

# Interaktion Rad - Schiene

Berührgeometrie, erste Erkenntnisse  
und Empfehlungen



# INHALT

- 1 Vorstellung**
- 2 Rad-Schienekontakt: Profilpaarung**
  - 2.1 kurze Einführung in die Berührgeometrie und deren Einfluss auf das Fahrverhalten
  - 2.2 Werkzeuge und Vorgehensweise bei der Analyse von Profilpaarungen
  - 2.3 Entwicklung verschleissangepasster Profilpaarungen
- 3 Rad-Schienekontakt: Materialpaarung**
  - 3.1 Besonderheiten Radwerkstoffe bei den Meterspurbahnen
  - 3.2 Besonderheiten Schienenwerkstoffe bei den Meterspurbahnen
- 4 Empfehlungen Rad-Schienekontakt**
  - 4.1 Profilpaarung und Betriebsmassnahmen
  - 4.2 Werkstoffe Rad und Schiene Meterspur
- 5 Erkenntnisse Fahrbahn**
  - 5.1 Fahrbahnformen – Signifikanzmatrix Einfluss-Auswirkung
- 6 Fragen / Diskussion**

# VORSTELLUNG

Gilbert Zimmermann



**Rhätische Bahn**

**Leiter Bahndienst Nord**

**RAILplus**

**Stv. Leiter Systemführerschaft Rad/Schiene**

- Dipl. Bauing. FH
- CAS ET Fahrbahn
- [gilbert.zimmermann@rhb.ch](mailto:gilbert.zimmermann@rhb.ch)



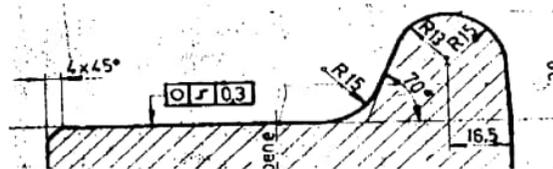
# Profilpaarung



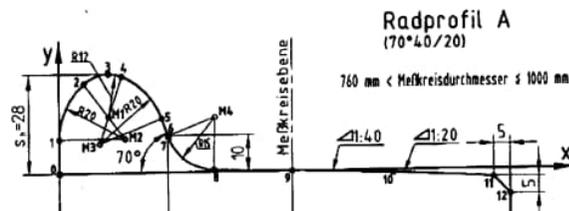
# PROFILPAARUNG

Kurze Einführung in die Berührgeometrie und deren Einfluss auf das Fahrverhalten

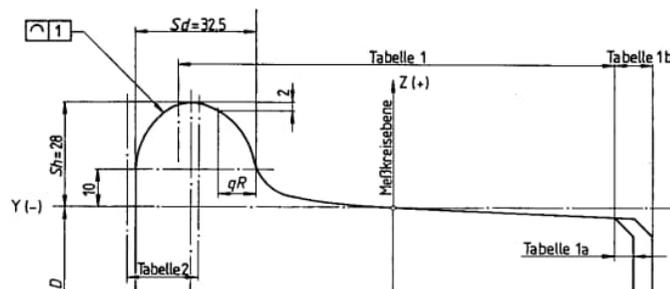
## Historie Profilentwicklung Rad – Schiene: Radprofilvarianten



Zylindrische Radprofile  
(z.B. U-Bahn Berlin)



Kegelförmige Radprofile  
nutzen Selbstzentrierung  
(z.B. heute noch  
Instandhaltungsfahrzeuge)



verschleißangepasste Radprofile:  
S1002 (System 1:40)  
und EPS (System 1:20)

### Meterspur:

Kegelförmige Radprofile  
unterschiedlicher Definition  
Bahn bzw. Netz bezogen  
(Basis: RTE 29500)

verschleißangepasste  
Radprofile:  
RAILplus\_v1A/28.3/25 (Typ A)  
RAILplus\_v1B/28.3/20 (Typ B)

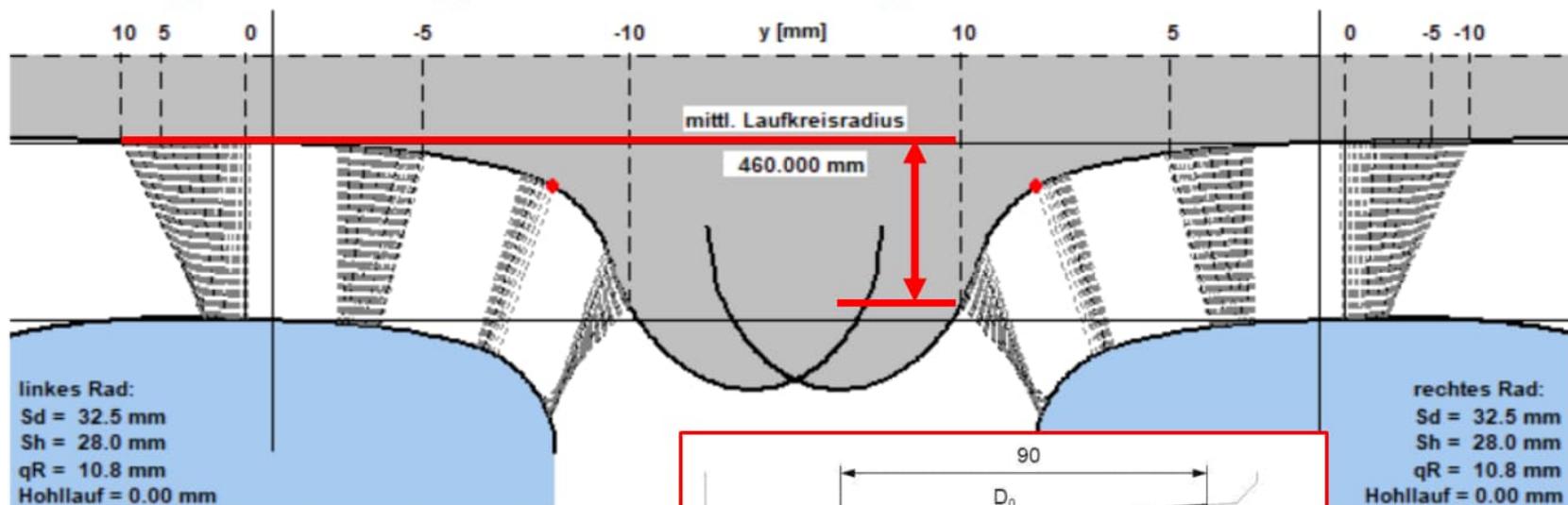
**Systemtechnik**



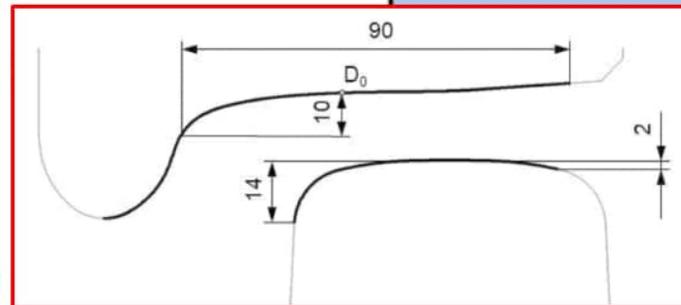
# PROFILPAARUNG

## Laufkreisradius – Unterschied; $\Delta r$ -Funktion

Bei einer Querverschiebung von 10 mm entsteht der gekennzeichnete Radienunterschied:



Berührungspunktbestimmung durch Querverschiebung des Radsatzes auf dem Gleis ergibt  $\Delta r$  - Funktion

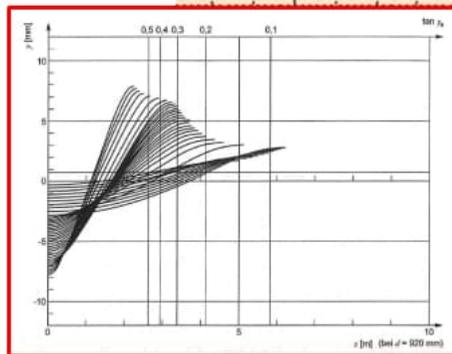
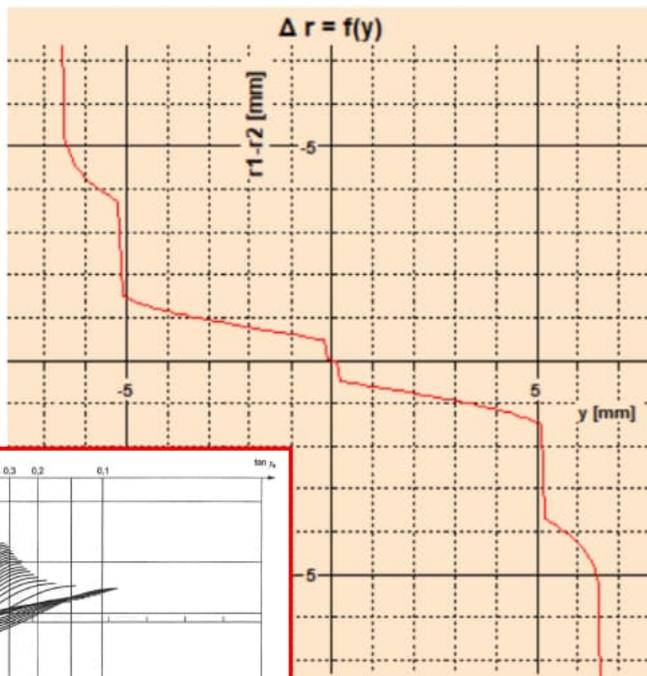


Systemtechnik

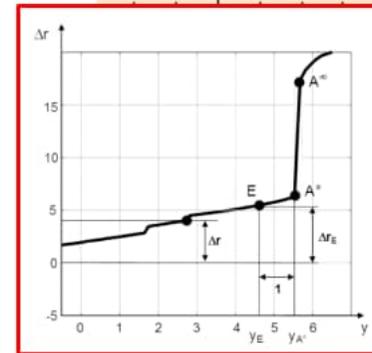
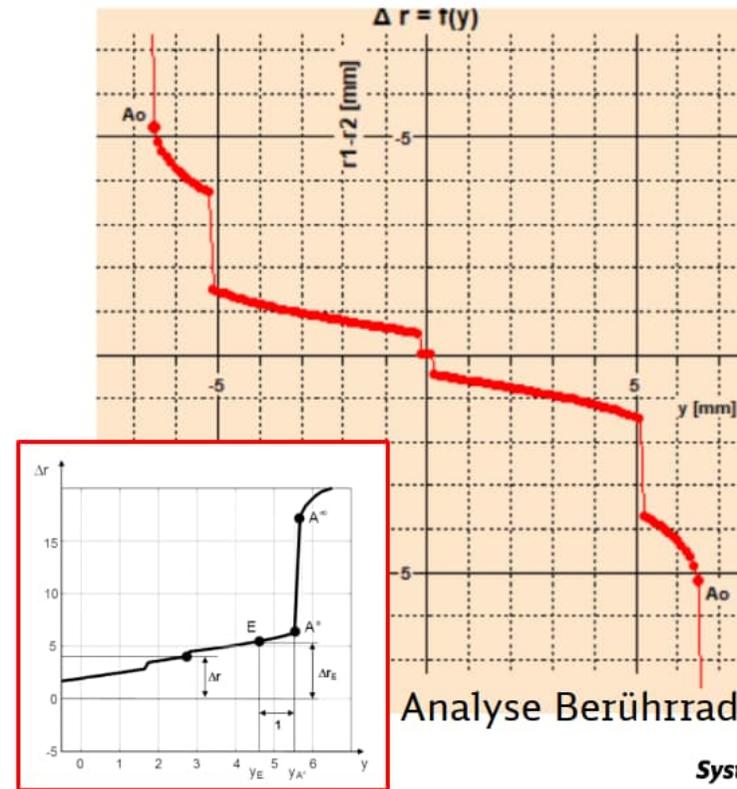
# PROFILPAARUNG

Äquivalente Konizität  $\tan(\gamma_e)$  und Radialstellungsindex  $q_E$

$\Delta r$ -Funktion als Basisgröße **durch** Querverschiebung des Radsatzes auf dem Gleis



Analyse Wellenlauf

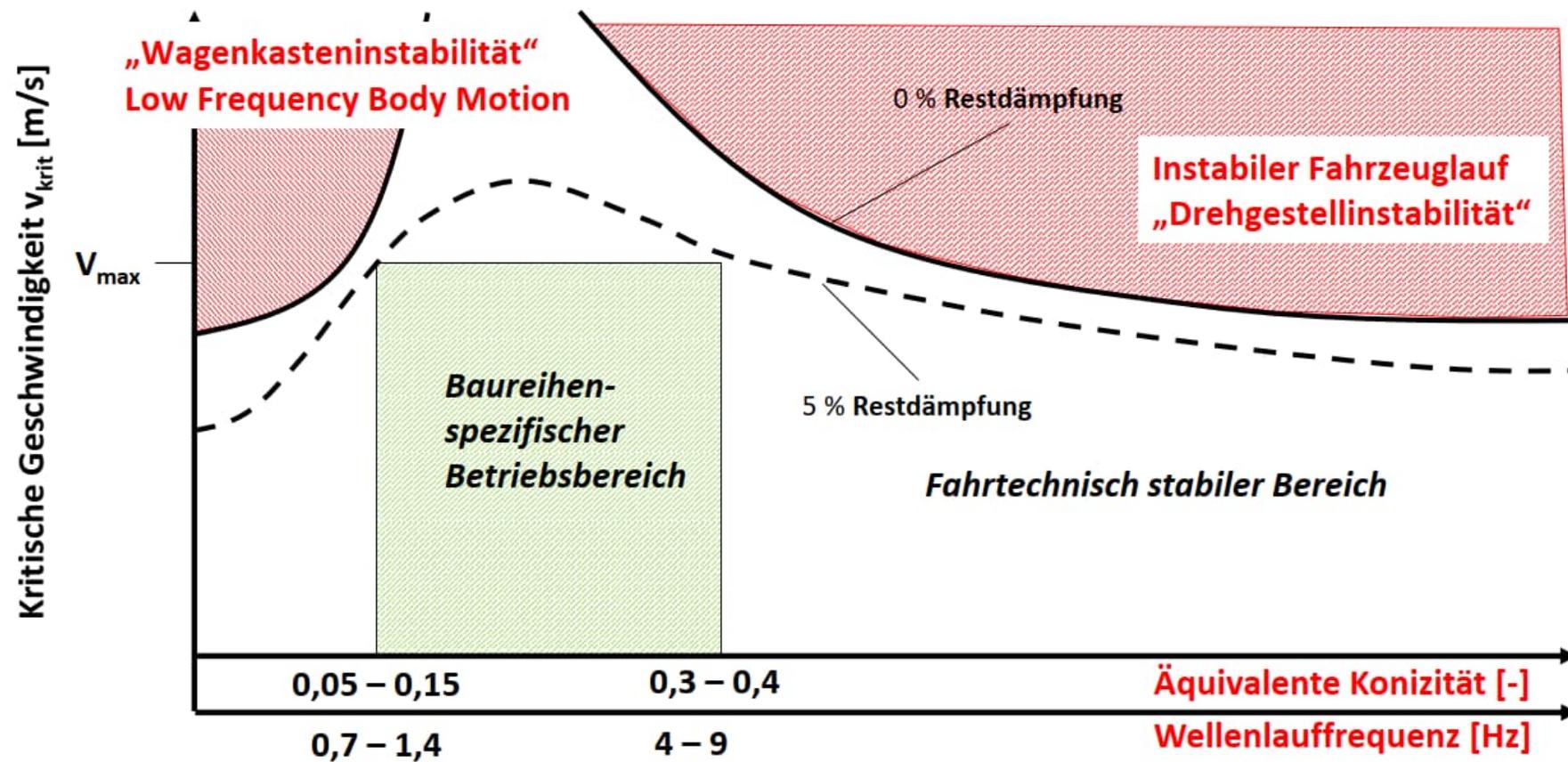


Analyse Berührradien

Systemtechnik

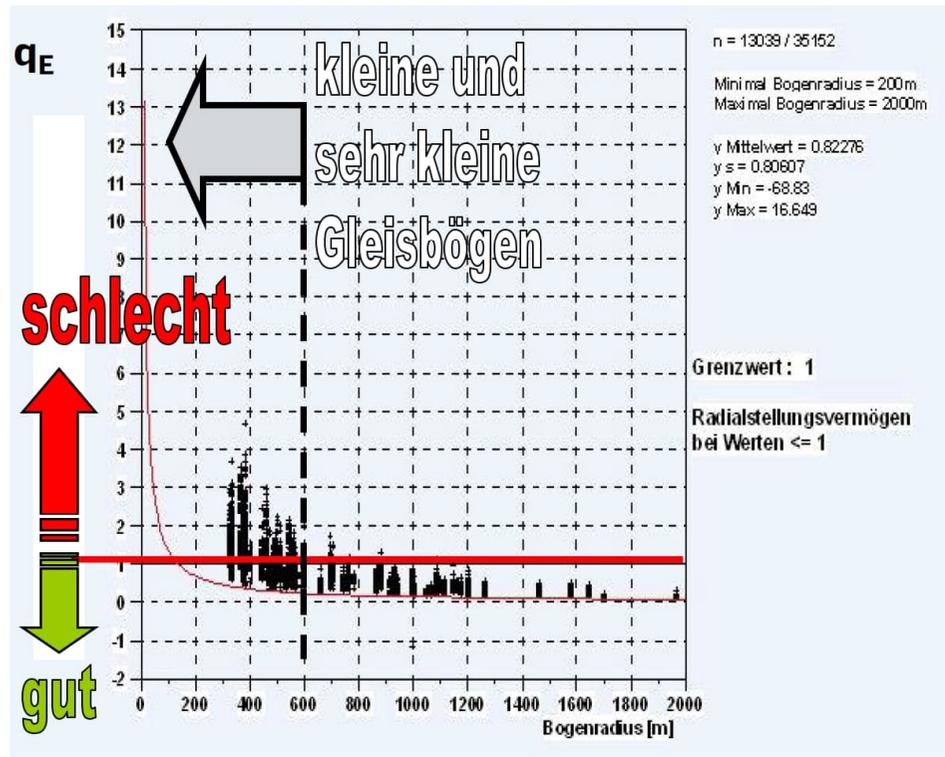
# EINFLUSS AUF DAS FAHRVERHALTEN

## Gerade Strecken

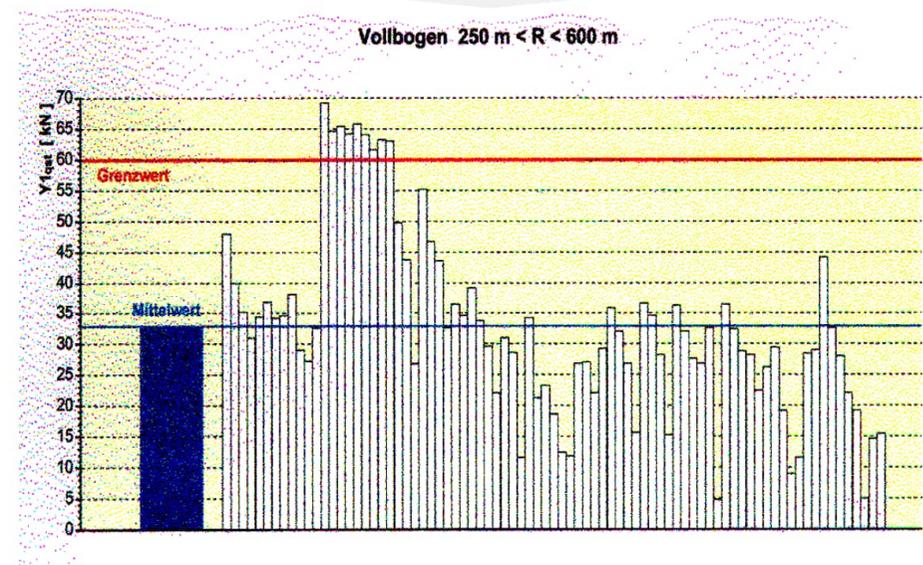


# EINFLUSS AUF DAS FAHRVERHALTEN

## Bogen



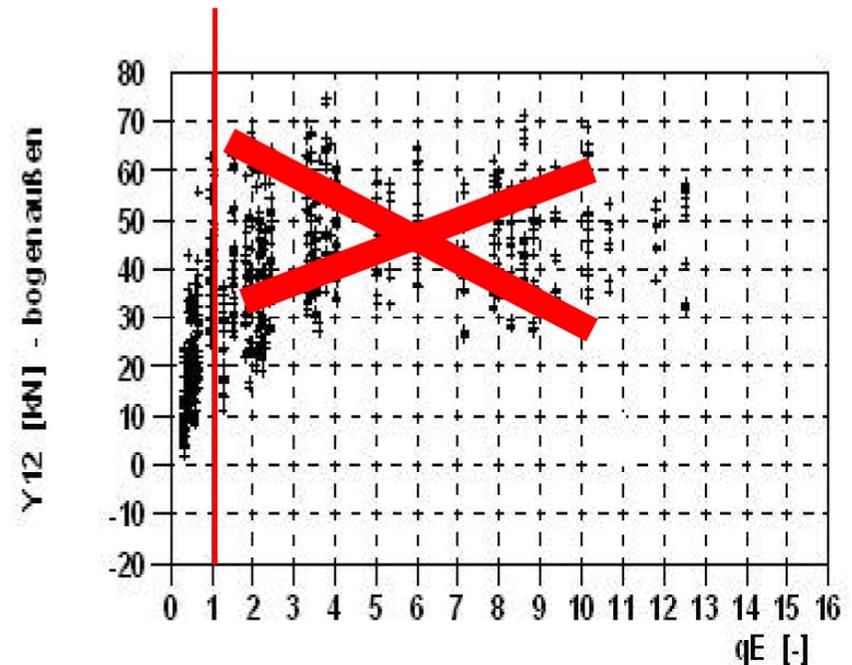
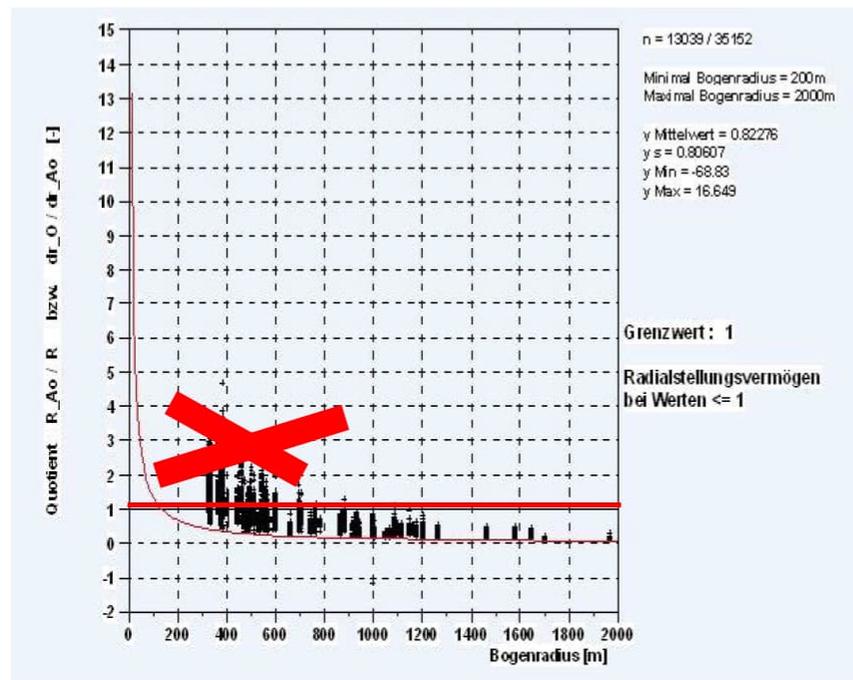
quasistatische Führungskräfte des führenden bogenäußeren Rades je Auswertabschnitt



# EINFLUSS AUF DAS FAHRVERHALTEN

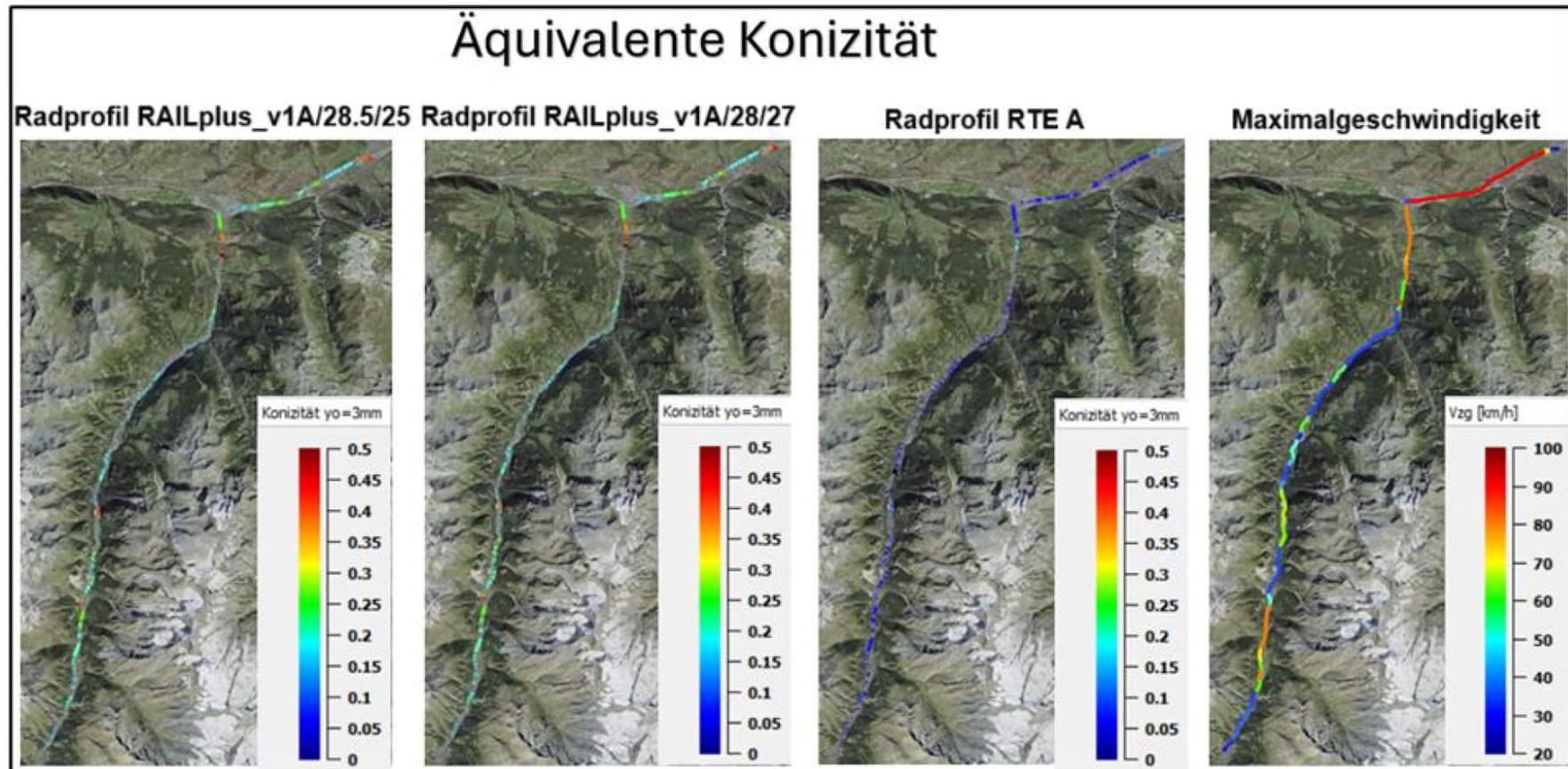
## Bogen

### Reduzierung der Spurführungskräfte und des Verschleißes



# EINFLUSS AUF DAS FAHRVERHALTEN

## Bogen



# Materialpaarung



# MATERIALPAARUNG

## Stähle für Vollräder



<b>Stahlsorte</b>	<b>C</b> %	<b>Si</b> %	<b>Mn</b> %	<b>Rm</b> MPa	<b>ReH</b> MPa	<b>A</b> %
<b>ER7</b>	≤ 0,52	≤ 0,40	≤ 0,80	820 - 940	≥ 520	≥ 16
<b>ER8</b>	≤ 0,56	≤ 0,40	≤ 0,80	860 - 980	≥ 540	≥ 16
<b>ERS8</b>	≤ 0,57	≤ 1,10	≤ 1,10	900 – 1.020	≥ 580	≥ 14
<b>ER9</b>	≤ 0,60	≤ 0,40	≤ 0,80	900 – 1.050	≥ 580	≥ 14

# MATERIALPAARUNG

## Stähle für Bandagen (Radreifen) in der Meterspur

Hersteller	Stahlsorte	C %	Si %	Mn %	Rm MPa	ReH MPa	A %
Gröditz	<b>B6Z</b>	≤ 0,65	≤ 0,42	≤ 0,90	950 – 1.080		≥ 12
Lucchini	<b>B7T</b>	0,57-0,67	≤ 0,015	≤ 0,90	1.070 - 1.240	≥ 680	
Gröditz	<b>KVR 600</b>	0,59*	0,25*	0,83*	880 – 1.000	≥ 470	≥ 12
BVV	<b>Exzellent**</b>				900 – 1.050	≥ 520	
BVV	<b>Excelsior (N)</b> Excelsior H** Excelsior So**	≤ 0,7	≤ 0,4	≤ 0,90	800 – 950 900 – 1.050 1.050 – 1.200	≥ 380 ≥ 540 ≥ 680	≥ 10
	<b>B6</b>	≤ 0,65	≤ 0,5	≤ 0,90	920 – 1.050	-	≥ 12

\* Ist-Werte

\*\* Sollwerte fehlen teilweise

# MATERIALPAARUNG

## Stähle für Schienen



Stahlsorte	C %	Si %	Mn %	Rm MPa	A %	HBW
R200	0,38 - 0,62	0,13 - 0,60	0,65 - 1,25	≥ 680	≥ 14	200 - 240
R220	0,48 - 0,62	0,18 - 0,62	0,95 - 1,30	≥ 770	≥ 12	220 - 260
R260	0,60 - 0,82	0,13 - 0,60	0,65 - 1,25	≥ 880	≥ 10	260 - 300
R350HT	0,70 - 0,82	0,13 - 0,60	0,65 - 1,25	≥ 1 175	≥ 9	350 - 390
R400HT	0,88 - 1,07	0,18 - 0,62	0,95 - 1,35	≥ 1.280	≥ 9	400 - 440

**Unterschied zu Vollrädern:** Anforderungen an die Härte (HBW), aber **keine** Streckgrenze

# MATERIALPAARUNG

## Schäden an Rad und Schiene

- **Überrollung der Schiene durch das Rad**



(Foto: DB Systemtechnik, Zoll)

- **Kontaktfläche:** ca. 1-2 cm<sup>2</sup>
- **Dauer:** ca. 0,1 – 1 ms

## (Adhäsiver) Verschleiß

- Materialabtrag

### Querprofil

- Rad: Spurkranz, Hohllauf
- Schiene: Fahrkantenverschleiß

### Längsprofil

- Rad: Polygonisierung
- Schiene: Riffel, Schlupfwellen

### Abhilfemaßnahmen:

- Rad-Schiene-Profilpaarung optimieren
- Schmierung
- Werkstoff hoher Härte

# MATERIALPAARUNG

## Schäden an Rad und Schiene

- **Überröhlung der Schiene durch das Rad**



(Foto: DB Systemtechnik, Zoll)

- **Normalspannung** aus Fahrzeugmasse und Fahrdynamik: bis 2.000 MPa
- **Tangentialspannung** aus Antrieb/ Bremse und Fahrdynamik: bis 500 MPa

## Rollkontaktermüdung

### (Rolling Contact Fatigue, RCF)

Wiederholte plastische Verformungen bei Überschreiten der **Streckgrenze** und Rissbildung in Bereichen mit höchster Kontaktspannung

#### Rad:

- Laufflächenrisse, Ausbröckelungen, Risse unter der Lauffläche

#### Schiene:

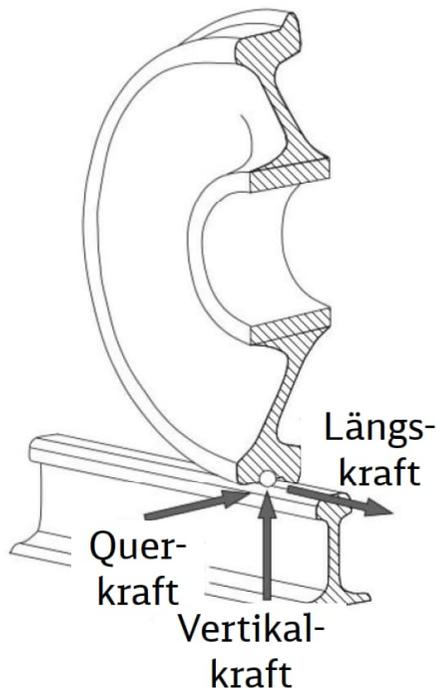
- Head Checks, Squats

#### Abhilfemaßnahme:

- Rad-Schiene-Profilpaarung optimieren
- Werkstoff mit höherer Streckgrenze

# MATERIALPAARUNG

## Woher kommen die Schäden?



- **Relativbewegungen** zwischen Rad und Schiene beim Überrollen -  
**Schlupf:** Antriebs- und Bremschlupf
- Einwirkung des Bremsklotzes

⇒ **Reibwärme** ⇒ **Gefügewandlung, Rissbildung**

### Rad:

- Laufflächenrisse, Ausbröckelungen

### Schiene:

- Schleuderstellen, Squats

Problem nimmt zu, je:

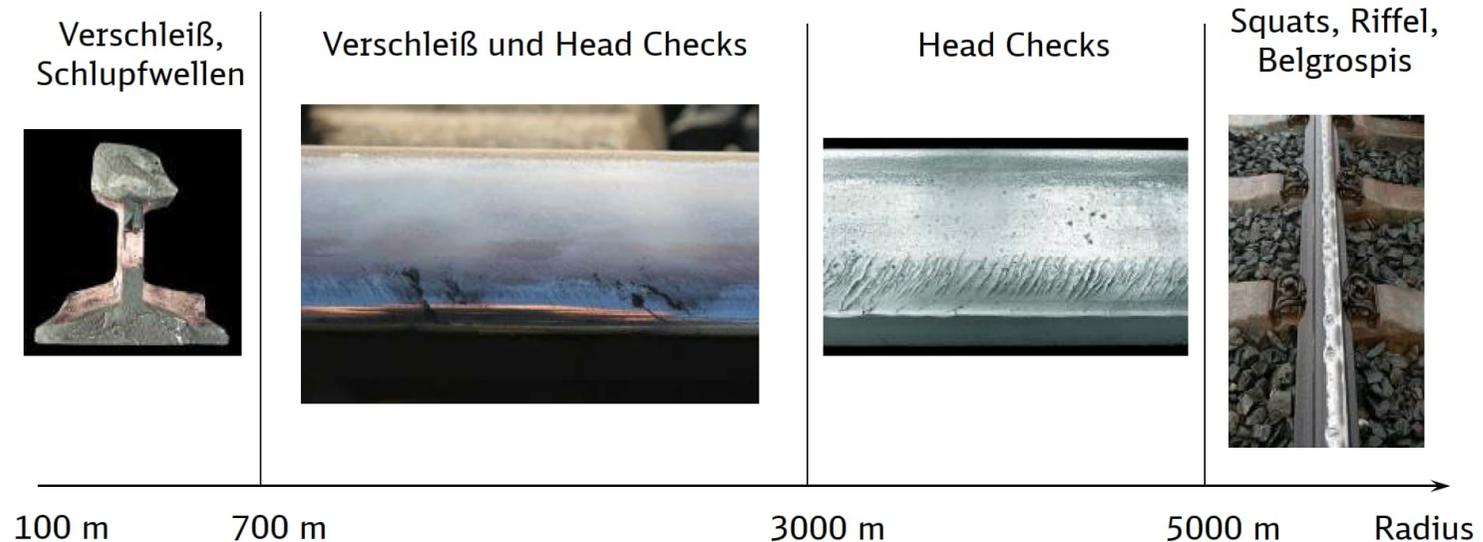
- höher die Traktions- und Bremsleistung
- höher der Kohlenstoffgehalt/ Festigkeit des Stahles
- höher die Achslast, kleiner die Räder, höher dynamische Anteile (Radunrundheiten, Gleislagefehler, etc),

### Abhilfemaßnahme:

- Optimierung Antriebs- / Bremssteuerung/ Gleitschutz
- Werkstoff

# MATERIALPAARUNG

## Differenzieller Materialeinsatz je nach Gleisgeometrie



**Deutsche Bahn:** Einsatz des Schienenstahls in Abhängigkeit vom Bogenradius

- Bogenradius  $\leq 1500$  m: R350HT vorgeschrieben seit 12/2008
- Bogenradius  $\leq 3.000$  m: R350HT empfohlen bei starker Head-Check-Belastung
- Gerades Gleis: R260 vorgeschrieben in Ril 820

# WEICHES RAD – HARTE SCHIENE?

*Machen die harten Räder tatsächlich die Schienen kaputt? **NEIN!***

**Höherfeste Stähle für Räder und Schienen bewirken**

- Weniger Verschleiß **und** Rollkontaktermüdungsschäden am Gegenpartner
- D.h weniger (ungeplanten) Instandhaltungsaufwand, längere Standzeiten für beide Kontaktpartner

**Warum?**

- Höhere Werkstofffestigkeit heißt höherer Widerstand gegen:
  - plastische Verformung, **adhäsiven Verschleiß** und Rollkontaktermüdung

**Profil härterer Räder und Schienen bleibt länger stabil**

- “Gutes Profil”: weniger hohe Kontaktspannungen, weniger Verschleiß am Gegenpartner - **Aber:** “Gutes Profil” und “Gutes Profilmanagement” gefragt!



# WEICHES RAD – HARTE SCHIENE?

- ↳ **Höherfeste Stähle sind kerbempfindlicher!**
- ↳ **Höherfeste Stähle reagieren empfindlicher auf Reibwärme!**
  - Gefahr der Rissbildung an Defekten an/ unter der Oberfläche
  - Rissausbreitung ungestört, wenn der Verschleiß fehlt (gerades Gleis!)
  - Instandhaltungsintervalle (z.B. Schienenschleifen/ -fräsen) verkürzen oder
  - Höherfeste Stähle nur dort einsetzen, wo wirklich erforderlich
  - Motto: “Viel hilft viel!” kann Schaden anrichten
- ↳ **Bei Neuentwicklungen auf das **Gesamtsystem** achten!**
  - Werkstoffe
  - Profile für Räder und Schienen
  - Antriebs- und Bremskonzepte,
  - Radsatzführungen, etc.



# Empfehlungen Rad-Schienekontakt



# PROFILPAARUNG

## Schienenprofilvarianten

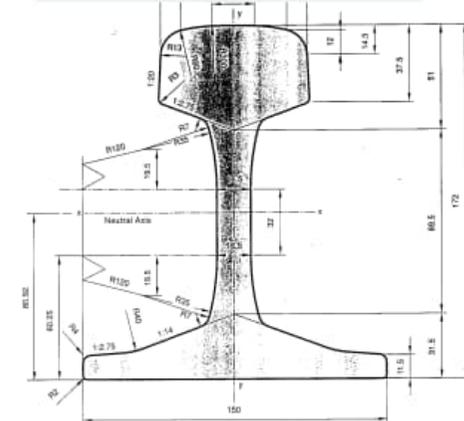
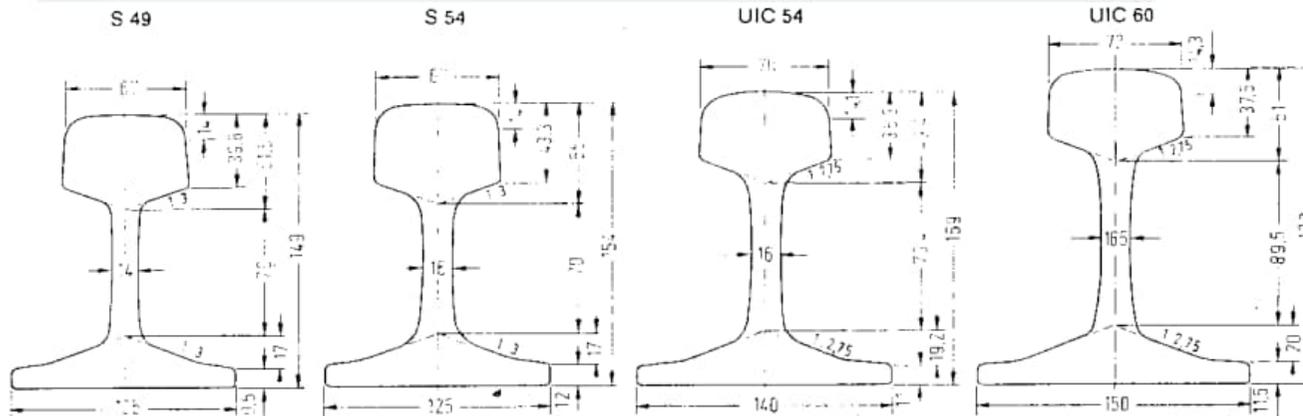
**Meterspur:**

Radienbasiertes Schienenkopprofil  
in Abhängigkeit des Metergewichtes  
36E3 und 46E1

noch nicht vorhanden  
Thema in Railplus P3  
(asymmetrisches Schienenprofil)

Radienbasiertes Schienenkopprofil  
in Abhängigkeit des Metergewichtes

berührgeometrisch  
optimiertes  
Schienenprofil 60E2  
(ÖBB: ballige Schiene)



# EMPFEHLUNGEN BERÜHRGEOMETRIE



## Historie Profilentwicklung Rad - Schiene

- Ziel muss immer die **verschleißangepasste Profilpaarung** sein;
- Kriterium: berührgeometrische Parameter, Schwerpunkte: äquivalente Konizität, Radialstellungsindex;
- das entwickelte RAILplus\_v1A und RAILplus\_v1B funktioniert erstmals bei beiden Einbauneigungen (Gegensatz zur Normalspur);
- Im geraden Gleis auf **Mindestspurweite** achten, keine Spurverengungen (analog wie Normalspur);
- **Spurerweiterung** im Gleisbogen hat **massiven Einfluss** auf Berührgeometrie (Gegensatz zur Normalspur)

## Berührgeometrie und deren Einfluss auf das Fahrverhalten

- gerades Gleis mit low frequency body motion und Instabilität (Beherrschung der Sinuslaufrequenz anhand der äquivalenten Konizität);
- Bogenlauf mit gutem und schlechtem Stellungsvermögen (Beherrschung Verschleiß, RCF und Lärm);
- Einfluss der Gleislage:  
vertikal schlechter im Gegensatz zur Normalspur,  
lateral vergleichbar mit Normalspur – hier besteht noch Untersuchungsbedarf!

# EMPFEHLUNGEN BERÜHRGEOMETRIE



## Werkzeuge und Vorgehensweise bei der Analyse der Profilpaarungen an Beispielen

- Verwendung und Nutzung von Werkzeugen zum Verständnis und zur Optimierung der berührgeometrischen Interaktion bei der Meterspur;
- Erste Ergebnisse: Entwicklung von RAILplus\_v1A und RAILplus\_v1B auch mit Spurkranzschwächung;
- Konsequenz für das Schienenprofil 36E3 => auf 46E1 ändern (damit auch geringere Flächenpressung);
- weitere Optimierung der Schienenprofilgeometrie ggf. asymmetrische Profile im Gleisbogen notwendig

## Meterspurbahnen: Entwicklung verschleißangepasster Profilpaarungen unter Berücksichtigung der Kontaktmechanik und Ergebnisse Betriebserprobung (Verschleiß- und Schadensentwicklungen)

Auf Maßnahmen wie Spurkranzschmierung und Schienenkopfkonditionierung kann mit der bestehenden Flotte nicht verzichtet werden!

Die nächsten Schritte sind:

- materialeitige Optimierung (Rad- und Schienenwerkstoffe)
  - fahrtechnische Optimierung (low frequency body motion und Instabilität, Radialstellungsvermögen)
  - fahrwegseitige Optimierung (Spurerweiterung, Fahrbahnsteifigkeit, Schienenbefestigungen)
- a) für bestehende Flotte
  - b) für künftige Fahrzeugkonstruktionen
  - c) künftige Fahrweggestaltung

# EMPFEHLUNGEN MATERIALPAARUNG



## Werkstoffe an Rad und Schiene

### ▪ Radwerkstoffe

- ER7, B4N und KVR 600 zu weich
- **Vollräder: ER9** (Toleranzband unten „abschneiden“)
- Höherfeste Werkstoffe wie ER10 müssen getestet werden, zuvor Radprofiloptimierung
- **Radreifen: B6z** (Vorgabe einer Streckgrenze  $ReH > 580$  MPa)
- Nach Radprofiloptimierung (möglicherweise) ER9 generell ausreichend

### Schienenwerkstoffe

- **R260** nur für gerades Gleis ausreichend
- **R350HT** als Standard und **R400HT** nur bei hohem Verschleiß (Schlupfwellen) in sehr engen Bögen (Verschleißanalyse der Schienen notwendig)
- **Bainitische Schienenstähle** wegen zu hohem Verschleiß nicht zu empfehlen

# Erkenntnisse Fahrbahn



# AUSWAHL DER FAHRBAHNFORMEN

## Komponenten

		Variationen
	<b>SCHIENE</b>	46 E1   54 E2 R260   350 HT   400 HT
	<b>STÜTZPUNKT (ZW)</b>	Hochelastisch   Elastisch   Steif
	<b>SCHWELLE</b>	Beton   Beton besohlt   Stahl   (Holz)   (Y-Stahl)
	<b>SCHOTTER</b>	Keine Variationen der Schottergüte Mit/ohne Unterschottermatte
	<b>UNTERBAU/ UNTERGRUND</b>	Bestehender Untergrund   PSS   AC-Rail



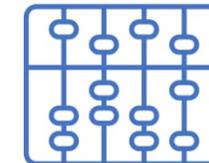
# AUSWAHL DER FAHRBAHNFORMEN

## Vorgehen



Wie stark ist der Zusammenhang zwischen den einzelnen Komponenten und den untersuchten Auswirkungen?

### Signifikanzmatrix



Wie beeinflussen unterschiedliche Variationen der einzelnen Komponenten die untersuchten Auswirkungen?

### Einflussmatrix

# AUSWAHL DER FAHRBAHNFORMEN

## Vorgehen

Die Ergebnisse der Signifikanz- und Einflussmatrix basieren auf der Zusammenführung des innerhalb P4 erarbeiteten Wissens und umfassen dabei folgende Quellen:



### Faktenblätter

Ausarbeitungen durch jeweils Verantwortliche zu unterschiedlichen Teilaspekten. Diese werden in Form von Faktenblättern dokumentiert.



### Standardelemente

Im Rahmen des Verschleissfaktors werden durch die TU Graz auch Standardelemente erarbeitet. Diese zeigen den Zusammenhang eingesetzter Komponenten und örtlicher Randbedingungen (Belastung, Radius) mit dem technischen Fahrbahnverhalten.



### Expertenwissen

Im Rahmen der Erarbeitung „Fahrbahnformen“ wurden auch Expertengespräche mit den jeweiligen Wissensträgern durchgeführt, um die gesamte Erfahrung sowie das Wissen aus P4 einfließen zu lassen.



### Fahrbahnmodelle

Relevante Erkenntnisse werden auch in den Fahrbahnmodellen gewonnen. Diese werden seitens ViF (Lärm, Schienenverschleiss) und Baugrund Dresden (Unterbauverhalten) erarbeitet. Finale Ergebnisse sind hier 2025 zu erwarten.

Die aktuellen Ausarbeitungen beinhalten den Wissensstand 09/2024. Die Standardelemente sind in Finalisierung, die weiteren Fahrbahnmodelle in Erarbeitung. Daher können die Erkenntnisse und Empfehlungen noch nicht als final bestätigt angesehen werden.

# AUSWAHL DER FAHRBAHNFORMEN

## Signifikanzmatrix

Die Ergebnisse der Signifikanzmatrix zeigen, dass sich Lärm und Schienenverschleiss insbesondere durch Schienen- und Zwischenlagenwahl beeinflussen lassen. Erschütterung und Gleislage durch Wahl und Dimensionierung von Schwellen, Schotterbett und Untergrund.

2 Signifikanter Einfluss

1 Indirekter Einfluss bzw. bei spezifischen Randbedingungen

0 Kein direkter signifikanter Einfluss

	Lärm (Kurvenkreischen)	Lärm	(Schienen-) Verschleiss	Erschütterung	Gleislage (Komp.-Verschleiss)
 Profil	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0
Güte	0,0	1,0	2,0	0,0	0,0
 Zwischenlagen	0,5	2,0	2,0	0,5	2,0
Schwellentyp	0,5	0,5	1,0	1,5	2,0
 Besohlung weich	0,0	0,0	0,5	2,0	2,0
Besohlung steif	0,0	0,0	0,0	0,5	2,0
 Schotterbett	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0
Unterschottermatte	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0
 Unterbau/Untergrund	0,0	0,0	0,0	2,0	2,0

# Diskussion / Fragen



# QUELENNACHWEIS



Folien zur Berührgeometrie: Dipl.-Ing. Thomas Kolbe, DB Systemtechnik

Folien zur Materialpaarung: Dr. Ing. Katrin Mädler, DB Systemtechnik

Analyse-Grafiken: Roland Müller, RAILplus

Grafiken Sinuslauf: Gilbert Zimmermann, RhB / FH GR

Grafiken zur Fahrbahnformen: DI Dr. Matthias Landgraf, RAILplus

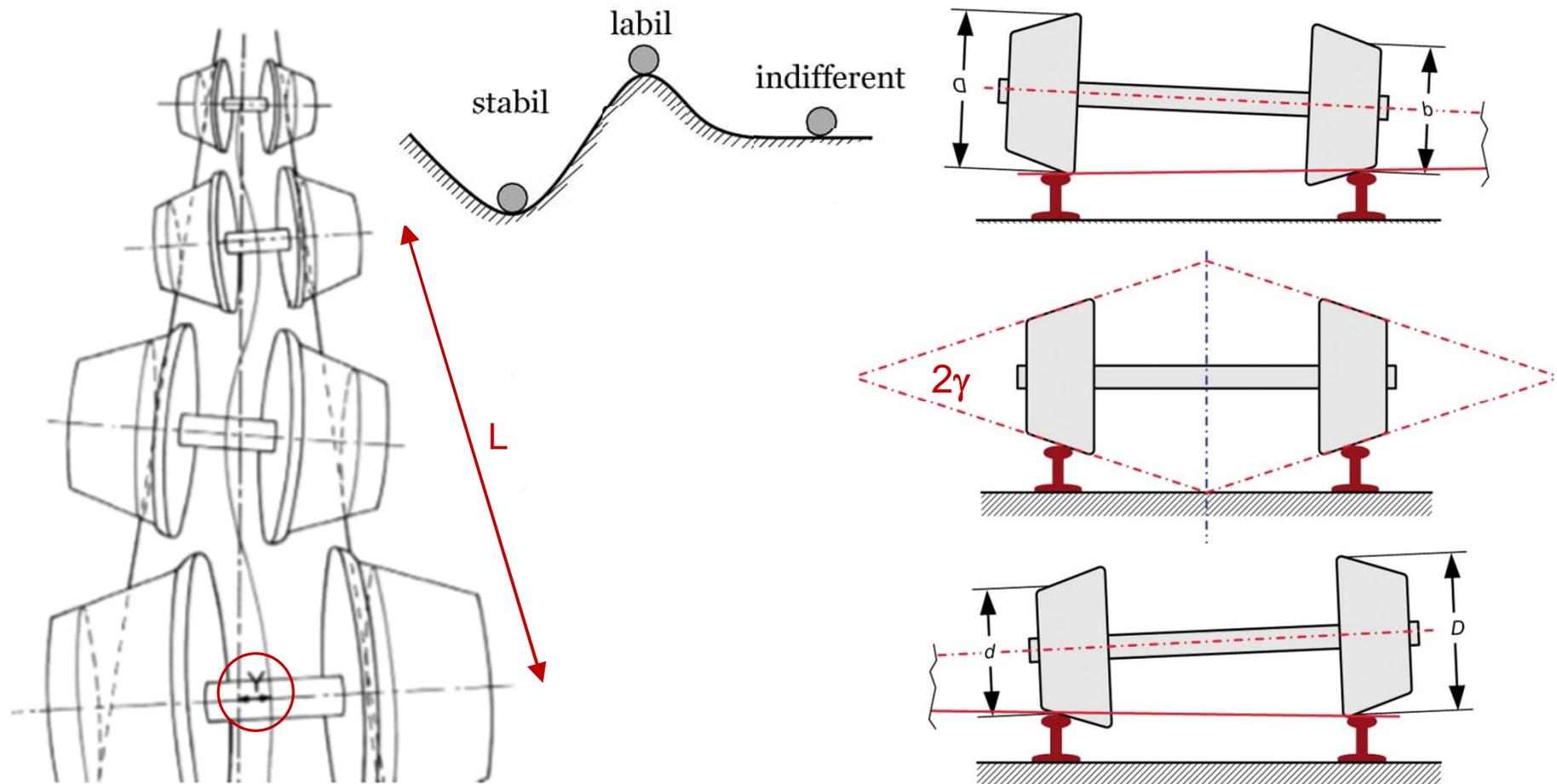


**Danke für die Aufmerksamkeit**

**Back up**

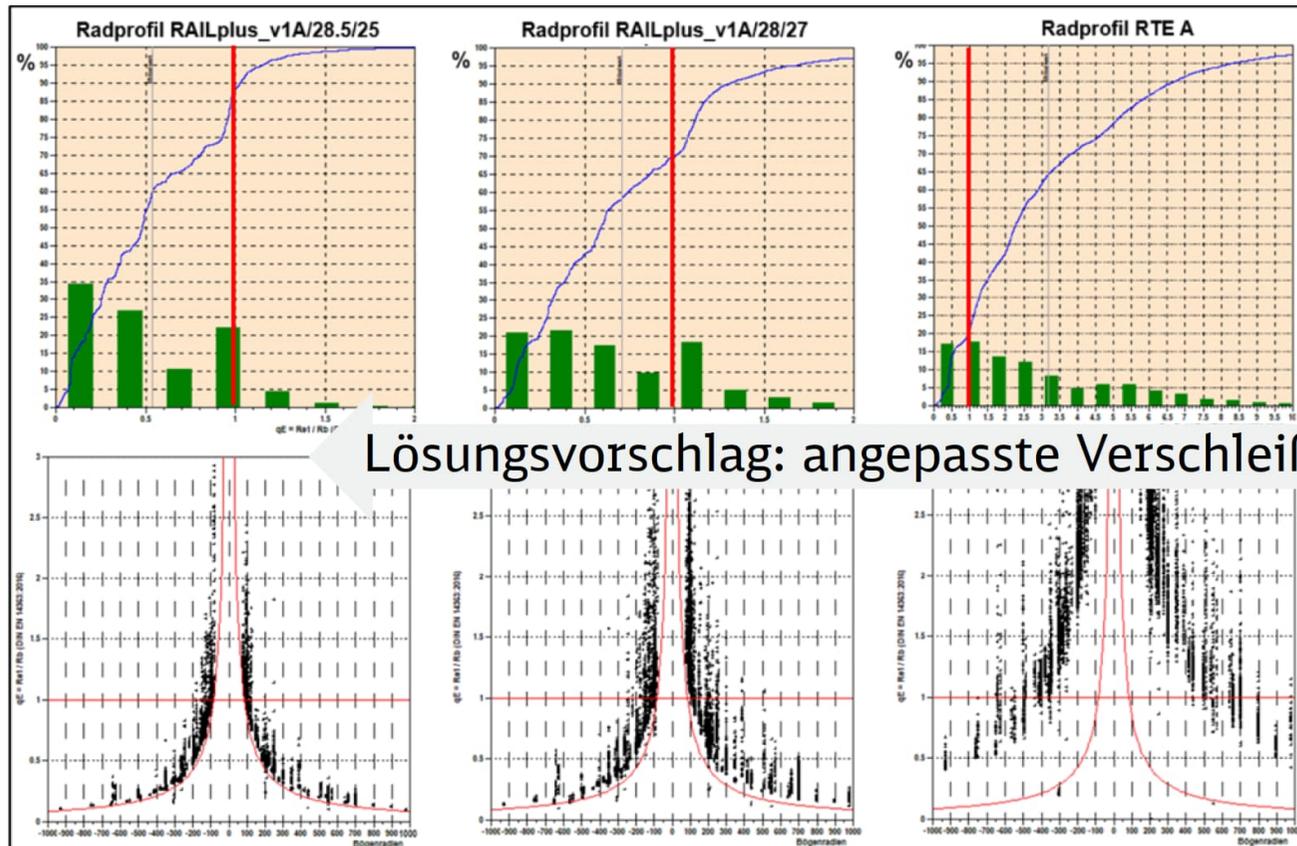


# SINUSLAUF IN DER GERADEN



# EINFLUSS AUF DAS FAHRVERHALTEN

Bogen, Meterspur



**Systemtechnik**

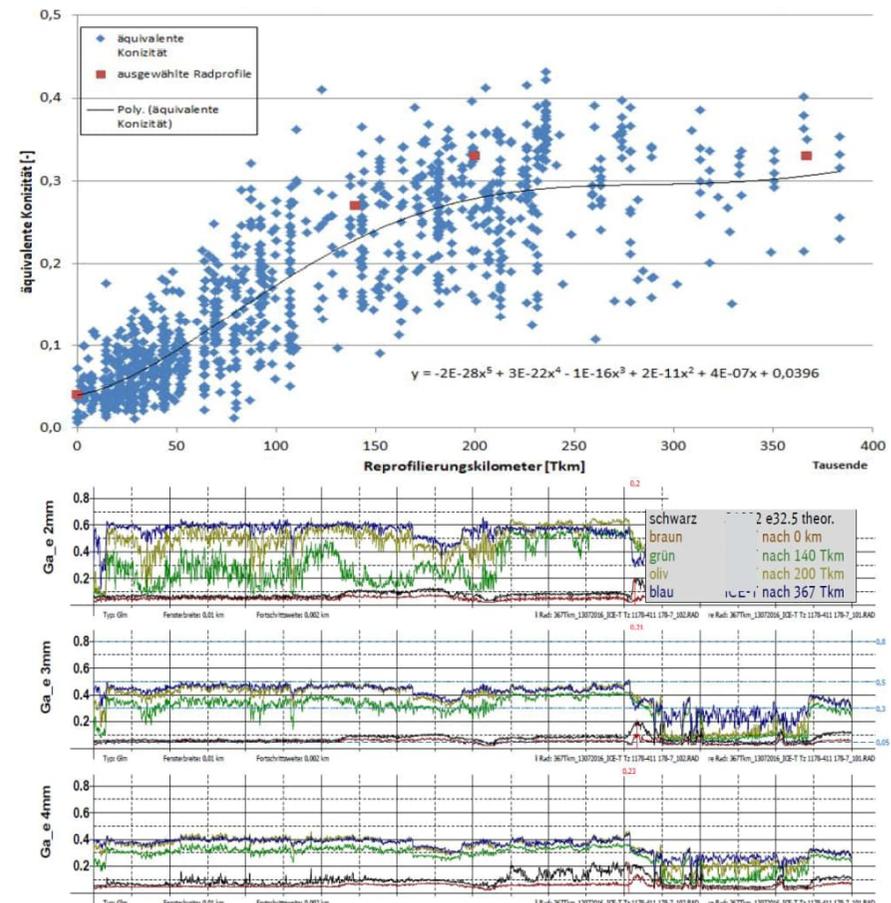
# ZUKUNFT BERÜHRGEOMETRIE

**Die Zukunft könnte aus der Sicht der Berührgeometrie so aussehen:**

Radprofile werden durch Messanlagen in den Werkstätten und/oder auf der Strecke regelmäßig erfasst.

Schienenprofile werden durch Messfahrzeuge bzw. Instandhaltungsfahrzeuge (Schleif- oder Fräsfahrzeuge) oder Regelfahrzeuge mit Messtechnik in Fristen bzw. kontinuierlich erfasst.

Zentral werden die Daten analysiert... und daraus die Instandhaltung definiert.



**XY**  
xy

