

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



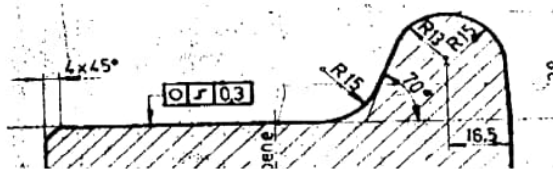
Profilpaarung



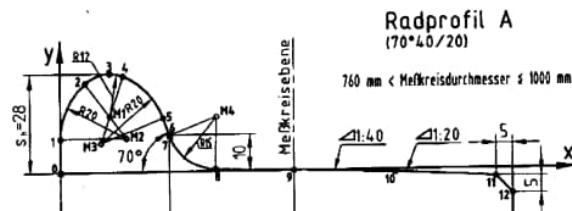
PROFILPAARUNG

Kurze Einführung in die Berührgeometrie und deren Einfluss auf das Fahrverhalten

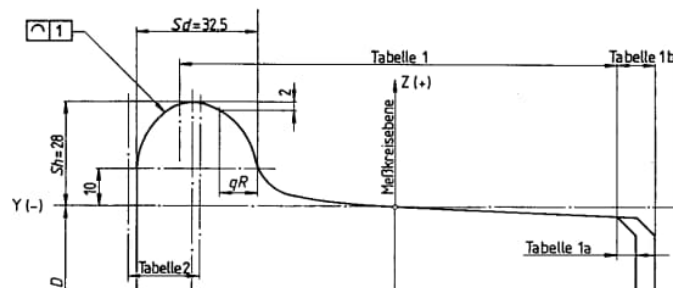
Historie Profilentwicklung Rad – Schiene: Radprofilvarianten



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:

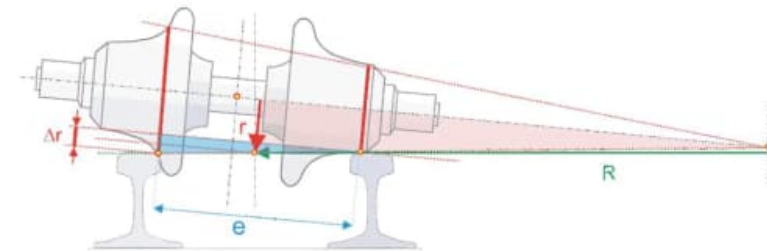
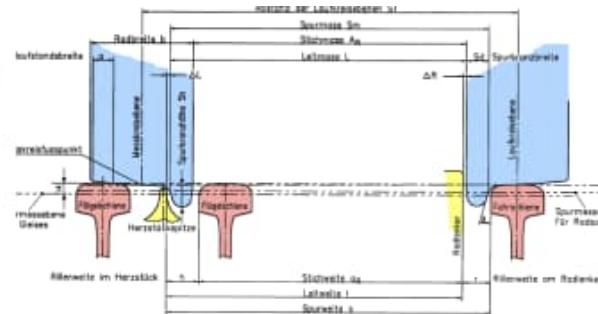
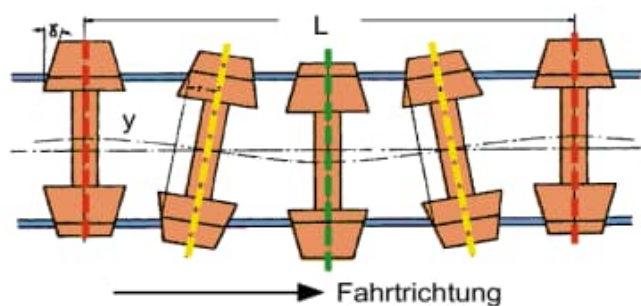
Kegelförmige Radprofile
unterschiedlicher Definition
Bahn bzw. Netz bezogen
(Basis: RTE 29500)

verschleißangepasste
Radprofile:
RAILplus_v1A/28.3/25 (Typ A)
RAILplus_v1B/28.3/20 (Typ B)

Systemtechnik

EINFLUSS AUF DAS FAHRVERHALTEN

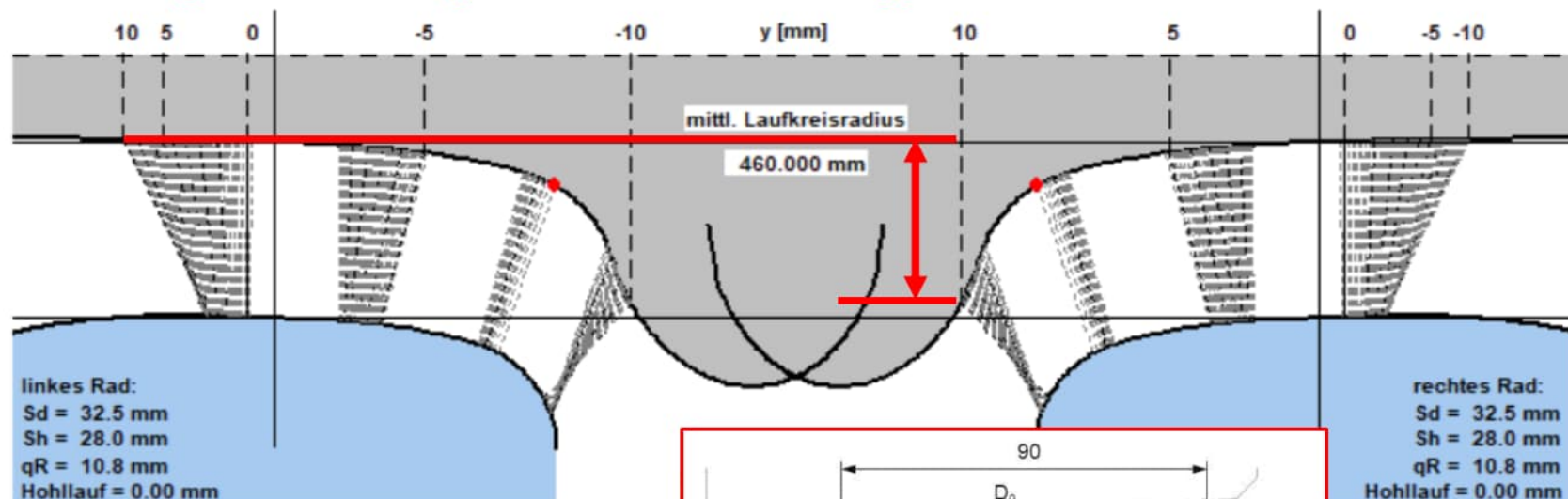
Fokus Meterspurbahnen: was passiert im Bogen?



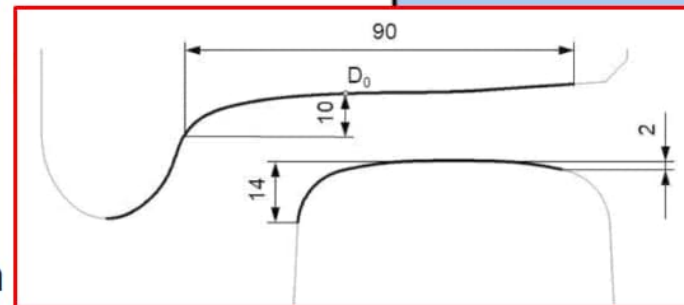
PROFILPAARUNG

Laufkreisradius – Unterschied; Δr -Funktion

Bei einer Querverschiebung von 10 mm entsteht der gekennzeichnete Radienunterschied:



Berührungspunktbestimmung durch Querverschiebung des Radsatzes auf dem Gleis ergibt Δr - Funktion

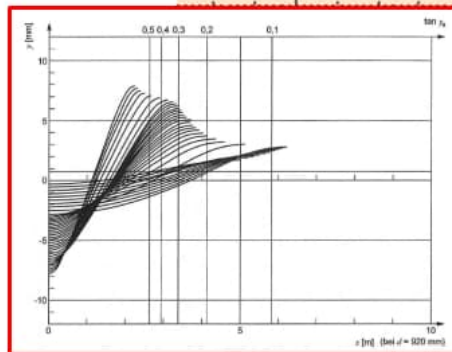
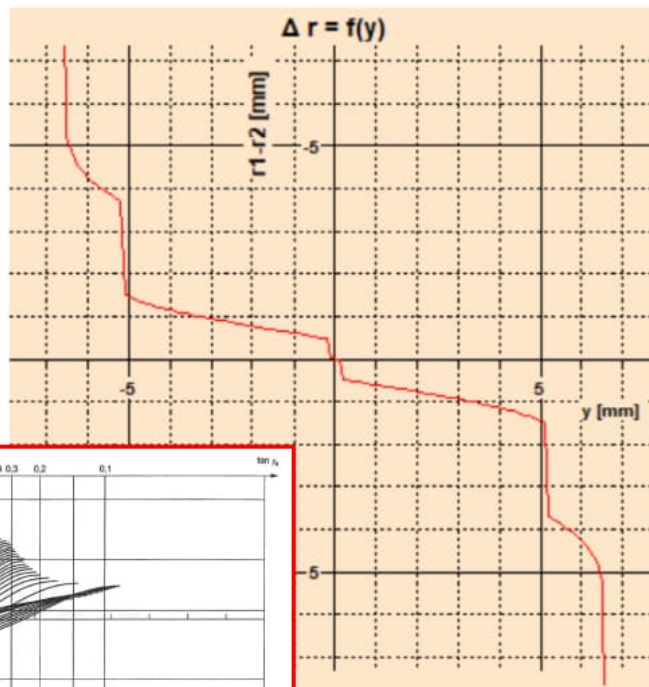


Systemtechnik

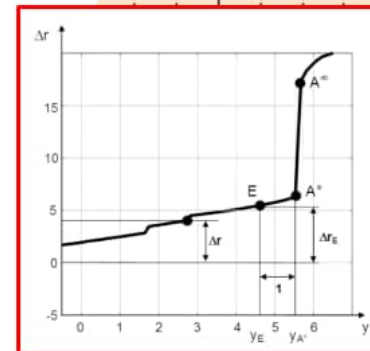
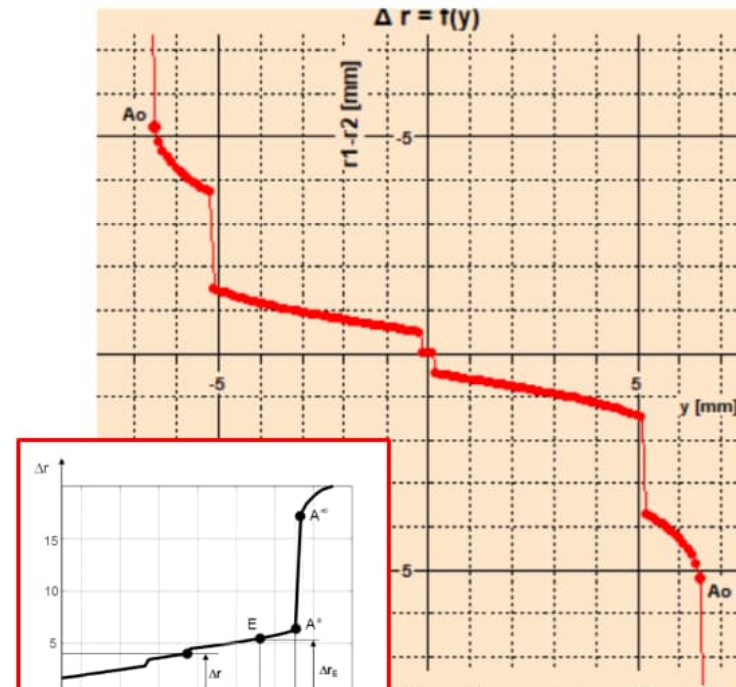
PROFILPAARUNG

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

Δr -Funktion als Basisgröße **durch** Querverschiebung des Radsatzes auf dem Gleis



Analyse Wellenlauf

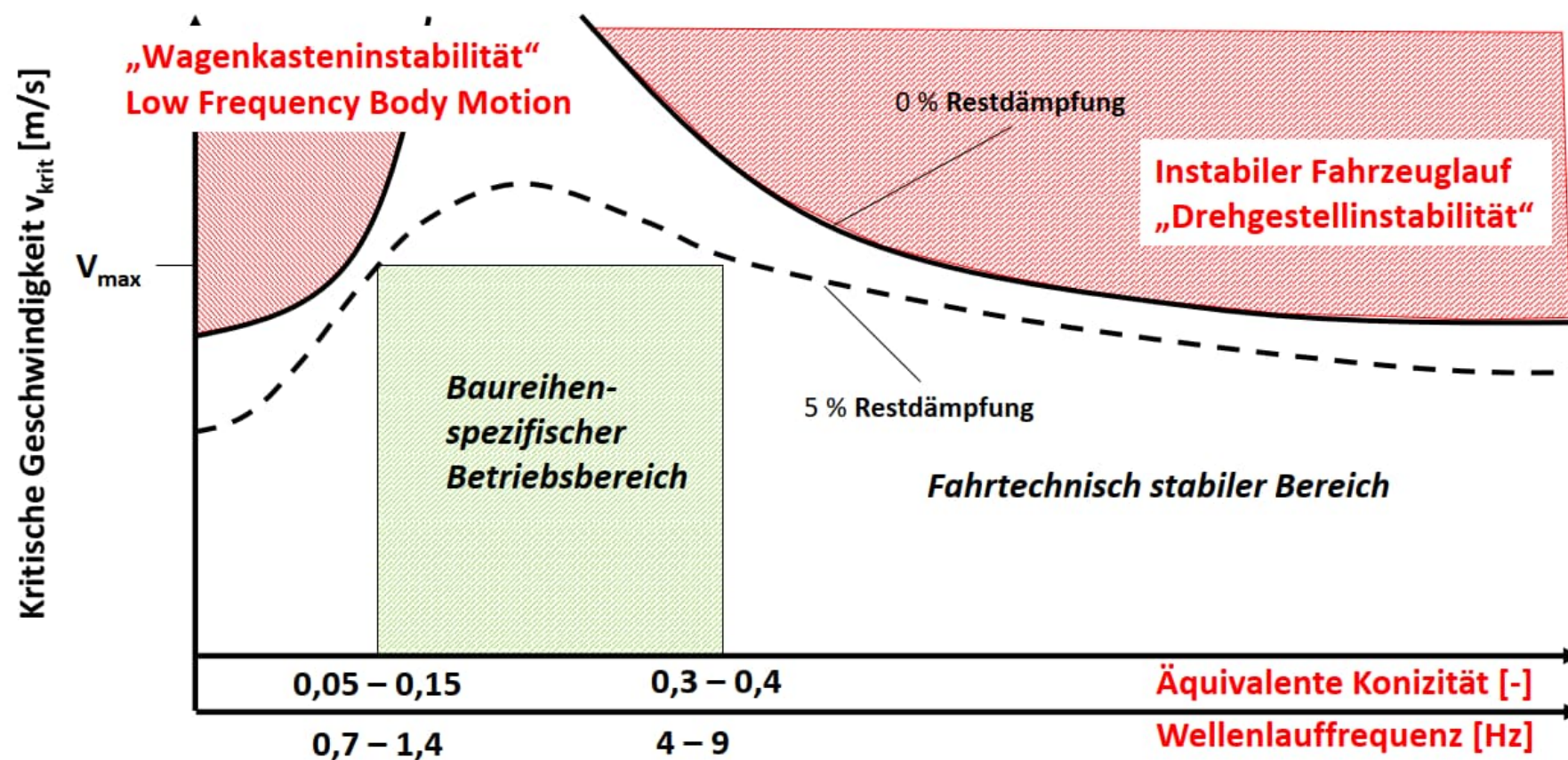


Analyse Berührradien

Systemtechnik

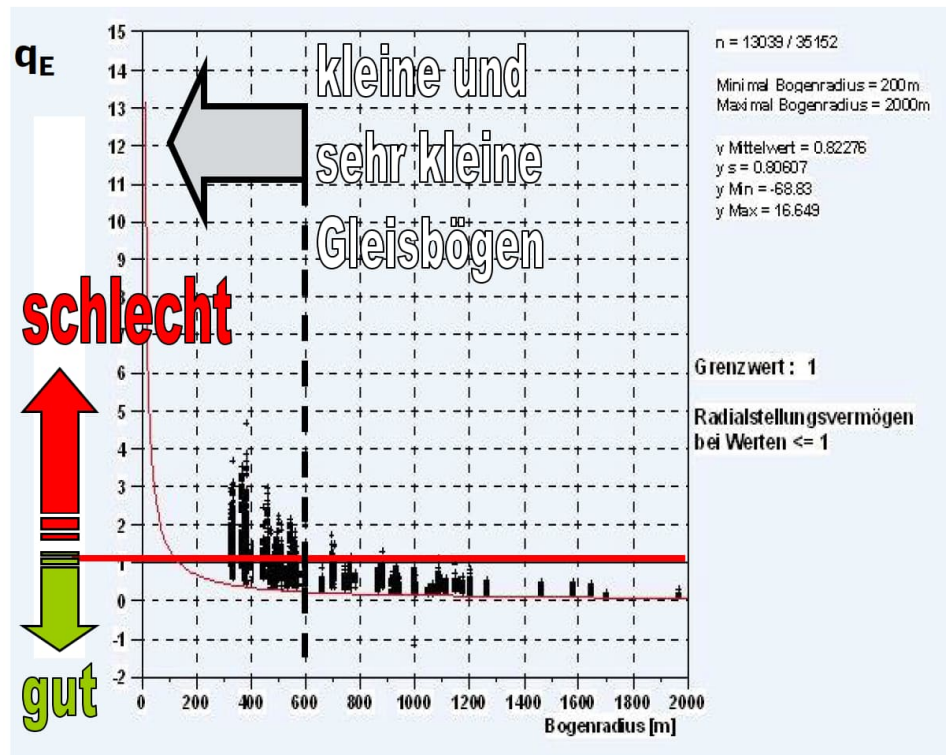
EINFLUSS AUF DAS FAHRVERHALTEN

Gerade Strecken

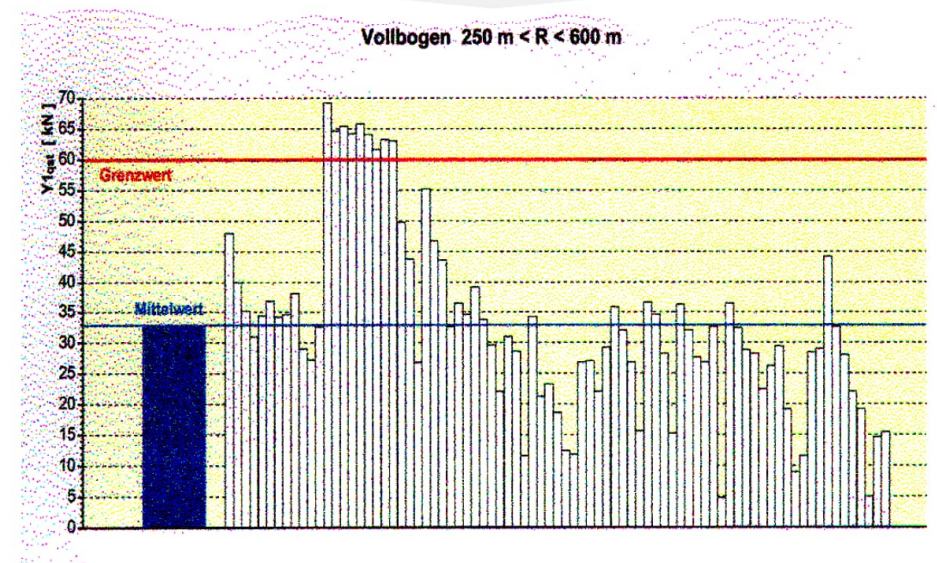


EINFLUSS AUF DAS FAHRVERHALTEN

Bogen



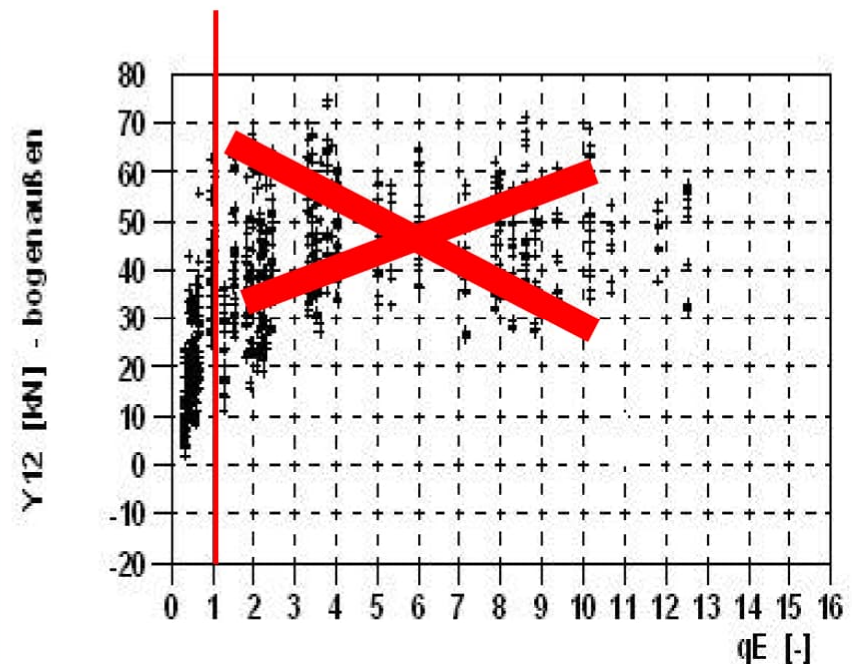
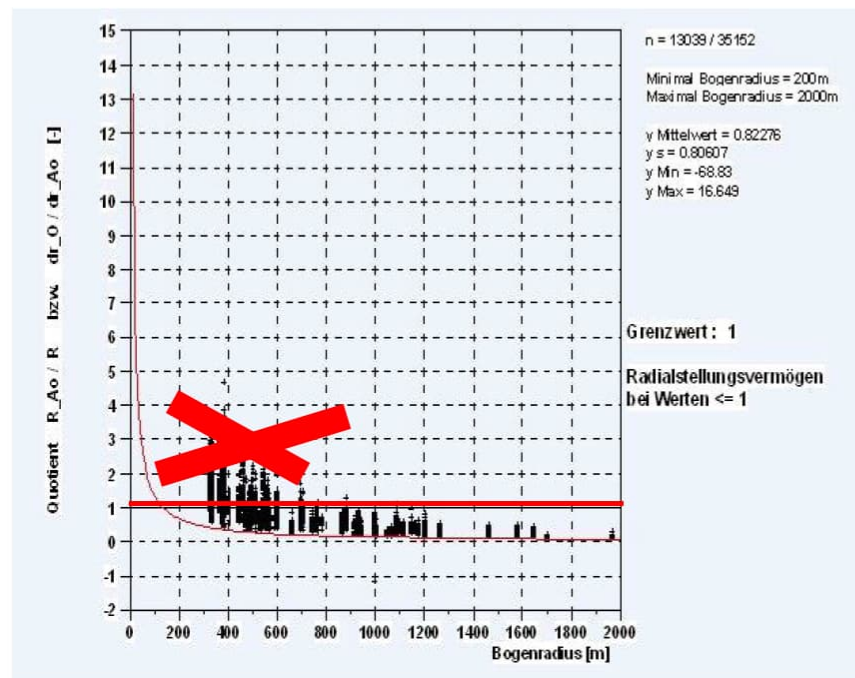
quasistatische Führungskräfte des führenden bogenäußeren Rades je Auswertabschnitt



EINFLUSS AUF DAS FAHRVERHALTEN

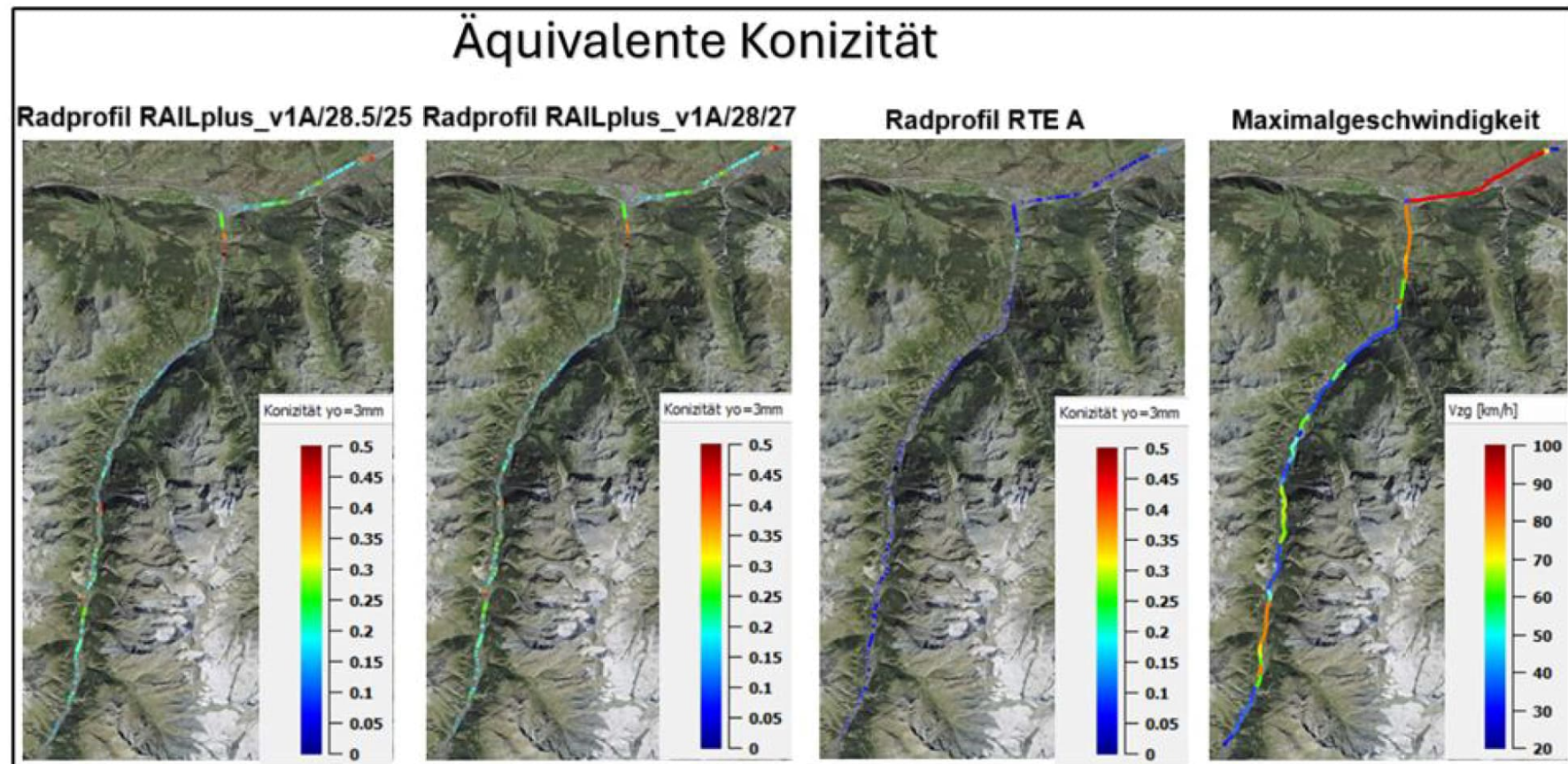
Bogen

Reduzierung der Spurführungskräfte und des Verschleißes



EINFLUSS AUF DAS FAHRVERHALTEN

Bogen



Materialpaarung



MATERIALPAARUNG

Stähle für Vollräder

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

MATERIALPAARUNG

Stähle für Bandagen (Radreifen) in der Meterspur

Hersteller	Stahlsorte	C %	Si %	Mn %	Rm MPa	ReH MPa	A %
Gröditz	B6Z	≤ 0,65	≤ 0,42	≤ 0,90	950 – 1.080		≥ 12
Lucchini	B7T	0,57-0,67	≤ 0,015	≤ 0,90	1.070 - 1.240	≥ 680	
Gröditz	KVR 600	0,59*	0,25*	0,83*	880 – 1.000	≥ 470	≥ 12
BVV	Exzellent**				900 – 1.050	≥ 520	
BVV	Excelsior (N)	≤ 0,7	≤ 0,4	≤ 0,90	800 – 950	≥ 380	≥ 10
	Excelsior H**				900 – 1.050	≥ 540	
	Excelsior So**				1.050 – 1.200	≥ 680	
	B6	≤ 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 cm²
- **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

- **Überrrollung 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:

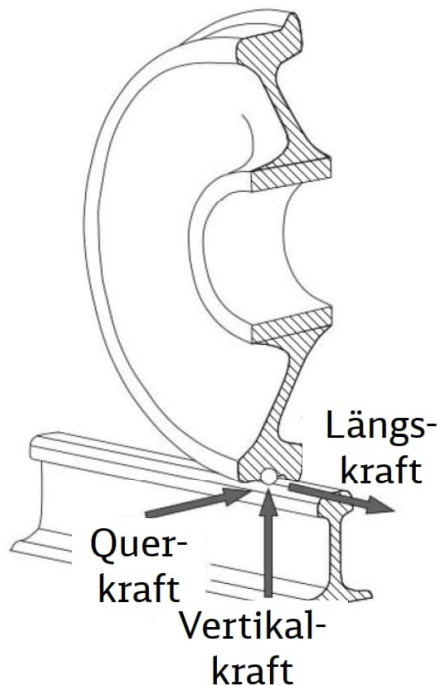
- Head Checks, Squats

Abhilfemaßnahme:

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

MATERIALPAARUNG

Woher kommen die Schäden?



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

⇒ **Reibwärme** ⇒ **Gefügeumwandlung, Rissbildung**

Rad:

- Laufflächenrisse, Ausbröckelungen

Schiene:

- Schleuderstellen, Squats

Problem nimmt zu, je:

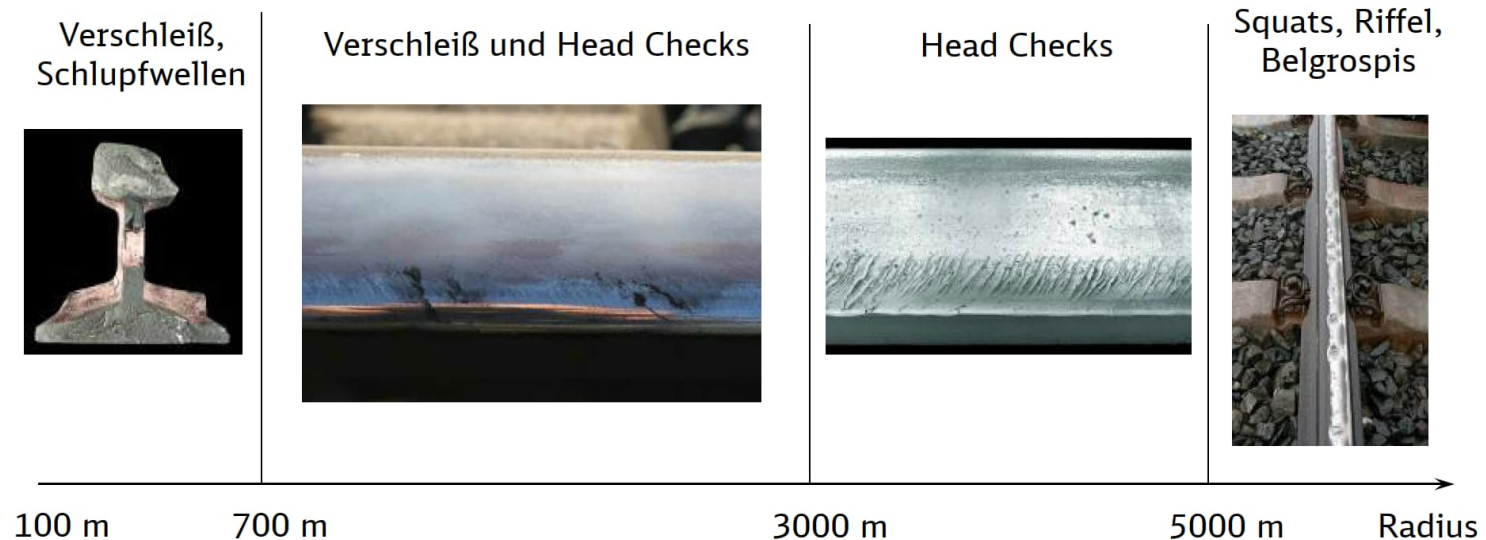
- höher die Traktions- und Bremsleistung
- höher der Kohlenstoffgehalt/ Festigkeit des Stahles
- höher die Achslast, kleiner die Räder, höher dynamische Anteile (Radunrundheiten, Gleislagefehler, etc),

Abhilfemaßnahme:

- Optimierung Antriebs- / Bremssteuerung/ Gleitschutz
- Werkstoff

MATERIALPAARUNG

Differenzieller Materialeinsatz je nach Gleisgeometrie



Deutsche Bahn: Einsatz des Schienenstahls in Abhängigkeit vom Bogenradius

- Bogenradius ≤ 1500 m: R350HT vorgeschrieben seit 12/2008
- Bogenradius ≤ 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

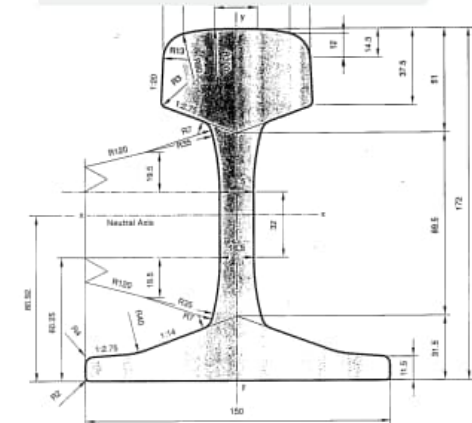
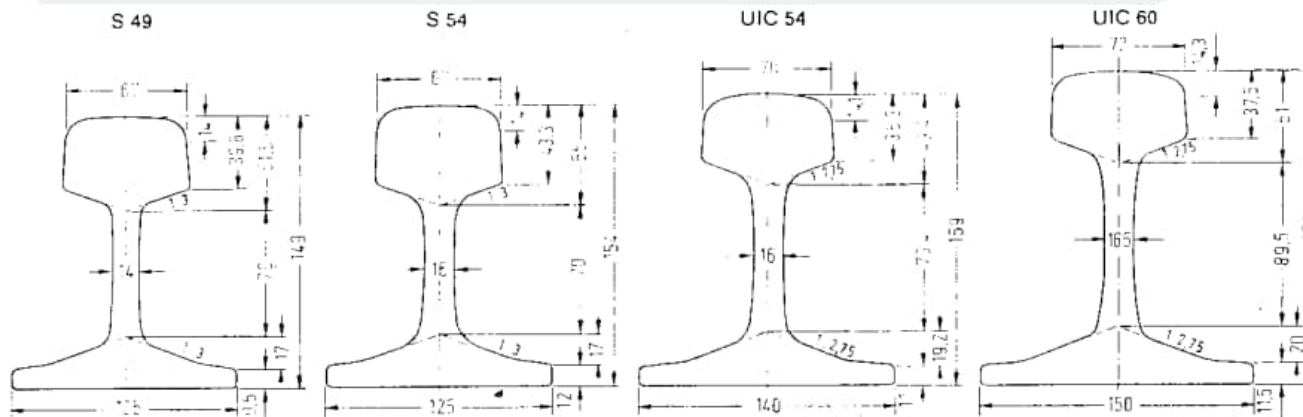
Schienenprofilvarianten

Meterspur: Radienbasiertes Schienenkopfprofil
in Abhängigkeit des Metergewichtes
36E3 und 46E1

noch nicht vorhanden
Thema in Railplus P3
(asymmetrisches Schienenprofil)

Radienbasiertes Schienenkopfprofil
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:

- materialseitige 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 $ReH > 580 \text{ MPa}$)
- 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
	SCHIENE	46 E1 54 E2 R260 350 HT 400 HT
	STÜTZPUNKT (ZW)	Hochelastisch Elastisch Steif
	SCHWELLE	Beton Beton besohlt Stahl (Holz) (Y-Stahl)
	SCHOTTER	Keine Variationen der Schottergüte Mit/ohne Unterschottermatte
	UNTERBAU/ UNTERGRUND	Bestehender Untergrund PSS AC-Rail

AUSWAHL DER FAHRBAHNFORMEN

Komponenten



SCHIENE



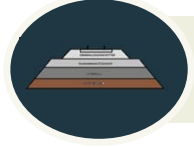
STÜTZPUNKT (ZW)



SCHWELLE



SCHOTTER



UNTERBAU/ UNTERGRUND

LÄRM

VERSCHLEISS

ERSCHÜTTERUNG

GLEISLAGE

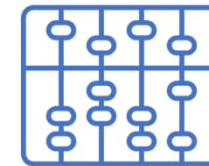
AUSWAHL DER FAHRBAHNFORMEN

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.



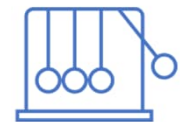
Standardelemente

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

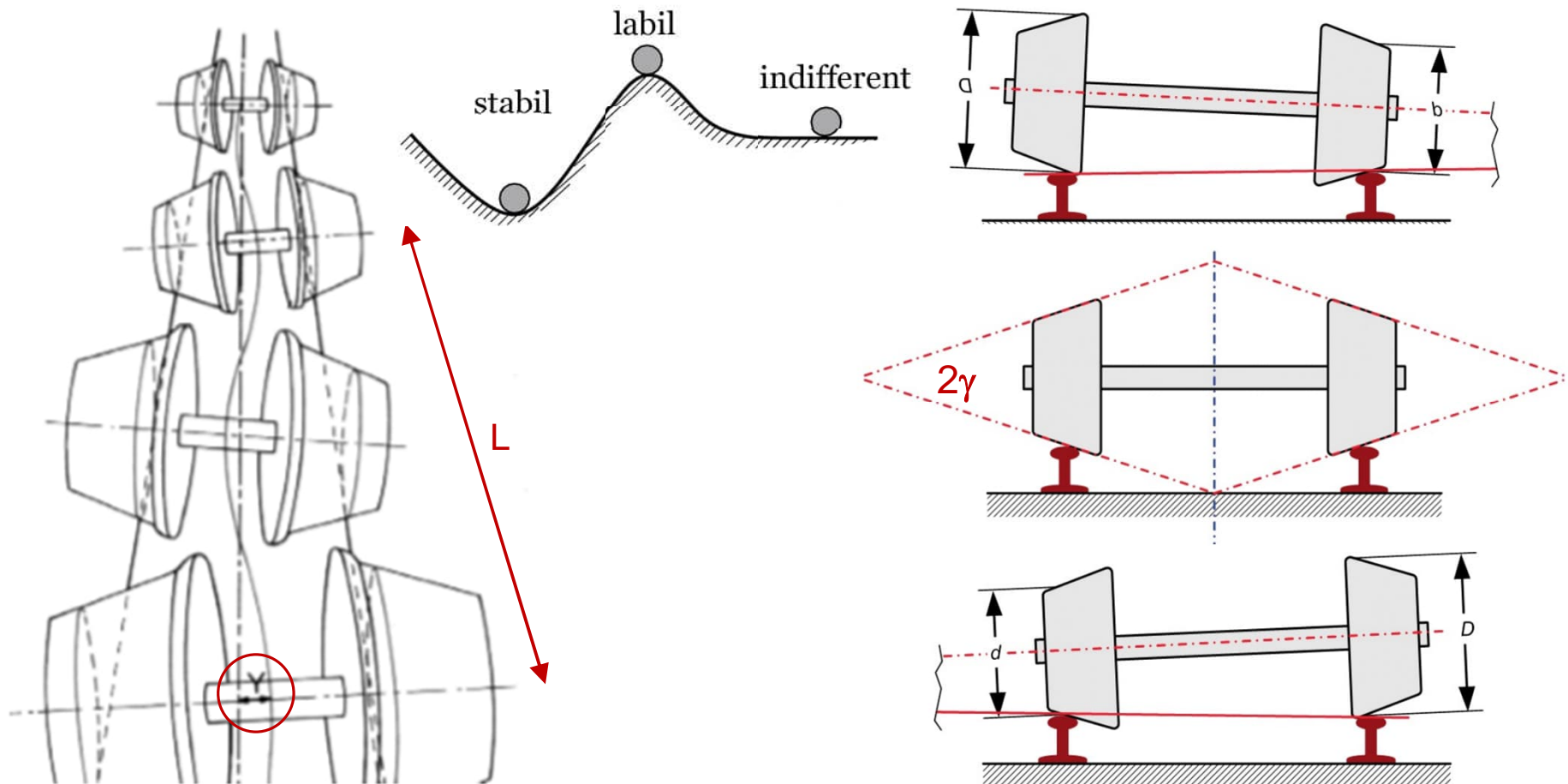


Danke für die Aufmerksamkeit

Back up

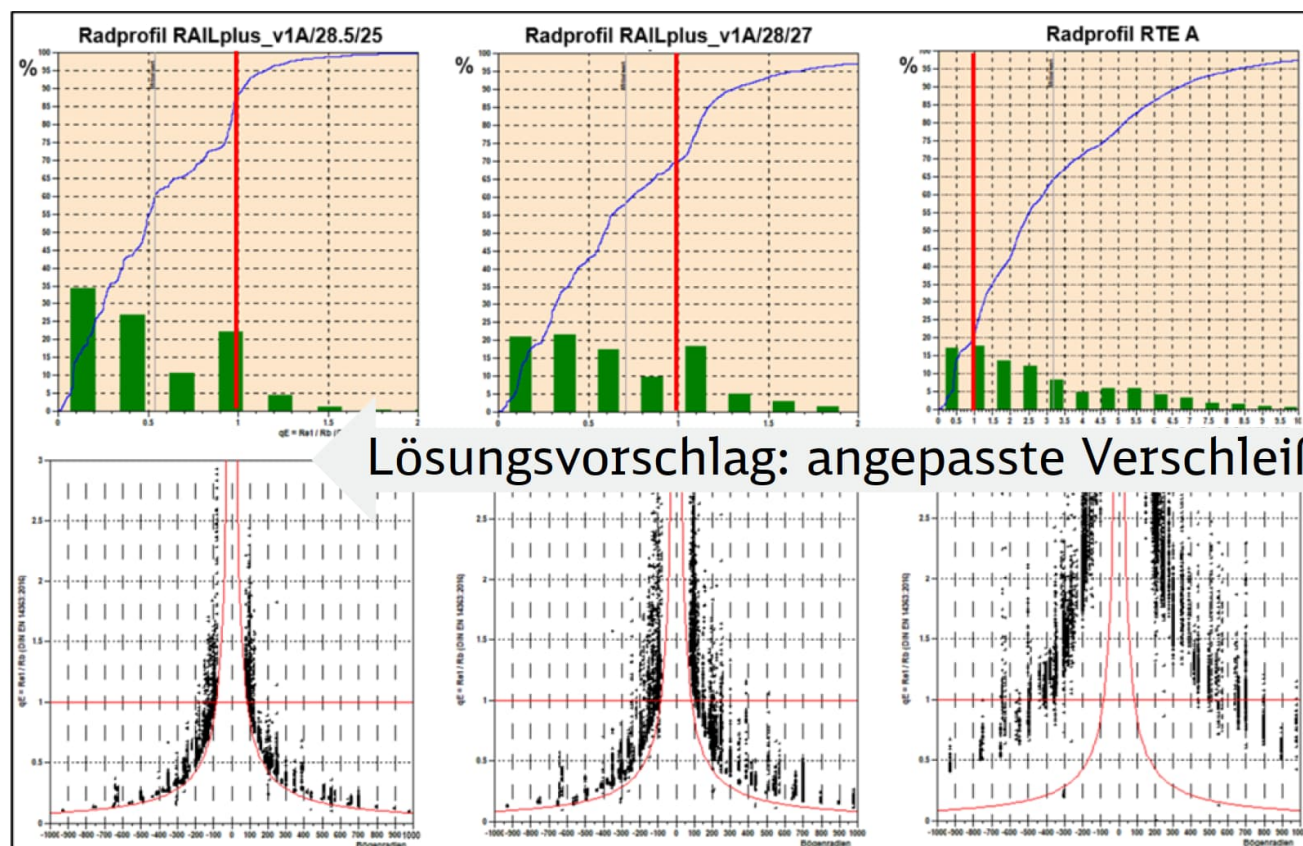


SINUSLAUF IN DER GERADEN



EINFLUSS AUF DAS FAHRVERHALTEN

Bogen, Meterspur



Systemtechnik

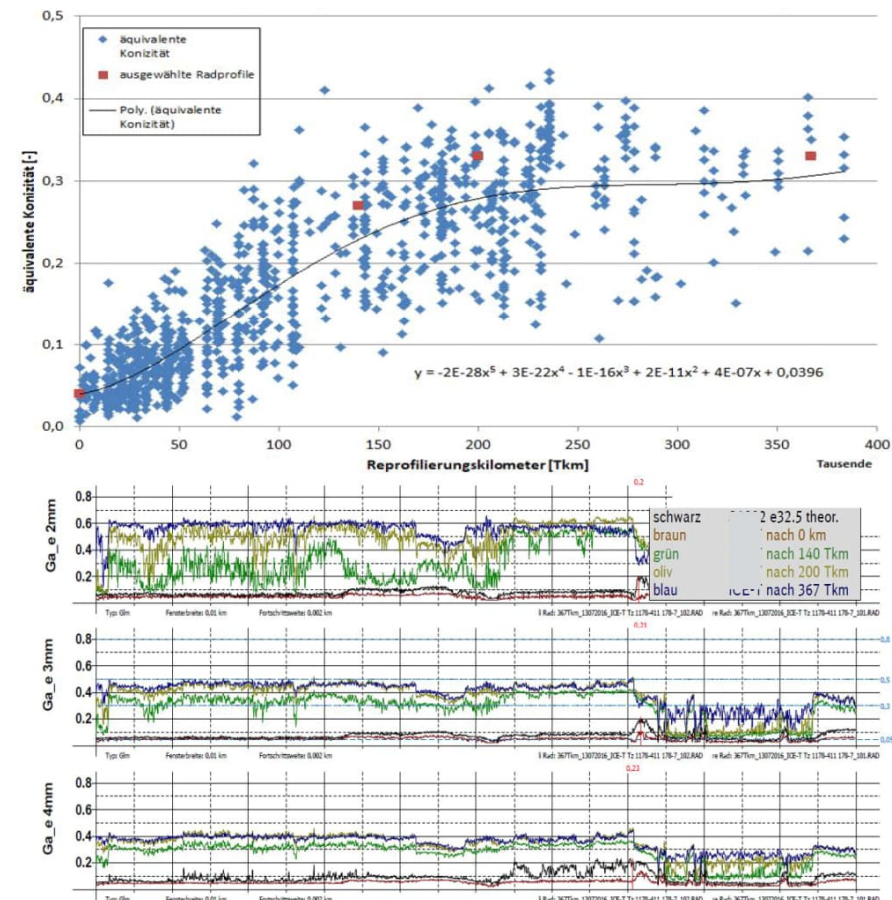
ZUKUNFT BERÜHRGEOMETRIE

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

