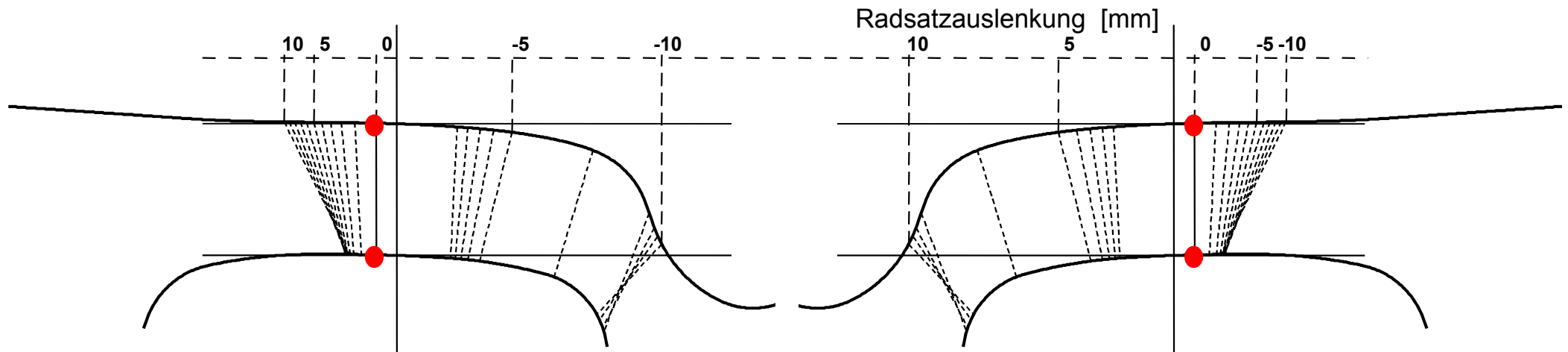
Berührgeometrie Radsatz-Gleis

- Berührgeometrie Radsatz-Gleis beeinflusst

- Stabilität
- Fahreigenschaften in Bogen
- Schwingungsverhalten
- Fahrkomfort
- Verschleiss
- Materialermüdung und Schädigung der Räder und Schienen



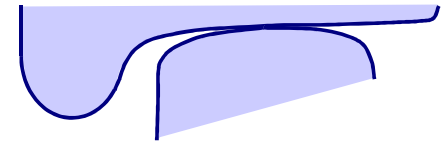
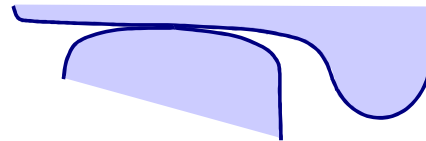
- Berührung Rad-Schiene bei Querauslenkung des Radsatzes im Gleis (starre Körper)



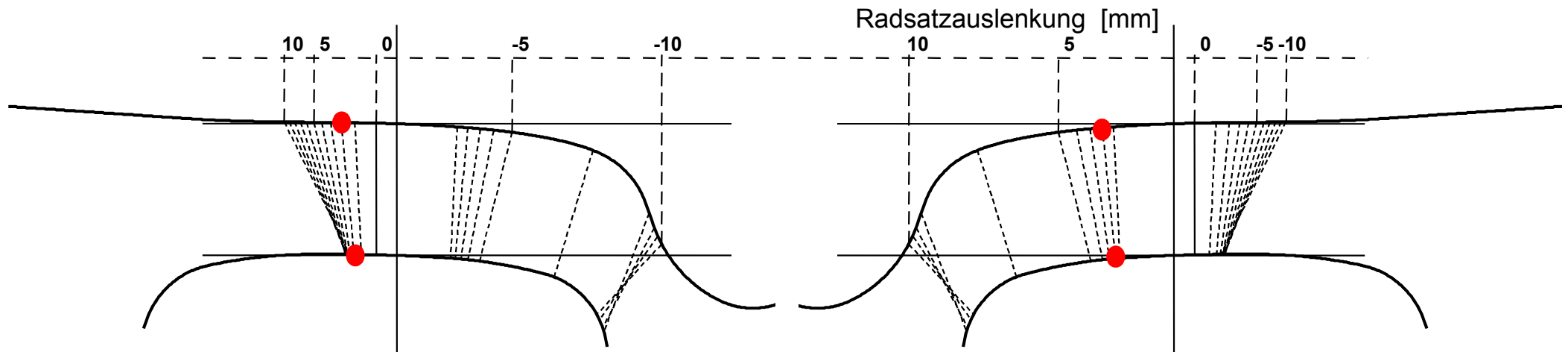
Berührgeometrie Radsatz-Gleis

- Berührgeometrie Radsatz-Gleis beeinflusst

- Stabilität
- Fahreigenschaften in Bogen
- Schwingungsverhalten
- Fahrkomfort
- Verschleiss
- Materialermüdung und Schädigung der Räder und Schienen



- Berührung Rad-Schiene bei Querauslenkung des Radsatzes im Gleis (starre Körper)



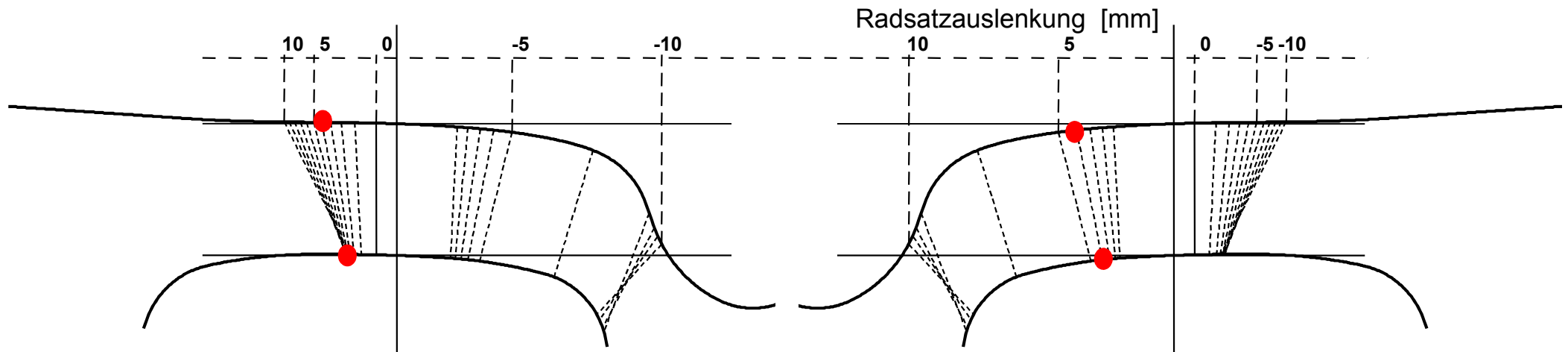
Berührgeometrie Radsatz-Gleis

- Berührgeometrie Radsatz-Gleis beeinflusst

- Stabilität
- Fahreigenschaften in Bogen
- Schwingungsverhalten
- Fahrkomfort
- Verschleiss
- Materialermüdung und Schädigung der Räder und Schienen



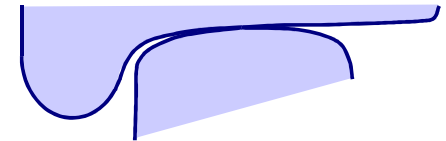
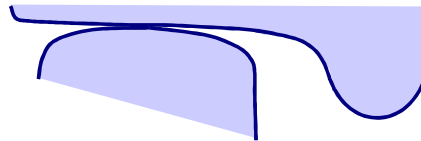
- Berührung Rad-Schiene bei Querauslenkung des Radsatzes im Gleis (starre Körper)



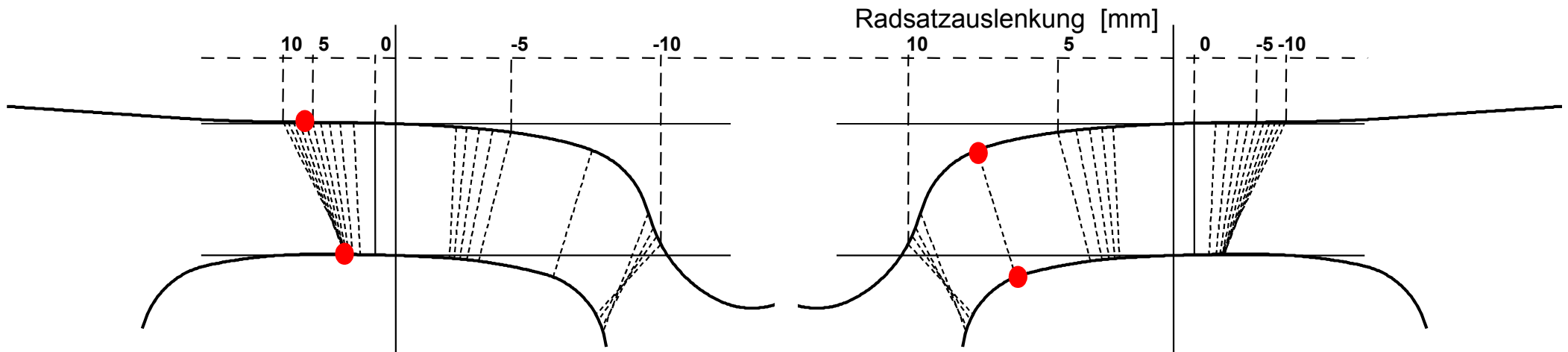
Berührgeometrie Radsatz-Gleis

- Berührgeometrie Radsatz-Gleis beeinflusst

- Stabilität
- Fahreigenschaften in Bogen
- Schwingungsverhalten
- Fahrkomfort
- Verschleiss
- Materialermüdung und Schädigung der Räder und Schienen



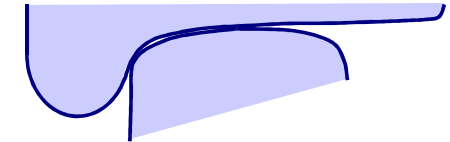
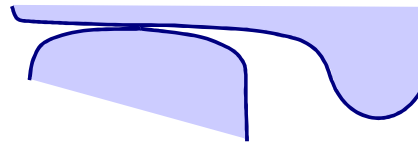
- Berührung Rad-Schiene bei Querauslenkung des Radsatzes im Gleis (starre Körper)



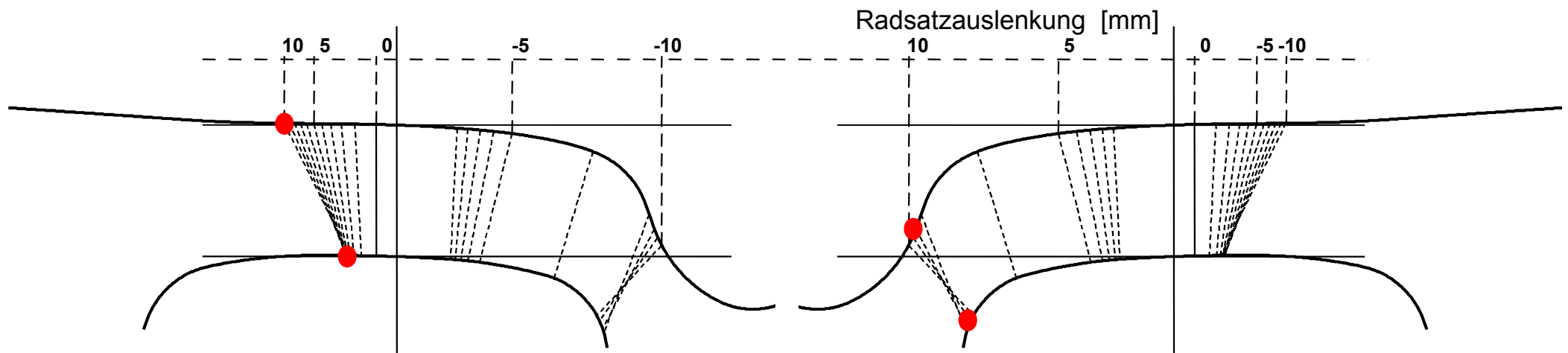
Berührgeometrie Radsatz-Gleis

- Berührgeometrie Radsatz-Gleis beeinflusst

- Stabilität
- Fahreigenschaften in Bogen
- Schwingungsverhalten
- Fahrkomfort
- Verschleiss
- Materialermüdung und Schädigung der Räder und Schienen



- Berührung Rad-Schiene bei Querauslenkung des Radsatzes im Gleis (starre Körper)



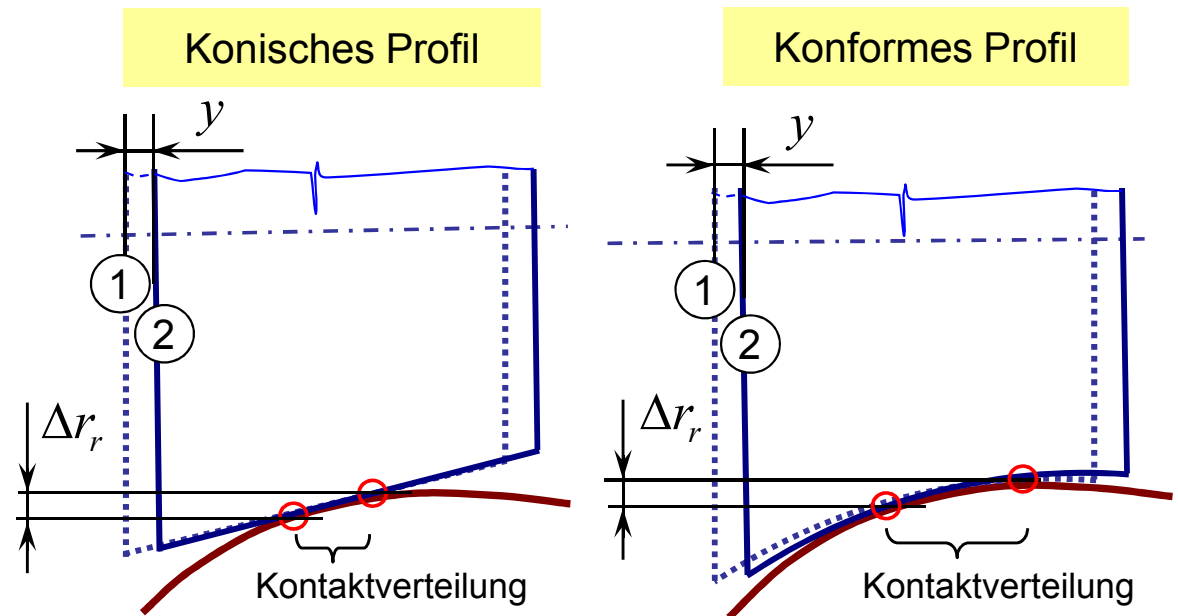
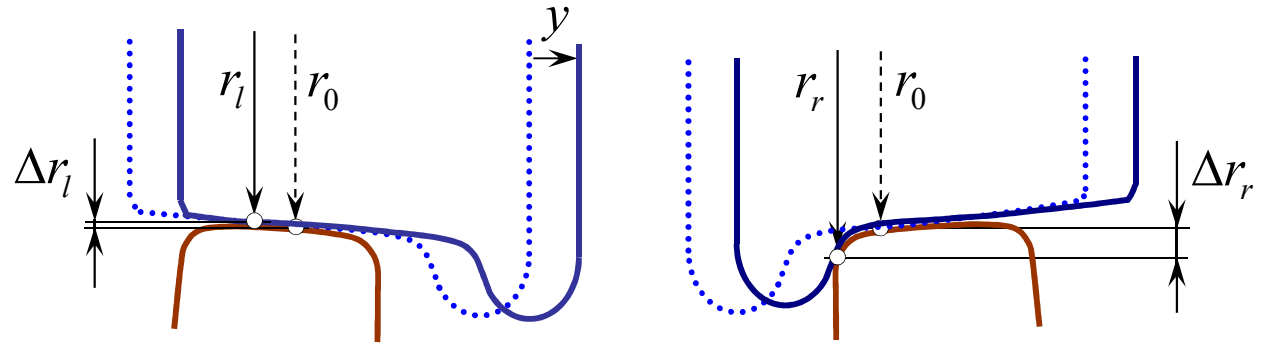
Berührgeometrische Funktionen

- Berührgeometrische Funktionen:
 - Rollradiusdifferenz
 - relevant betr. Bogenfahrt
 - Äquivalente Konizität
 - relevant betr. Stabilität

- Berührgeometrische Funktionen werden beeinflusst durch:
 - Kontaktwinkel ~ nominale Berührungsposition
 - Konformität

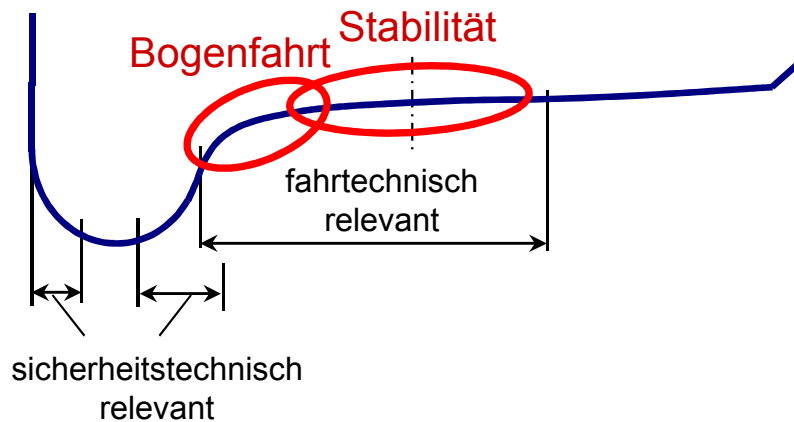
- Auch Kontaktspannung und Verschleiss werden durch diese Parameter beeinflusst

- Änderung der Berührgeometrie beeinflusst auch Verschleiss und vice versa



Form des Radprofils und seine Optimierung

- Bedeutung der Form des Radprofils

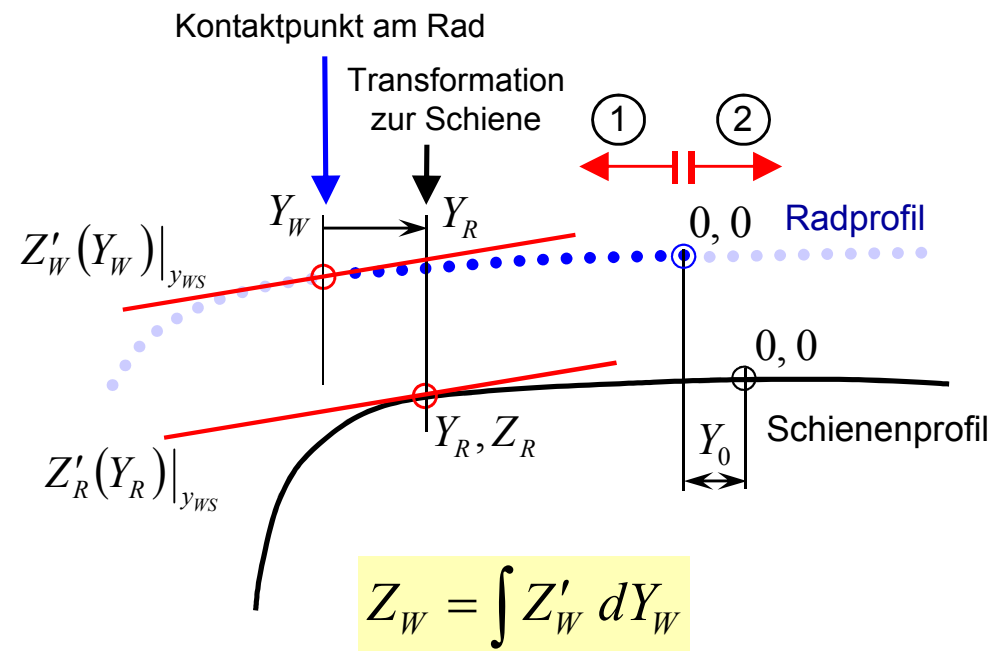


- Veränderung des Radprofils im Betrieb

- Ziel: Gleichmässige Radabnutzung, stabile Form des Radprofils
- Verschleiss der Lauffläche überwiegt auf geraden Strecken und bei grossen Traktionskräften
- Gleichmässigerer Abnutzung kann durch Optimierung des Radprofils erreicht werden

- Neue Methode der Profilentwicklung

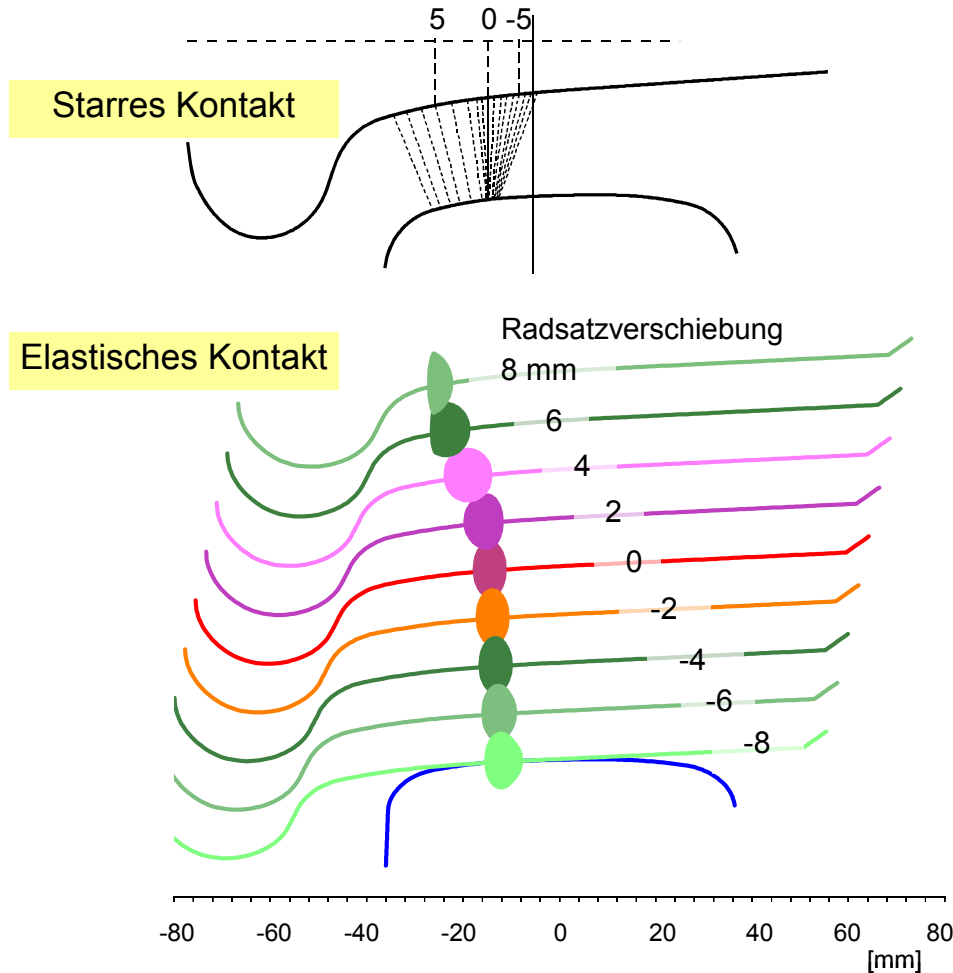
- Zielwert der äquivalenten Konizität
- Spezifizierte Verschiebung der Berührfläche entlang des Radprofils in Funktion der Radsatz-Querauslenkung
- Berechnung des neuen Radprofils ausgehend aus der Form des Schienenprofils



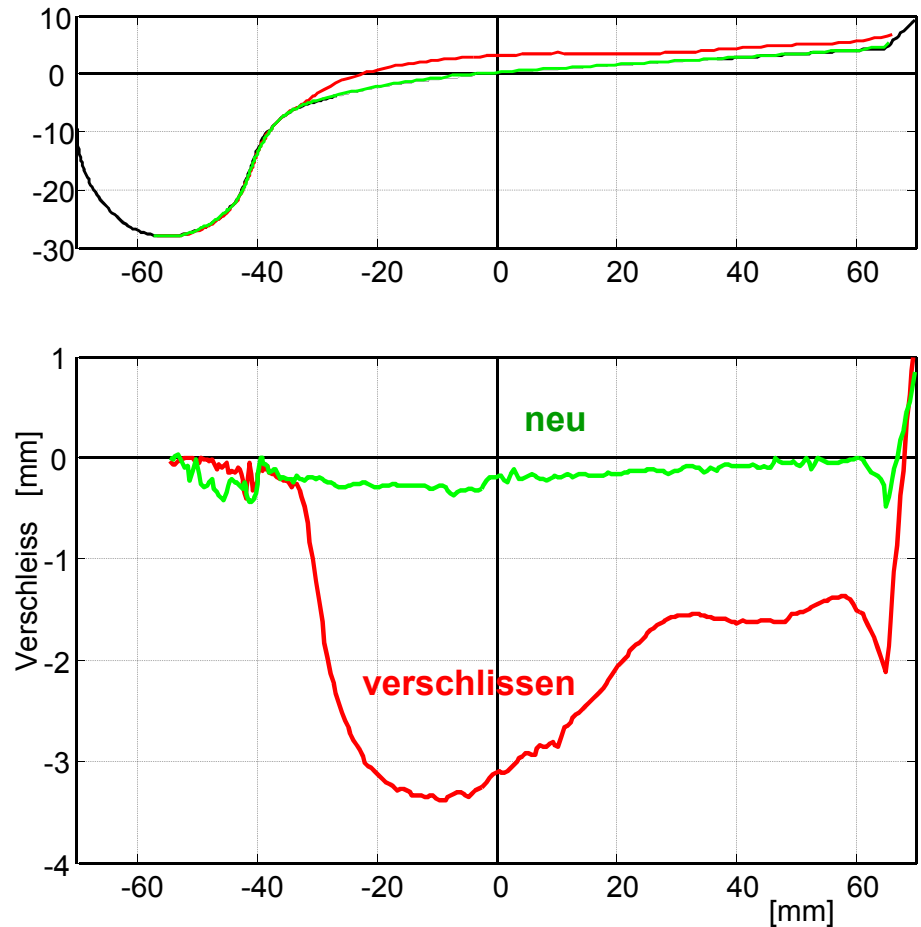
Polach, O., *Wear* 271 (2011), S.195–202

Optimiertes Radprofil: Berührgeometrie und Verschleiss

- Optimierung der Position und Grösse der Berührfläche bei Querauslenkung des Radsatzes
- Zielwert der äquivalenten Konizität

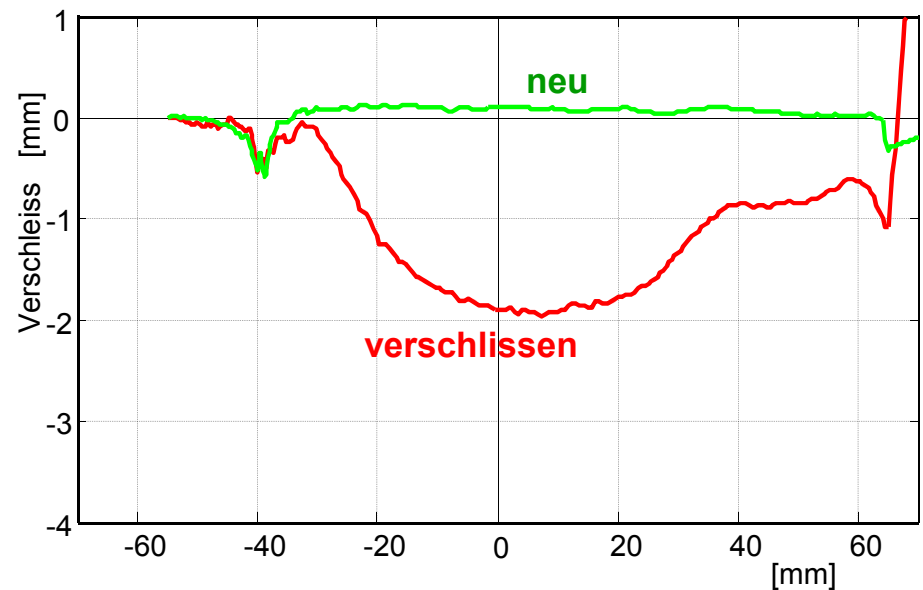
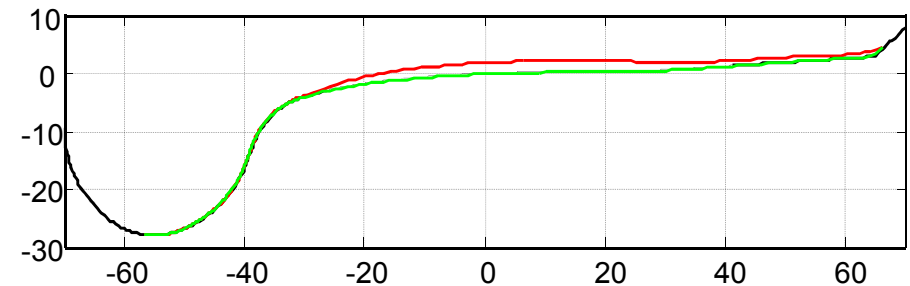
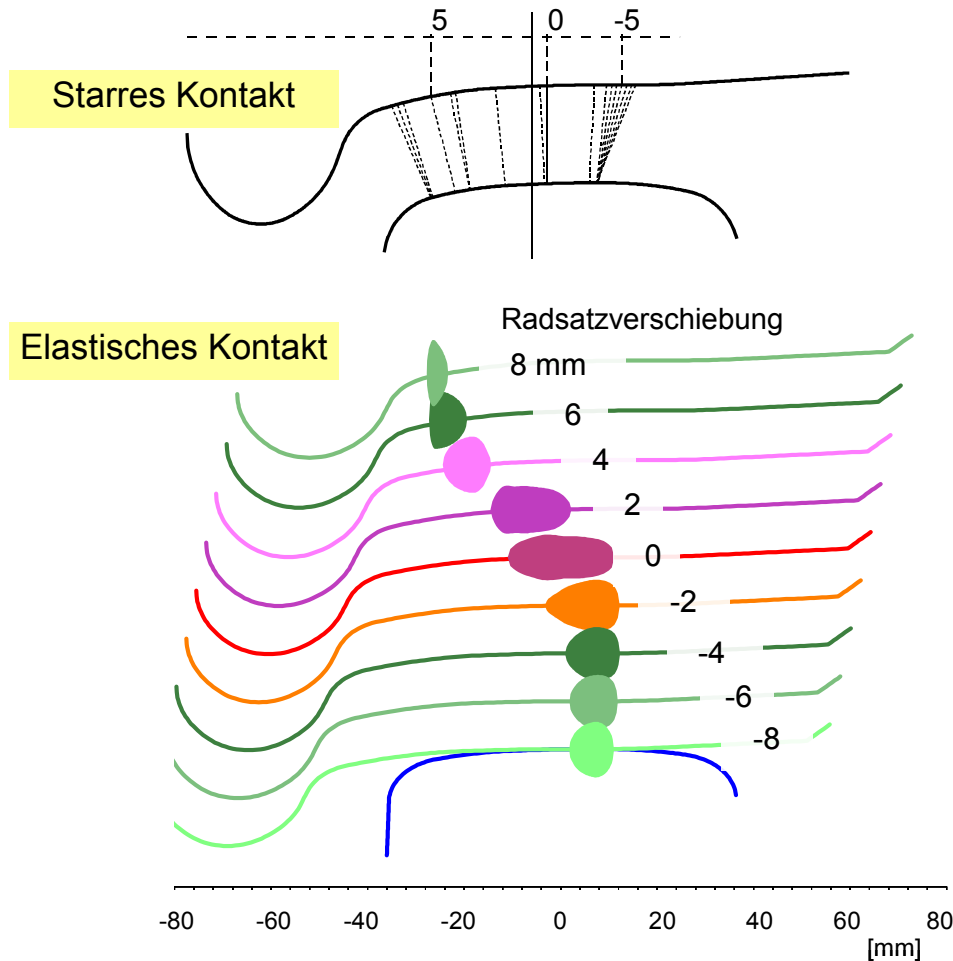


- Verschleiss des Radprofils während gleicher Zeit und Laufleistung unter ungünstigen Adhäsionsbedingungen



Optimiertes Radprofil: Berührgeometrie und Verschleiss

- Optimierung der Position und Grösse der Berührfläche bei Querauslenkung des Radsatzes
- Zielwert der äquivalenten Konizität
- Verschleiss des Radprofils während gleicher Zeit und Laufleistung unter ungünstigen Adhäsionsbedingungen



Inhalt

- **Kontakt Rad-Schiene – Das Kernelement der Eisenbahntechnik**
- **Berührgeometrie Radsatz-Gleis**
- **Berechnung der Kraftschlusskräfte**
- **Rad-Schiene-Kontakt und Stabilität**
- **Ausblick und Zusammenfassung**

Entwicklung der Berechnung der Kraftschlusskräfte

- Tangentialkräfte zwischen Rad und Schiene – Kraftschlusskräfte

- F. W. Carter (1926):

- Haftfläche (H) – Schlupf durch Materialdeformation
- Gleitfläche (G) – Gleiten der Oberflächensegmente

- J. J. Kalker:

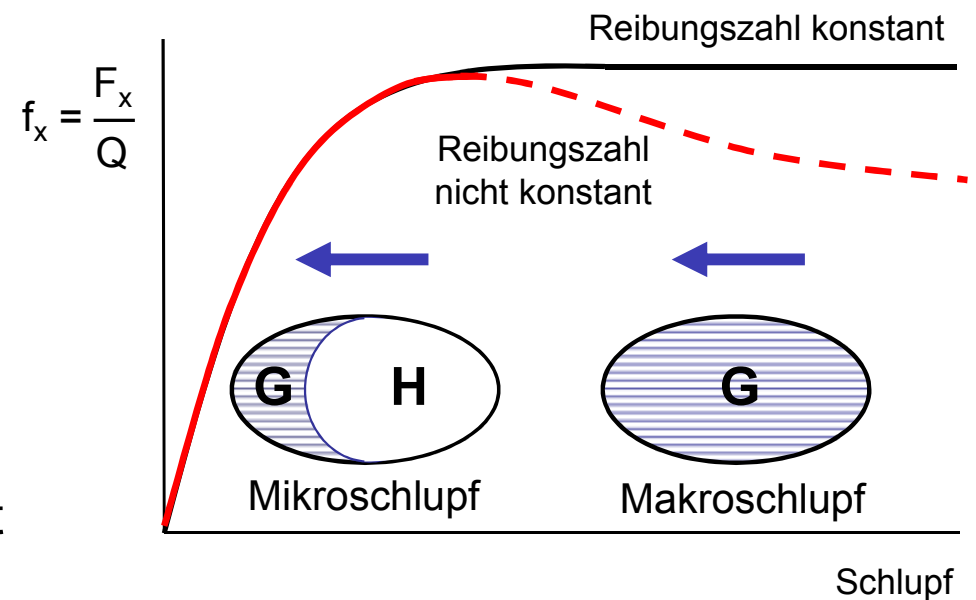
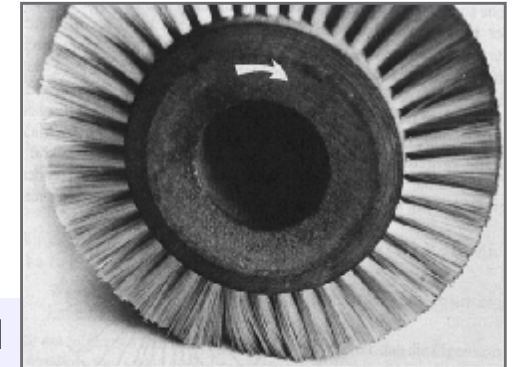
- Lineare Theorie (1967)
- Exakte Theorie (1979)
- Vereinfachte Theorie (1982)

- Kraftschlusskräfte

- abhängig von vier unabhängigen Variablen
- Berechnung für jedes Rad in jedem Integrationsschritt
- kurze Rechenzeit sehr wichtig

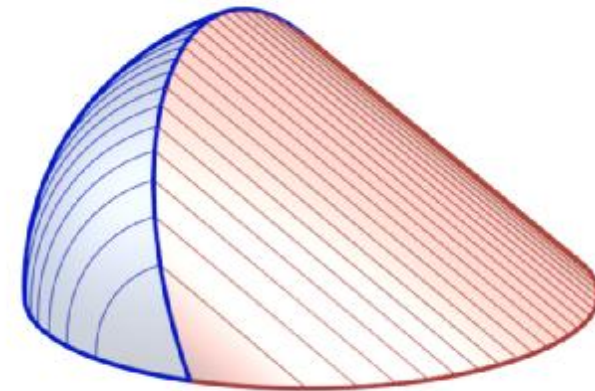
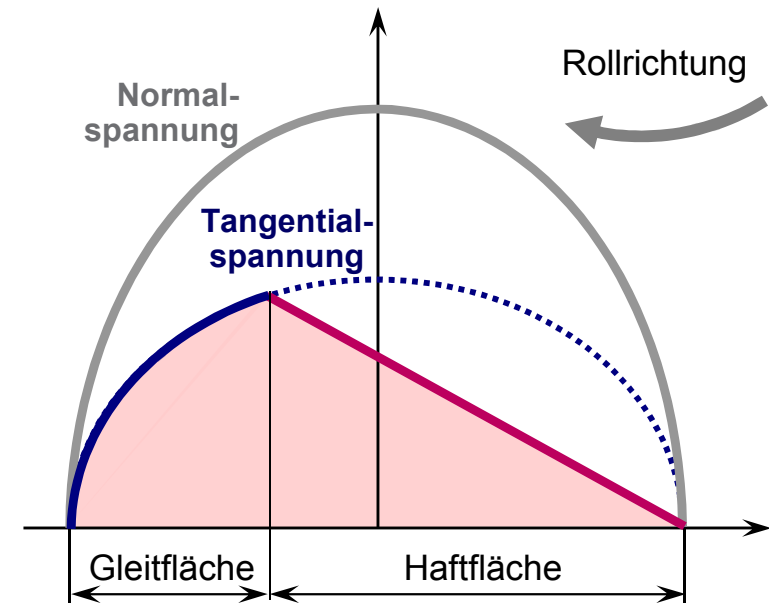
- Diskretisierung der Kontaktfläche führt zu langen Rechenzeiten

Bürstenmodell



Schnelle Methode der Berechnung der Kraftschlusskräfte

- Semi-physikalisches Modell
- Annahmen:
 - Normalspannung in Form eines Ellipsoids
 - Maximale Tangentialspannung proportional der Normalspannung
 - Haft- und Gleitgebiet
 - Lineare Zunahme der Tangentialspannung in der Haftfläche
- Lösung für Längs- und Querschlupf:
 - Transformation der Verteilung der Tangentialspannung
 - Berechnung der Schlupfkraft als Volumina geometrischer Körper
- Lösung für Längs-, Quer- und Bohrschlupf:
 - Einfluss von Bohrschlupf: Approximation der Lösung nach Kalker
- Anwendung in Simulationsprogrammen seit 1990
- Bestandteil kommerzieller Programme SIMPACK, ADAMS/Rail, GENSYS

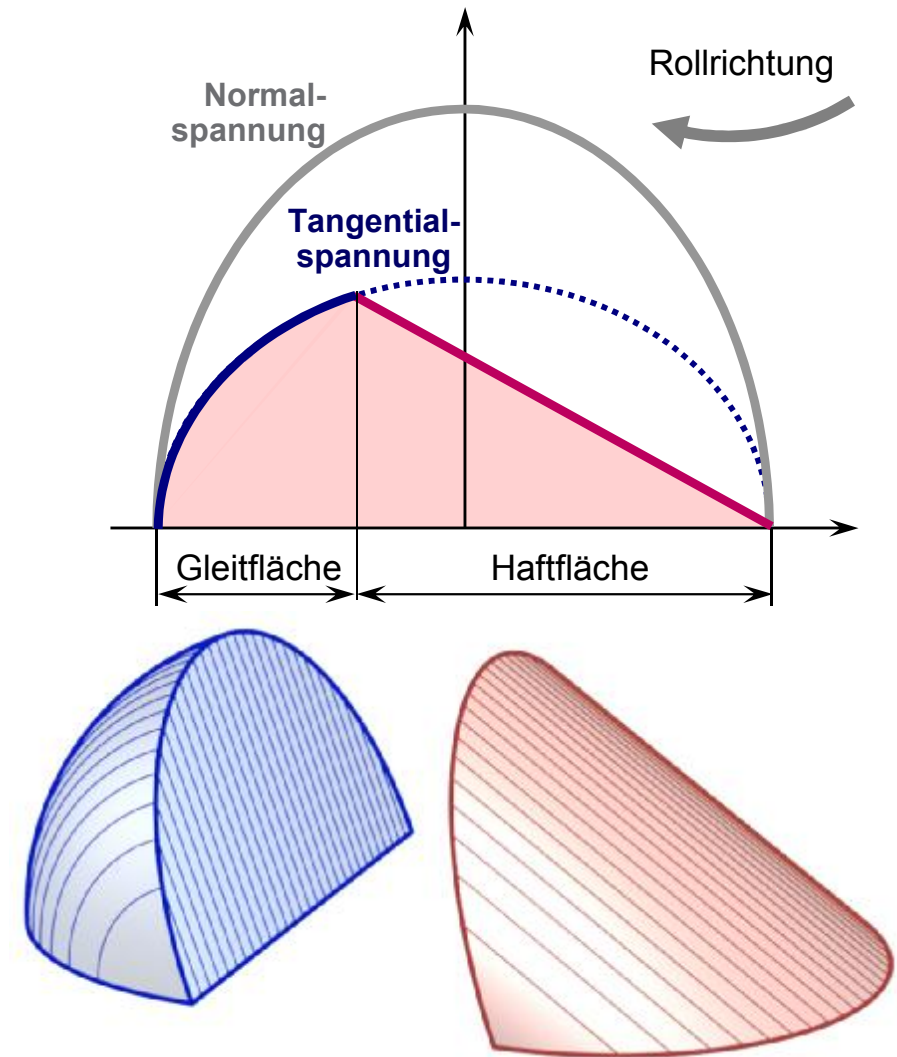


Polach, O., Proceedings of the 2nd International Conference on Railway Bogies and Running Gears, Budapest 1992, S.10-17

Polach, O., Vehicle System Dynamics (Suppl.) 33 (1999), S.728-739

Schnelle Methode der Berechnung der Kraftschlusskräfte

- Semi-physikalisches Modell
- Annahmen:
 - Normalspannung in Form eines Ellipsoids
 - Maximale Tangentialspannung proportional der Normalspannung
 - Haft- und Gleitgebiet
 - Lineare Zunahme der Tangentialspannung in der Haftfläche
- Lösung für Längs- und Querschlupf:
 - Transformation der Verteilung der Tangentialspannung
 - Berechnung der Schlupfkraft als Volumina geometrischer Körper
- Lösung für Längs-, Quer- und Bohrschlupf:
 - Einfluss von Bohrschlupf: Approximation der Lösung nach Kalker
- Anwendung in Simulationsprogrammen seit 1990
- Bestandteil kommerzieller Programme SIMPACK, ADAMS/Rail, GENSYS

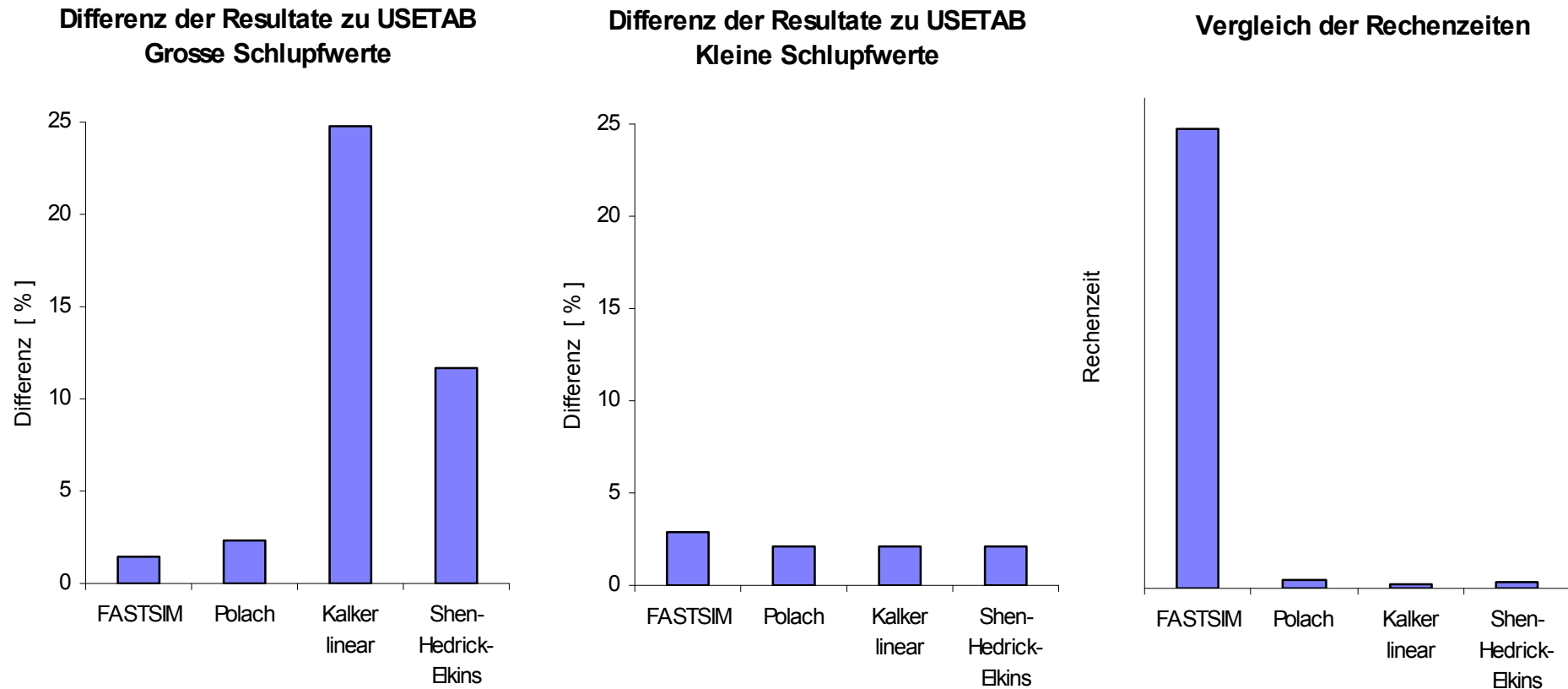


Polach, O., Proceedings of the 2nd International Conference on Railway Bogies and Running Gears, Budapest 1992, S.10-17

Polach, O., Vehicle System Dynamics (Suppl.) 33 (1999), S.728-739

Vergleich der Methode mit anderen Programmen

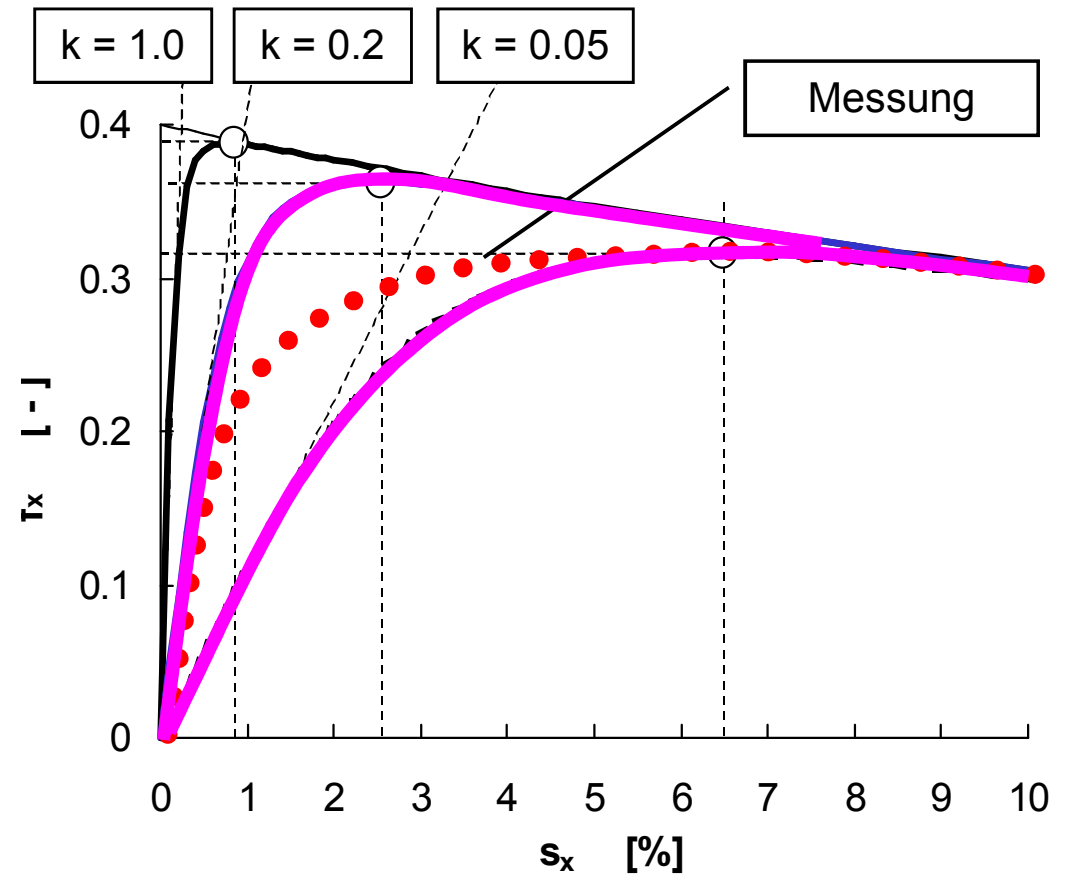
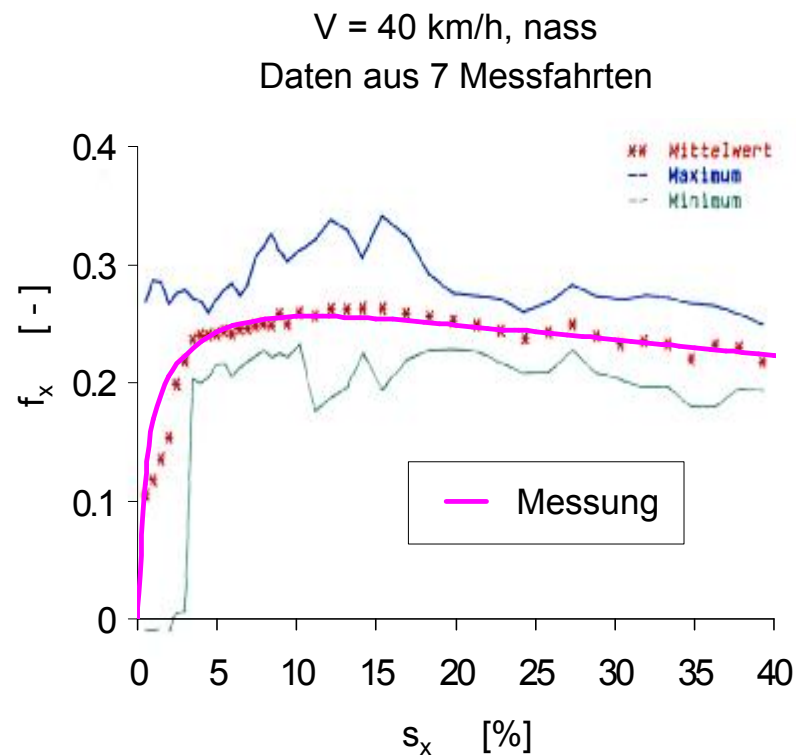
- Referenz: USETAB - Tabelle berechnet mit Programm CONTACT von Kalker
- Parametervariation: Grosse Schlupfwerte (0 - 1), kleine Schlupfwerte (0 - 0.01)
- Insgesamt 594 Rechenfälle



Arrus, P., De Pater, A. D., Meijers, P.: A comparison of rolling contact models for railway systems. Report No. LTM 1175, Delft University of Technology, 1998

Kraftschlussmodelle bei grossem Traktionsschlupf

- Standardmodelle zur Berücksichtigung der Antriebsdynamik:
 - Reibungszahl abhängig von der Schlupfgeschwindigkeit
 - Reduktion der Anfangssteigung (Faktor k)
- Unterschied zu Messungen bei niedriger Adhäsion

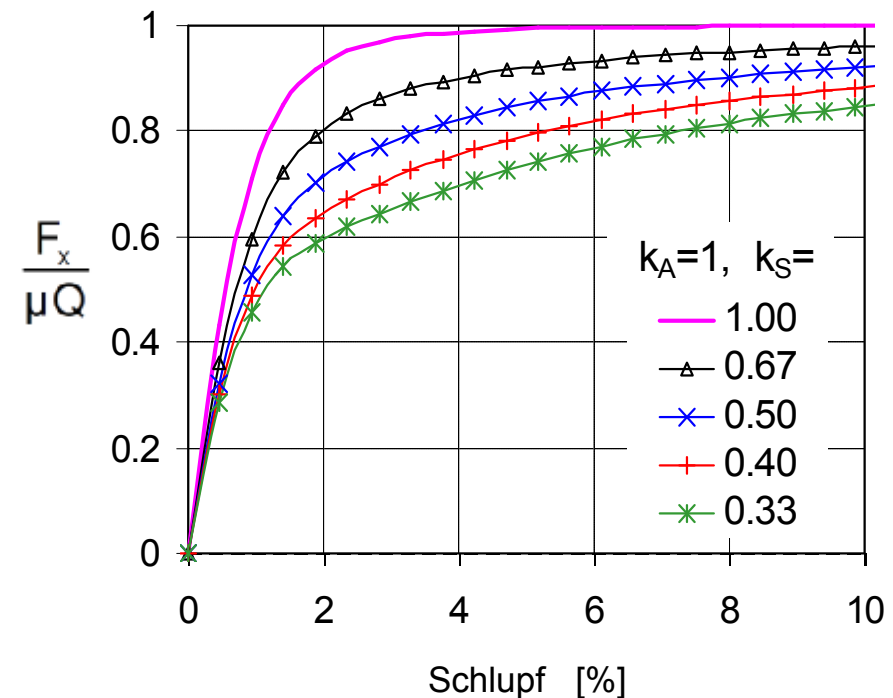
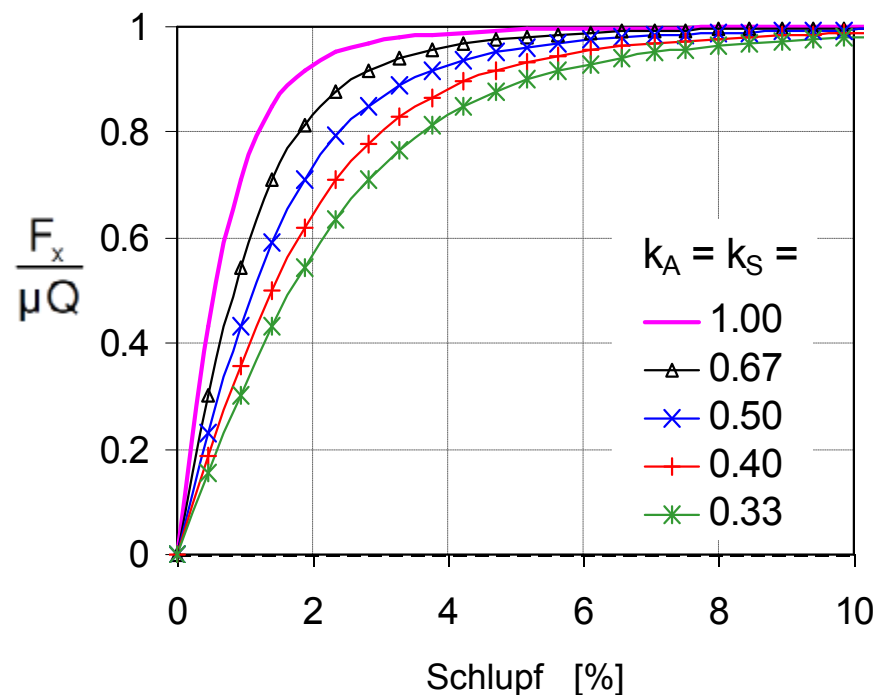


Polach, O., *Elektrische Bahnen*, Nr. 5/2001, S.219-230

Ergänzung der Methode bei grossen Schlüpfen und Zwischenschicht

- Unterschiedliche Abminderungsfaktoren k_A in der Haftfläche und k_S in der Gleitfläche
- Berücksichtigung der Nichtlinearität der Materialschicht im Kontakt

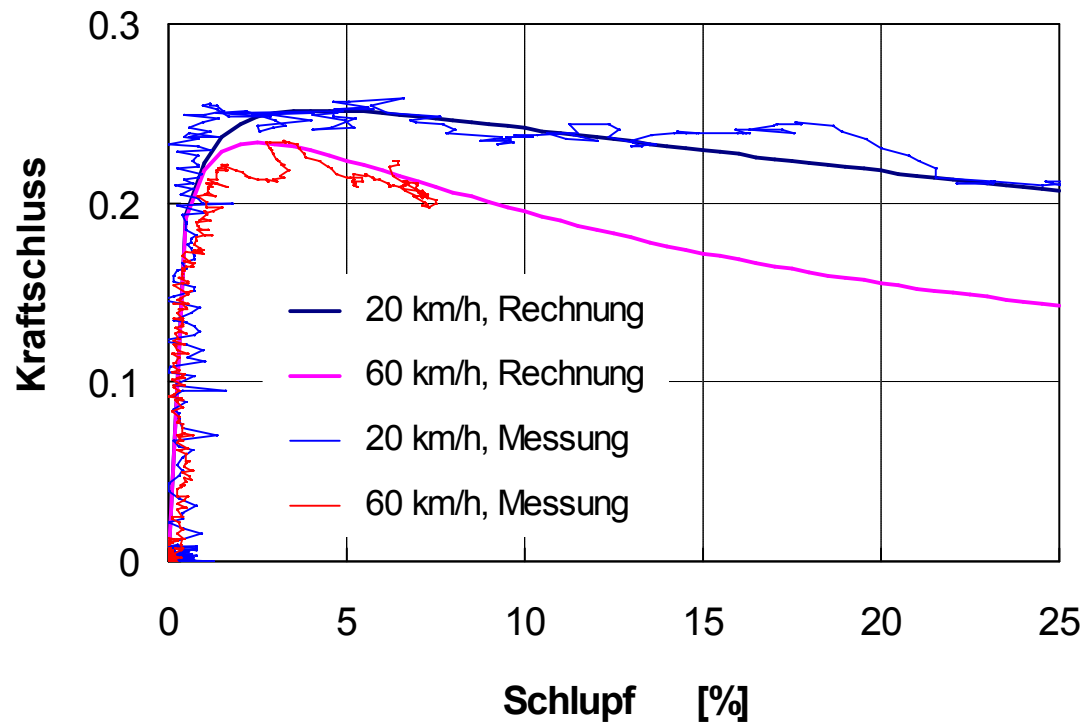
$$F = \iint_{(U)} \tau \, dx \, dy = \frac{2 \cdot Q \cdot \mu}{\pi} \left(\frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon^2} + \arctan \varepsilon \right), \quad \text{mit} \quad \varepsilon = \frac{2}{3} \frac{C \cdot \pi \cdot a^2 \cdot b}{Q \cdot \mu} s$$



Polach, O., Wear 258 (2005), S. 992-1000

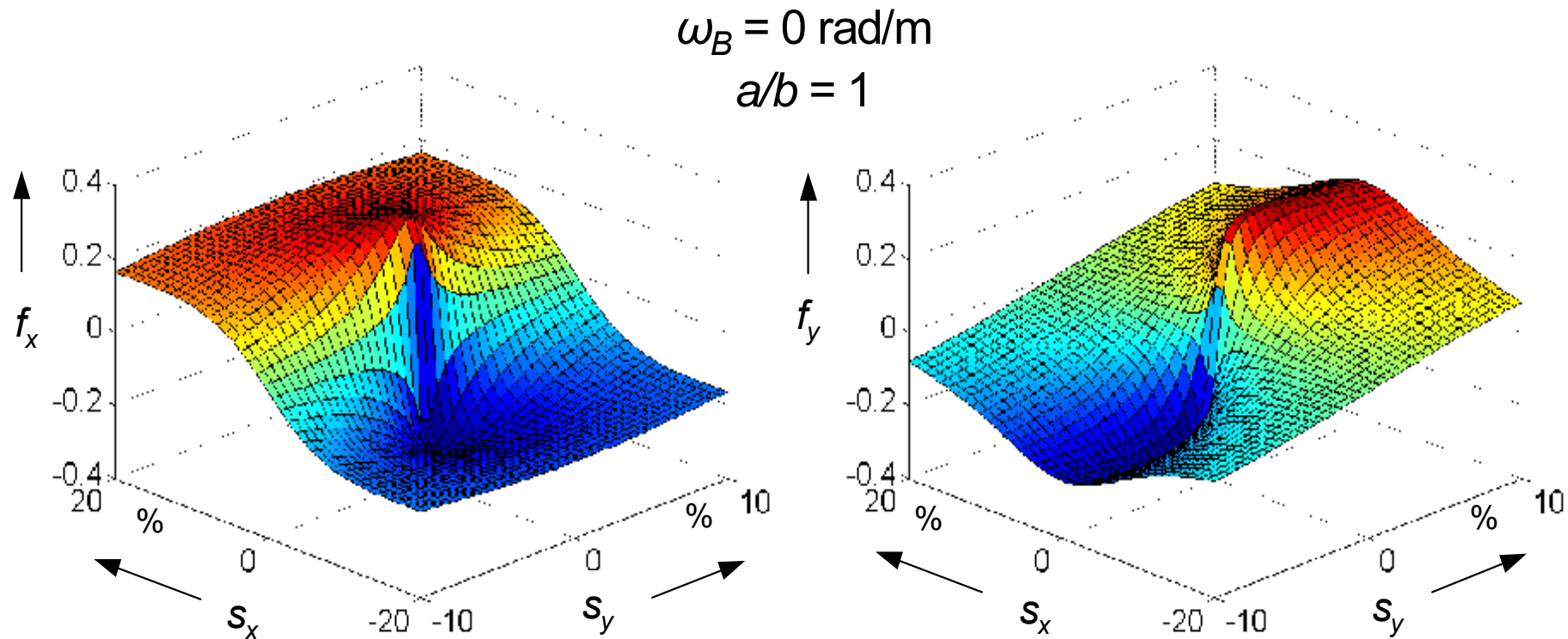
Zusammenhang von Längs-, Quer- und Bohrschlupf in der erweiterten Methode

- Identifikation der Parameter des Rad-Schiene-Modells entsprechend den gemessenen Kraftschluss-Kennlinien in Längsrichtung
- Einfluss vom Längs-, Quer- und Bohrschlupf, Form der Kontaktellipse und Geschwindigkeit berücksichtigt



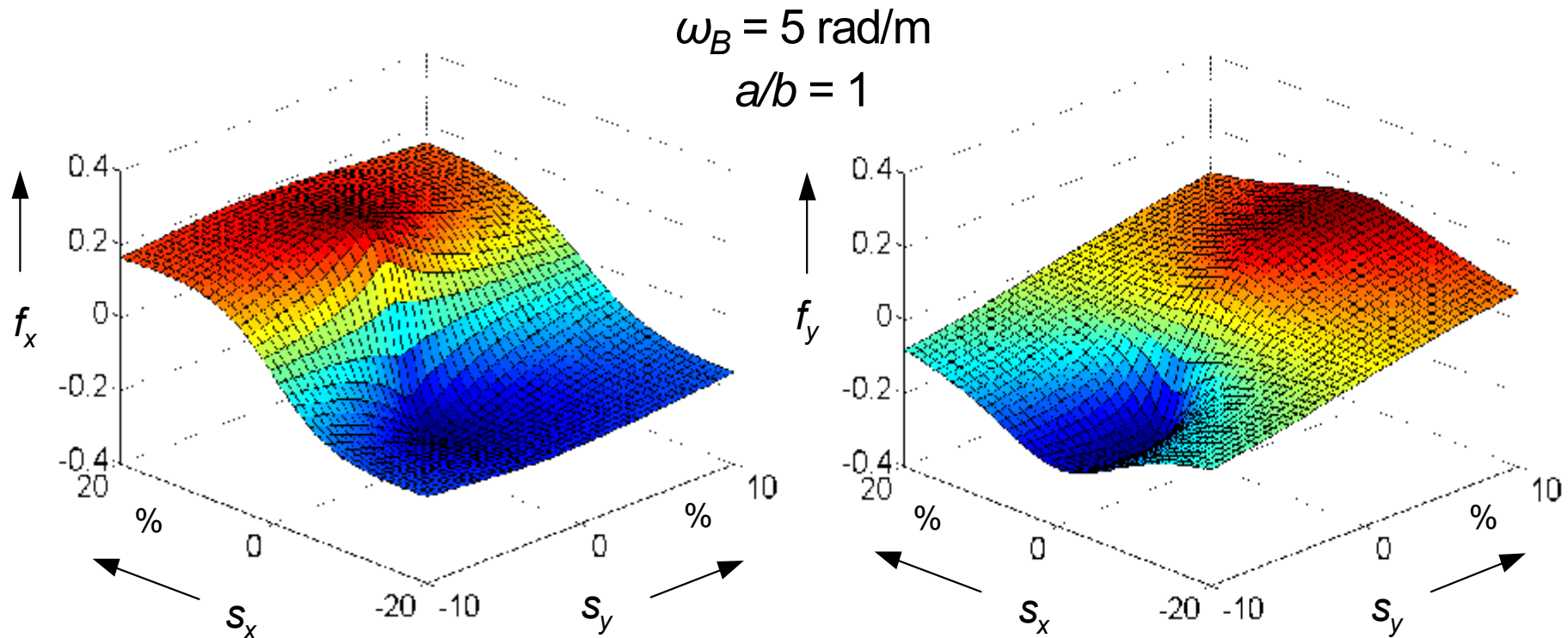
Zusammenhang von Längs-, Quer- und Bohrschlupf in der erweiterten Methode

- Identifikation der Parameter des Rad-Schiene-Modells entsprechend den gemessenen Kraftschluss-Kennlinien in Längsrichtung
- Einfluss vom Längs-, Quer- und Bohrschlupf, Form der Kontaktellipse und Geschwindigkeit berücksichtigt



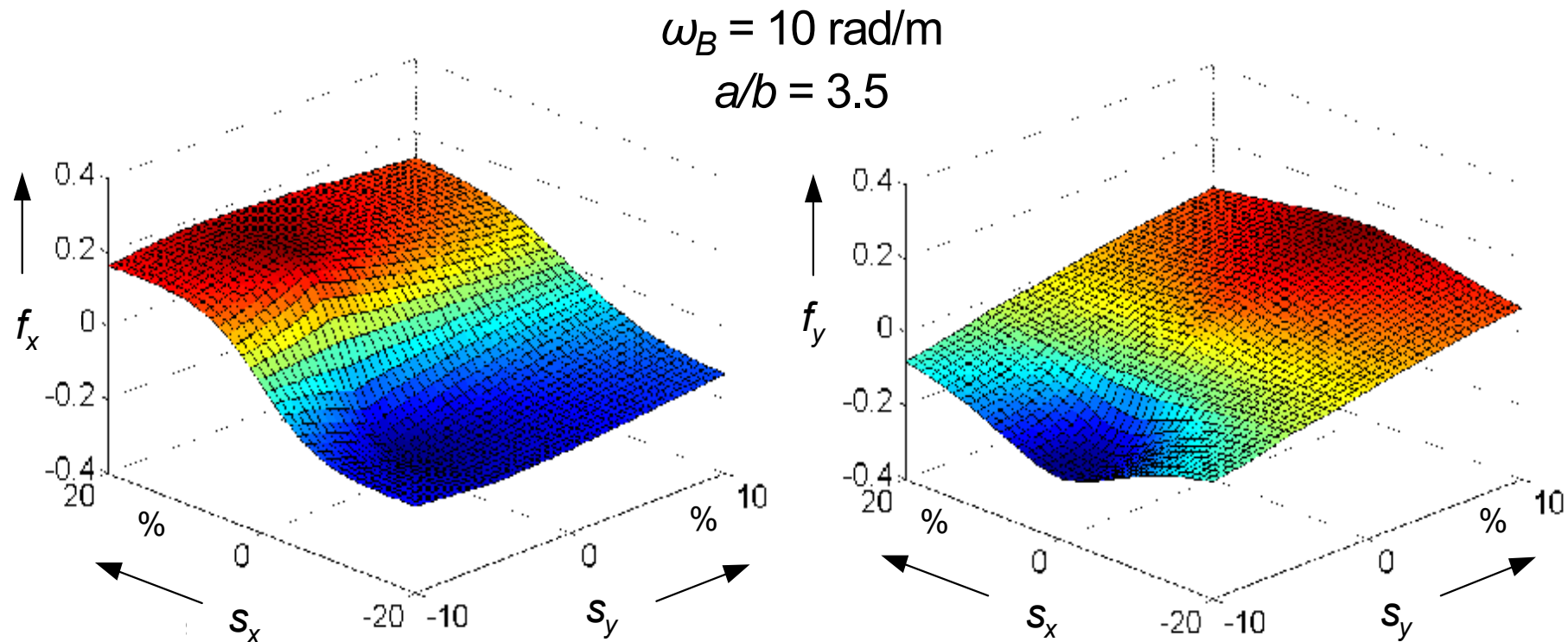
Zusammenhang von Längs-, Quer- und Bohrschlupf in der erweiterten Methode

- Identifikation der Parameter des Rad-Schiene-Modells entsprechend den gemessenen Kraftschluss-Kennlinien in Längsrichtung
- Einfluss vom Längs-, Quer- und Bohrschlupf, Form der Kontaktellipse und Geschwindigkeit berücksichtigt



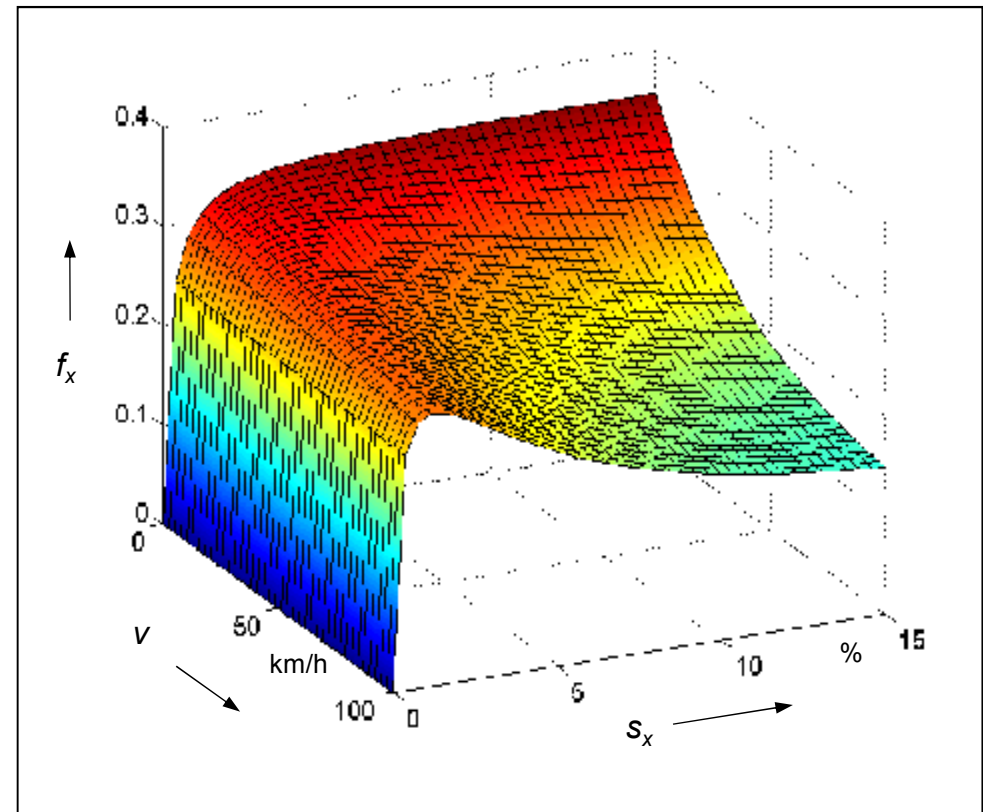
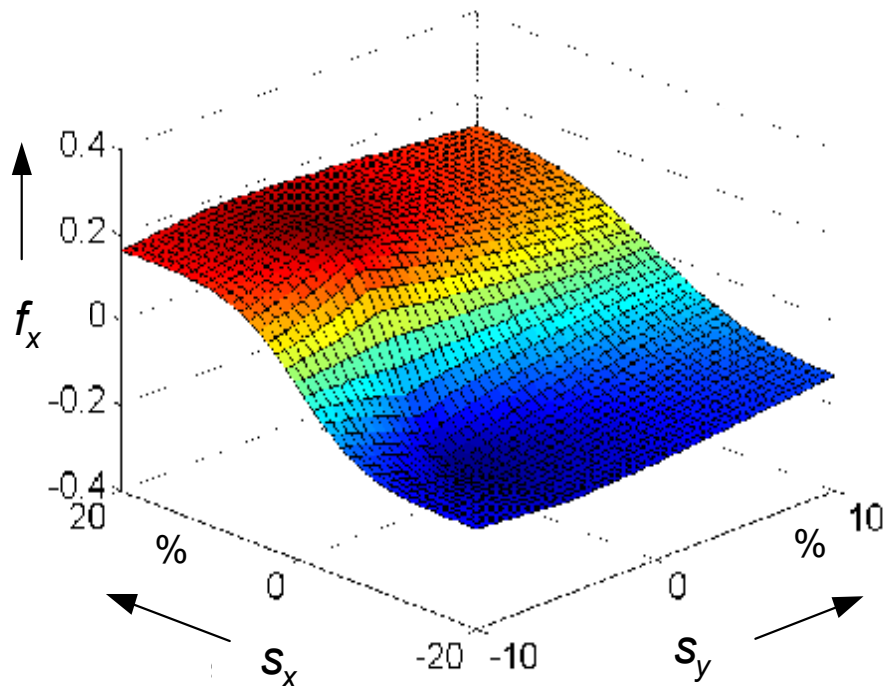
Zusammenhang von Längs-, Quer- und Bohrschlupf in der erweiterten Methode

- Identifikation der Parameter des Rad-Schiene-Modells entsprechend den gemessenen Kraftschluss-Kennlinien in Längsrichtung
- Einfluss vom Längs-, Quer- und Bohrschlupf, Form der Kontaktellipse und Geschwindigkeit berücksichtigt



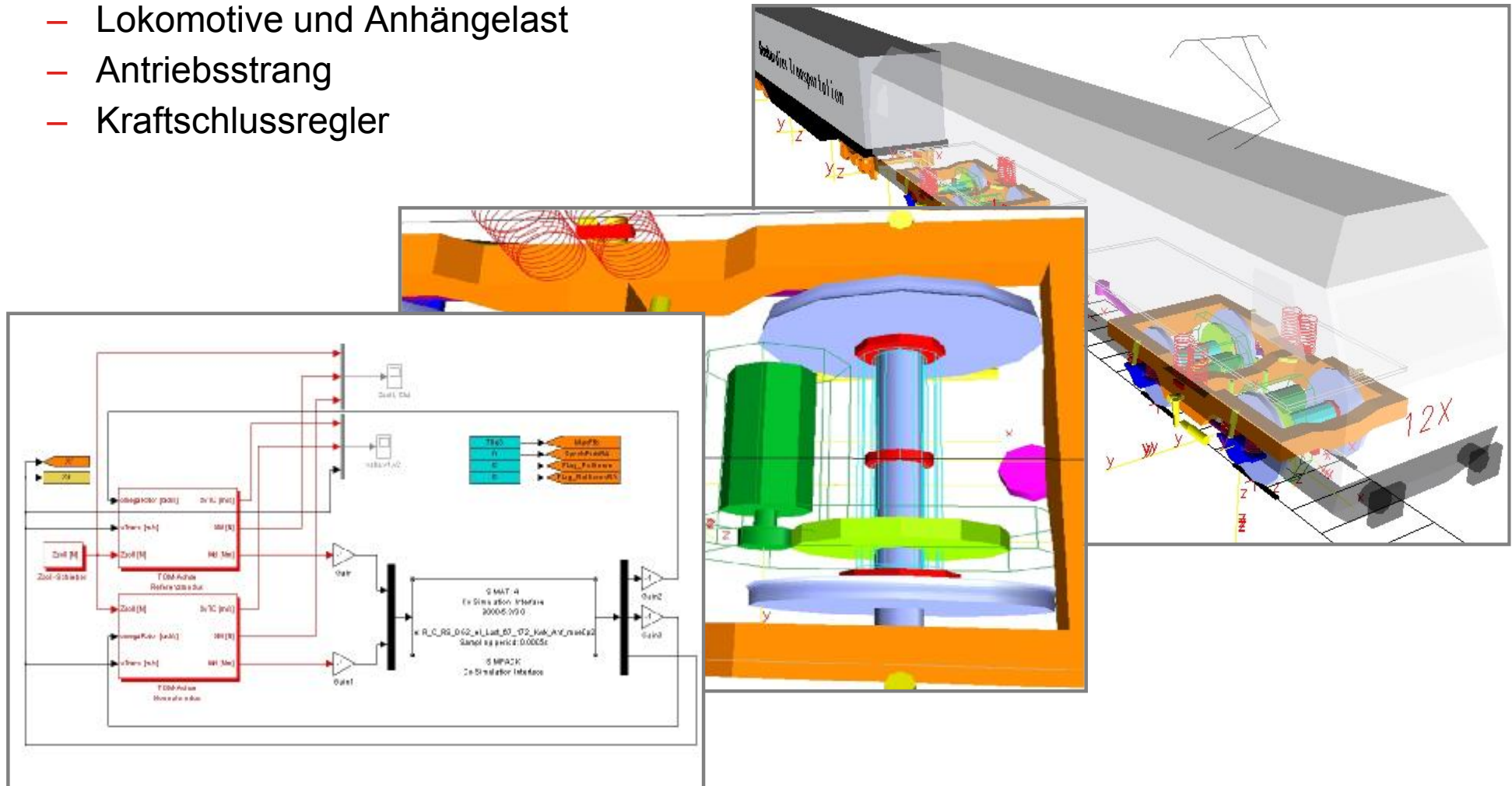
Zusammenhang von Längs-, Quer- und Bohrschlupf in der erweiterten Methode

- Identifikation der Parameter des Rad-Schiene-Modells entsprechend den gemessenen Kraftschluss-Kennlinien in Längsrichtung
 - Einfluss vom Längs-, Quer- und Bohrschlupf, Form der Kontaktellipse und Geschwindigkeit berücksichtigt
- Einfluss der Fahrgeschwindigkeit



Simulation der Fahrzeugdynamik und Kraftschlussregelung

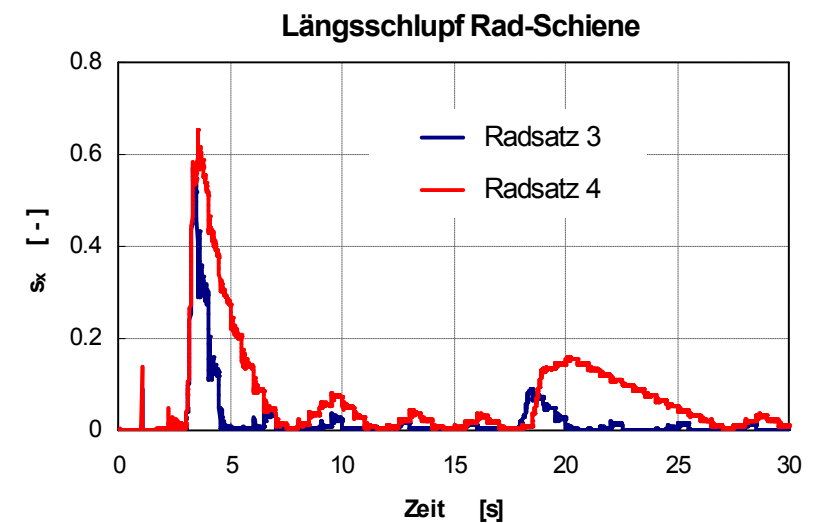
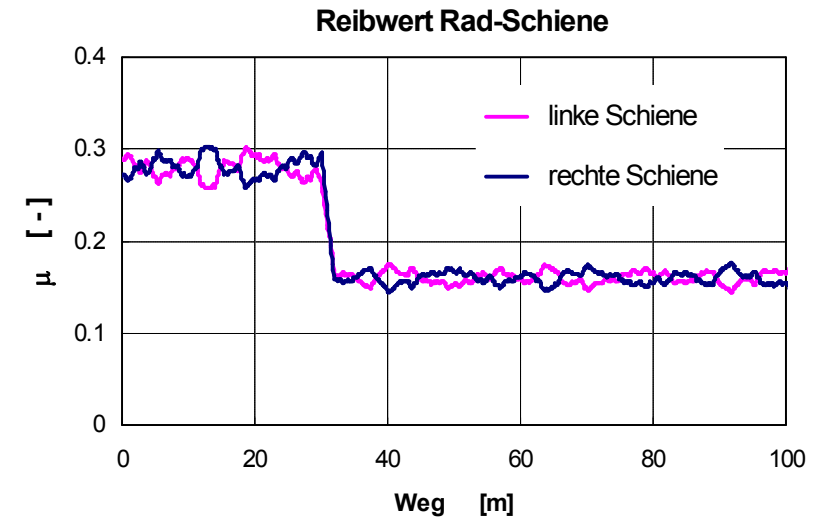
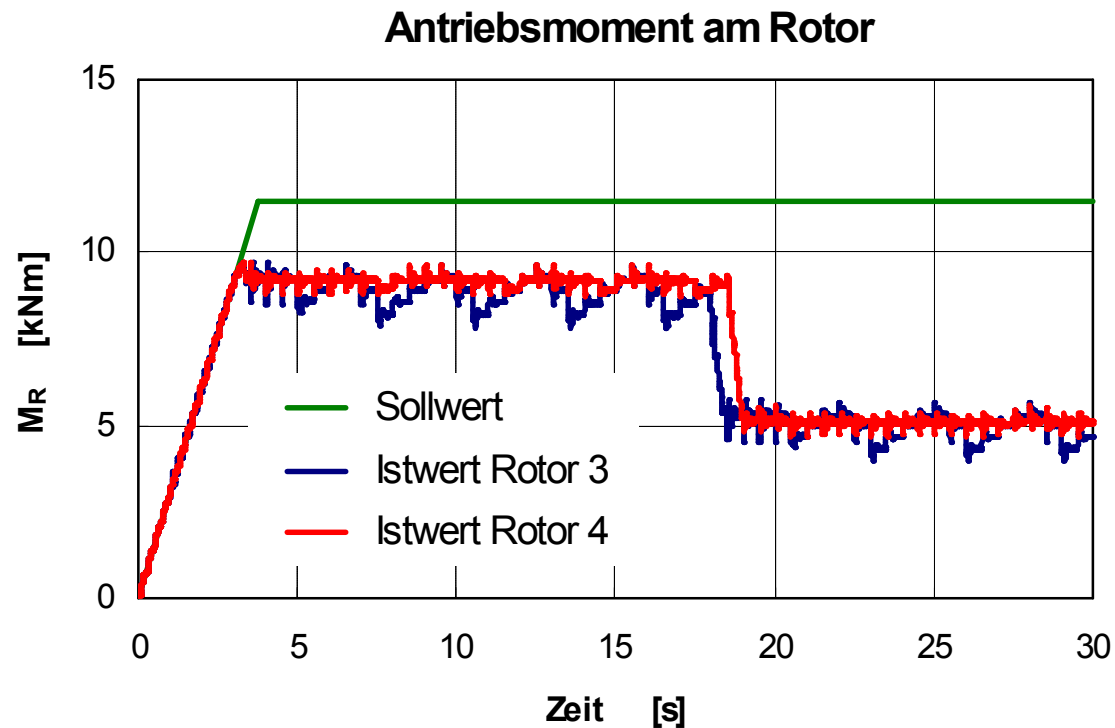
- Modell:
 - Lokomotive und Anhängelast
 - Antriebsstrang
 - Kraftschlussregler



Simulation der Fahrzeugdynamik und Kraftschlussregelung

■ Modell:

- Lokomotive und Anhängelast
- Antriebsstrang
- Kraftschlussregler



Inhalt

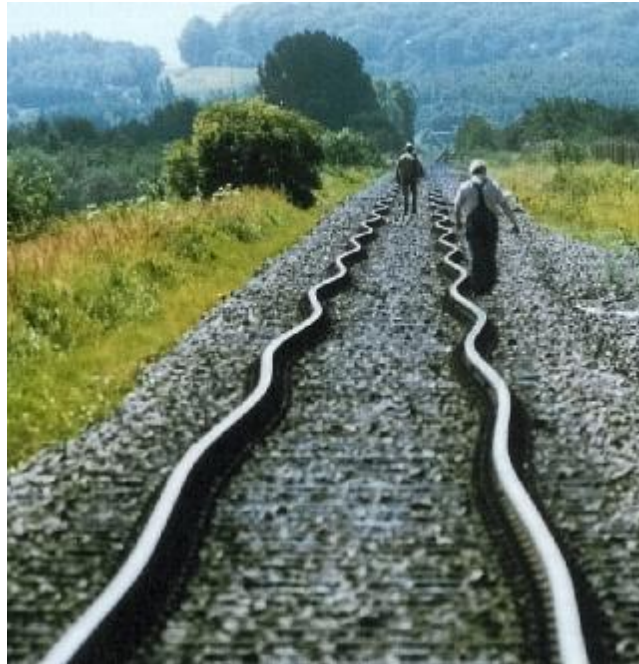
- **Kontakt Rad-Schiene – Das Kernelement der Eisenbahntechnik**
- **Berührgeometrie Radsatz-Gleis**
- **Berechnung der Kraftschlusskräfte**
- **Rad-Schiene-Kontakt und Stabilität**
- **Ausblick und Zusammenfassung**

Geschwindigkeitsrekord 1955

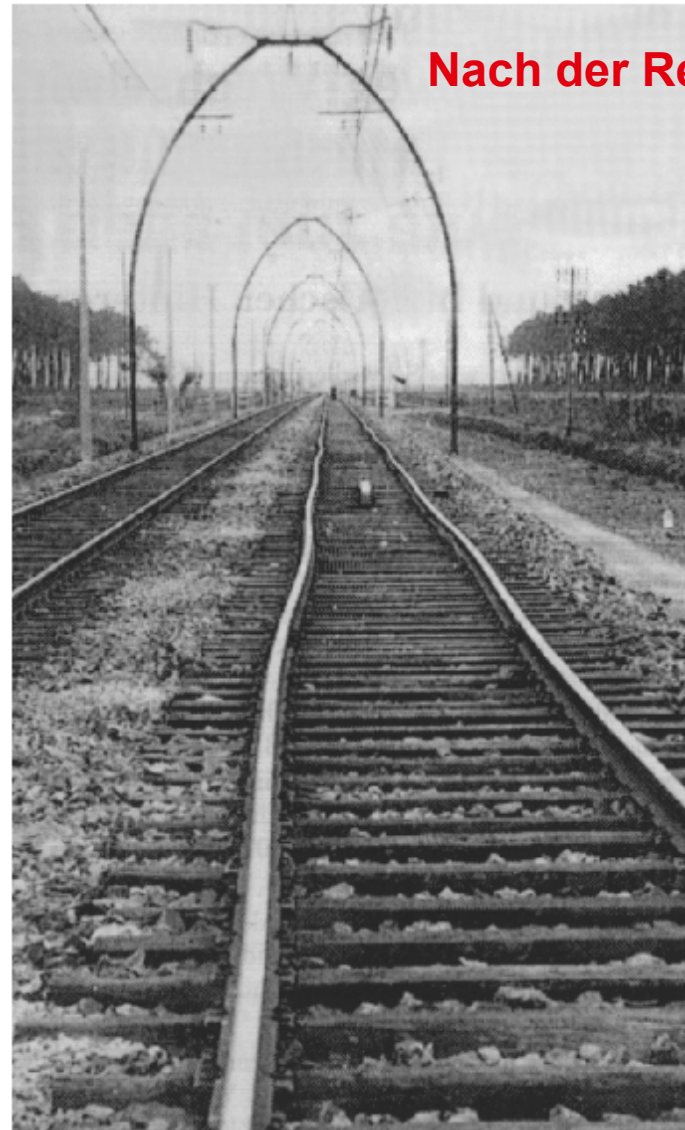
- 29. März 1955
- SNCF Lokomotive BB 9004
- Geschwindigkeit 331 km/h



Gleisverwerfung durch instabilen Lauf



Quelle: Eisenbahn-Revue International, 2003



Nach der Rekordfahrt...

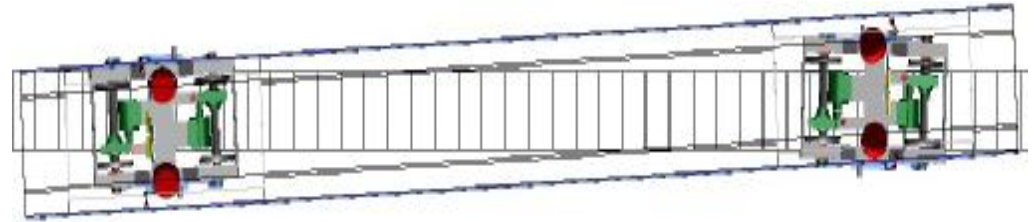
Quelle: La Vie du Rail, 1981



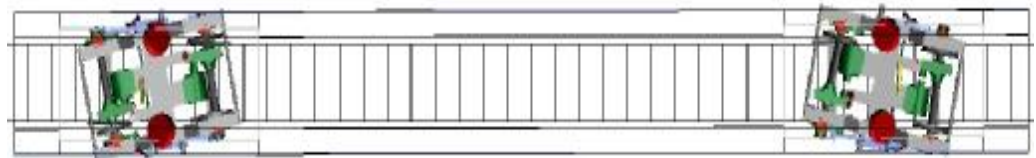
Quelle: CHARMEC Triennial Report/Review/Plans, 2004

Selbsterregte Schwingungen der Schienenfahrzeuge

- Instabilität des Kastens
 - Frequenz 1 - 2 Hz
 - niedrige äquivalente Konizität
 - grosse Kastenbewegungen
 - Beeinträchtigung des Fahrkomforts
 - bei Fahrzeugen mit weicher Sekundärfederung keine Überschreitung der Grenzwerte der Fahrsicherheit

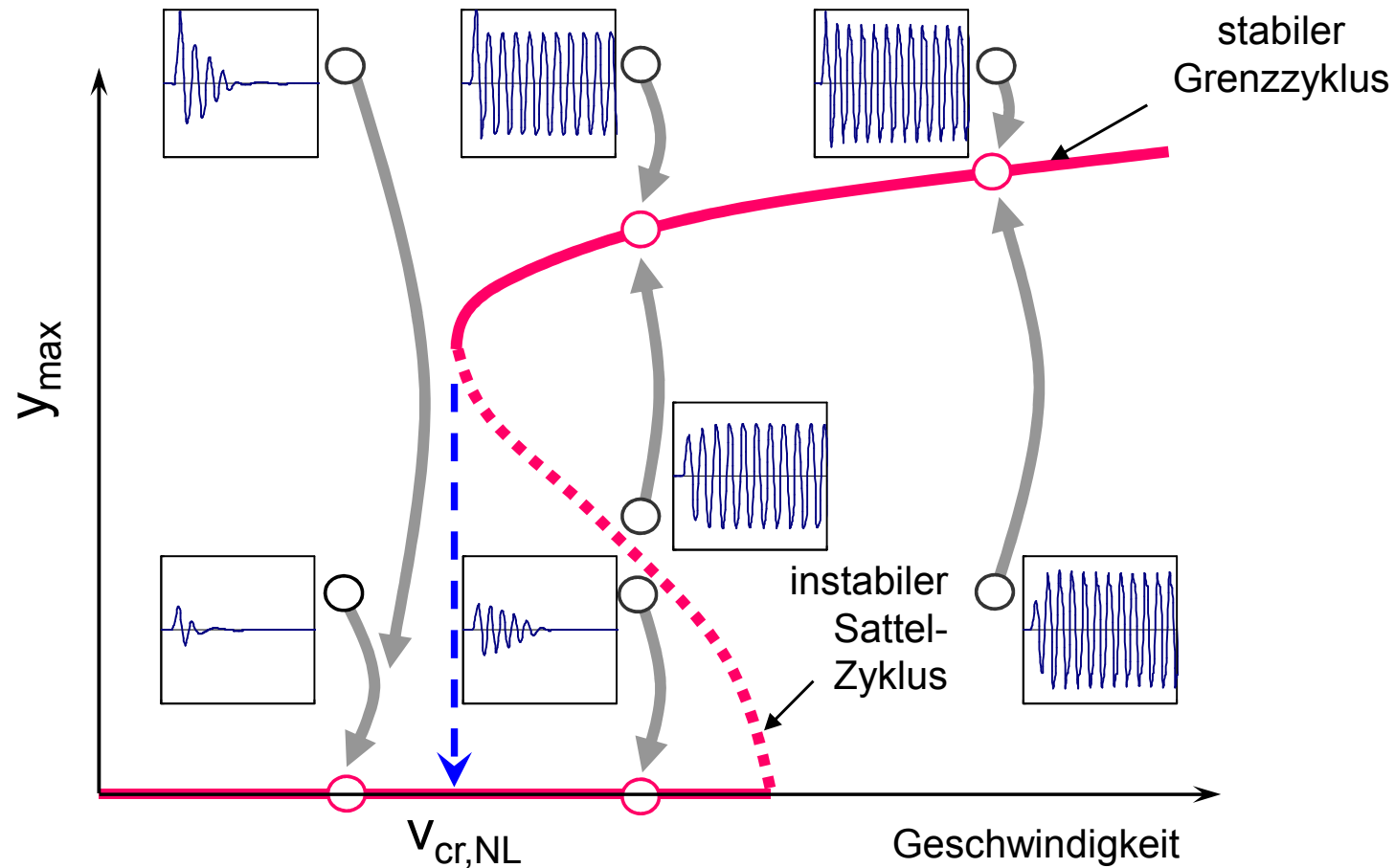


- Drehgestellinstabilität
 - Frequenz 3 - 9 Hz
 - hohe äquivalente Konizität
 - sicherheitsrelevant
 - Kräfte zwischen Rad und Schiene nehmen mit steigender Geschwindigkeit zu
 - Risiko von Gleisverschiebung und Entgleisung



Nichtlineare Stabilitätsanalyse: Verzweigungsdiagramm

- Verzweigungsdiagramm stellt die Attraktoren der Radsatz-Querauslenkungen dar
- „Brute-Force“ Methode: Ein Satz numerischer Simulationen

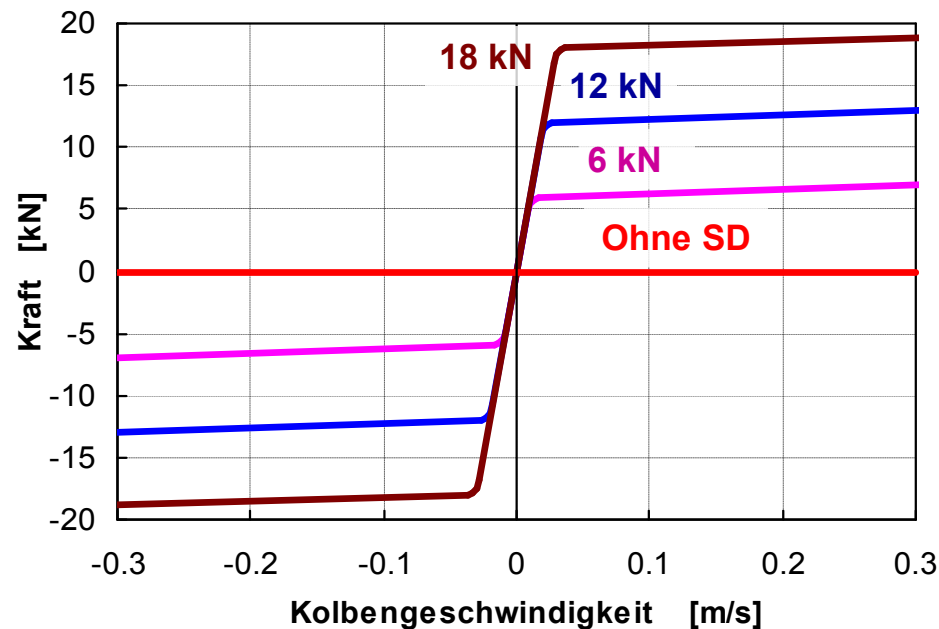


Vergleich der Methoden der Stabilitätsanalyse

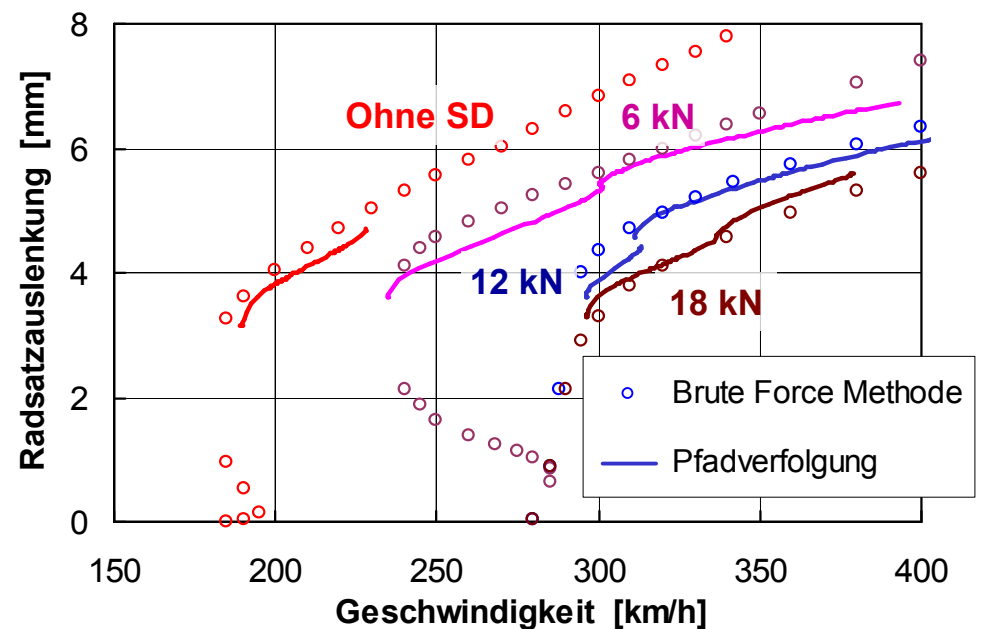
- Vergleich der Methoden in Zusammenarbeit mit DLR Oberpfaffenhofen:
 - „Brute Force“ Methode
 - Pfadverfolgung (Programm PATH)
- Pfadverfolgung kann nur periodische Lösungen identifizieren
- Brute Force Methode ist unabhängig von der Periodizität und kann auch den instabilen Sattel-Zyklus identifizieren



Kennlinie des Schlingerdämpfers



Verzweigungsdiagramm

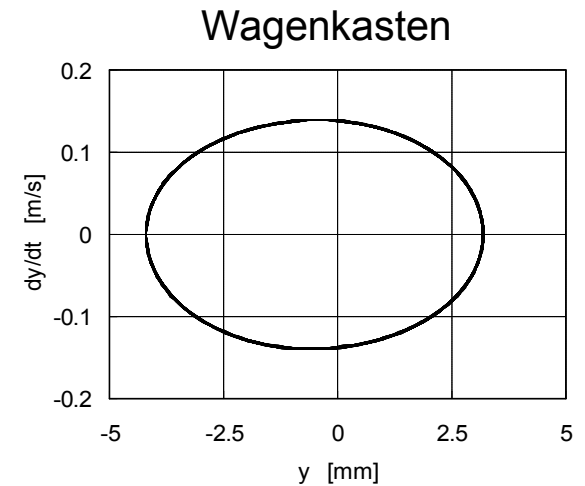
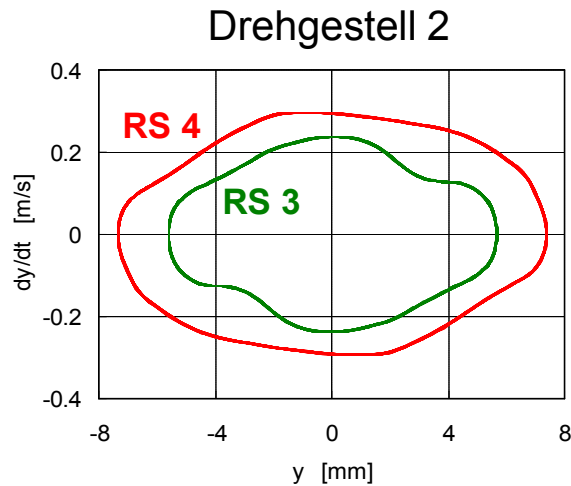
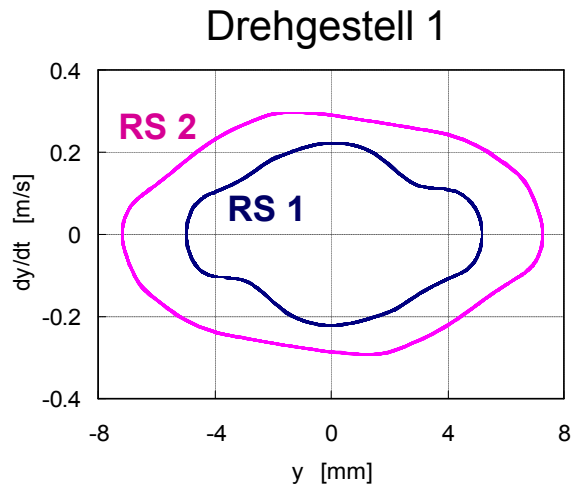


Polach, O., Kaiser, I., *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics* (eingereicht – auf Einladung)

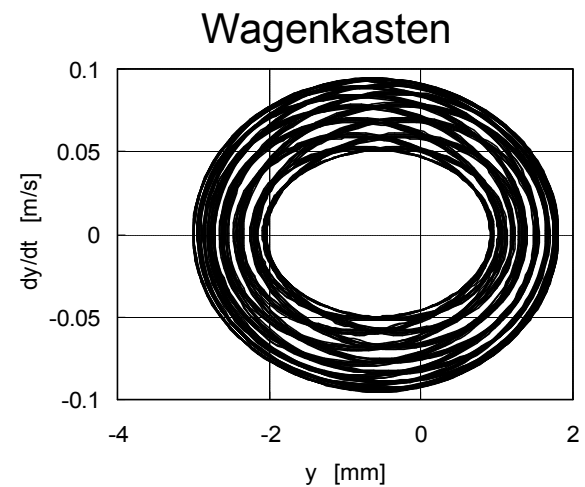
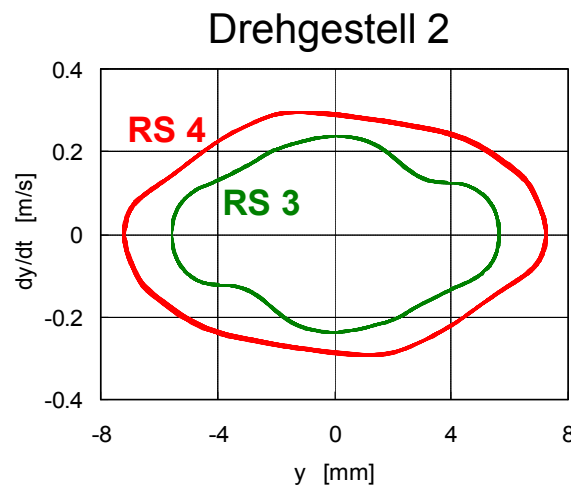
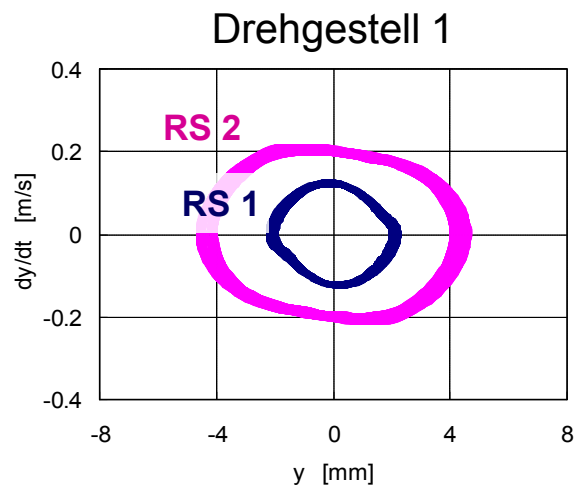
Beispiele der Phasendiagramme

■ Periodische Lösung

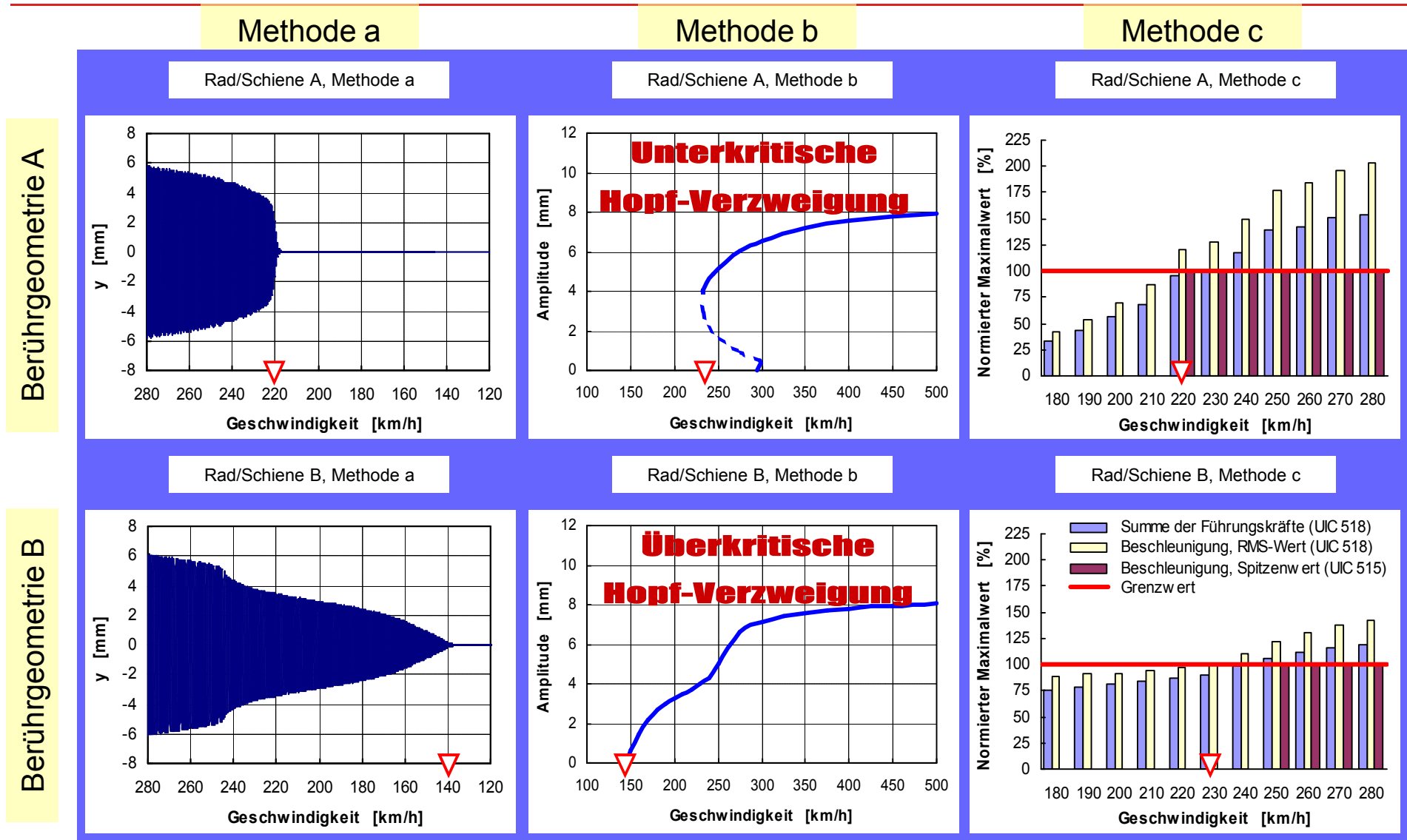
$V = 350 \text{ km/h}$



■ Quasi-periodische Lösung



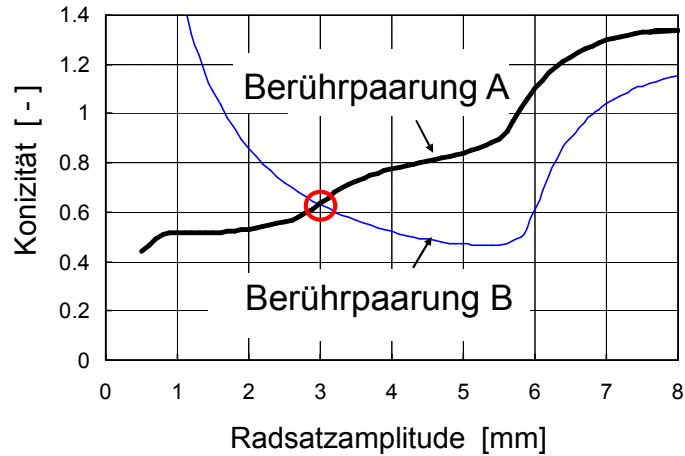
Methoden der Stabilitätsbeurteilung und Nichtlinearität der Berührgeometrie Radsatz-Gleis



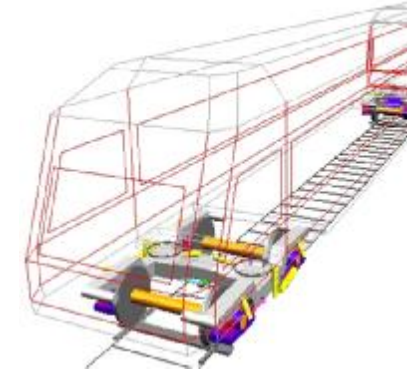
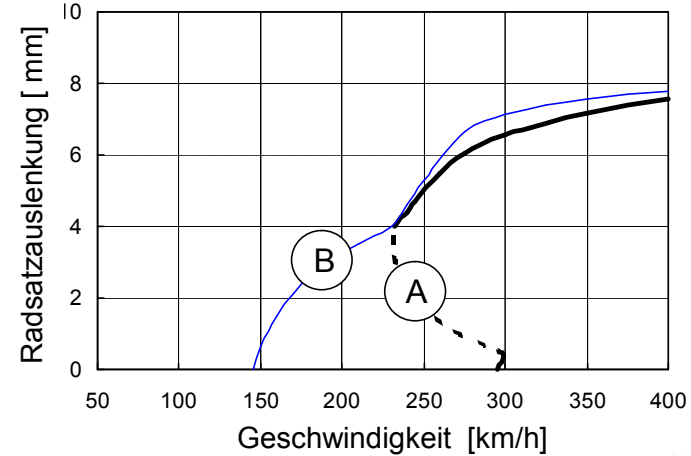
Polach, O., Proc. IMechE, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit 220 (2006), S.13-27

Nichtlinearität der Berührgeometrie Radsatz-Gleis und die Form des Verzweigungsdiagramms

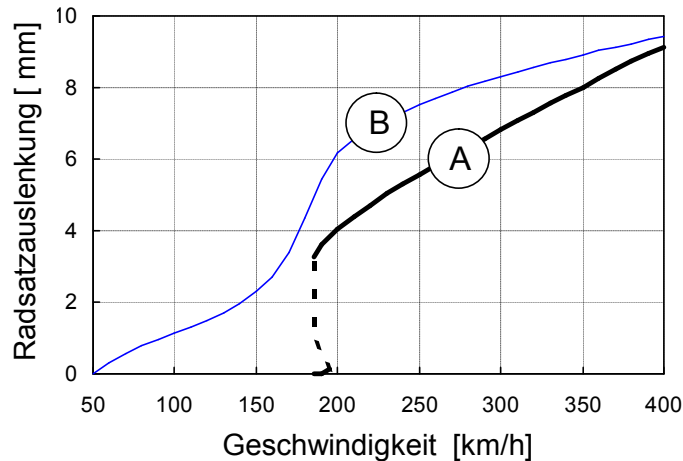
Äquivalente Konizität



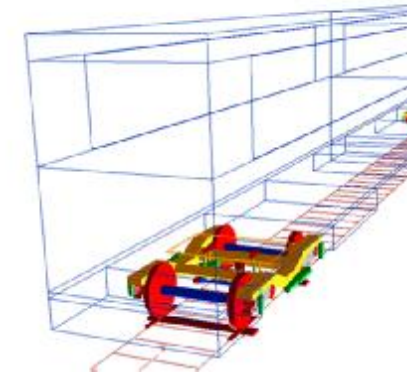
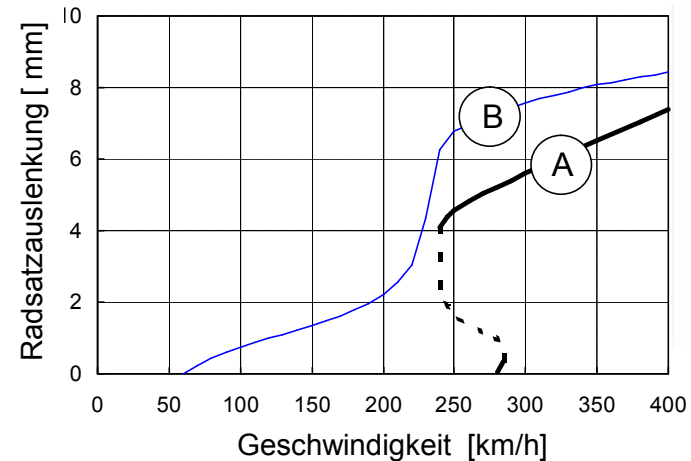
Verzweigungsdiagramm: Fahrzeug 1



Verzweigungsdiagramm: Fahrzeug 2



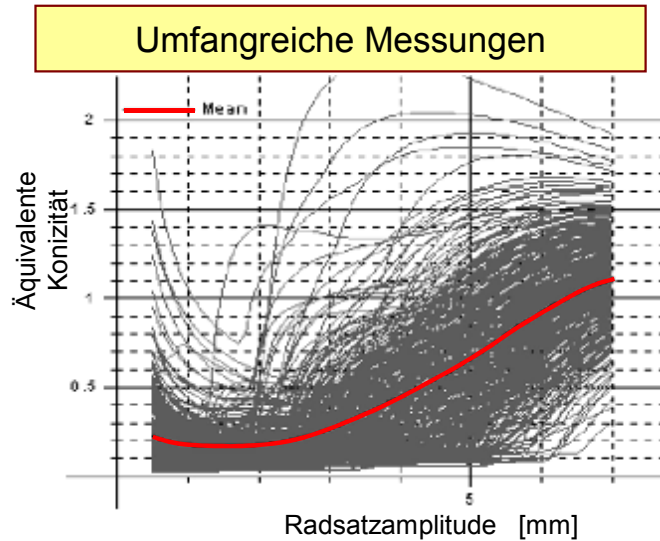
Verzweigungsdiagramm: Fahrzeug 3



Polach, O., *Vehicle System Dynamics (Suppl.)* 48 (2010), S.19-36

Zweiparametrische Beschreibung der Berührgeometrie Rad-Schiene

■ Stand der Technik



Andere Charakteristik?

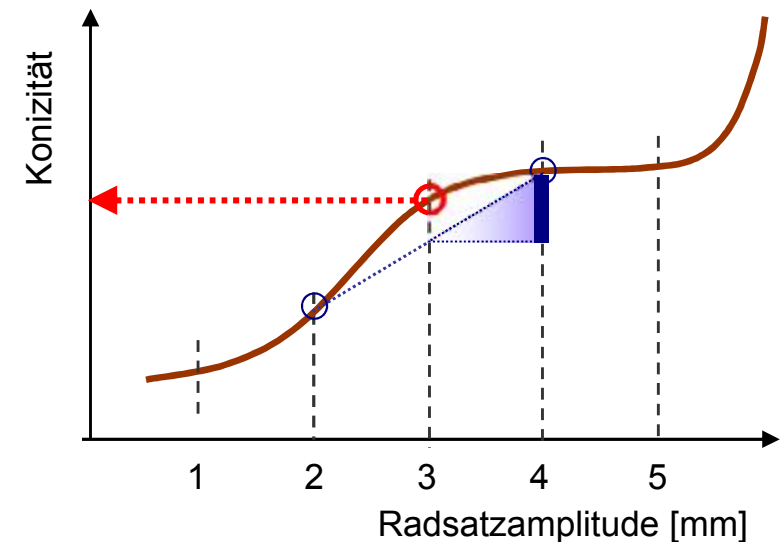
Ein Wert der äquivalenten Konizität



0.XX

■ Zweiparametrische Beschreibung

- Parameter 1 – Niveau-Parameter:
 - Äquivalente Konizität für Radsatzamplitude von 3 mm
 - Beurteilung im Bezug auf die Grenzwerte der Instabilität
- Parameter 2 – Nichtlinearitätsparameter:
 - Neigung der Funktion der äquivalenten Konizität
 - Beurteilung der Eigenschaften an der Stabilitätsgrenze und der Empfindlichkeit auf Queranregung



Polach, O., Proceedings of the 21st IAVSD Symposium, Stockholm, 17-21 August 2009

Inhalt

- **Kontakt Rad-Schiene – Das Kernelement der Eisenbahntechnik**
- **Berührgeometrie Radsatz-Gleis**
- **Berechnung der Kraftschlusskräfte**
- **Rad-Schiene-Kontakt und Stabilität**
- **Ausblick und Zusammenfassung**

Ausblick: Simulationen statt Messfahrten

- EU Forschungsprojekt Dynotrain:
 - Interoperabilität
 - Anwendung der Simulationen zur Fahrzeugzulassung
- Team: 22 Partners
- Dauer: Juni 2009 – Mai 2013
- Der Autor ist Leiter des Arbeitspakets „Modellbildung und Validierung“



Bruni S., Vinolas, J., Berg, M., Polach, O., Stichel, S., Vehicle System Dynamics 49 (2011), S.1021-1072 (auf Einladung)

- Kontakt zwischen Rad und Schiene spielt in Dynotrain eine wichtige Rolle:
 - offener Punkt in TSI (Tech. Spezifikationen für Interoperabilität)
 - entscheidend für fahrzeugdynamische Simulationen
- Streckenversuche Oktober 2010:
 - Messfahrten in Deutschland, Frankreich, Italien und Schweiz, total 7500 km
 - Kontinuierliche Messung der Gleislage und der Schienenprofile
 - Total 10 Messradsätze, 300 Messgrößen, mehr als 3 Terabyte Messdaten



Zusammenfassung

- Kontakt zwischen Rad und Schiene hat grosse Auswirkungen auf die Eisenbahntechnik
- Mehrkörper-Simulationen der Schienenfahrzeugdynamik ermöglichen kontinuierliche Entwicklung der Eisenbahntechnik, reduzieren Risiken und Kosten
- Eine genaue und detailtreue Modellierung der Berührung Rad-Schiene ist das Kernelement der Schienenfahrzeugdynamik
- Die Präsentation hat einige Beiträge des Autors auf diesem Gebiet vorgestellt:
 - Optimierung des Radprofils
 - Schnelle Methode der Kraftschlussberechnung für Simulation der Fahrtechnik und Antriebsdynamik
 - Zusammenhang der Nichtlinearität der Berührgeometrie Radsatz-Gleis und der Stabilitätsanalyse der Schienenfahrzeuge