



# Fahrweg & Fahrzeug

Impulsvortrag, 48. Tagung „Moderne Schienenfahrzeuge“

Graz, 18.09.2023

# Anlagenmanagement Fahrweg

...muss ein

I sicheres

I verfügbares

I wirtschaftliches → Hohe Qualität!

Komponenten

→ lange Nutzungsdauern

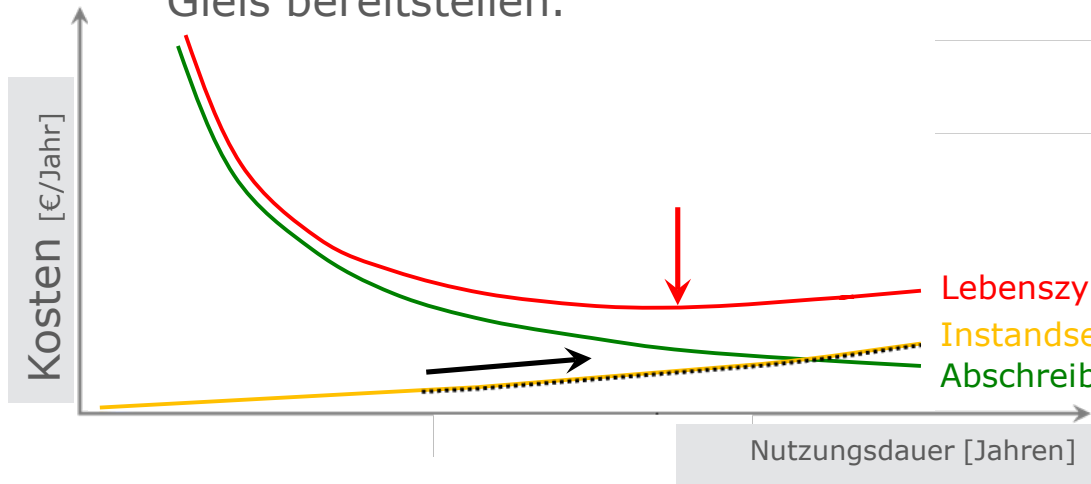
Gleisarbeiten

→ lange **Instandhaltung**zyklen

Instandhaltungsfrequenz

→ lange **Nutzungsdauer**

Gleis bereitstellen.



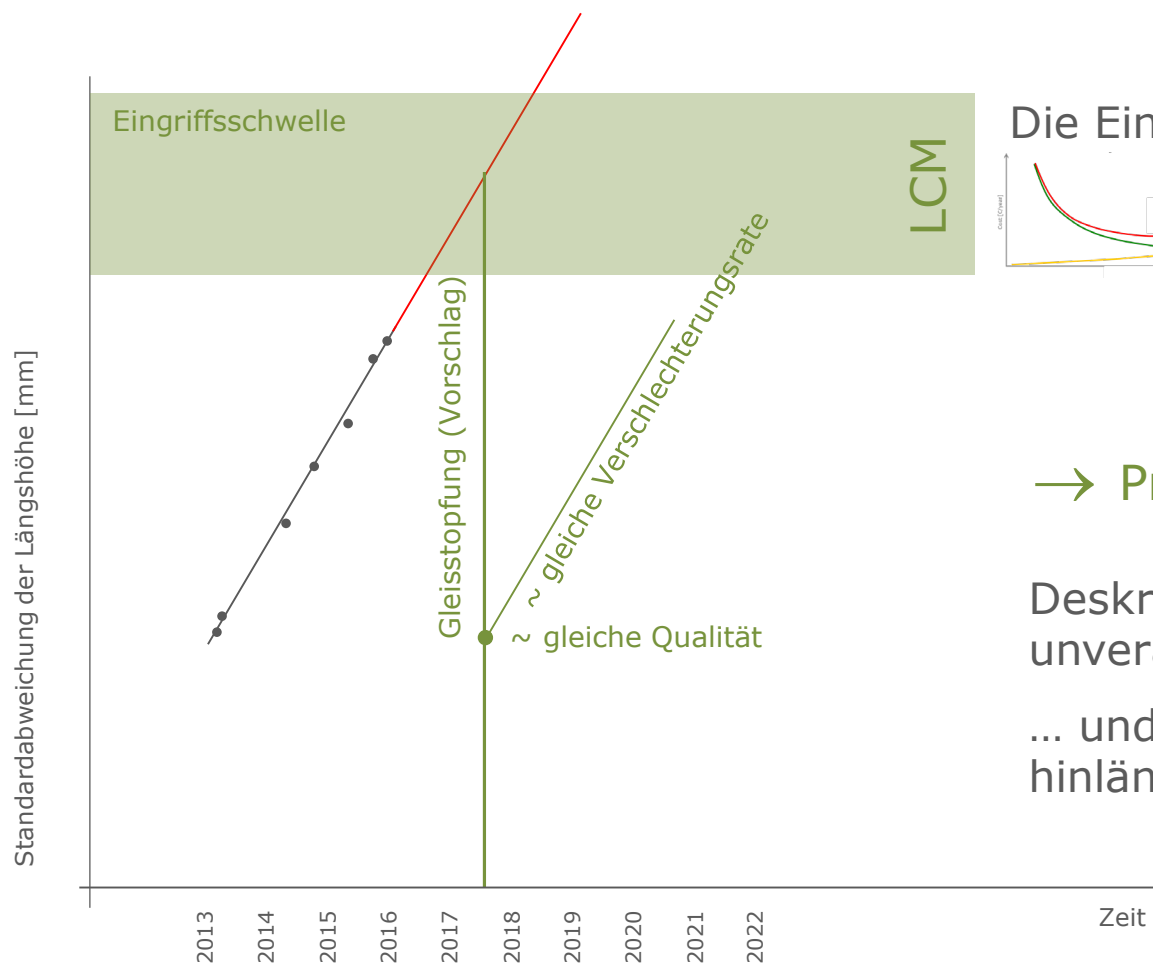
**Wirtschaftliches Ziel: niedrigste LCC**

Technische Aufgabe: Instandhaltungsprognose

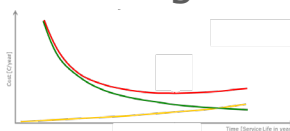
Life Cycle Management = technische Beschreibung bewertet mit Lebenszykluskosten

# Gleisqualität

Beispiel Längshöhe (und deren Standardabweichung)



Die Eingriffsschwelle ist ein LCM-Resultat – eine wirtschaftliche Entscheidung!



→ Predictive Maintenance ✓

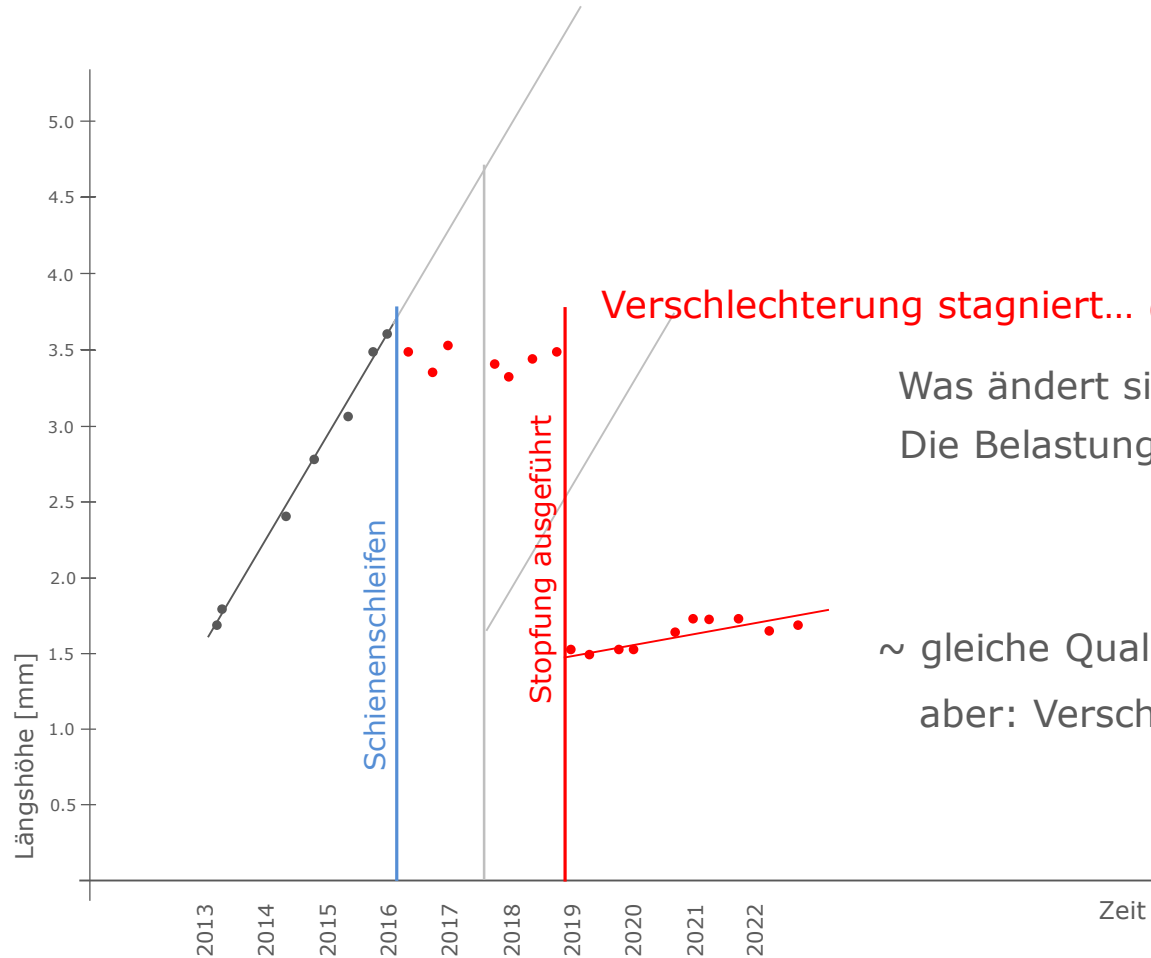
Deskriptiver Ansatz funktioniert nur bei unveränderlichen Randbedingungen

... und kann die **Ursache** der Verschlechterung nicht hinlänglich erklären.

# Gleisqualität Beispiel Längshöhe



Müssen wir Schienenschleifen bei der Stopfprognose berücksichtigen?



Verschlechterung stagniert... (auf schlechtem Qualitätsniveau)

Was ändert sich?

Die Belastung ist konstant. **Änderung durch Instandsetzung!**

~ gleiche Qualität

aber: Verschlechterungsrate signifikant niedriger

# Gleisqualität

Beispiel Längshöhe und Schienenoberfläche



Müssen wir Schienenschleifen bei der Stopfprognose berücksichtigen?

Offensichtlich ja. Wenn das Schleifen Oberflächenfehler beseitigt!

- ⌚ Unebenheit triggert Dynamik in der rollenden Last
- ⌚ Analytischer Ansatz (empirische Formel):

$$P_2 = Q + (A_z \times V_m \times \left[ \frac{M_v}{M_v + M_z} \right]^{0.5} \times \left( 1 - \left( \frac{\pi \times C_z}{4 \times [K_z \times (M_v + M_z)]^{0.5}} \right) \right) \times (K_z + M_v)^{0.5})$$

— statische Achslast

— Unebenheit

— Fahrzeuggeschwindigkeit

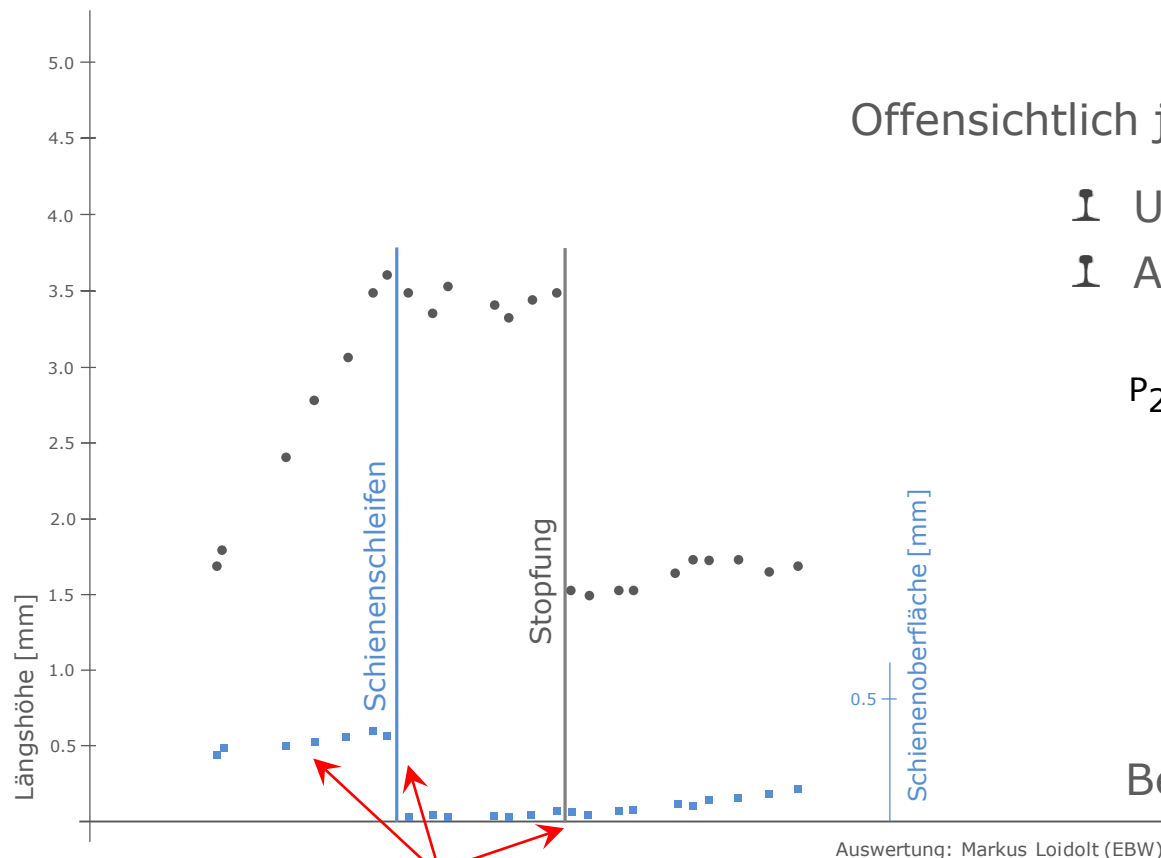
— ungefederte Masse

Gleisparameter

$C_z$  effektive vertikale Schienendämpfung pro Rad

$K_z$  effektive vertikale Schienensteifigkeit pro Rad

$M_z$  effektive vertikale Schienenmasse pro Rad



$A_z$  ändert sich signifikant!

Belastung (Tonnage) konstant, aber Beanspruchung nicht!

# Gleisqualität Beispiel Längshöhe und Schienenoberfläche

## I Analytischer Ansatz (empirische Formel):

$$P_2 = Q + (A_z \times V_m \times \left[ \frac{M_v}{M_v + M_z} \right]^{0.5} \times \left( 1 - \left( \frac{\pi \times C_z}{4 \times [K_z \times (M_v + M_z)]^{0.5}} \right) \right) \times (K_z + M_v)^{0.5})$$

└─ statische Achslast  
└─ Unebenheit  
└─ Fahrzeuggeschwindigkeit  
└─ ungefederte Masse

Track Parameters  
Cz effektive vertikale Schienendämpfung pro Rad  
Kz effektive vertikale Schienensteifigkeit pro Rad  
Mz effektive vertikale Schienenmasse pro Rad

### Fahrzeugeinfluss

- I In diesem Fall: Achslast und ungefederte Masse (und Geschwindigkeit)

Wie kann das Anlagenmanagement Fahrweg die Fahrzeugkonstruktion beeinflussen?

variiert für jedes Fahrzeug

→ Wir müssen die "Gleisbelastung" anders beschreiben, detaillierter – weg von der Bruttotonne hin zu Schädigungsinkrementen!

### Fahrwegeinfluss

- I Unebenheit: kurzwellig (Schiene) oder mittelwellig (Schotter)
- I Gleisparameter: abhängig vom Oberbau

Das Anlagenmanagement Fahrweg kann hier mit Instandhaltung und Oberbaukonfiguration beeinflussen

konstant (im ersten Wurf)

# Gleisqualität Beispiel Längshöhe und Schienenoberfläche

## I Analytischer Ansatz (empirische Formel):

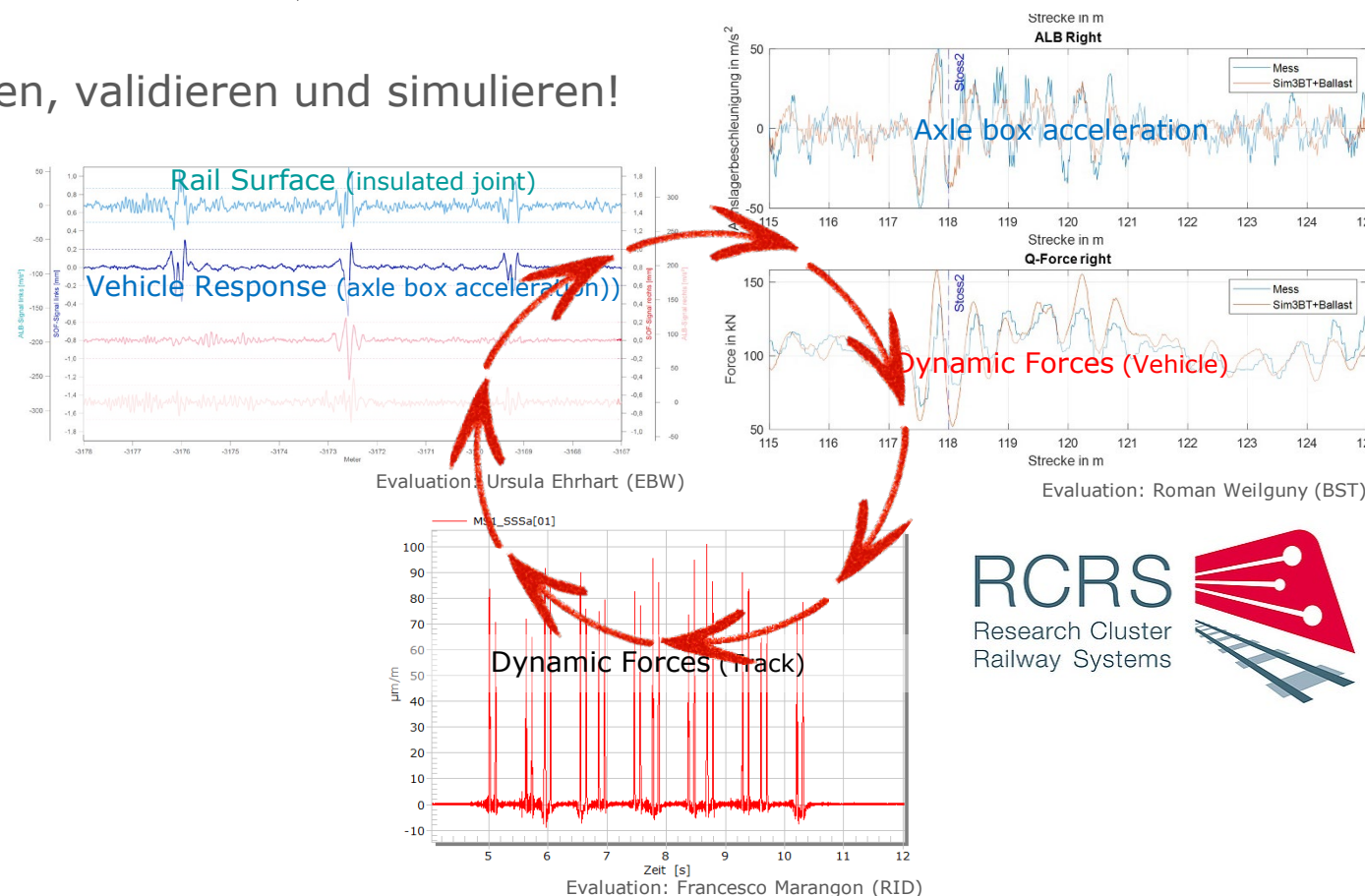
$$P_2 = Q + (A_z \times V_m \times \left[ \frac{M_V}{M_V + M_Z} \right]^{0,5} \times \left( 1 - \left( \frac{\pi \times C_z}{4 \times [K_Z \times (M_V + M_Z)]^{0,5}} \right) \right) \times (K_Z + M_V)^{0,5})$$

Kräfte und Schädigungen verstehen, validieren und simulieren!

Interdisziplinäre Forschung!

Kooperation

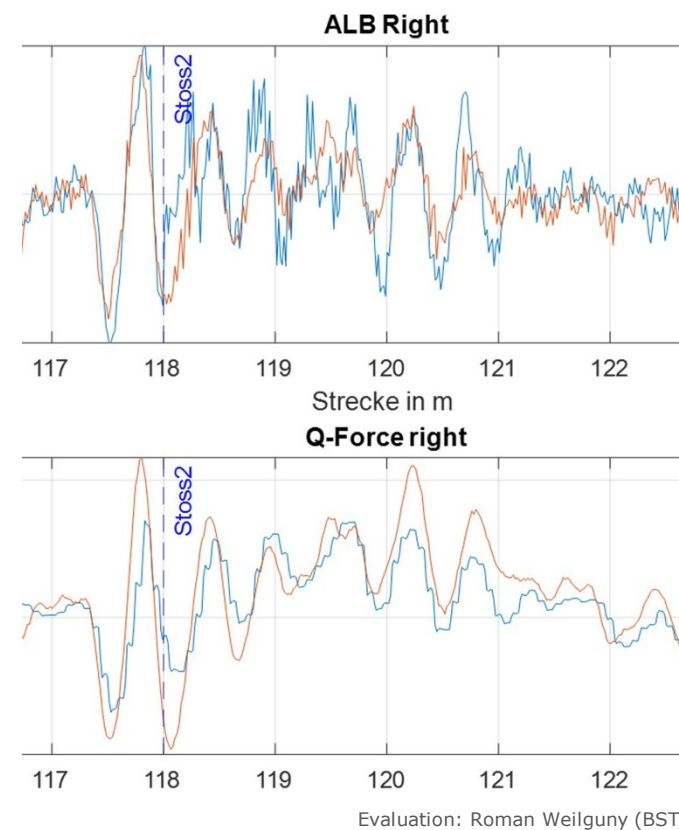
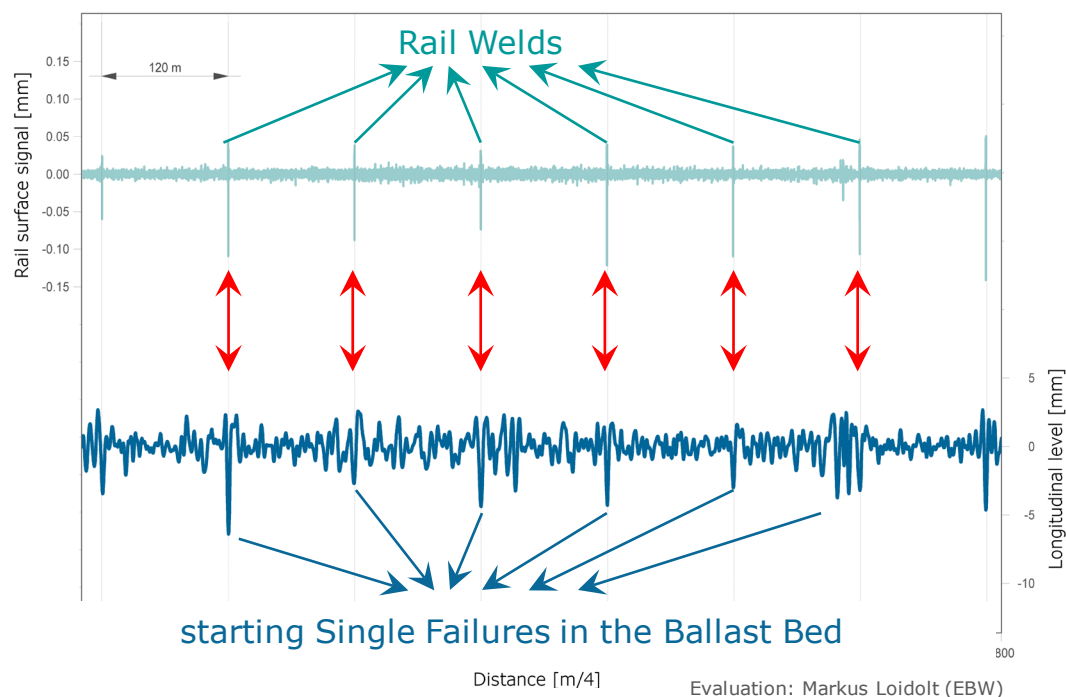
Open Data Regimes





# Gleisqualität Beispiel Längshöhe und Schienenoberfläche

Neue Erkenntnisse rücken Gleis- bzw. Schotterverhalten und die Instandhaltung in ein neues Licht.



Das Fahrzeug rollt diese Fehler auf den gesamten Abschnitt aus  
→ vom "Einzelfehler" zur "schlechten Gleisqualität"



# Gleisqualität

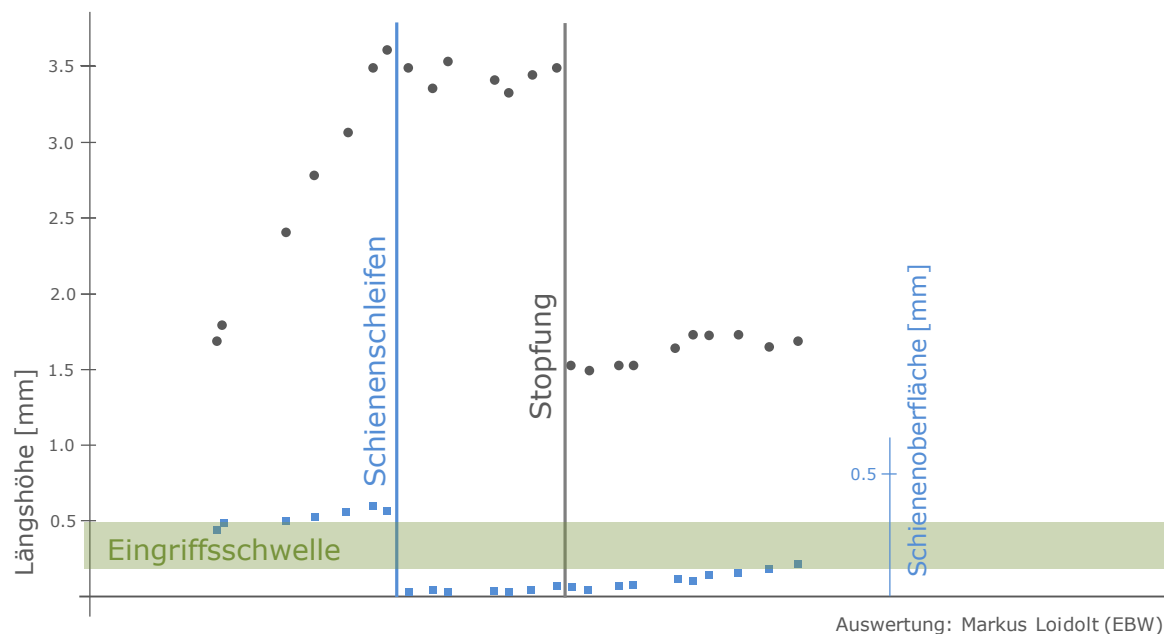
Beispiel Längshöhe und Schienenoberfläche

Sollen wir die Schiene früher schleifen?

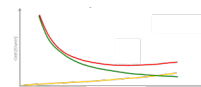
Ja! (zumindest in diesem Fall)

Und wann?

Die Eingriffsschwelle ist ein LCM-Resultat – eine wirtschaftliche Entscheidung!



LCM



# Gleisschädigung

D1

$P_{2,V}^3$



Gleislage

Schotterverschmutzung

$$\sum_{\text{Fahrzeuge}} a \times P_{2,V}^3$$



Stopfen | Schotterbettreinigung

Wenn wir die maximal erträgliche Gleisschädigung errechnen, können wir die nächste Instandhaltung als Funktion der Beanspruchung (fahrzeugspezifische Schädigung) prognostizieren

Das geht weit über einen deskriptiven Ansatz hinaus!

# Gleisschädigung und ihre Kosten

↓

**D1**

$$c_{1R} \times P_{2,V}^3$$



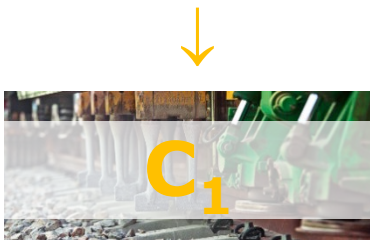
Gleislage

Schotterverschmutzung

↓

$$D_{1lim} = \sum_{\text{Fahrzeuge}} a \times P_{2,V}^3$$

$$\frac{C_1}{D_{1lim}} = \frac{C_1}{\sum_{\text{Fahrzeuge}} a \times P_{2,V}^3} = c_{1R} \quad \text{Kosteninkrement [€/Schädigungsinkrement]}$$



Stopfen | Schotterbettreinigung

**Das funktioniert!** Die Kalibrierung erfolgt mit mittleren Instandhaltungsfrequenzen (StdE).

# Gleisschädigung und ihre Kosten

$$C_{Veh,V,R} = c_{1R} \times P_{2,V}^3 \cdot c_{2R} \times P_{2,V}^{1.2} \cdot c_{3R} \times T_{pv} \cdot c_{4R} \times W_{bR} \cdot c_{5R} \times \sqrt{(0.5 \times P_{2,40km/h}^2 + 0.5 \times Y_{R=190m}^2)} \cdot c_{6R} \times P_{1,S}^3 \cdot c_{7R} \times \sqrt{(f_{71,R} \times P_{2,V}^2 + f_{72,R} \times Y_R^2)}^3$$



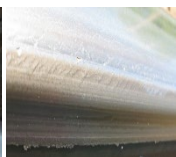
Gleislage



Schotterverschmutzung



Schienenoberfläche (Gerade)



Schienenoberfläche (Bogen)



Schienenverschleiss (Bogen)



Weichenkomponenten



Weichenherzstück



Gleis | Weiche Erneuerung

$$D_{1lim} = \sum_{\text{Fahrzeuge}} a \times P_{2,V}^3$$

$$\frac{C_1}{D_{1lim}} = \frac{C_1}{\sum_{\text{Fahrzeuge}} a \times P_{2,V}^3} = c_{1R}$$



Stopfen | Schotterbettreinigung



Schleifen|Fräsen



Schleifen|Fräsen



Schienenwechsel



Bauteilwechsel



Herzwechsel|Schweissen



Variable, kalkulatorische Abschreibung

# Gleisschädigung und ihre Kosten

$$c_{1_R} \times P_{2,V}^3 + c_{2_R} \times P_{2,V}^{1.2} + c_{3_R} \times T_{pv} + c_{4_R} \times W_{b_R} + c_{5_R} \times \sqrt{(0.5 \times P_{2,40km/h}^2 + 0.5 \times Y_{R=190m}^2)} + c_{6_R} \times P_{1,S}^3 + c_{7_R} \times \sqrt{(f_{7_{1,R}} \times P_{2,V}^2 + f_{7_{2,R}} \times Y_R^2)}^3$$



kostengewichtetes, fahrzeugspezifisches Verschleissmodell

Die verschiedenen Schädigungen lassen sich nicht aufsummieren, wohl jedoch deren Kosten!



fahrzeugspezifische, verschleissbedingte Fahrwegkosten je Fahrzeugkilometer

# Trassenbepreisung

$$C_{Veh_{V,R}} = c_{1R} \times \overset{D1}{P_{2,V}^3} + c_2 \times \overset{D2}{P_{2,V}^{1.2}} + c_3 \times \overset{D3}{T_{pv}} + \dots + c_7 \times \sqrt[3]{(f_{7,1,R} \times P_{2,V}^2 + f_{7,2,R} \times Y_R^2)}$$

Ob sich aber Zusatzinvestitionen in das Fahrzeug refinanzieren, ist eine andere Wirtschaftlichkeitsrechnung bestehend aus Fahrzeug-investition, Fahrzeuginstandhaltung, Fahrzeugeinsatz und Trassen-entgelt. Das macht das Eisenbahnverkehrsunternehmen!

Das sollten wir im Wegeentgelt tun! Eine andere Geschichte...

Anlagenmanagement Fahrweg:

- I "Gleisfreundliche" Fahrzeuge incentivieren **Aber was ist eigentlich "gleisfreundlich"?**
- I Auspreisen "gleisschädlicher" Fahrzeugeigenschaften

Beispiel:

$$P_2 = Q + (A_z \times V_m \times \left[ \frac{M_v}{M_v + M_z} \right]^{0.5}) \times \left( 1 - \left( \frac{\pi \times C_z}{4 \times [K_z \times (M_v + M_z)]^{0.5}} \right) \right) \times (K_z + M_v)^{0.5}$$

- I Achslast reduzieren!
- I Ungefederte Massen reduzieren!
- I Geschwindigkeit limitieren?

Güterverkehr  
nein  
ja (insb. Lokomotiven)  
nein

Personenverkehr  
ja!  
ja  
**nein**

# Anlagenmanagement Fahrweg im System Bahn

- I Prognosen schärfen  
Interaktionen verschiedener Verschleissprozesse und der Instandhaltung  
Verkehrsbelastung spezifischer berücksichtigen laufend kurz- & mittelfristig
- I Verschleissabhängige, fahrzeugspezifische Trassenpreise  
"Gleisfreundliche" Fahrzeugkonstruktionen incentivieren jetzt umsetzen!
- I Ein "fahrzeugfreundliches" Gleis zur Verfügung stellen  
Ermöglicht ggfs. leichtere Fahrzeugkonzepte langfristig

Zeit zu warten gibt es nicht: Plan plus 100% Kapazität bis 2040 in Österreich

- Kapazität weniger Zeit für Instandhaltung
- Pünktlichkeit & Kapazität weniger Zeit für Instandhaltung
- Verkehrszuwachs mehr Instandhaltung notwendig



**Wir werden jedes Optimierungspotential heben müssen, um die Qualität hoch zu halten!**





Cooperate and progress!

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Stefan Marschnig**  
mob: +43664608736717  
mail: [stefan.marschnig@tugraz.at](mailto:stefan.marschnig@tugraz.at)  
web: [www.ebw.tugraz.at](http://www.ebw.tugraz.at)