ETH zürich

BASEL ERFAHREN BVB

Datenbasierte Optimierung der Bandagenlaufleistung von Trams bei der BVB

Datenerhebung, Aufarbeitung, Analyse – wie Messdaten helfen, das Rad-Schiene-System zu verstehen und Bandagen gezielter zu nutzen



Arangan Arumugam

IHRUS 2026

12.11.2026, Luzern

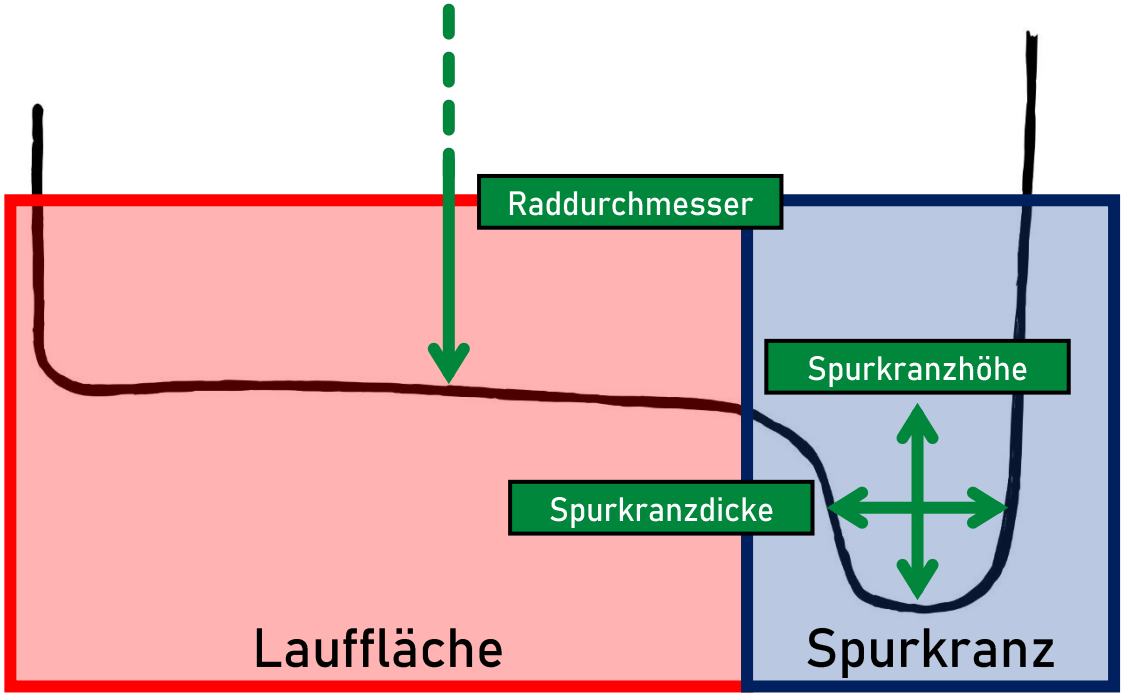
Vorstellung



ETH zürich

Maschinenbau MSc

BASEL ERFAHREN BVB





Agenda

1. **Einführung**

2. **Methodisches Vorgehen**
   1. Datengrundlagen
   2. Messmittelvergleich
   3. Analyse der Daten

3. **Strategieentwicklungen**



2 Flexity-Varianten (2015)
Kurz: 32m lang
Lang: 43m lang

Rückläufige Laufleistungen der Radreifen bei allen Tramflotten

- **Aktuelle Bandagenweisung** ab 2022
  - statisch-konservativer Ansatz & Wiederherstellung des Normprofils (beim Wartungsdrehen)
  - Laufleistung einer Bandage 2024: **180 tkm (2-3 Jahre)**
    - Benchmarking → 250 tkm - 300 tkm

Die Bandagen machen rund **20 % der gesamten Instandhaltungskosten** der Flexity-Flotte aus und zählen damit zu den wesentlichen Kostentreibern.

Ziel:
Transformation von verschleissbasierten Mess- und Betriebsdaten in belastbare Instandhaltungsentscheidungen.

→ Vorschläge zur Optimierung des Instandhaltungskonzepts

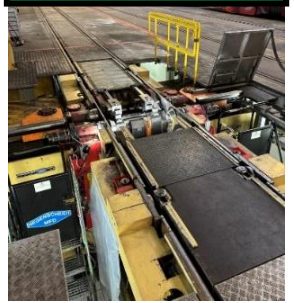
Datengrundlagen



Welche Daten haben wir und was können wir damit auswerten?

Messmittel:

Unterflurdrehbank Sz-A



Drehbank Mobiturn Sz-W



Calipri Handmessgerät



Überfahrmessanlage Sz-W



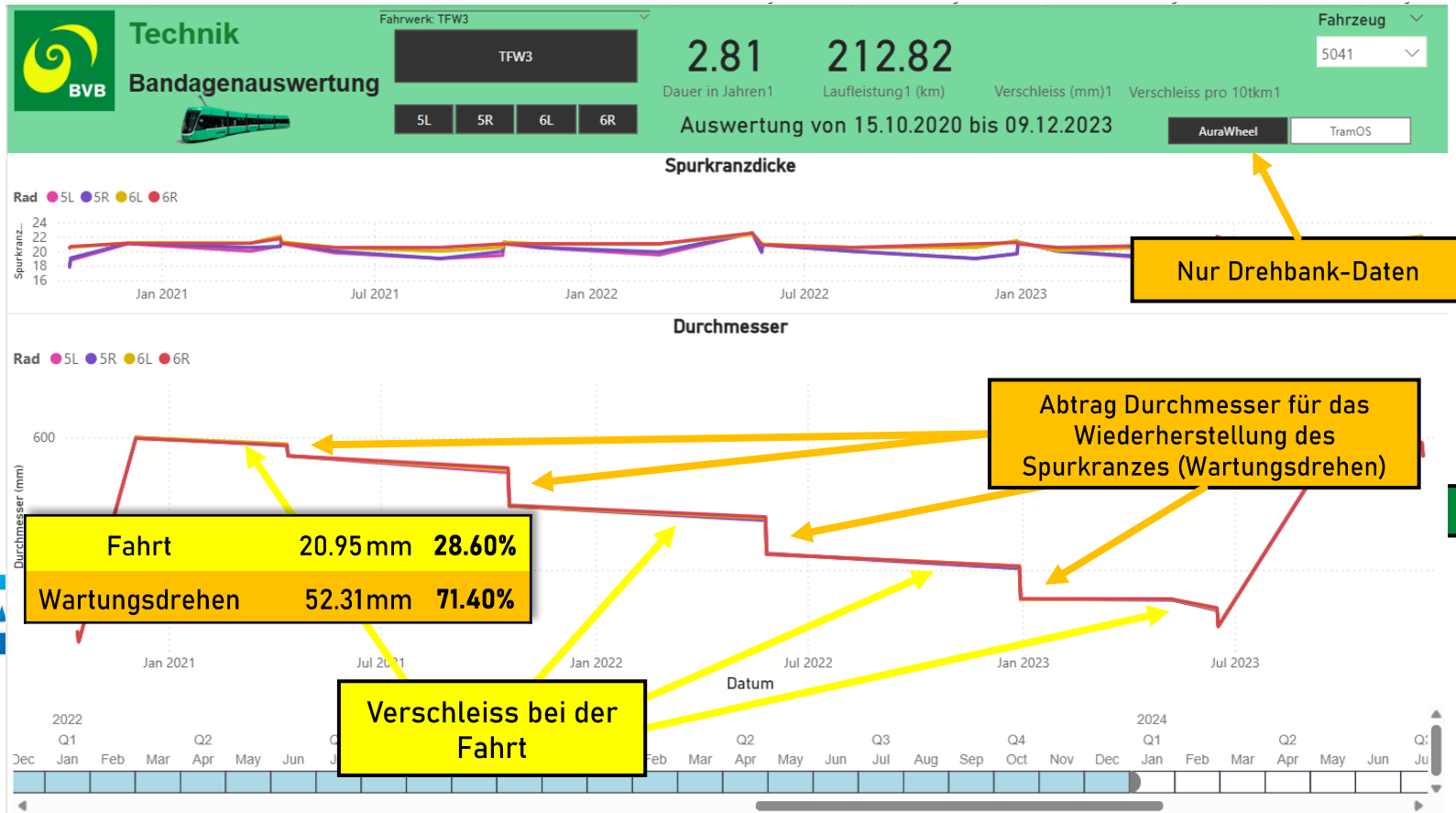
AuraWheel

TramOS

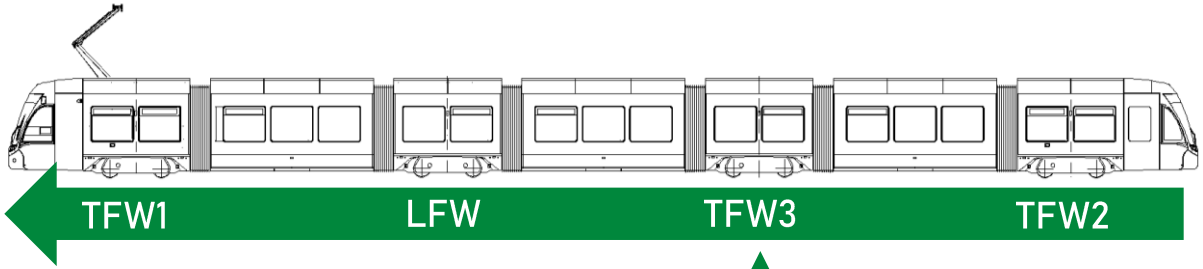
Schnittstellen:

SAP

Aufbau einer **automatisierten End-to-End Daten-Pipeline** für eine **zentralisierte Datenbank**


Technik
Bandagenauswertung
Fahrwerk: TFW3
TFW3
5L
5R
6L
6R
2.81
Dauer in Jahren1
212.82
Laufleistung1 (km)
Verschleiss (mm)1
Verschleiss pro 10tkm1
Fahrzeug
5041
Auswertung von 15.10.2020 bis 09.12.2023
AuraWheel
TramOS
Spurkranzdicke
Rad 5L 5R 6L 6R
Spurkranz...
24
22
20
18
16
Jan 2021
Jul 2021
Jan 2022
Jul 2022
Jan 2023
Nur Drehbank-Daten
Durchmesser
Rad 5L 5R 6L 6R
Durchmesser (mm)
600
Abtrag Durchmesser für das Wiederherstellung des Spurkranzes (Wartungsdrehen)
Fahrt 20.95 mm 28.60%
Wartungsdrehen 52.31 mm 71.40%
Jan 2021
Jul 2021
Jan 2022
Jul 2022
Jan 2023
Jul 2023
Datum
Verschleiss bei der Fahrt
2022
Q1
Q2
Q3
Q4
2024
Dec Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec Jan Feb Mar Apr May Jun Jul

Datengrundlagen – Laufleistungsermittlung



Flexity Lang

Flexity Kurz

Fahrwerk	Laufleistung [km]	Laufzeit [Jahre]
TFW1	155075	2.29
LFW	186680	2.72
TFW3	184227	2.74
TFW2	205005	2.94

Fahrwerk	Laufleistung [km]	Laufzeit [Jahre]
TFW1	99017	1.66
LFW	123918	2.06
TFW2	117892	1.97

Mittelwert:
Flexity Lang: **182 tkm & 2.7 Jahre**
Flexity Kurz: **113 tkm & 1.9 Jahre**

Nur Drehbank-Daten

Messmittelvergleich

Wie gut stimmen die verschiedenen Messsysteme überein?



Ziel: Vergleich der Messmittel hinsichtlich Wiederholgenauigkeit und systematischer Abweichung

- 4 Messmittel
- 16 Räder
- 10 Wiederholungen pro Messmittel

= 640 Messungen pro Parameter

Allgemein hohe Wiederholgenauigkeit



Calipri streut am stärksten → Handmessgerät (Punktmessung)

Wiederholgenauigkeit (Standardabweichung) [mm]:

	Mobiturn	UFD	Calipri	ÜFMA
Durchmesser	0.008	0.010	0.235	0.059
Spurkranzdicke	0.017	0.026	0.528	0.030
Spurkranzhöhe	0.013	0.016	0.426	0.025

Erweiterter Messmittelvergleich: 24.04.2026

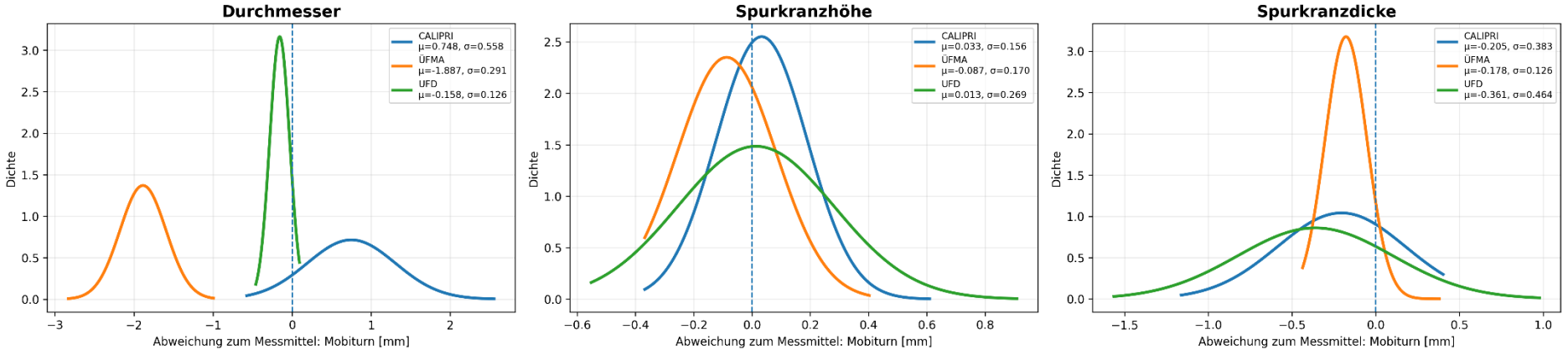
Messmittelvergleich – Vergleich der Messmittelabweichungen zur Referenz

Referenz: Mobiturn

ÜFMA
UFD
Calipri

Normalverteilung der Differenzen zu Mobiturn

640 Messungen



Referenzwert notwendig

<u>Auffälligkeiten bei den Messwertdifferenzen:</u>
Systematische Abweichung beim Durchmesser (ÜFMA ca. 2 mm)
→ Möglicher Fehler beim Erkennen der Kennrille
→ ÜFMA & Calipri sind Punktmessgeräte

ETH zürich
BASEL ERFAHREN BVB

$$\textit{Erweiterte Messunsicherheit: } U_C = k \cdot \sqrt{u_A^2 + u_b^2 + u_B^2}$$

u_A: Wiederholbarkeit
u_b: Systematische Abweichung
u_B: Hersteller / Kalibrierung

[mm]

Gesamtdurchschnitt	Mobiturn	UFD	Calipri	ÜFMA
Durchmesser	1.30	0.99	**3.81**	**3.77**
Spurkranzdicke	1.18	**1.48**	1.33	0.82
Spurkranzhöhe	0.33	1.32	0.69	0.76

28.12% vom Verschleissvorrat

32.55% vom Verschleissvorrat

4.75% vom Verschleissvorrat

- Referenz notwendig → Vermessung Referenzradsatz
- Mobiturn & UFD: Unsicherheit durch das Einspannen?

Richtwert für alle Analysen bezüglich der Messmittel

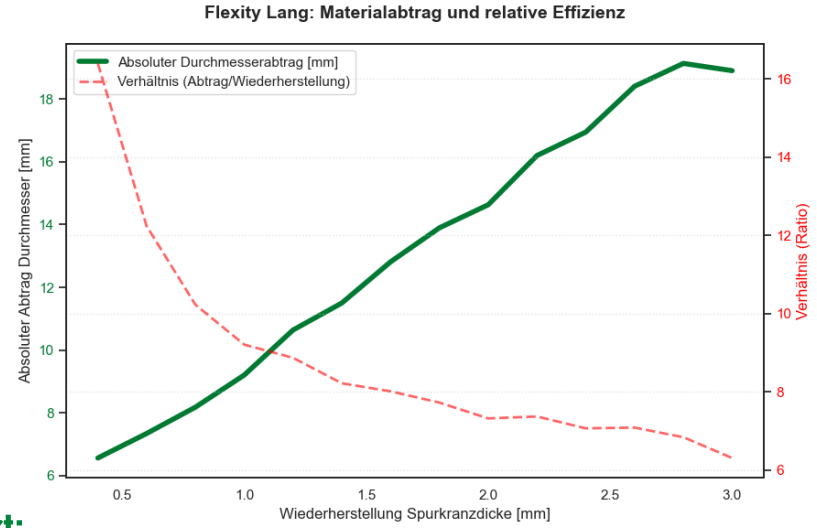
GUM = «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (1993) »

Analyse der Daten

Wartungsdrehen & bei der Fahrt



Analyse aller Wartungsdrehen: Abtrag des Durchmessers pro Wiederherstellung der Spurkranzdicke



Im Mittel: 8.32 mm/mmSD

3592 gedrehte Räder beachtet

Verschleiss bei der Fahrt:

Gewichteter Durchmesserverschleiss	0.91 mm/10'000km (1.14%)
Gewichteter Spurkranzdickenverschleiss	0.22 mm/10'000km (4.23%)

Spurkranzverschleiss während der Fahrt pro Rad:

mm pro 10'000km

	Links	Rechts
Achse 1	0.46	0.45
Achse 2	0.09	0.08
Achse 3	0.39	0.36
Achse 4	0.10	0.08
Achse 5	0.38	0.35
Achse 6	0.11	0.08
Achse 7	0.32	0.29
Achse 8	0.10	0.09
Gesamt-Durchschnitt	**0.24**	**0.22**

Durchmesserverschleiss während der Fahrt pro Rad:

mm pro 10'000km

	Links	Rechts
Achse 1	1.28	1.27
Achse 2	1.09	1.06
Achse 3	1.05	1.02
Achse 4	0.90	0.88
Achse 5	1.25	1.21
Achse 6	1.06	1.03
Achse 7	1.22	1.19
Achse 8	1.30	1.14
Gesamt-Durchschnitt	**1.14**	**1.10**

Achse 1 hat immer einen grösseren Verschleiss als Achse 2 (unabhängig vom Fahrwerk)

Das erste Fahrwerk hat den grössten Verschleiss im Vergleich zum hintersten Fahrwerk

Unterschied zwischen der vorderen und der hinteren Achse ist nicht mehr signifikant gross



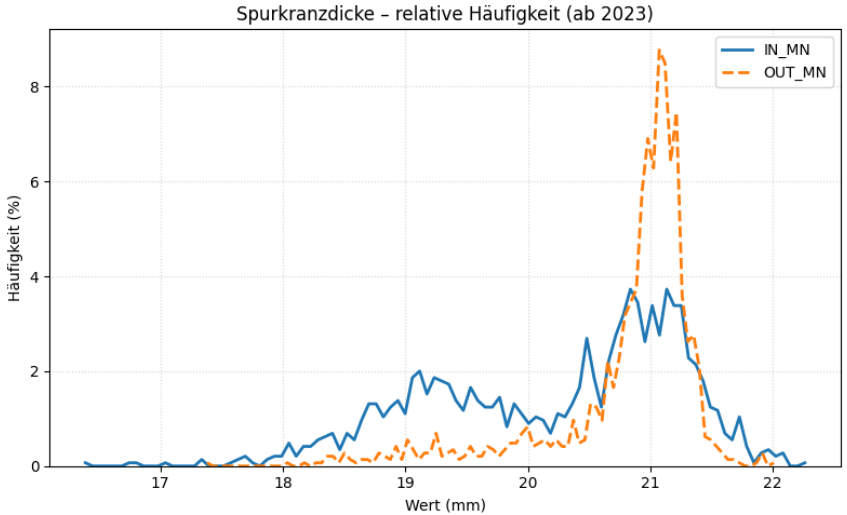
Strategieentwicklungen

Welche Optimierungspotenziale lassen sich aus den Daten ableiten?

Spurkranzdicke massgebend für das Wartungsdrehen:

5.6.1 Warn- und Grenzwerte Flexity

Flexity	D in [mm]	b in [mm]	d in [mm]*	h in [mm]
Neumass	600	105	21,2	22
Warnwert	540	---	19	19
unterer Grenzwert	520	---	16	18
oberer Grenzwert	---	---	22	25



Eingangsmessung: **Mittelwert der Spurkranzdicke: 20.14 mm**

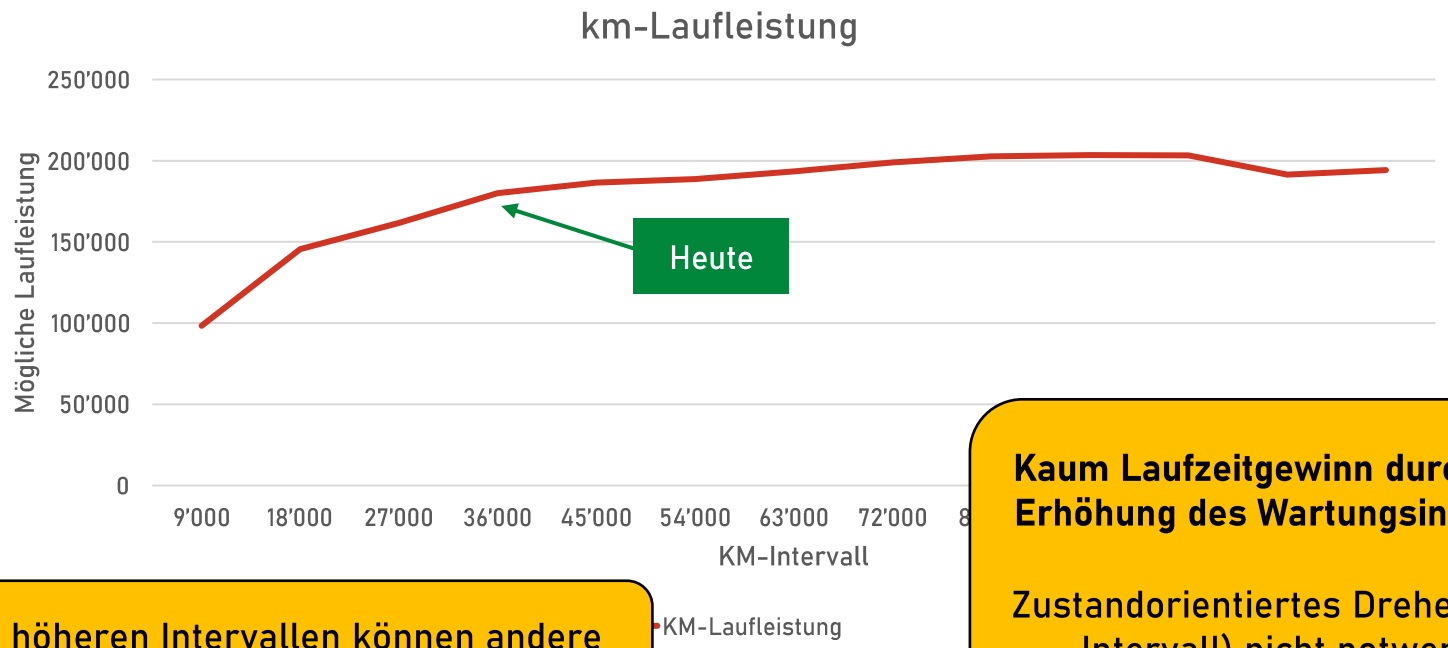
→ Unteres Grenzmass selten/nie erreicht unter der km-Bedingung

→ Verschleiss meist nicht bekannt bei dünneren Spurkränzen

Einführung einer Testgruppe → Aufhebung der km-Limitierung bei 4 Fzg.

- Keine signifikanten Erkenntnisse bei der Testgruppe – **Verschleiss bleibt bis zum Grenzbereich weitgehend konstant**
- Unteres Grenzmass aus Zeitgründen noch nicht erreicht
- Untersuchung weiterer Faktoren erforderlich (insbes. Hohllauf)

1. km-Intervall für das Wartungsdrehen erhöhen



Bei höheren Intervallen können andere Faktoren auftreten → z.B **Hohllauf**

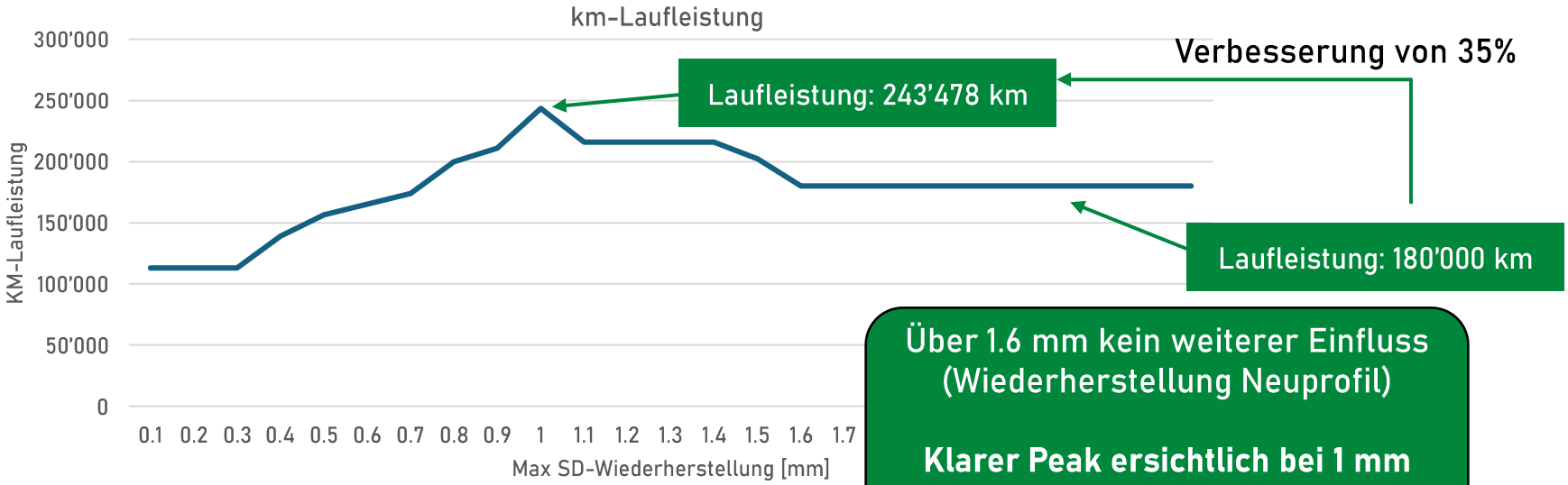
Kaum Laufzeitgewinn durch reine Erhöhung des Wartungsintervalls

Zustandorientiertes Drehen (ohne Intervall) nicht notwendig

Alle angesprochenen Verkehrsbetriebe drehen die Spurkranzdicke nicht auf Neuprofil → **zustandorientiertes Profil beim Drehen**

2. Zustandsangepasste Reprofilierung mit SD-Deckelung

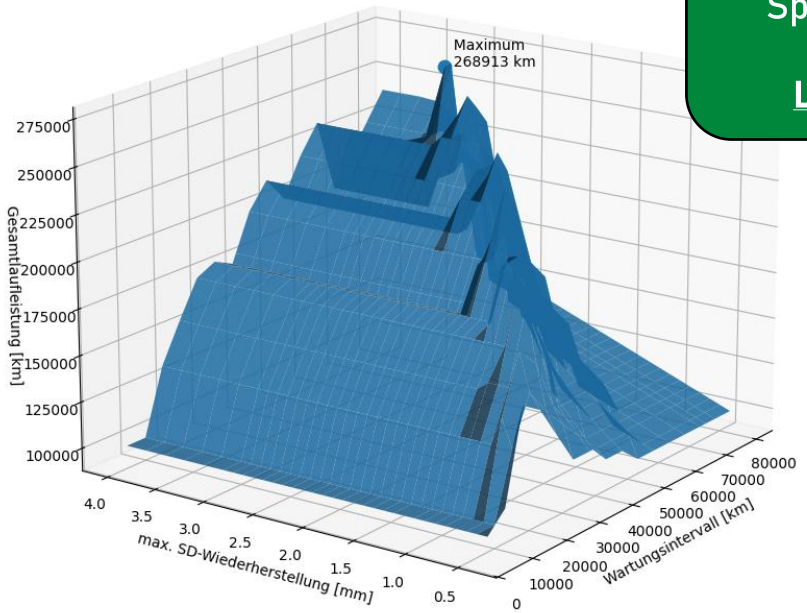
Idee: Die Wiederherstellungsmenge der Spurkranzdicke deckeln, sodass nicht das Neuprofil wiederhergestellt werden muss.



3. Kombination der beiden vorherigen Strategien (SD-Reserve: 1 mm)

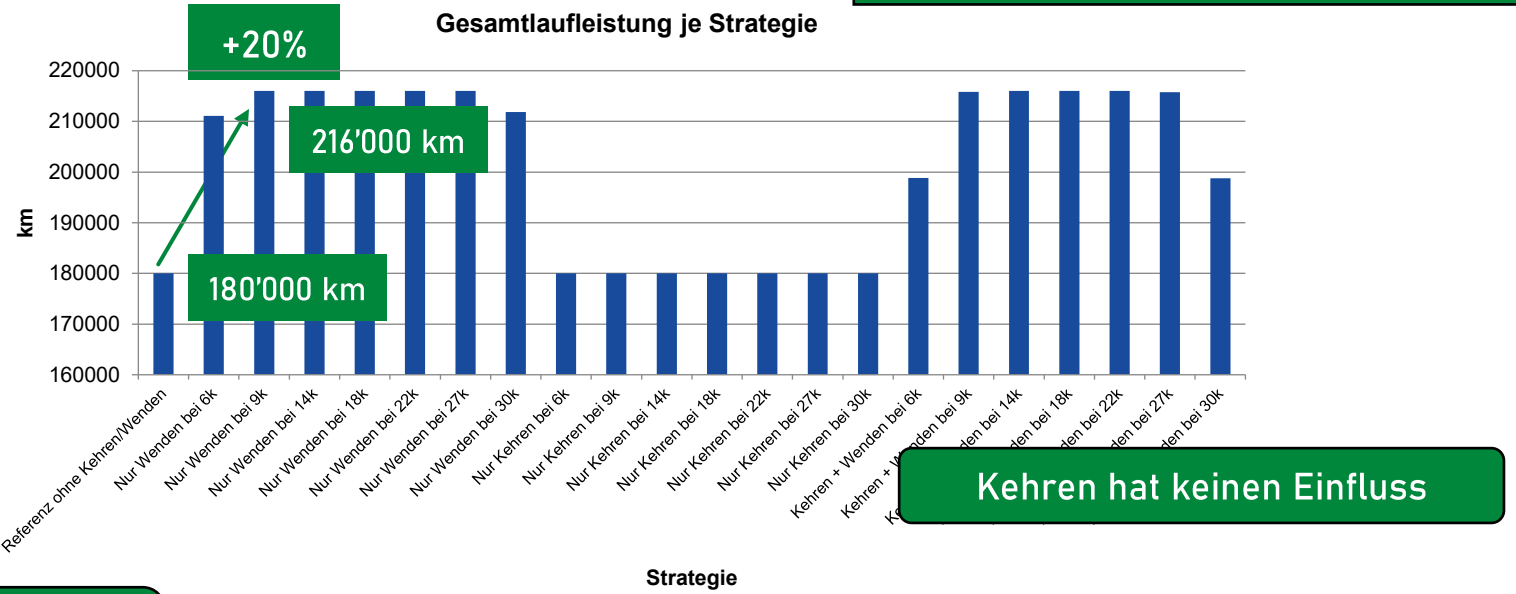
Die beste Kombination:
Intervall: 72'000 km
Spurkranzdeckelung: 3 mm

Laufleistung: 268'913 km



4. Kehren und Wenden

Wenden: Alle Fahrwerke um 180 Grad drehen
Kehren: 1. Fahrwerk mit dem letzten Fahrwerk tauschen



Kehren hat keinen Einfluss

Intervall-Zeitraum:
11'000 km-27'000 km

Wenden | Kehren | Kombination

Strategieentwicklungen – Was ist nun die beste Strategie?

ETH zürich
BASEL ERFAHREN BVB

Variable Parameter:

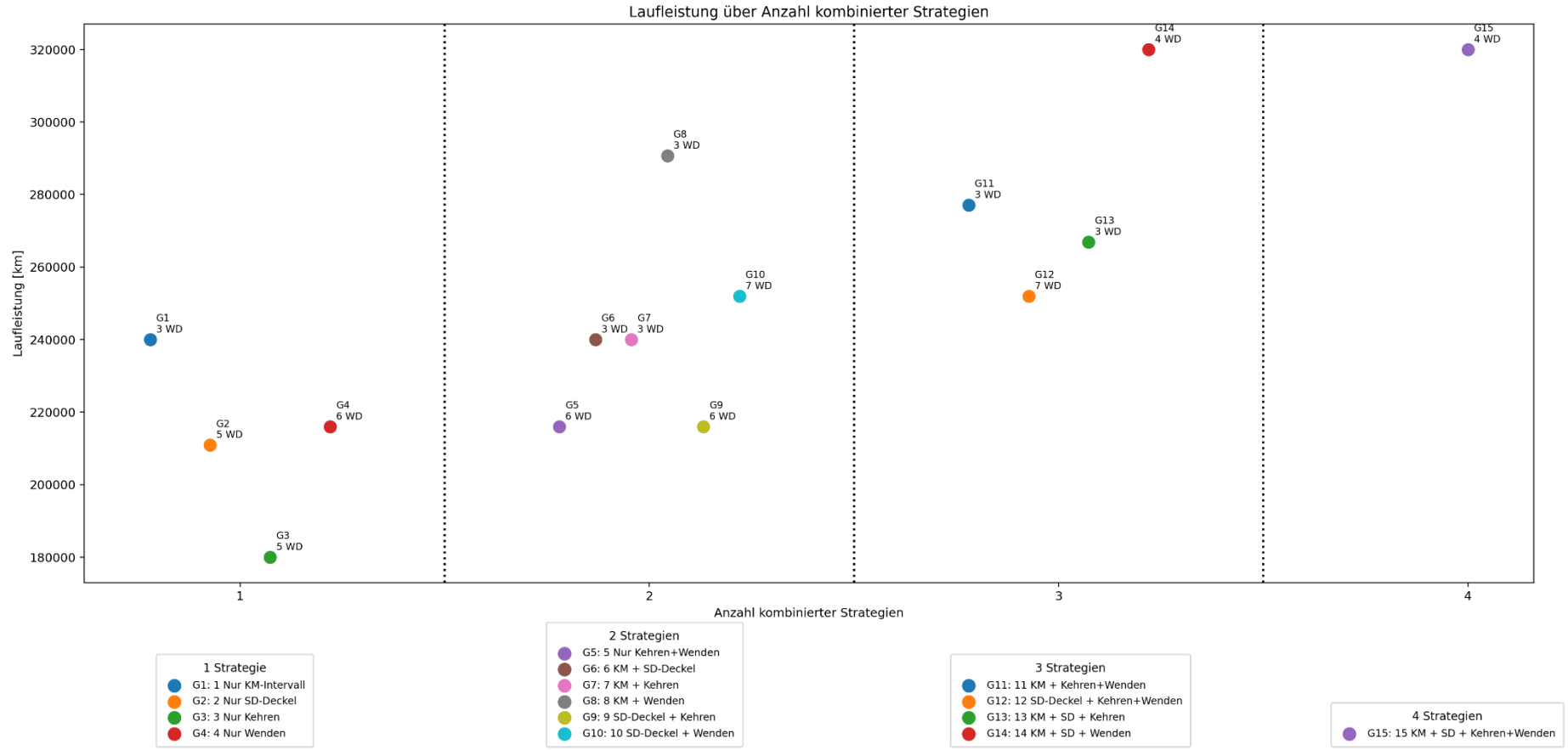
km-Intervall (10'000 km – 72'000 km)	SD-Deckelung (0.4 mm – 4 mm)	Kehren Ja/Nein	Wenden Ja/Nein
20 Möglichkeiten	32 Möglichkeiten	2 Möglichkeiten	2 Möglichkeiten

Kombinierte Strategie:
16 mögliche Kombinationen

2560 Möglichkeiten

Ziel:
Höchste Laufleistung

Strategieentwicklungen – Was ist nun die beste Strategie?



Strategieentwicklungen – Wirtschaftlichkeitsvergleich beim Flexity **Lang**



Die beste Strategie:

Wenden | Intervall = 80tkm | SD = 1.7 mm

Einsparung gesamte Flotte:
1'027'277 CHF/Jahr
Laufleistung: **314'418 km**

Flotte	Laufleistung	Jährliche Flotteneinsparung
Flexity Lang	314'418 km	1'027'276.54 CHF/Jahr
Flexity Kurz	202'500 km	415'439.14 CHF/Jahr
Total		**1'442'715.68 CHF/Jahr**

- Theoretisches Potenzial: Verifikation & Validierung erforderlich (-20% der Laufleistung erwartbar)
- Weiteres Einsparpotenzial bei Combino und AFZ noch quantitativ zu ermitteln
- Ressourcen nicht miteinkalkuliert

Heute:

Flexity Lang: **182'000 km**	2.8 Jahre → 4.9 Jahre
Flexity Kurz: **113'000 km**	1.7 Jahre → 3.1 Jahre



Danke für die Aufmerksamkeit

Fragen?