STADLER

Entwicklung einer Methode zur automatisierten Erzeugung und Optimierung anwendungsspezifischer Eisenbahnradprofile

10.11.2026 | Maximilian Hecker | Dr.-Ing. Martin Schwickert | Public | © Stadler

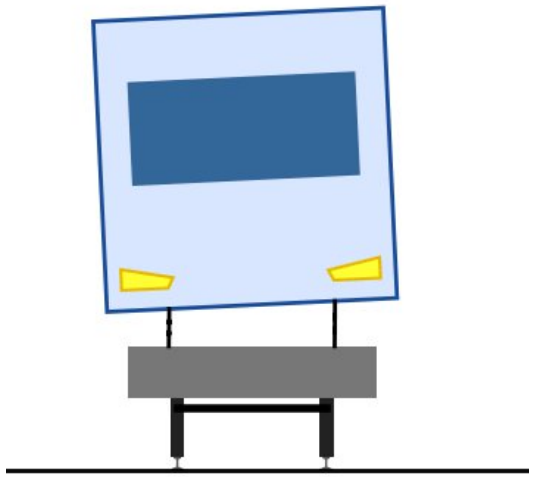
Inhalt

1. Einführung
2. Radprofilerzeugung
3. Radprofiloptimierung
4. Anwendungsbeispiel

1.

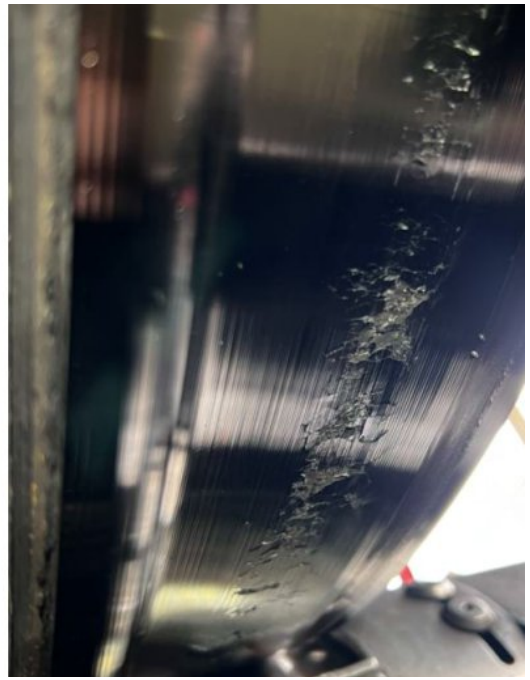
Einführung

Warum machen wir uns die Mühe?



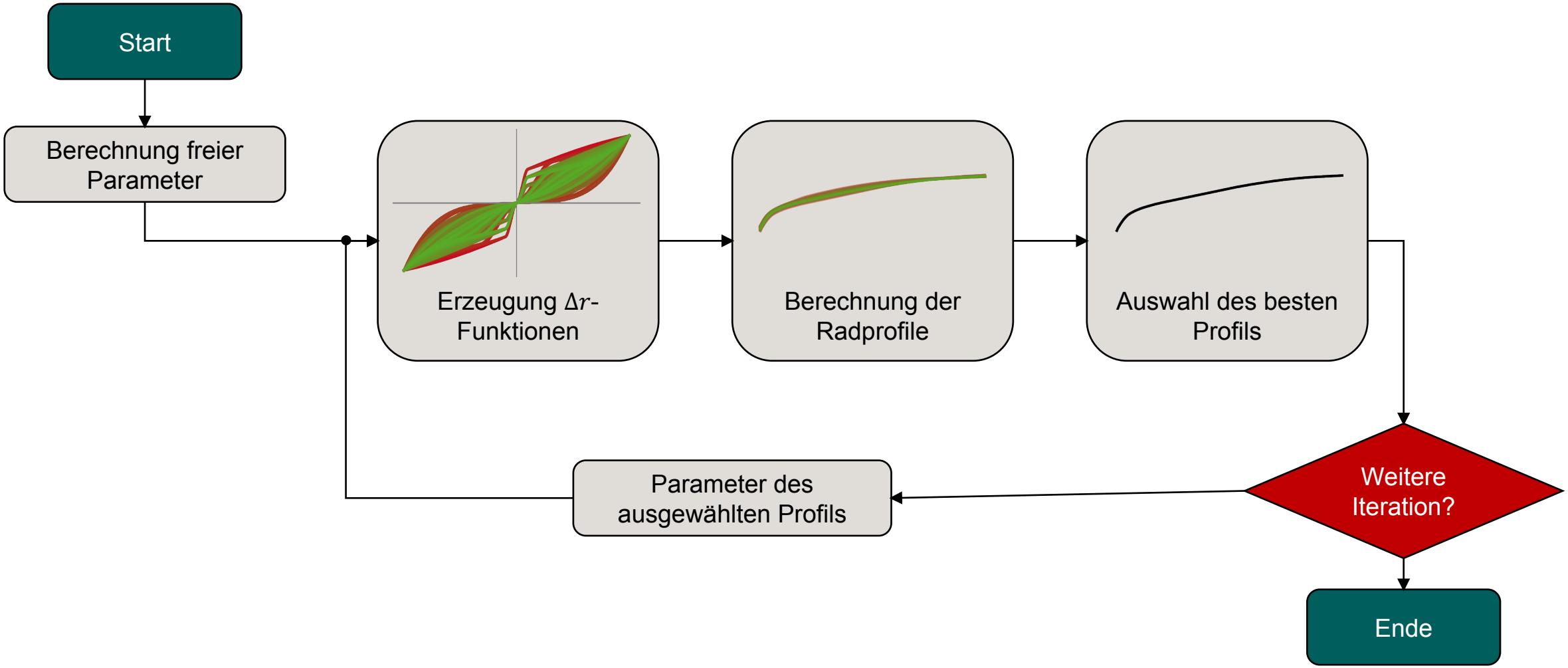
S1002 ⟷ EPS





- Auswahl genormter Radprofile mangelhaft:
  - S1002: Zu geringe äquivalente Konizität bei Spurkranzschwächung -> LFBM
  - EPS: Neigung zu RCF
  - GV 1/40: Kein Verschleißprofil
- Allgemein sind kaum Methoden verfügbar, um ein Radprofil nach spezifischen Anforderungen zu gestalten.

Grobe Vorgehensweise



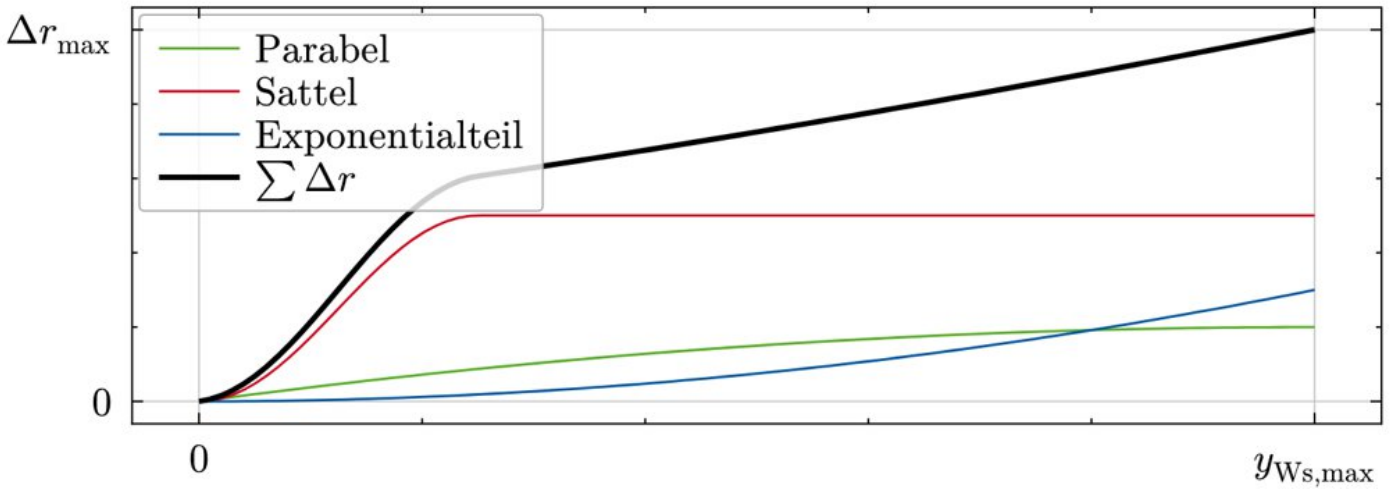
2.

Radprofilerzeugung

Gestaltung der Δr-Funktion

Aufteilung der Δr-Funktion
in Teilfunktionen:

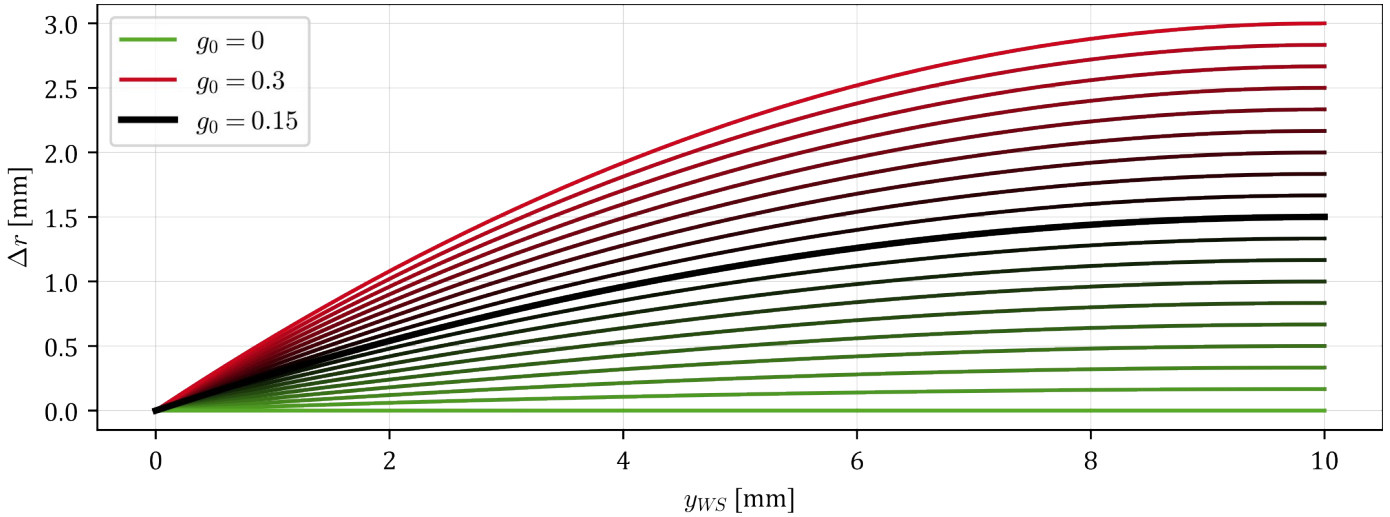
- Parabel (grün)
- Exponentialteil (blau)
- Sattel (rot)
  - Der Sattel sorgt für ein schnelleres Ansteigen des Δr
  - Dies verteilt den Verschleiß, verringert aber auch die Stabilität



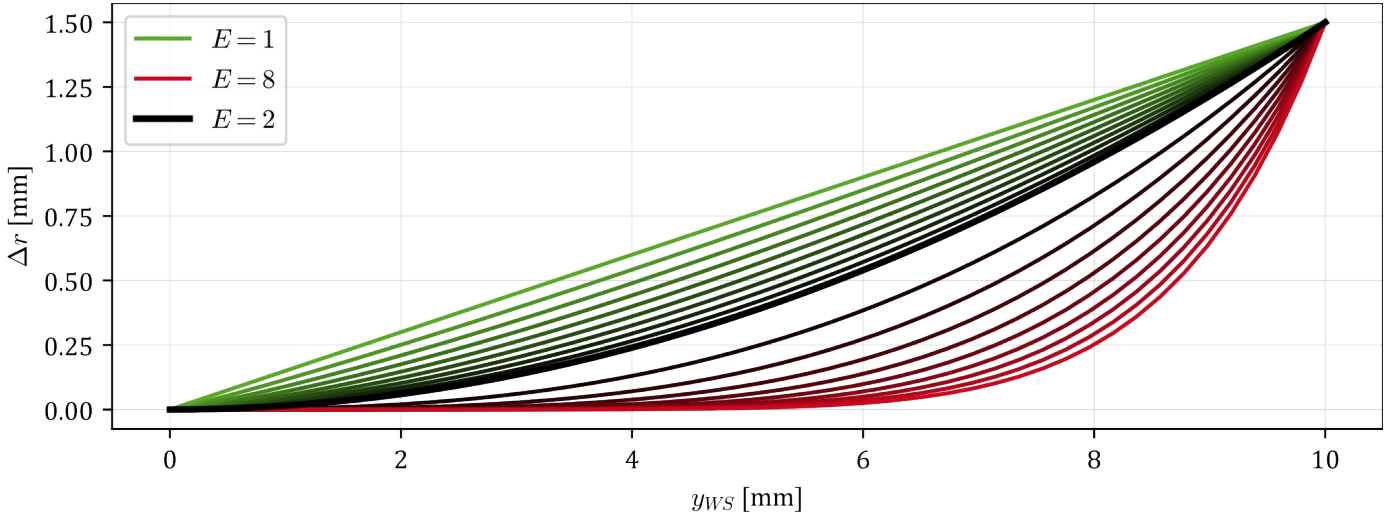
$$\Delta r(y_{\mathrm{Ws}}) = \text{Parabel} + \text{Exponentialteil} + \text{Sattel}$$

Δr-Funktion: Grundsteigung und Exponent

g_0: **G**rundsteigung

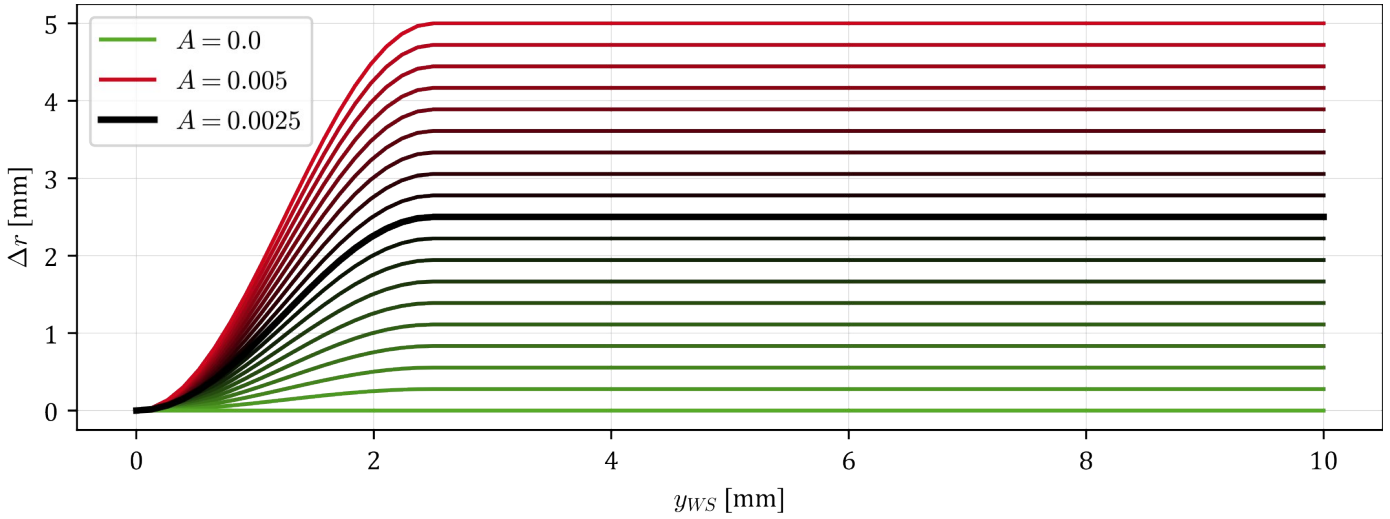


E: **E**xponent

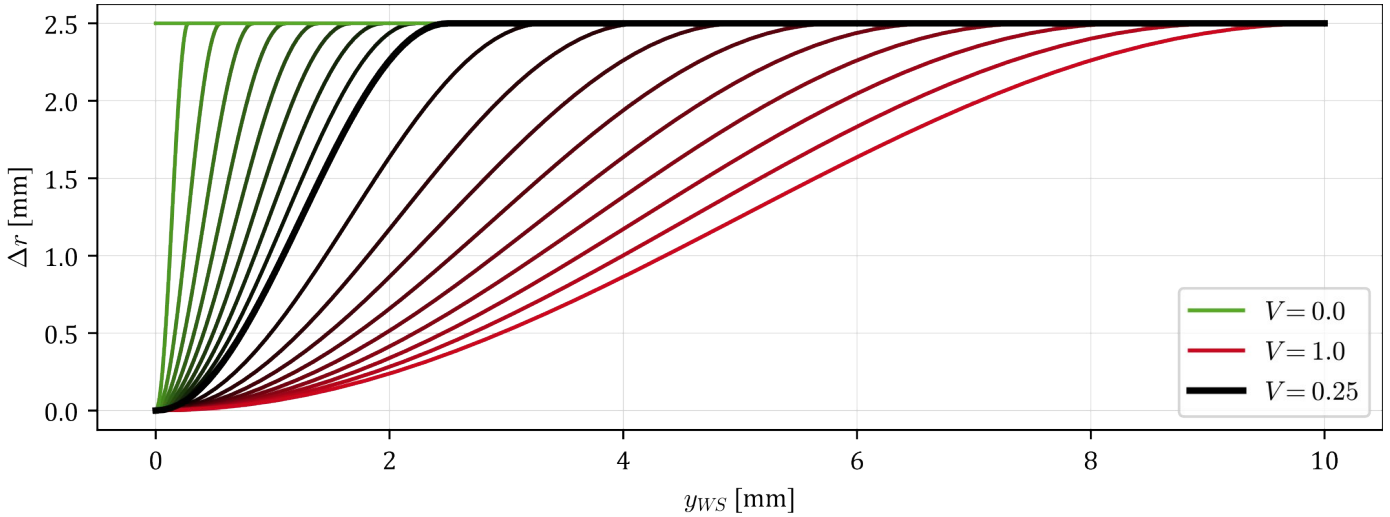


Δr-Funktion: Sattelfunktion

A: Sattel**a**mplitude

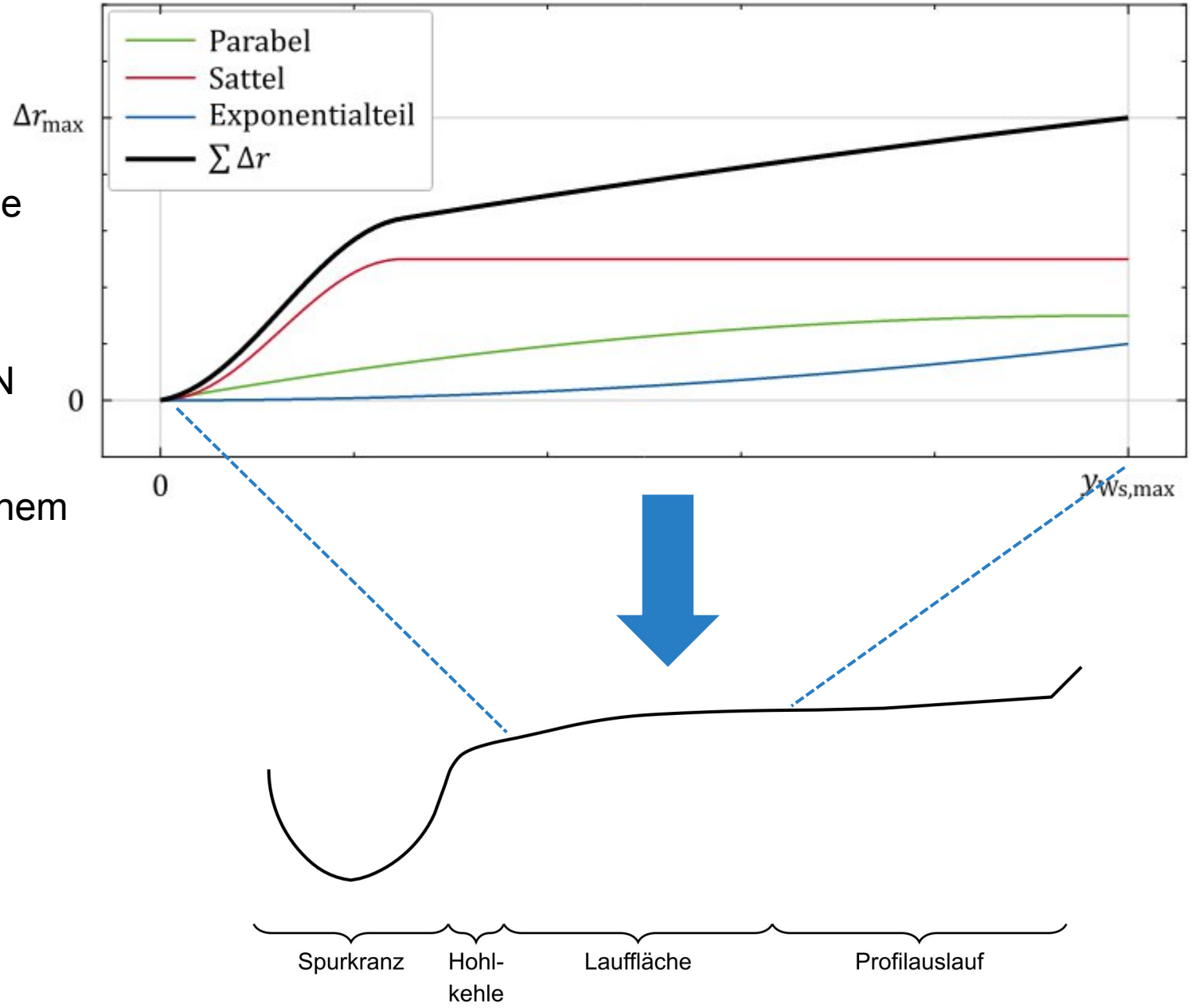


V: **V**erschiebungsfaktor (Sattel)



Radprofilberechnung

- Δr-Funktion wird geometrisch in Lauffläche übersetzt
- Anschließend wird bei maximaler Querverschiebung der Spurkranz nach EN 13715 angebracht
- Das Profil wird mit einer Hohlkehle und einem Profilauslauf vervollständigt

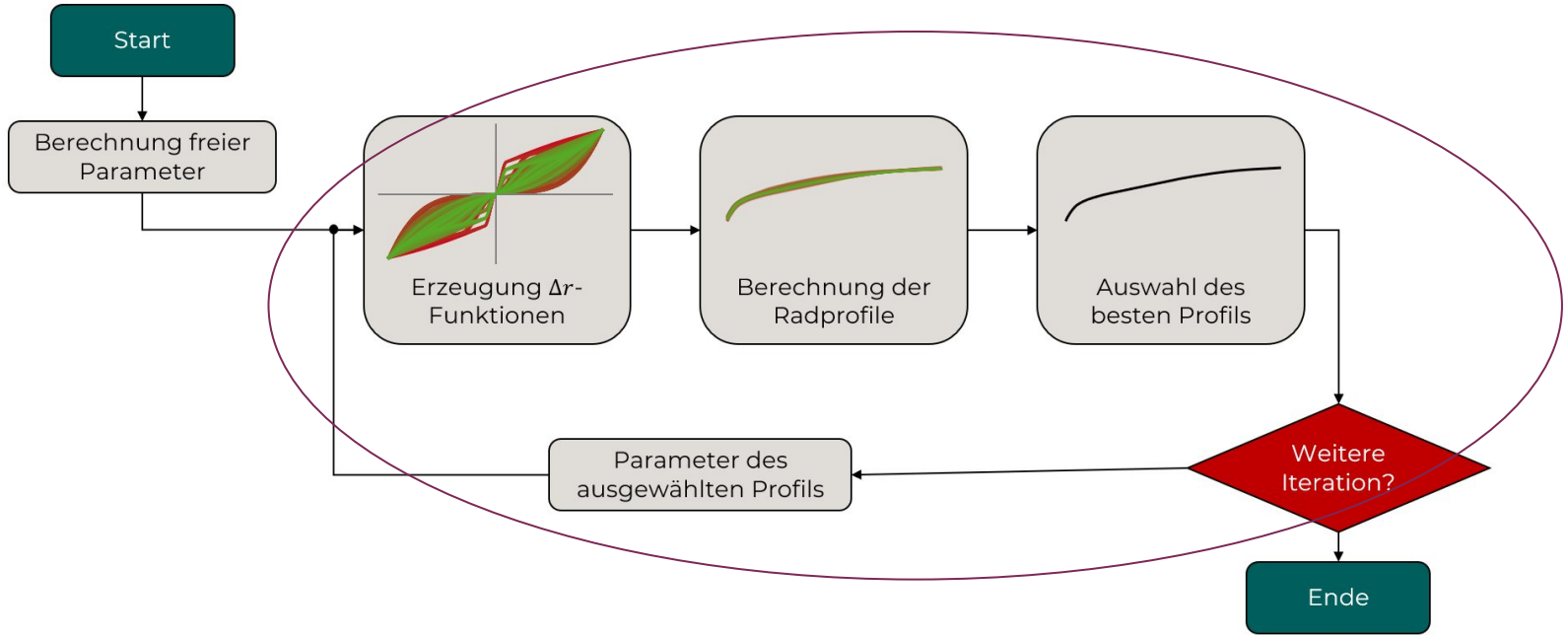


3.

Radprofiloptimierung

Optimierungsschleife

- Zuerst werden eine ganze Auswahl an Radprofilen anhand der Parameter A, V, g_0 und E erzeugt.
- Viele Parameterkombinationen ergeben, abhängig vom Schienenprofil, kein sinnvolles Profil
- Die übrigen Profile werden auf eine Reihe von Ausschlusskriterien geprüft. Einige sind bereits durch die Parameter festlegbar



Abrollbedingung (im Voraus festlegbar)

- Δr_{max} muss ausreichend groß sein, um die Abrollbedingung in einem definierten minimalen Bogenradius (z.B. 180m) zu erfüllen. Dafür wird der Radialstellungsindex nach EN 14363 berechnet
- Der Index bekommt einen Sicherheitsfaktor vorgestellt, der Einflüsse durch die Steifigkeit des Fahrwerks berücksichtigen soll. Schließlich kann sich der Radsatz nie ganz frei (perfekt) einstellen.

$$q_E = \frac{1}{R_{\min}} \cdot \frac{2 r_0 b_0}{\max(\Delta r)} \overset{!}{\leq} 1$$

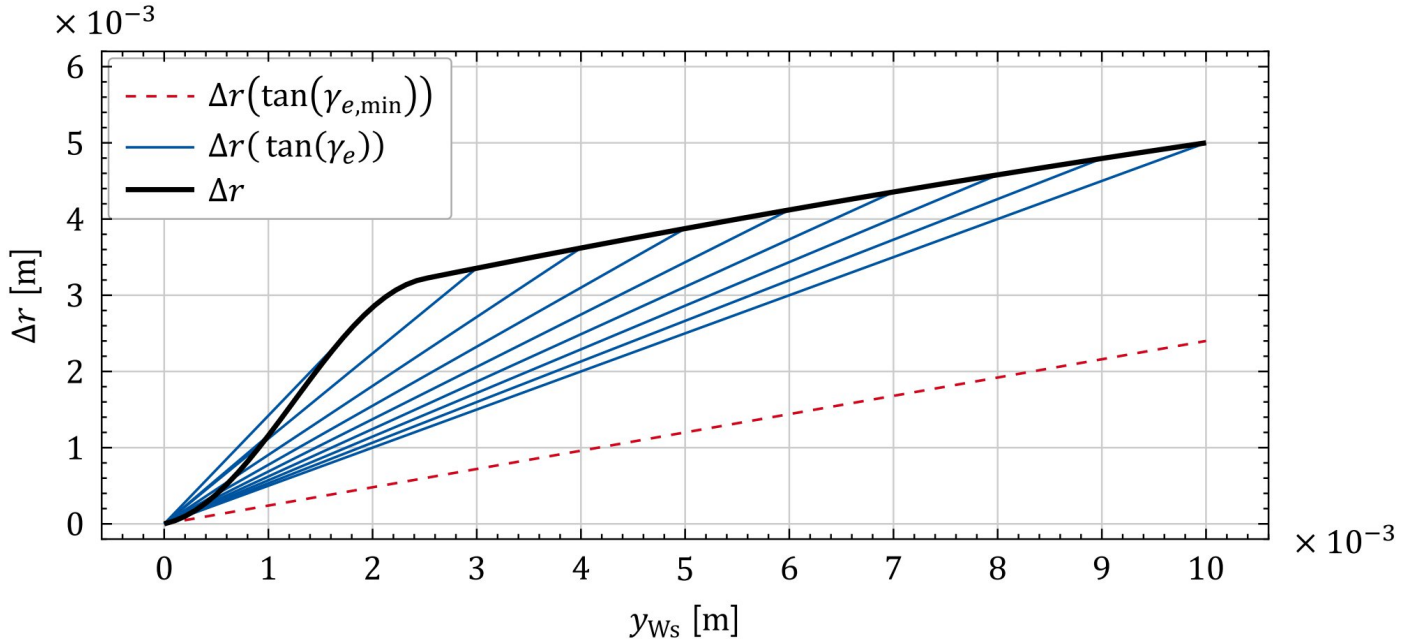
q_E : Radialstellungsindex
b_0 : Stützweite
r_0 : Radradius
$\max(\Delta r)$: Maximales Δr
$R_{\min}$: Minimaler Bogenradius

Ausschlusskriterium: LFBM

- Um LFBM zu vermeiden, muss die äq. Konizität ausreichend hoch sein.

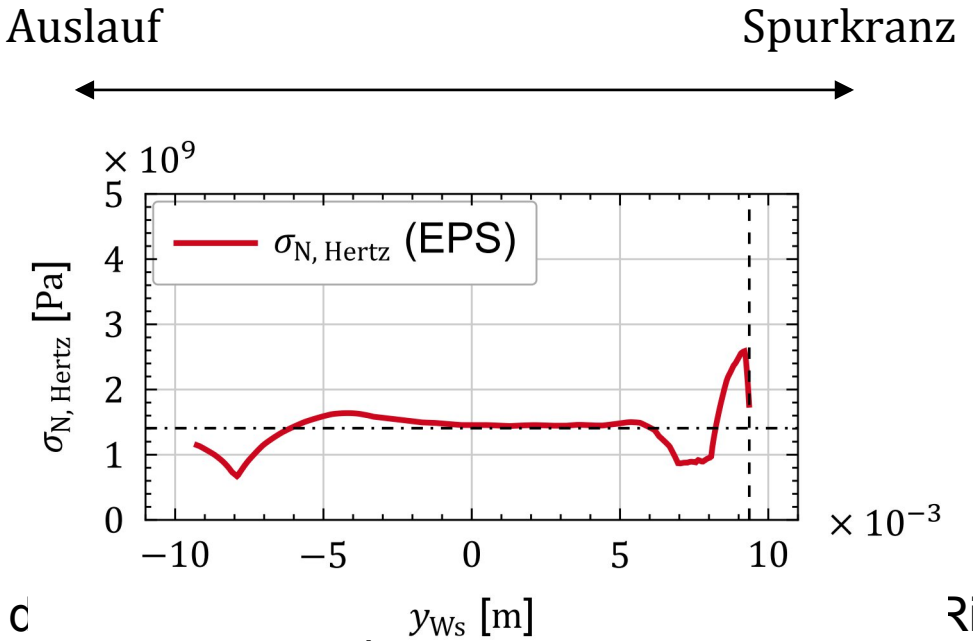
  Kriterium: $\tan(\gamma_e) \geq 0.12$

- Die erzeugte Δr-Funktion wird linearisiert und auf zu niedrige Konizität geprüft



Ausschlusskriterium: RCF

- Das Profil darf eine maximale hertz‘sche Kontaktspannung nicht überschreiten
- Sehr grobes Kriterium, da Auftreten von RCF ein Zusammenspiel von Verschleiß und Spannung ist



- Ggf. besser: Betrachtung d Rissausbreitungsgeschwindigkeit → derzeit Gegenstand der Forschung

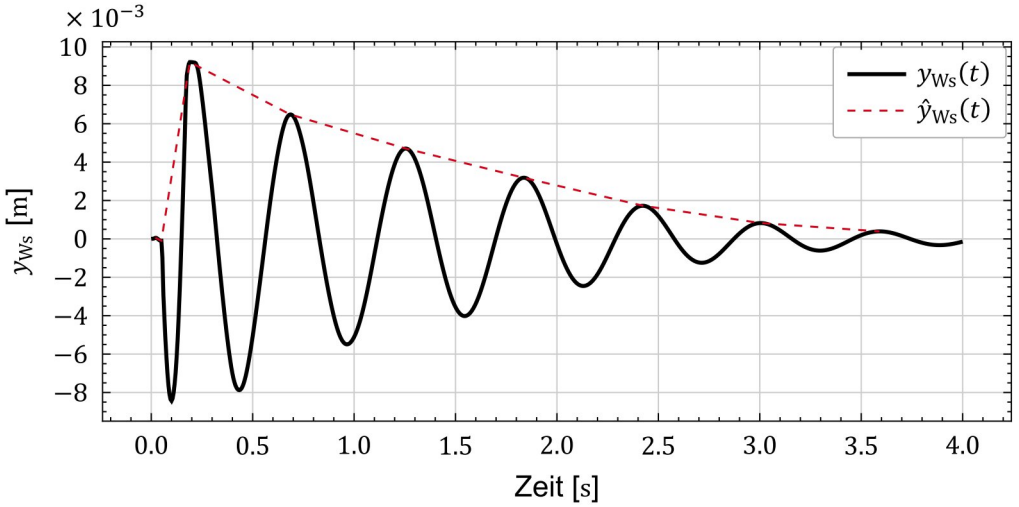
Ausschlusskriterium: CCI

- Contact Concentration Index nach Polach
- Verhältnis von Querverschiebung ($y_{Ws,max}$) zur Kontaktflächenbreite ($\max(Y_W) - \min(Y_W)$)
- Bestenfalls 0 (sehr breite Kontaktfläche)
- Schlechtestenfalls 1 (Kegelprofil)
- Nur Profile gleicher maximaler Querverschiebung sind untereinander vergleichbar
- Beispiel: S1002 auf 60E1: CCI = 0,35
  → Kontaktfläche ca. 3-mal breiter als Spurspiel

$$\mathrm{CCI} = \frac{2 \cdot y_{\mathrm{Ws,max}}}{\max(y_W) - \min(y_W)}$$

Ausschlusskriterium: Stabilität

- Standardisierter, simulierter Stabilitätstest bei ca. 1,25-facher Höchstgeschwindigkeit. Zur Laufzeitoptimierung wird nur das Drehgestell modelliert
- Zu Beginn Auslenkung bis zum Spurkranz, danach wird Verlauf der Stabilität betrachtet
- Nach 4 s muss die Hüllkurve der Queramplitude einen Grenzwert (z.B. 5 mm) unterschritten haben

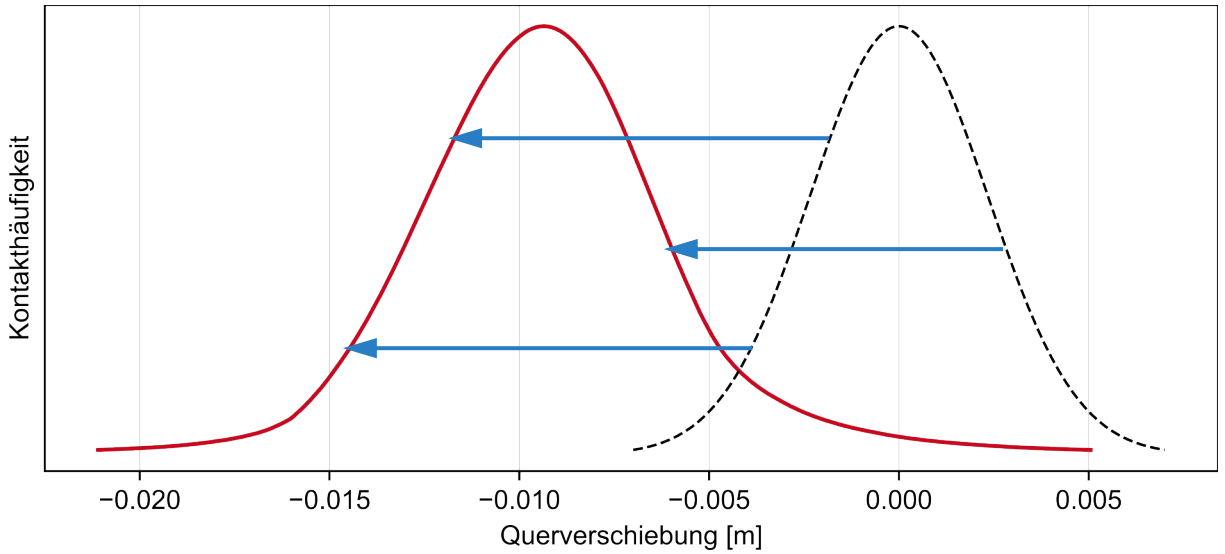


Gleichmäßigkeit des Verschleißes / Formstabilität

Finale Bewertung der übrigen Profile:

- Annahme: Die Verteilung der Querverschiebung über die Zeit entspricht einer Normalverteilung (nach Polach, gilt für geraden Lauf)
- Nun wird zu jeder Querverschiebung die Lage des Kontaktpunktes bestimmt und so mittels der Normalverteilung betrachtet, wie häufig sich der Kontakt an diesem Punkt befindet
- Nach Polach entspricht dies ungefähr der Verschleißverteilung (Radlauffläche)

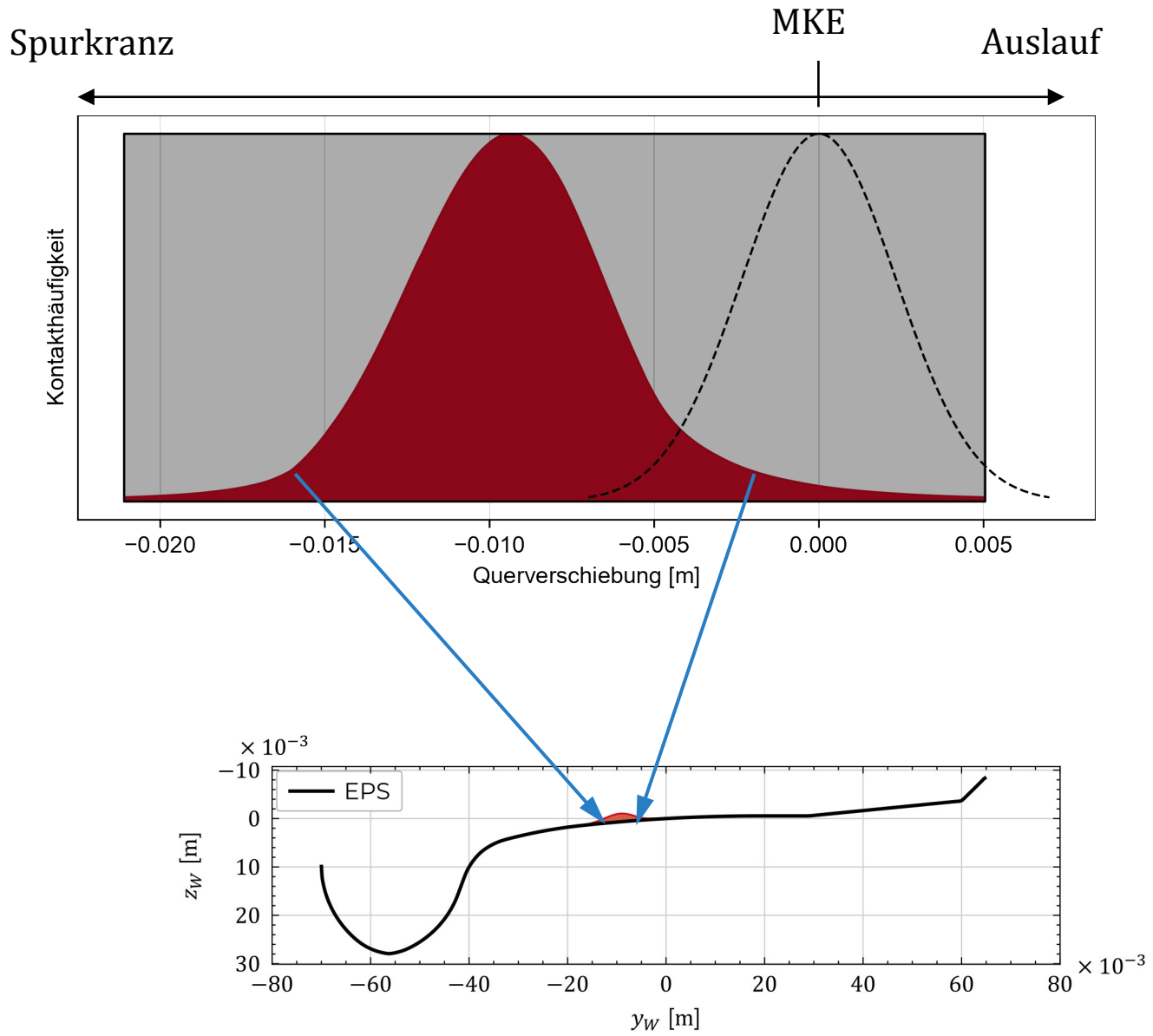
→ Je gleichmäßiger, desto besser



Bewertungskriterium: Formstabilität

Es wird der Ausfüllungsgrad der Rechteckfläche über der Lauffläche berechnet.

→ Je größer, desto gleichmäßiger der Verschleiß

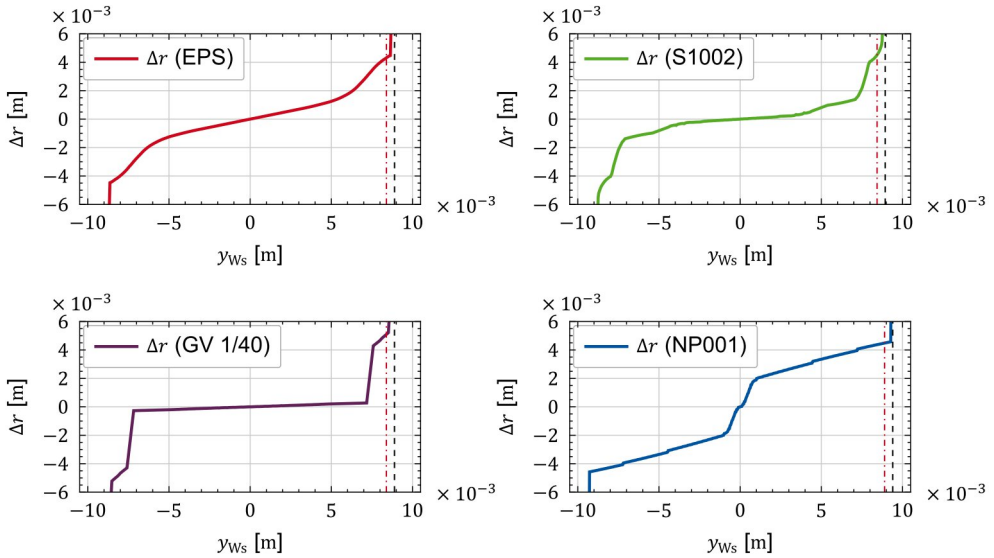


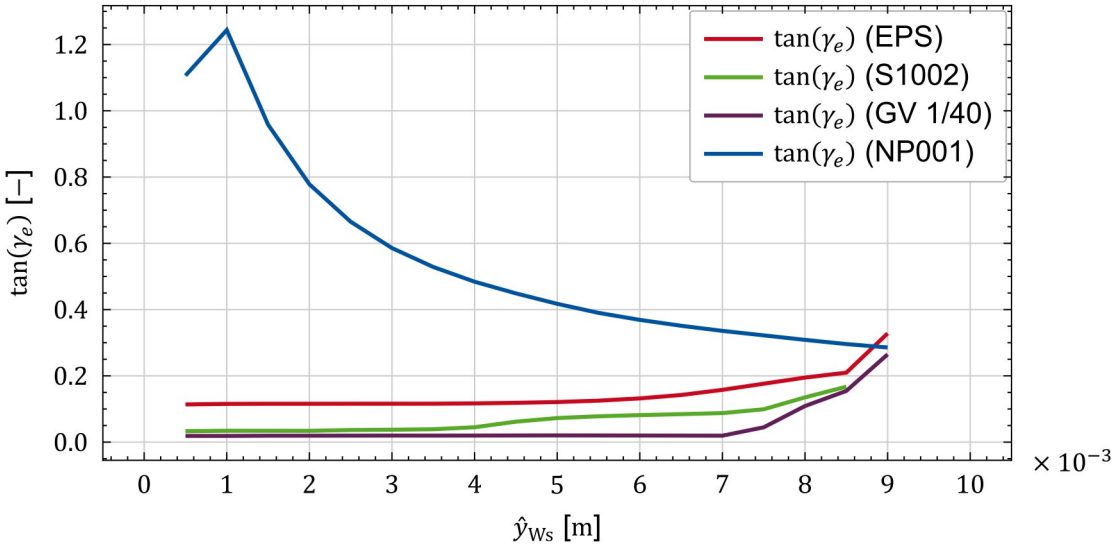
4.

Anwendungsbeispiel

Δr-Funktion

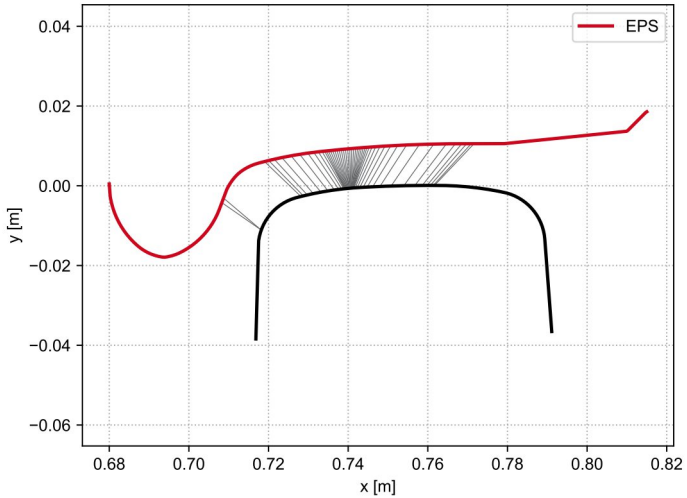
- Funktion des NP001 steigt sehr schnell sehr stark an
- Äquivalente Konizität bei geringen Auslenkungen extrem hoch
- Intuitive Erwartung: Stark instabiles Verhalten

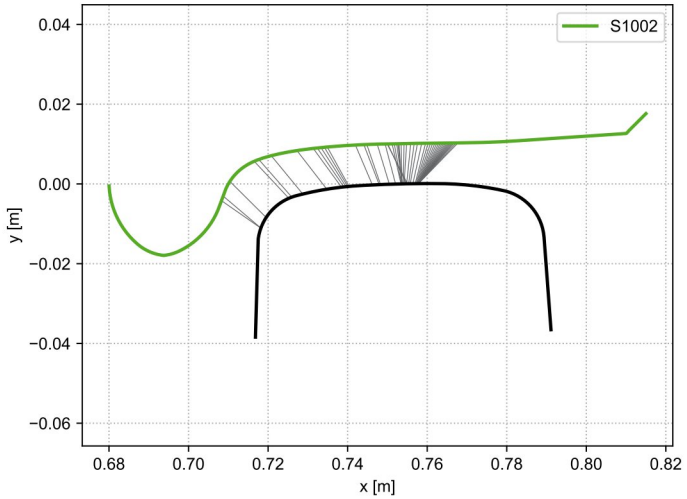


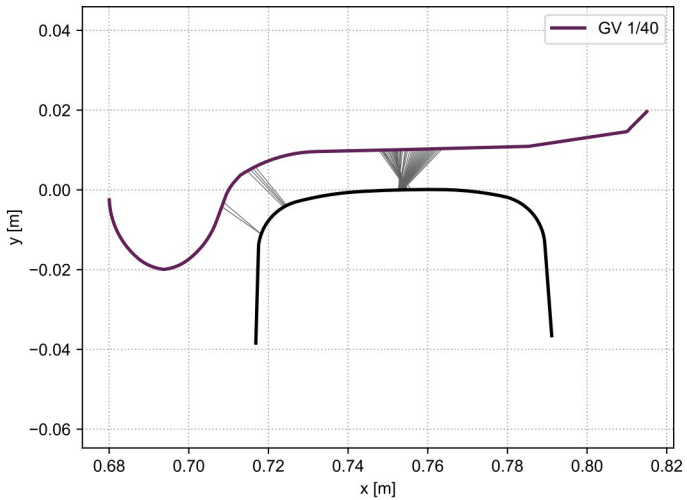


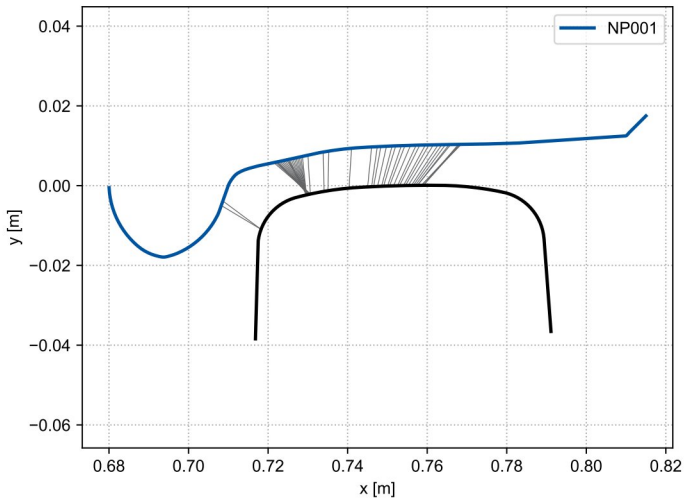
Anwendungsbeispiel

Kontaktverteilung







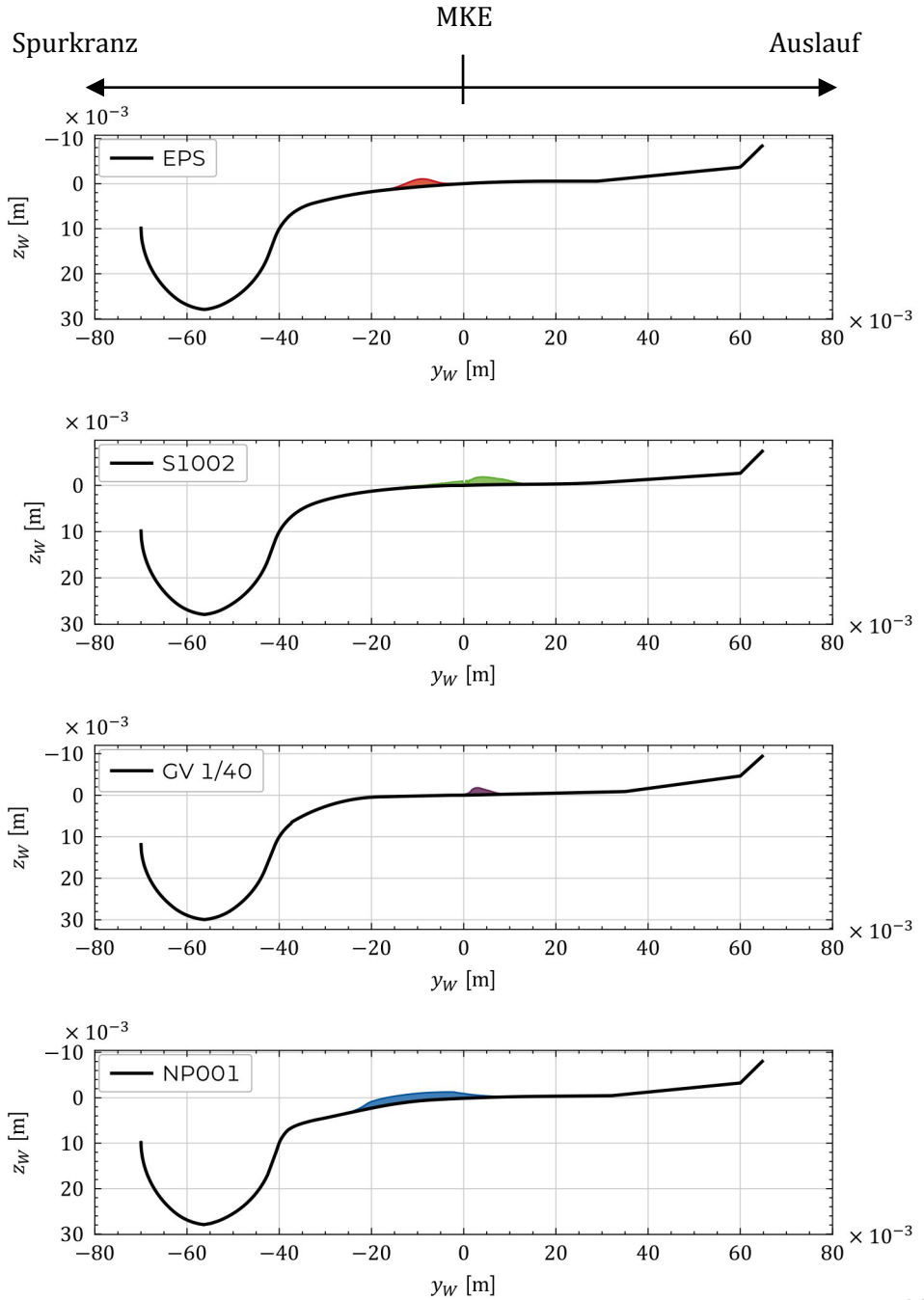


Generiertes Profil NP001:

- Kontaktdichte um den Nullkontakt sehr gering
- Erhöhte Konzentration im äußeren und inneren Bereich → statistisch selten in Kontakt

Formstabilität

- Abbildung zeigt zu erwartenden Verschleiß entlang des Radprofils. $y_W = 0$ entspricht der Messkreisebene
- EPS: Verschleiß eher in Spurkranznähe (da steileres Profil), eher eng verteilt
- S1002: Verschleiß weiter außen, da weniger steil (Zylinderfläche durch Spurkranzschwächung), eher breit verteilt
- GV 1/40: Verschleiß weiter außen (Kontakt bei 1/40), sehr eng verteilt
- NP001: Verschleiß sehr breit verteilt, eher innen, da steileres Profil
- Breit und gleichmäßig verteilter Verschleiß lassen wenig Formänderung im Verlauf des Verschleißes erwarten
  → Längere Reprofilierungsintervalle



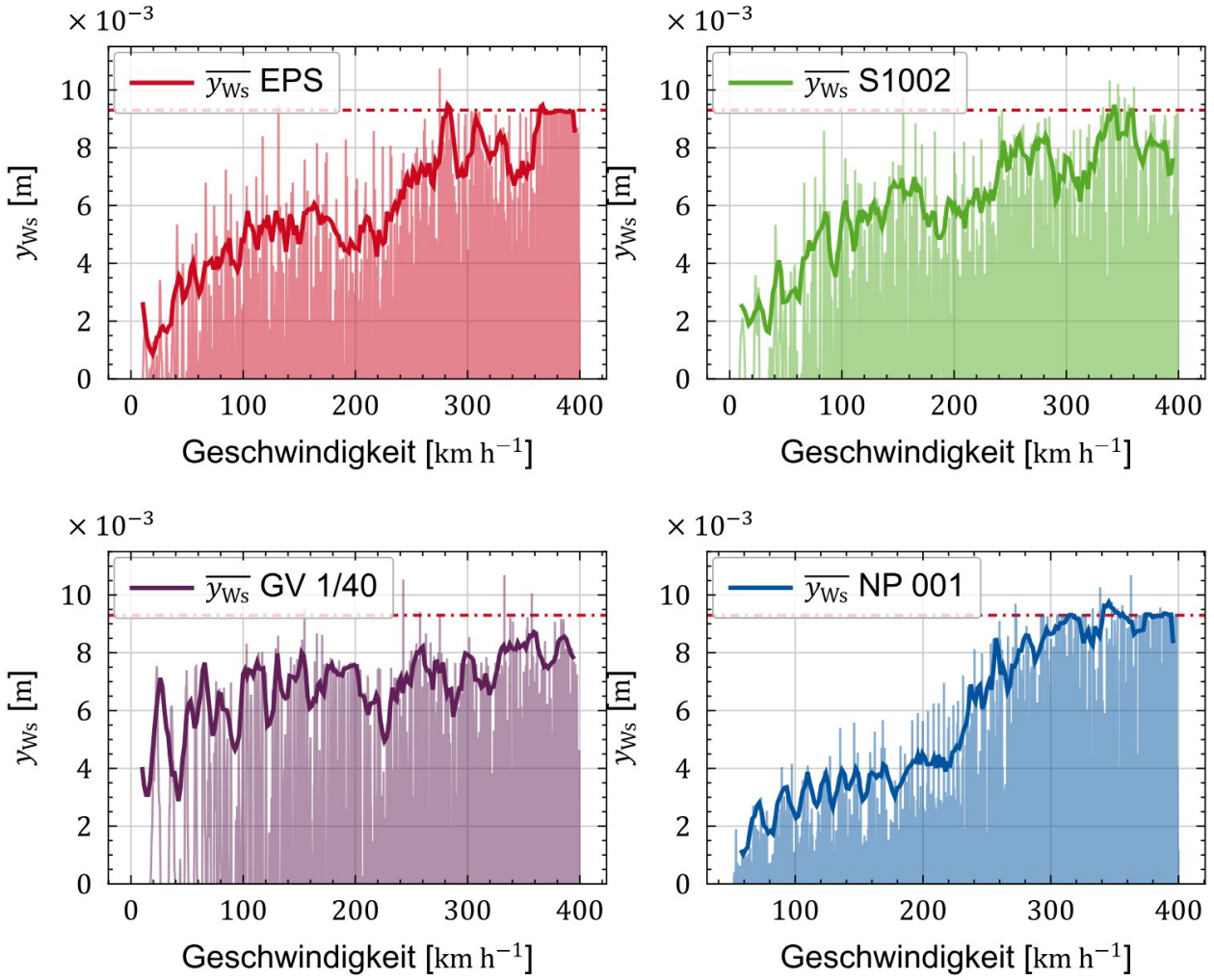
Stabilitätstest auf ERRI Low - Anregung

Generiertes Profil NP001:

- Erwartung:
  Stark instabiles Verhalten
- Tatsächlich:
  Stabiler Zustand um kleine Queramplitude
  über weiten Geschwindigkeitsbereich
- Kleine Amplitude bis ca. 230 km/h
- Ausgeprägte Stabilitätsgrenze

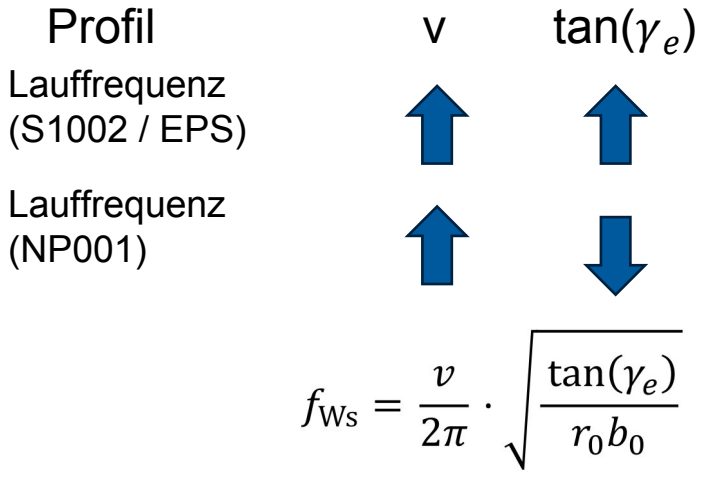
S1002 und EPS:

- Deutlich größere Amplituden
- Weniger ausgeprägte Stabilitätsgrenze



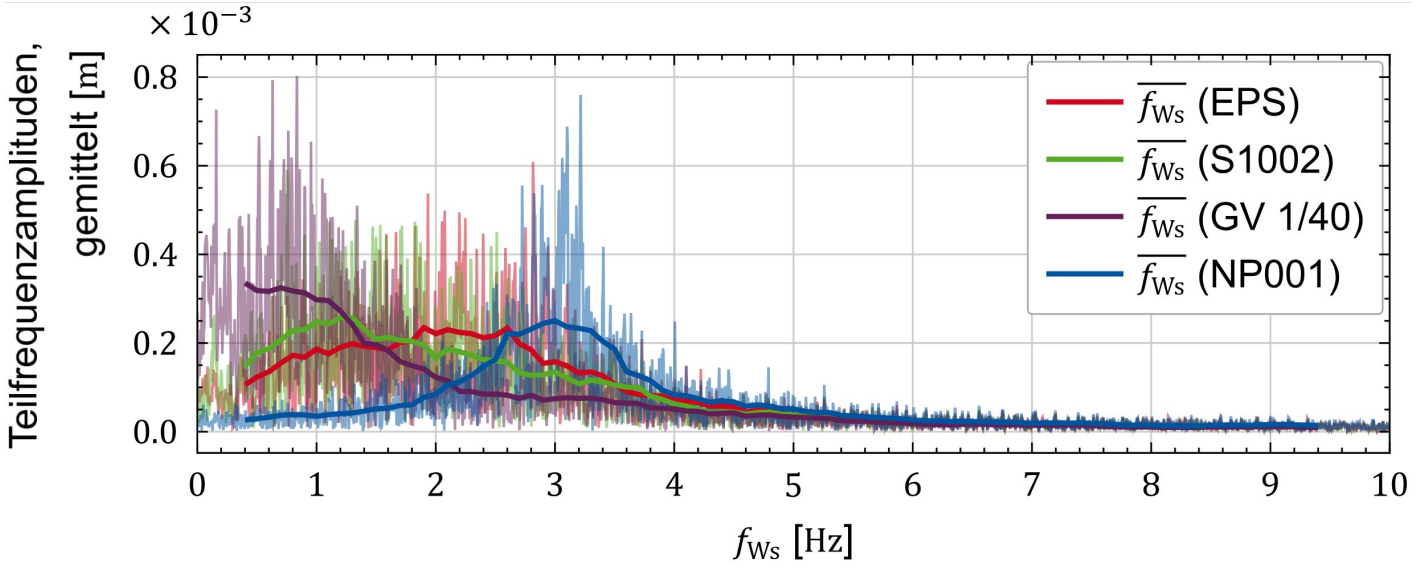
Frequenzspektren

- Frequenz von S1002 und EPS variiert im Stabilitätstest erwartungsgemäß
- Frequenz des NP001 bleibt relativ konstant bei ca. 3 Hz, gemäß folgendem Zusammenhang:



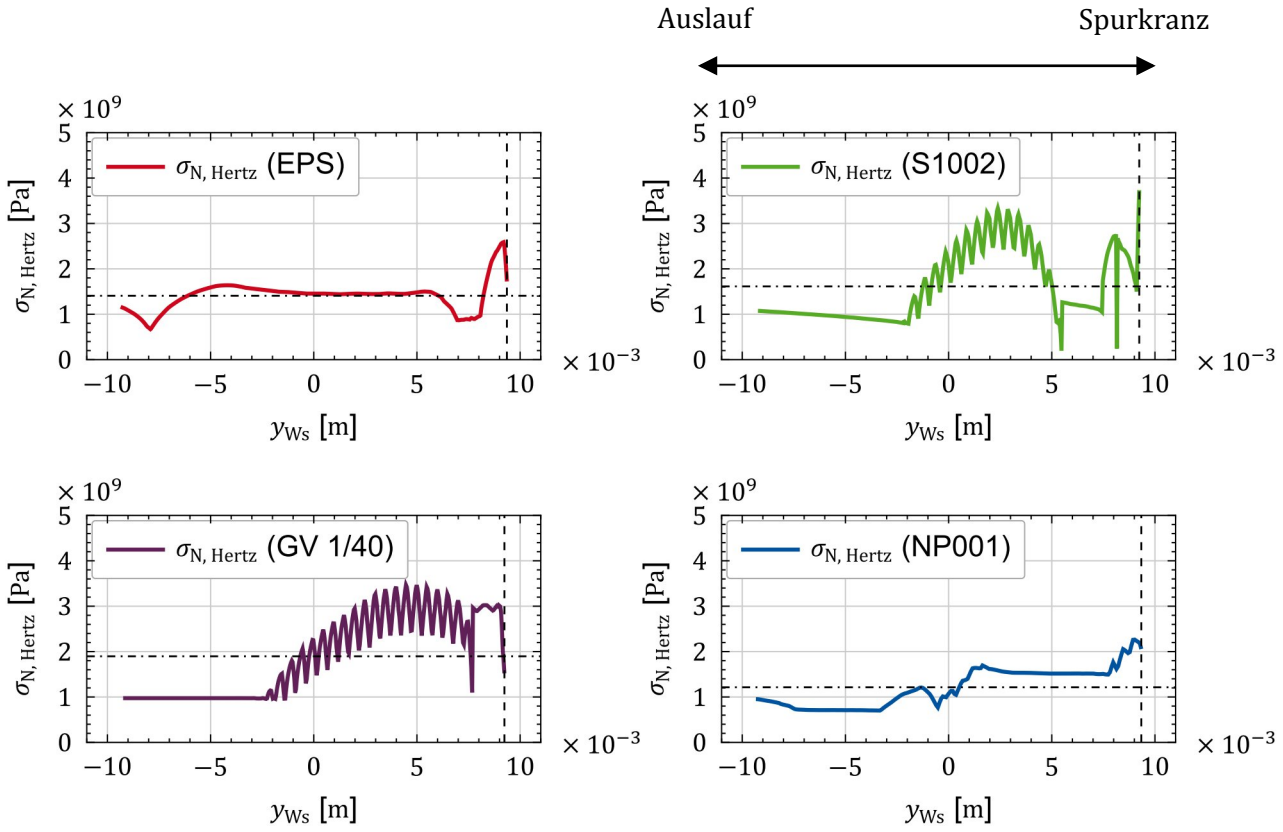
$$f_{\mathrm{Ws}} = \frac{v}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\tan(\gamma_e)}{r_0 b_0}}$$

Klingel'sche Formel



Kontaktspannung

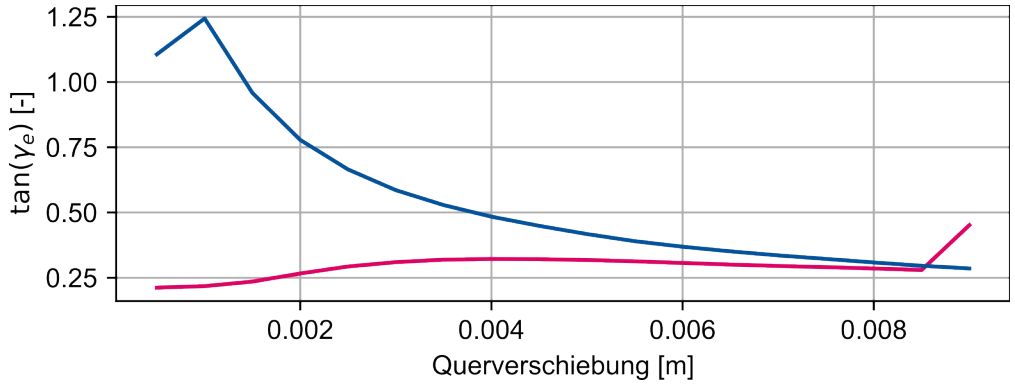
- NP001 mit niedrigster durchschnittlicher Kontaktspannung
- Etwas geringere Kontaktspannung kurz vor Spurkranz als EPS
- EPS und S1002 haben hohe Spannungen in geraden Bereichen (Kegel/Zylinder)



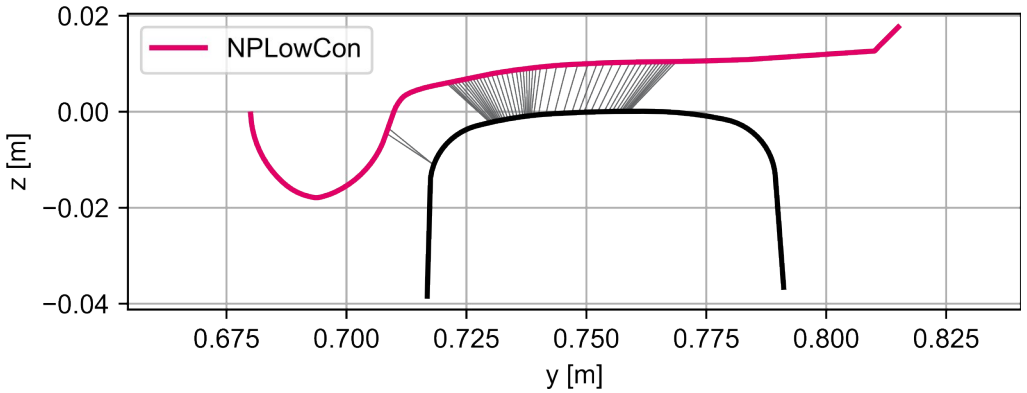
Beispielprofil mit Konizitätsobergrenze

Einführung einer oberen Konizitätsgrenze (Ausschlusskriterium)

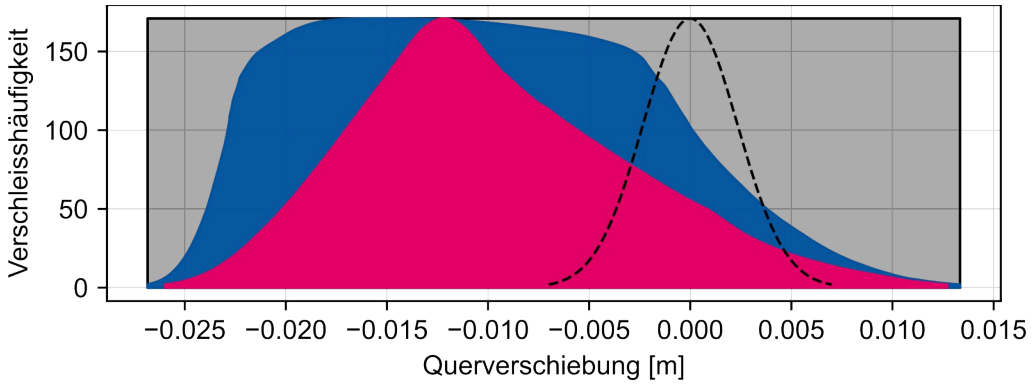
Äquivalente Konizität



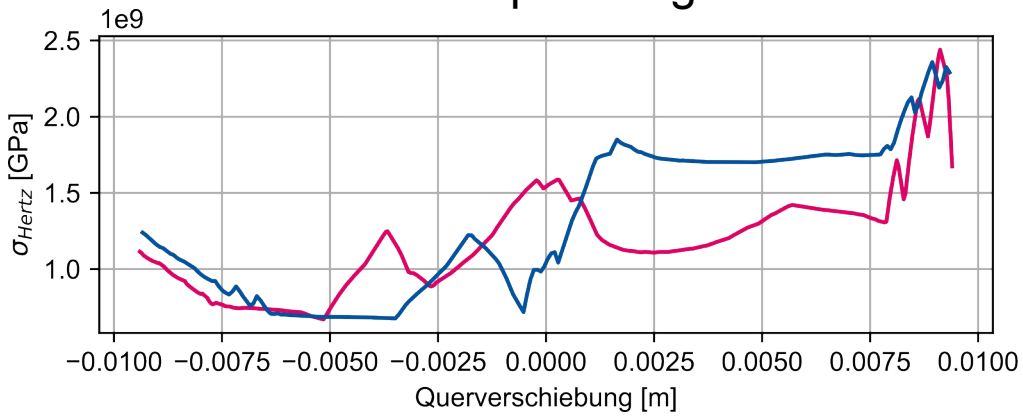
Kontaktverteilung



Formstabilität



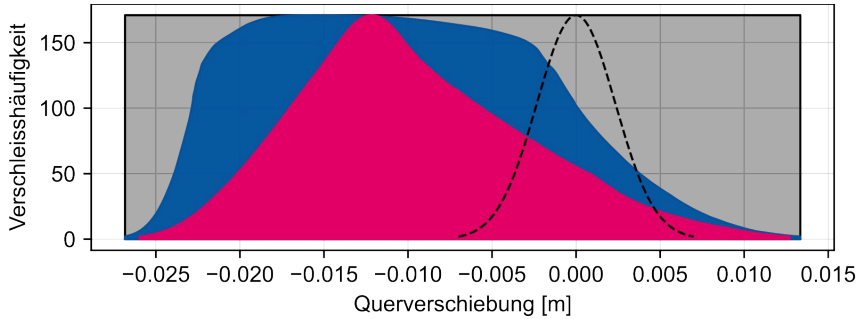
Kontaktspannung



Schlussfolgerungen und Ausblick

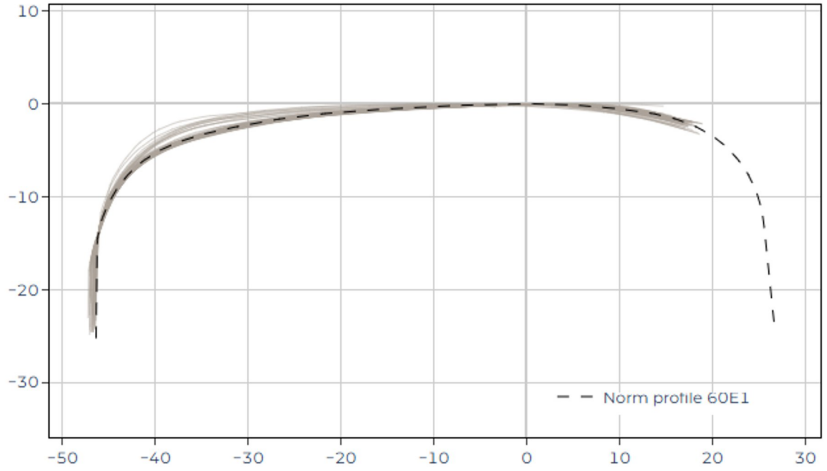
Schlussfolgerungen

- Entwickeltes Verfahren erzeugt stabil ein anwendungsoptimiertes Radprofil
- Eigenschaften des Profils lassen sich über Eingabeparameter und Kriterien steuern
- Optimierung auf Formstabilität führt im betrachteten Anwendungsfall zu hoher äquivalenter Konizität



Ausblick

- Ergänzung um Mechanismus, um reale, variierende Gleisgeometrien einzubeziehen
- Verbesserung des RCF-Kriteriums
- Validierung an realen Fahrzeugen



Fragen?

STADLER

Stadler Rail Schweiz AG
Standort Bussnang
Ernst-Stadler-Strasse 4
CH-9565 Bussnang

Telefon +41 58 595 50 00
www.stadlerrail.com

Maximilian Hecker
Berechnungsingenieur
Zahnradbahnen, Schmalspur- und Spezialfahrzeuge

maximilian.hecker@stadlerrail.com

Stadler Rail Schweiz AG
Standort St. Margrethen
Neudorfstrasse 8
CH-9430 St. Margrethen

Telefon +41 58 595 50 00
www.stadlerrail.com

Dr. Martin Schwickert
Spezialist Fahrtechnik
Zulassungssupport Fahrtechnik
Stv. Leiter Stadler Rail Inspektionsstelle (SRI)

Mobil + 41 79 340 82 78
martin.schwickert@stadlerrail.com