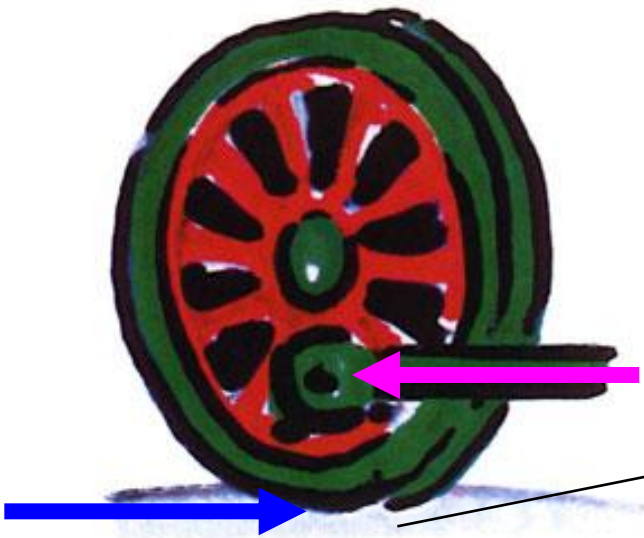


Wie kommt die Antriebs-
Bremskraft vom Rad auf die Schiene ?

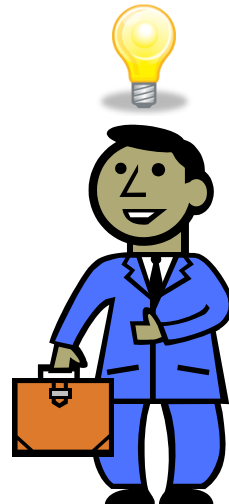


dynamisches Kraftschluss-Schlupfmodell zur Beschreibung von Bremsvorgängen

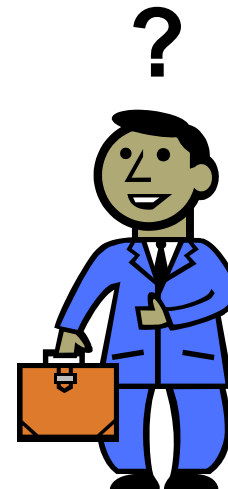
statisches
Kraftschlussmodell
(Laufdynamik)



Idee



Fahrversuch
Rätsel

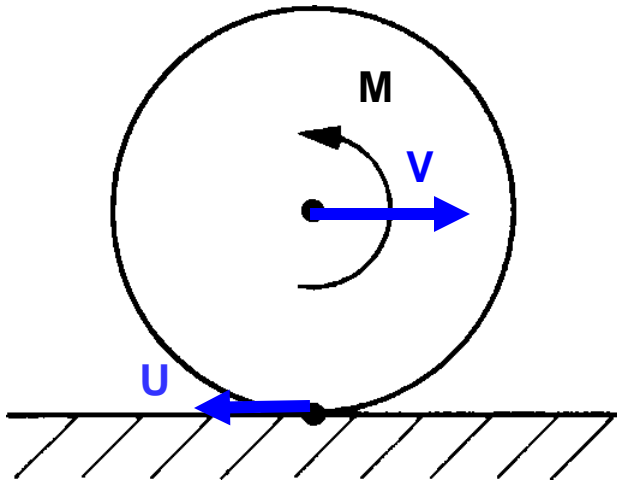


dynamisches
Kraftschlussmodell
(Bremsen-Antreiben)





Bremsendes Rad



mit V = Fahrgeschwindigkeit
 U = Radumfanggeschwindigkeit
 M = Bremsmoment

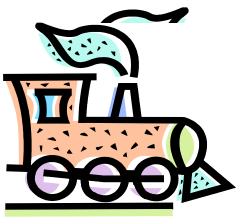
folgt $U < V$

bzw. $W_x = U - V < 0$ Längsgleitgeschwindigkeit

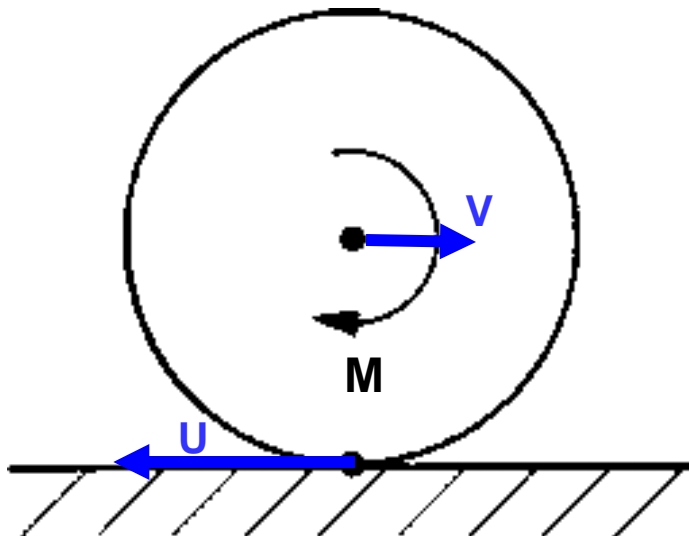
bzw. $s_x = \frac{W_x}{V}$ Bremsschlupf

$$-1 \leq s_x \leq 0$$

$s_x = -1 = \frac{0 - V}{V}$ Blockieren



Treibendes Rad



mit V = Fahrgeschwindigkeit
 U = Radumfanggeschwind.
 M = Antriebsmoment

folgt

$$U > V$$

bzw.

$$W_x = U - V > 0 \quad \text{Längsgleitgeschw.}$$

bzw.

$$s_x = \frac{W_x}{U}$$

Antriebsschlupf

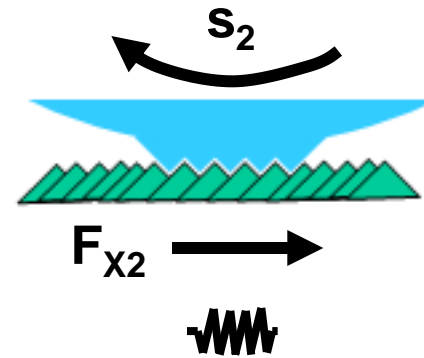
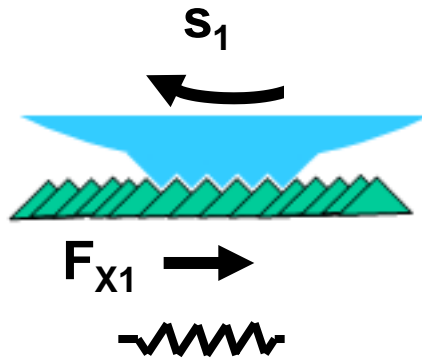
$$0 \leq s_x \leq 1$$

$$s_x = 1 = \frac{U - 0}{U}$$

Schleudern



Schlupf, Stauchung und Längskraft im Radaufstandspunkt

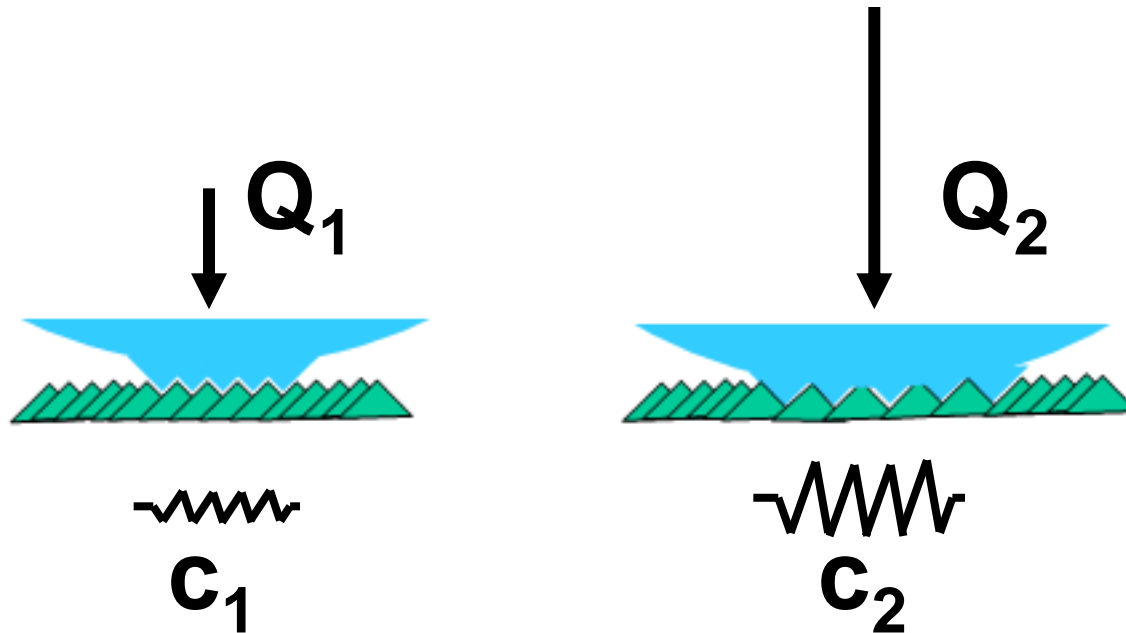


$$F_x = f(s)$$

$$s \uparrow \Rightarrow F_x \uparrow$$



Radaufstandskraft und Längssteifigkeit im Aufstandspunkt

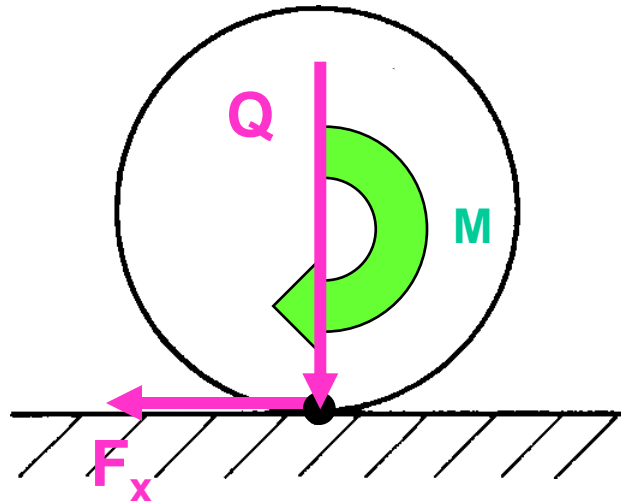


$$c = f(Q)$$

$$Q \uparrow \Rightarrow c \uparrow$$



Kräfte am Rad



Q = Radaufstandskraft

f = Kraftschlussbeiwert

F_x = Brems- Antriebskraft

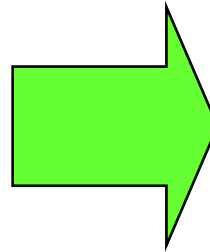
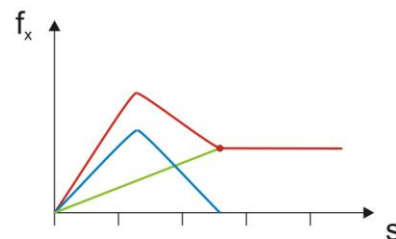
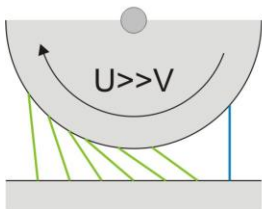
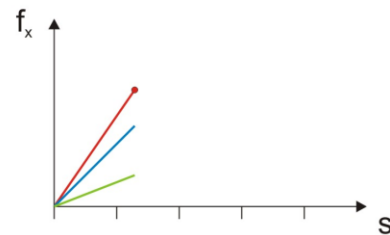
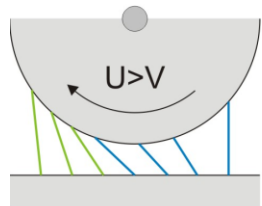
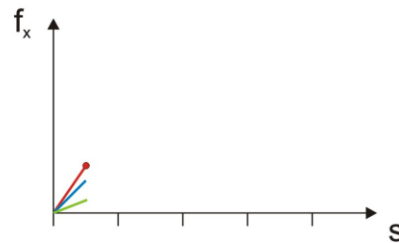
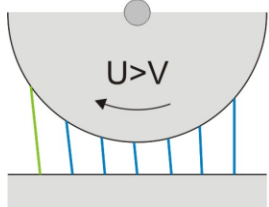
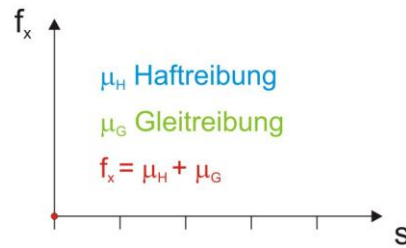
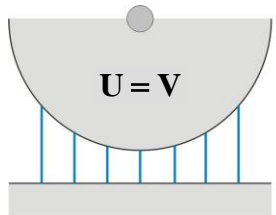
$$F_x = f(s, Q)$$

$$f = f(s) \quad ?$$

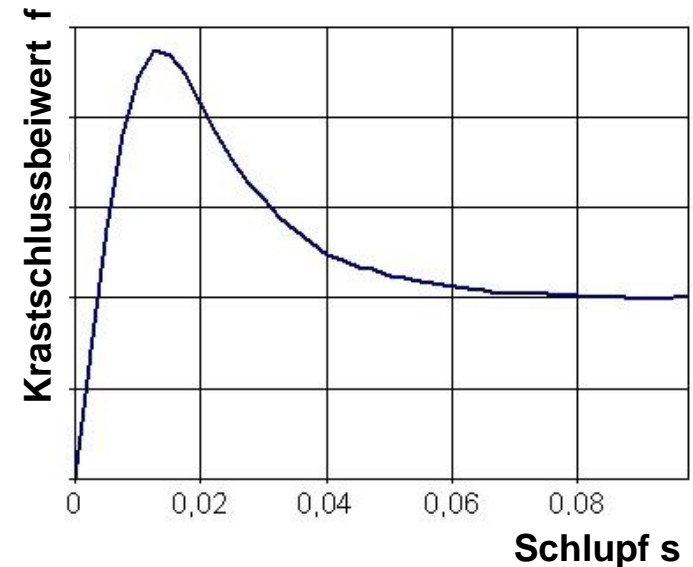
$$F_x = f \cdot Q$$



Kraftschluss-Schlupffunktion (vereinfachtes Denkmodell - Bürstenmodell)

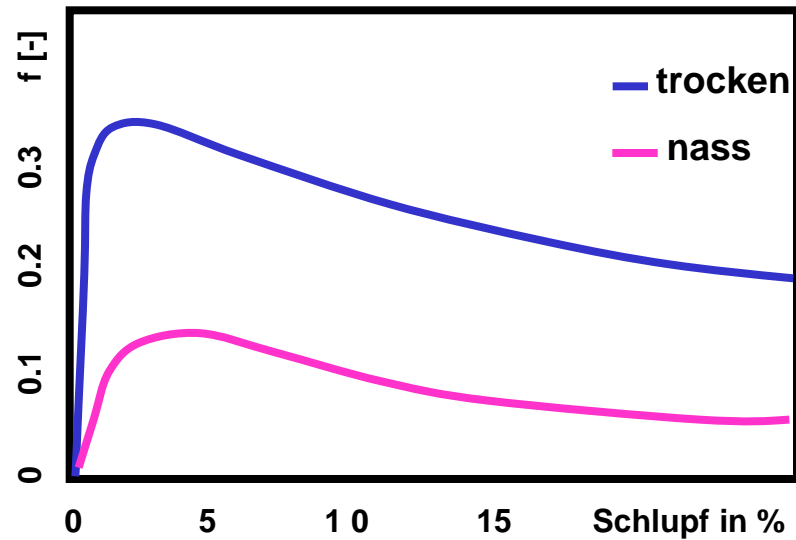


Simulation einer Tangentialkraft mit dem Bürstenmodell





Einfluss von Nässe

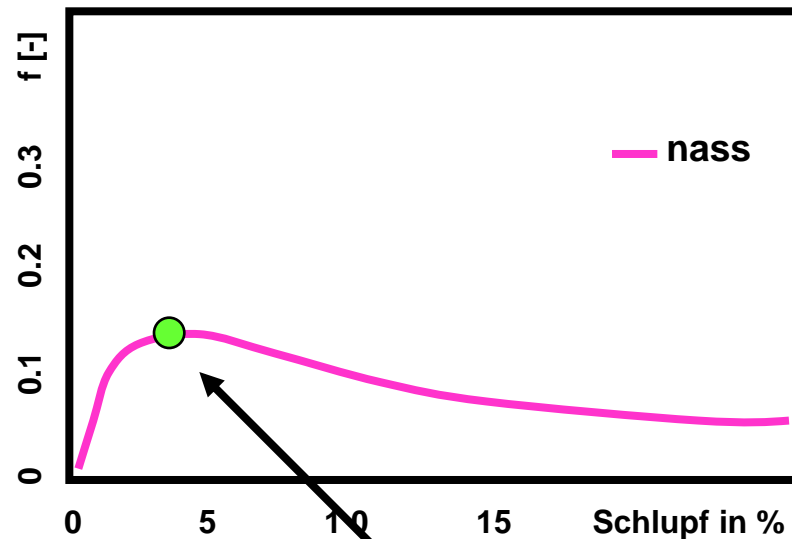


?



Die Idee

Das optimale Gleitschutzsystem

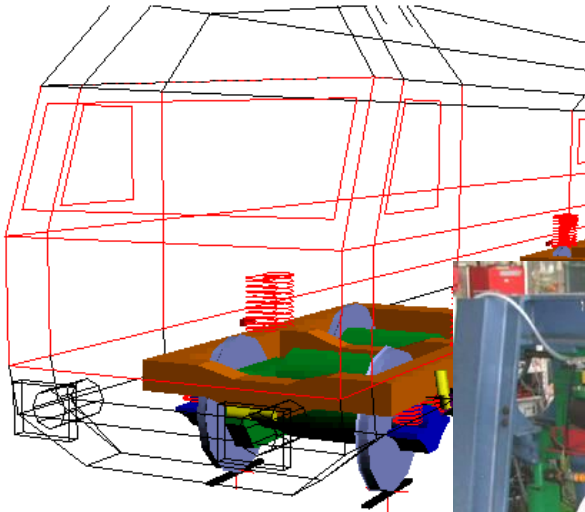


**Gleitschutzregler mit
Optimalschlupfsuche
 $f(s)/ds=0$**



Die Idee

Simulation



Prüfstand



Durchgehende Entwicklungsumgebung

Fahrversuche

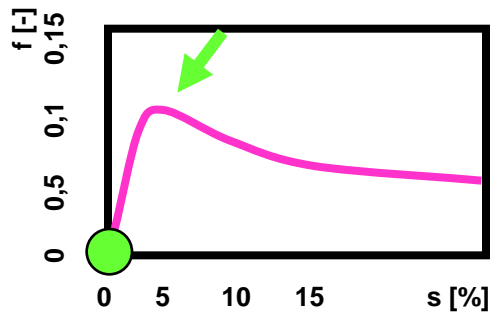


?

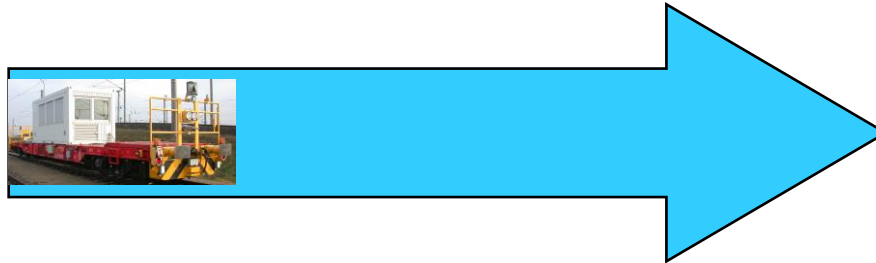


Versuch Rätsel

Gleitschutzregler mit Optimalschlupfsuche



80 km/h

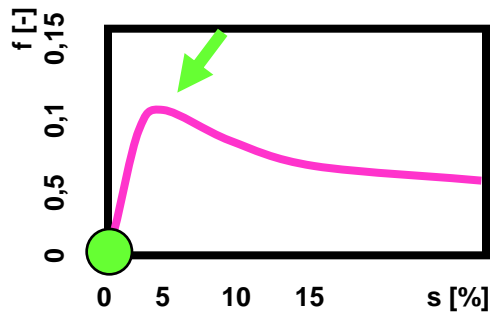


**Bremsweg
ca. 250 m**



Versuch Rätsel

Gleitschutzregler mit Optimalschlupfsuche

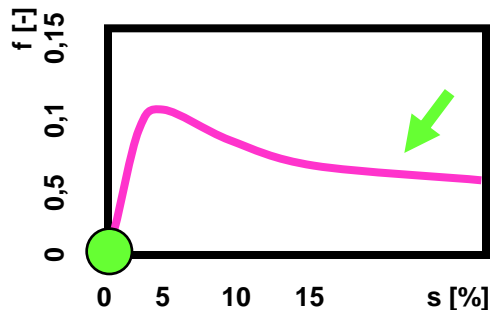


80 km/h



Bremsweg
ca. 250 m

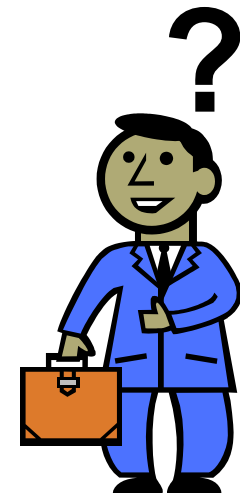
Gleitschutzregler mit Hochschlupf



80 km/h

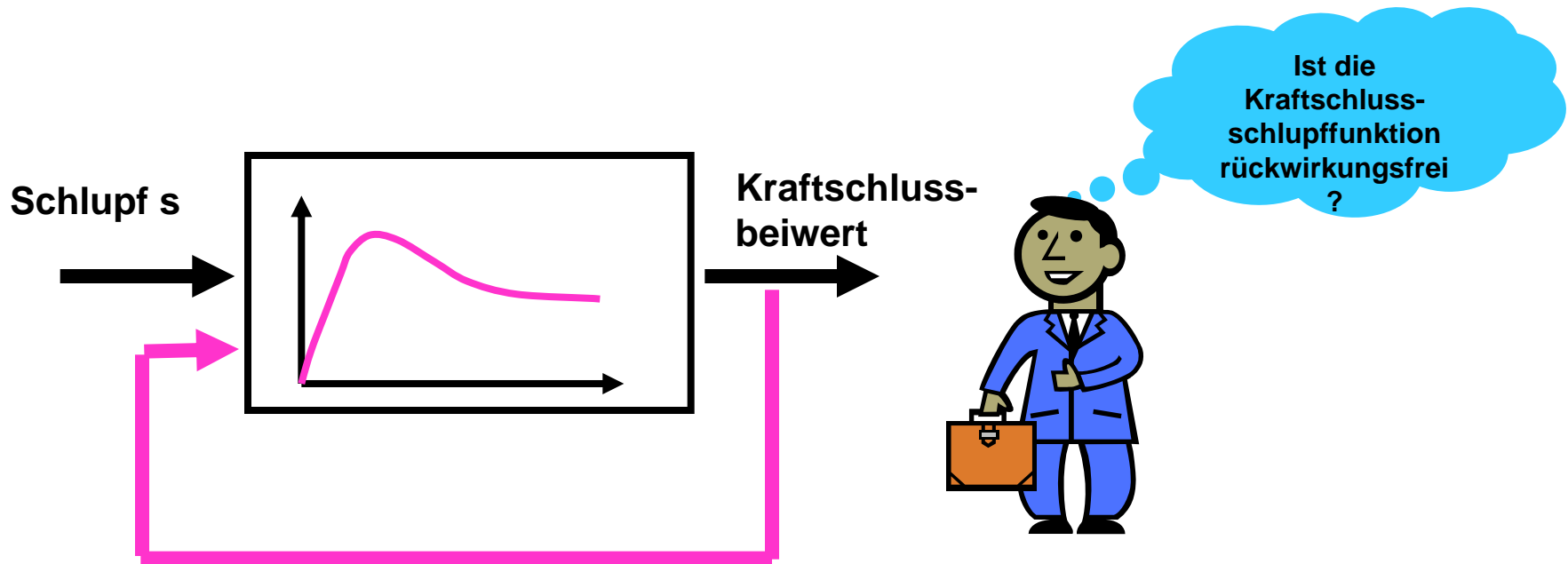


Bremsweg
ca. 150 m



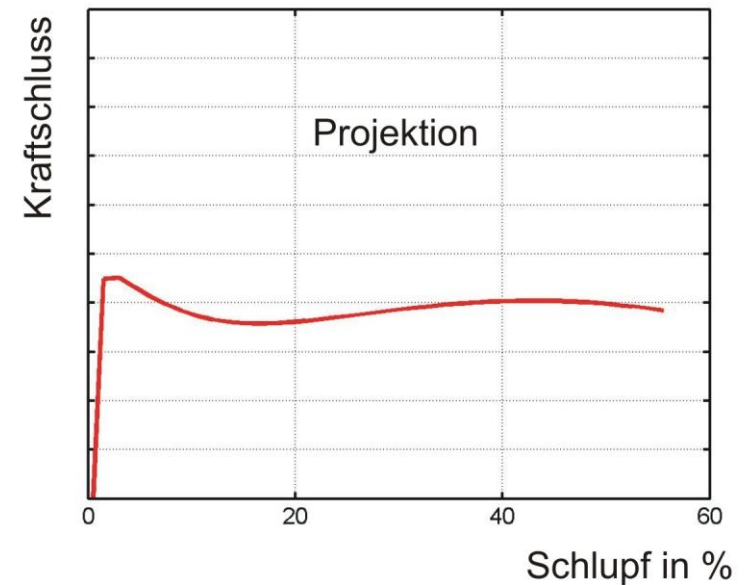
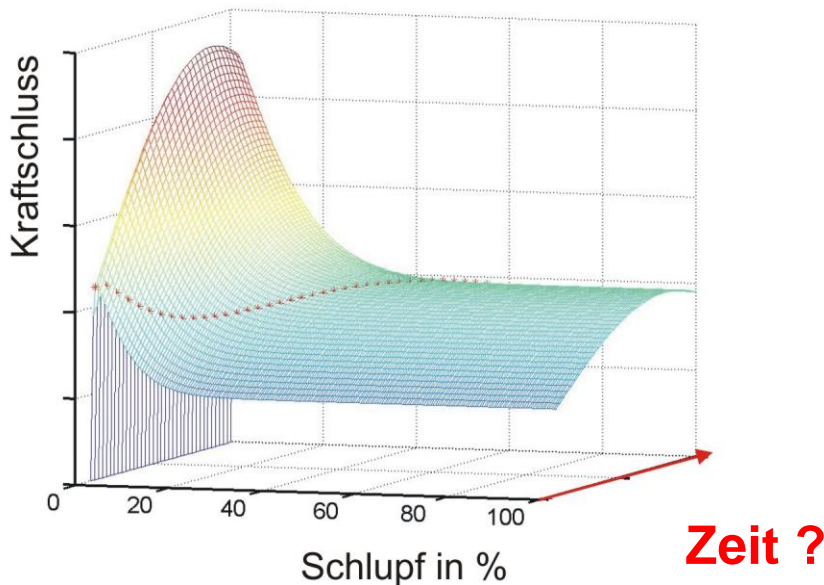


dynamisches Kraftschlussmodell (Bremsen-Antreiben)





dynamisches Kraftschlussmodell (Dreidimensionales Kraftschlussmodell)

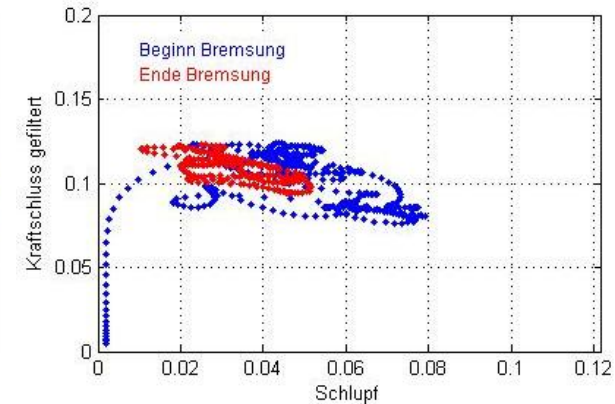
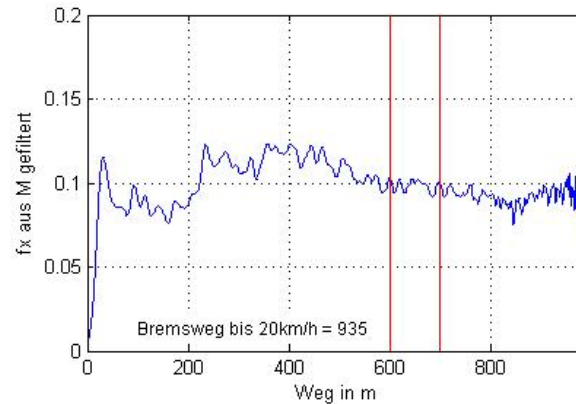
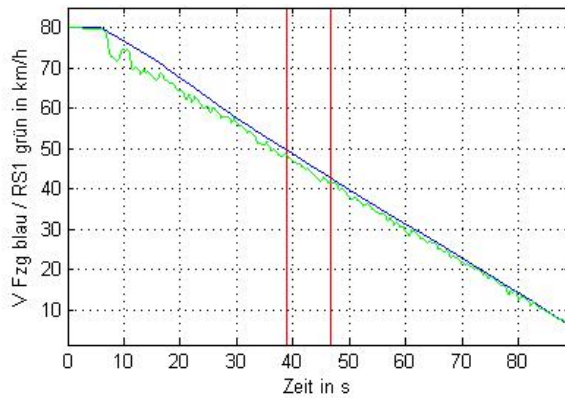


**Dreidimensionales Kraftschlussmodell als Voraussetzung zum
Verständnis des dynamischen Kraftschlusses**

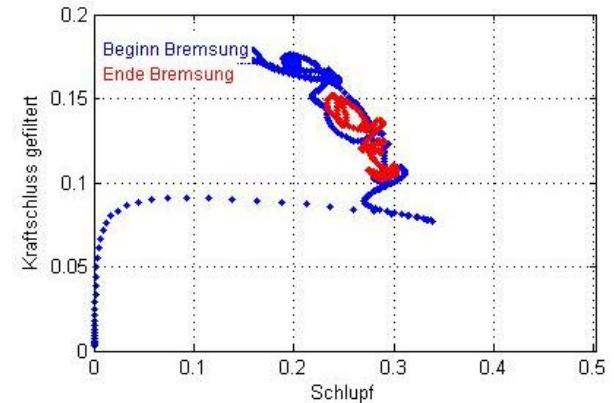
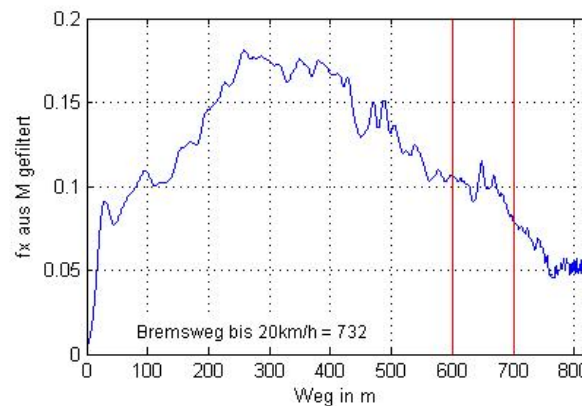
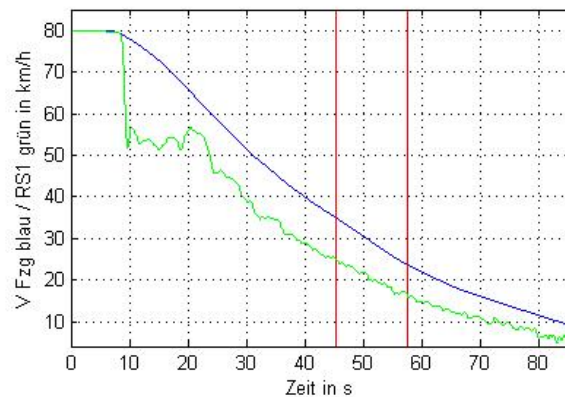


dynamisches Kraftschlussmodell (Beispielmessungen)

Sollschlupf 5%



Sollschlupf 30%

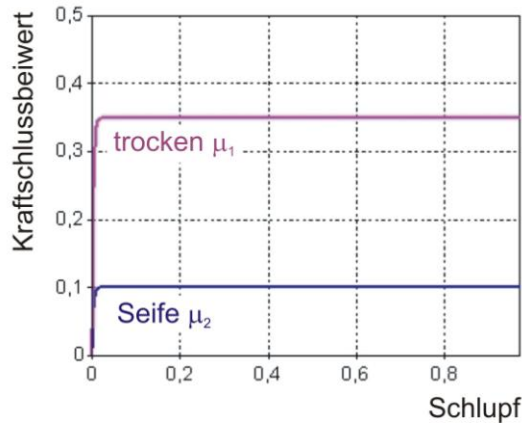


Interpretation?



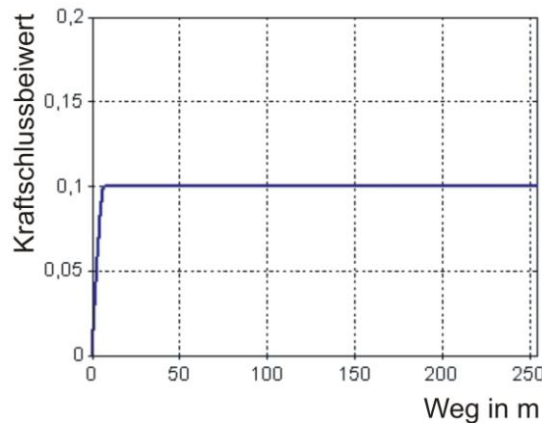
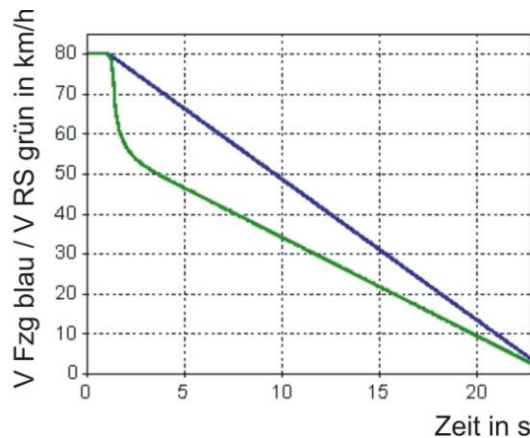
dynamisches Kraftschlussmodell (Erklärung mit Frederich)

f_x nach Frederich



- mathematische Modellbildung anhand von Messdaten
- Anpassung der maximale Reibungszahl an einen wegabhängigen Kraftschluss
- Darstellung in Abhängigkeit vom Schlupf
- Abbildung des Mikroschlupfbereichs für Simulation der Fahrdynamik

Simulation



- keine physikalischen Größen
- keine zeitabhängigen Größen

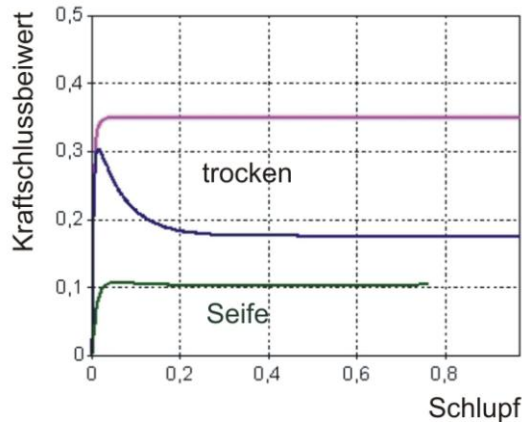


Mit statischem Kraftschlussmodell Effekte beim Bremsen nicht erklärbar



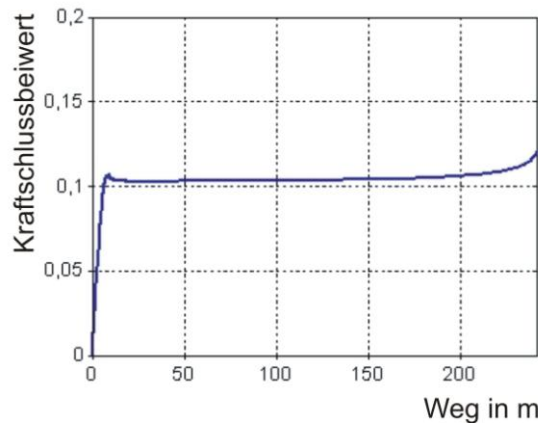
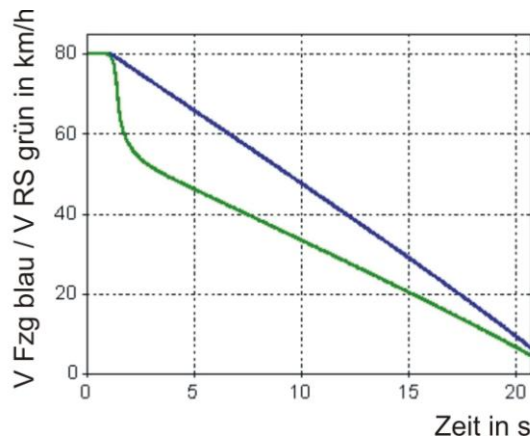
dynamisches Kraftschlussmodell (Erklärung mit Polach)

f_x nach Polach



- Kombination zwischen physikalischer Modellbildung und Anpassung mittels Messdaten
- Berechnung der Kontaktfläche und der Tangentialspannungen im Rad/Schienekontakt basierend auf Kalker
- Einfügen zusätzlicher Parameter zur Darstellung des gemessenen Kraftschlussabfalls im Makroschlupf in Abhängigkeit von der Differenzgeschwindigkeit und des flacheren Verlaufs bei nasser und geseifter Schiene

Simulation



- teilweise physikalischen Größen
- keine Rückkopplung des Kraftschlusses
- Maximaler Kraftschluss abhängig von aus Messdaten abgeleiteten Parametern und der Geschwindigkeit

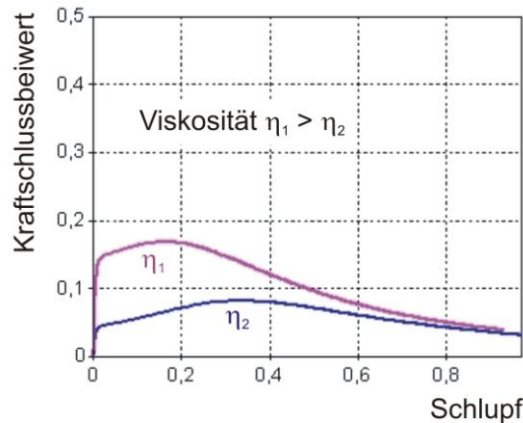


Mit statischem Kraftschlussmodell Effekte beim Bremsen teilweise erklärbar

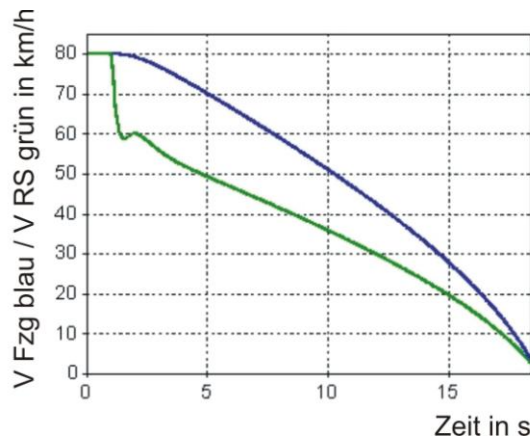


dynamisches Kraftschlussmodell (Erklärung mit Kraft / Häse)

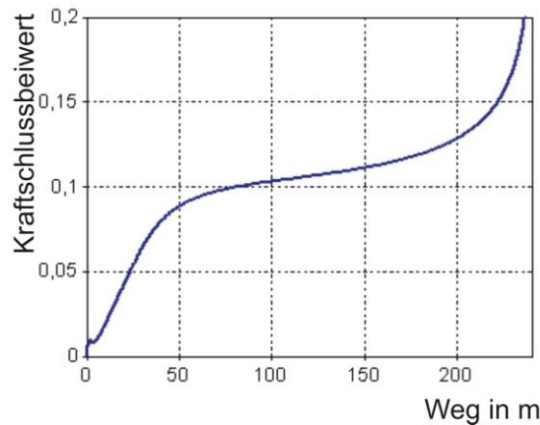
f_x nach Häse



Simulation



- physikalische Modellbildung basierend auf einem Mischreibungsmodell
- Laminare Strömungen durch eine Fremdschicht führt zur teilweisen Trennung der verzahnten Mikrorauheiten zwischen Rad und Schiene
- Zusätzliche Parameter wie Viskosität der Fremdschicht und Rauheit der Kontaktflächen
- Systemgrößen wie Höhe der Zwischenschicht und Temperatur



- physikalisches Kraftschlussmodell
- Rückkopplung über Systemgrößen
- Kraftschluss abhängig von neuen unbekannten Parametern

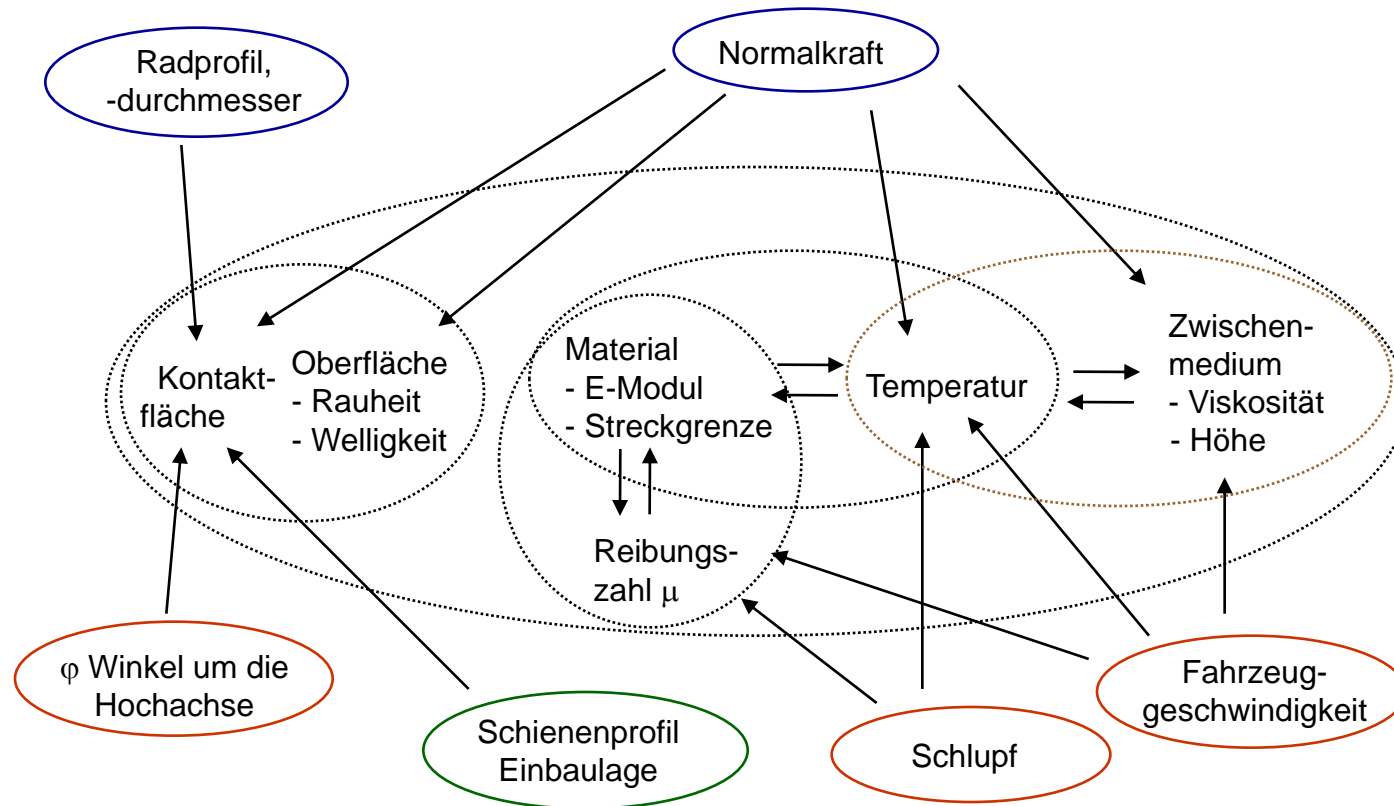


Mit dynamischem Kraftschlussmodell Effekte beim Bremsen erklärbar aber keine Konditionierung



dynamisches Kraftschlussmodell (Größen des physikalischen Modells)

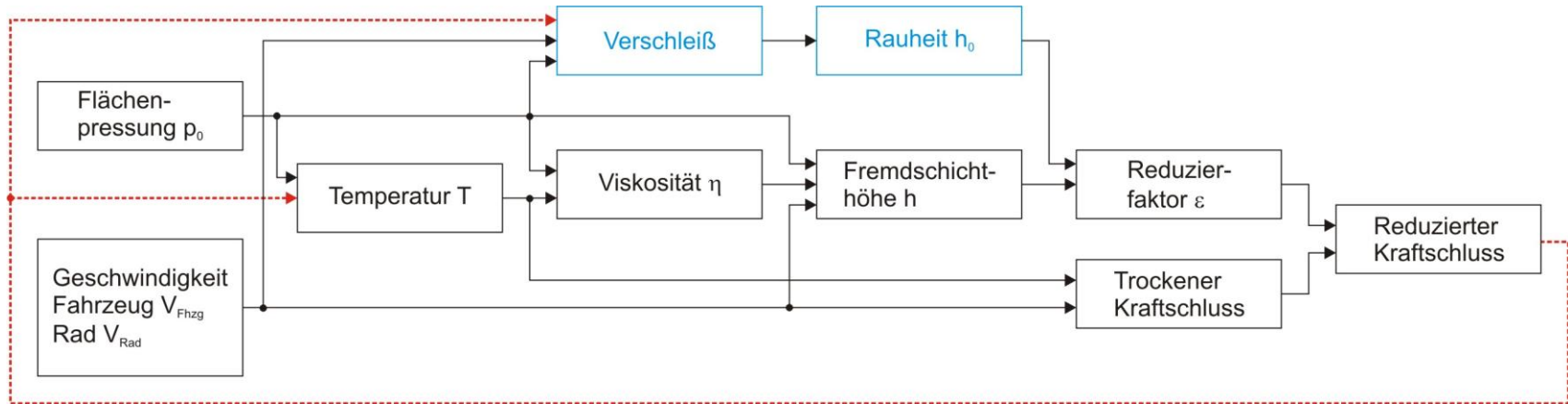
Physikalische Größen des Rad / Schienenkontaktes



- Fahrdynamik – Wiedergabe des Mikroschupfes
- Antriebsdynamik – Wiedergabe des Mikroschlupfes, Makroschlupfes und des Maximums
- Bremsvorgänge – Makroschlupf und Optimalschlupf aber zeitliches Verhalten?



dynamisches Kraftschlussmodell (Erklärung mit Kraft / Häse sowie Verschleiß)



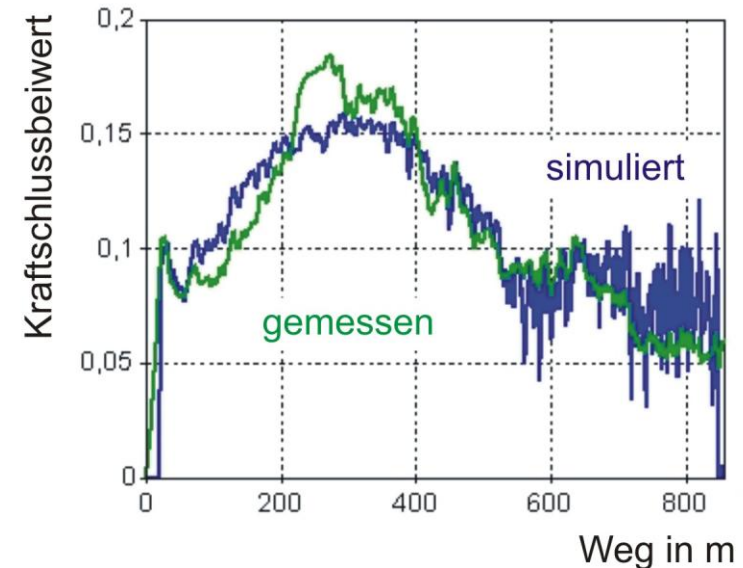
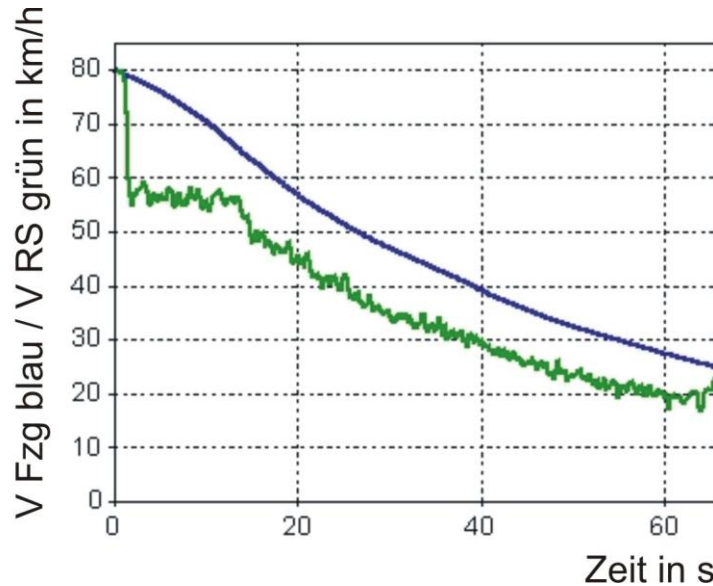
- Erweiterung um ein Verschleißmodell
- Rauheit der Radoberfläche bestimmt im Mischreibungsmmodell im erheblichen Maße den Kraftschlussbeiwert
- Rauheitsmessungen nach Makroschlupfbremungen zeigen einen vom Makroschlupf abhängigen Rauheitswert der Radlauflächen



Mit dynamischen Kraftschlussmodell können zeitabhängige Prozesse erklärt werden



dynamisches Kraftschlussmodell (Erklärung mit Kraft / Häse sowie Verschleiß)



- Schwierige Initialisierung des Modells
- Oberflächenbeschaffenheit von Rad und Schiene nicht bekannt
- Viskosität der tatsächlichen Fremdschicht nicht bekannt
- Viskosität von Seifenlösungen bei hohen Temperaturen und Drücken nicht bekannt

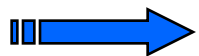
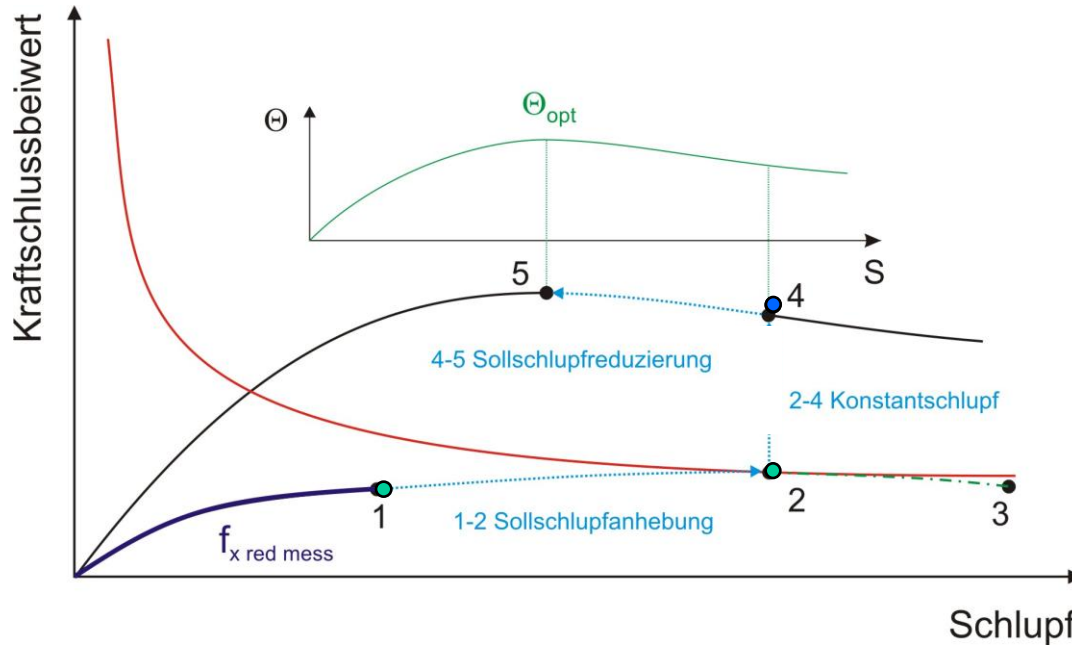


Lässt sich das dynamische Kraftschlussmodell trotz neuer unbekannter Parameter für eine Sollwertvorgabe nutzen?



dynamisches Kraftschlussmodell (Konsequenz aus einem physikalischen Modell)

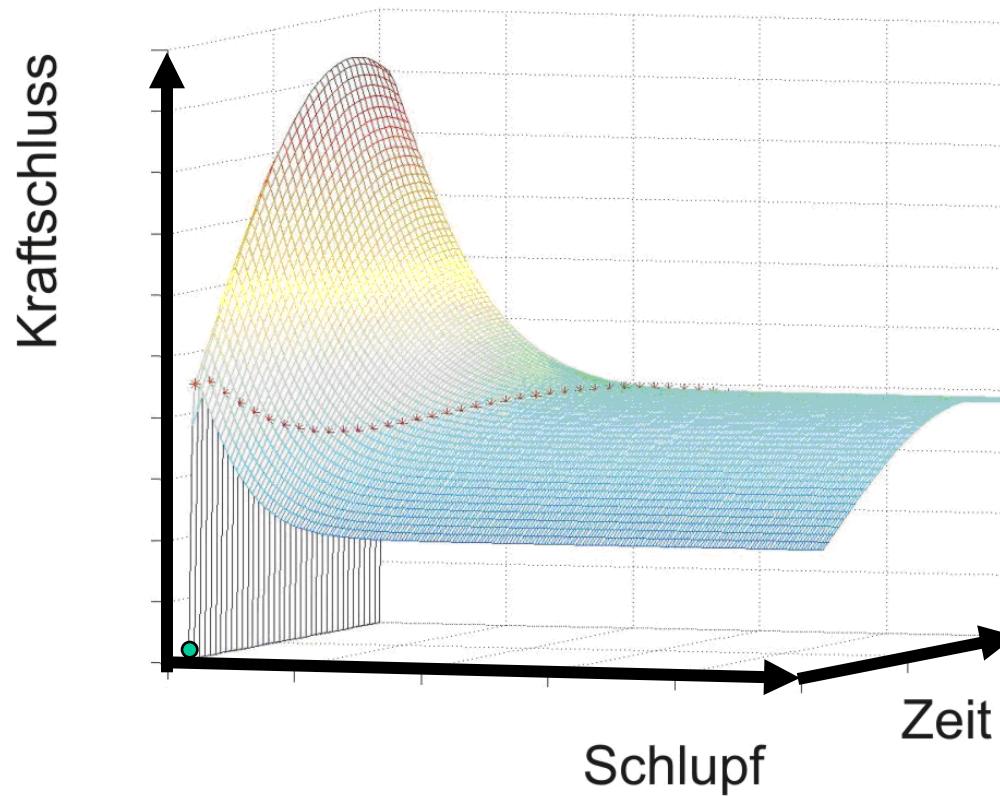
- Eigenschaften der Zwischenschicht zeigen sich in der Fahrzeugreaktion während der ersten Instabilität
- Schätzen des Kraftschlussverlaufs zur Optimierung der Sollwertvorgabe für eine Gleitschutzregelung



Das Kraftschlussmaximum und damit der Bremsweg lässt sich durch die Sollschlupfvorgabe beeinflussen!



dynamisches Kraftschlussmodell (Bremsen)



Danke für die Aufmerksamkeit