

Fakultät Maschinenwesen

Institut für Festkörpermechanik / Professur für Dynamik und Mechanismentechnik

# Ergebnisse aus dem 10-jährigen Betrieb der Dresdner Messstraßenbahn

**Prof. Dr.-Ing Michael Beitelschmidt, TU Dresden**

Prof. Dr. Roland Rennert, IMA Dresden

Dr. Gunter Dürschmidt, MVB München

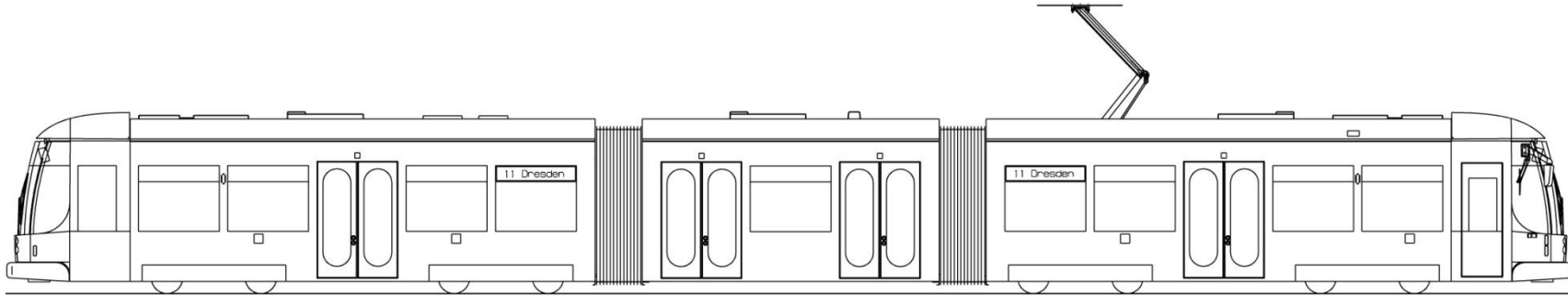
Dr. Gero Zechel, AT Wien (Österreich)

Dr. Matthias Harter, AT Bautzen

Maximilian Loderer, TU Dresden

# Idee „Dresdner Messstraßenbahn“

- (teilautomatisierte) **Langzeitbeobachtung** von Fahrzeug, Infrastruktur und Betrieb
- Rollender **Praktikumsplatz** für die Ausbildung von Studierenden der Fachbereiche:
  - Schienenfahrzeugtechnik
  - Mechatronik
  - Maschinenbau
- **Test** von Messtechnik / Messprinzipien
- Gezielte Messungen zur **Validierung von Simulationen**



# Dresdner Messstraßenbahn Konsortium



# Dresdner Messstraßenbahn

## Geschichte

- Ca. **10 Jahre** Messbetrieb
- Mehr als **1 Million Kilometer** zurückgelegt
- **13,5 TB** Messdaten
- 62 studentische Abschlussarbeiten
- 6 Promotionen (Mitautoren!)
- 23 wissenschaftliche Veröffentlichungen, u.A.:
  - 39. SFZ Tagung Graz: Projektvorstellung
  - 44. SFZ Tagung Graz: Zwischenergebnisse
  - 47. SFZ Tagung Graz: Ergebnisse und Abschluss
- Anfang 2021: Beschluss zur **Stilllegung** der Messtechnik
- vsl. Sommer 2022: Rückbau der Messtechnik



# Inhalt

Technische Beschreibung

Ergebnisse (Auswahl)

- Neue Erkenntnisse zu Beanspruchungen eines Straßenbahnfahrzeugs im Betrieb
- Gewinnung von Lastkollektiven mit Orts- und Zustandsbezug
- Energieflüsse und Energiebilanzen
- Ermittlung von Fahrwiderständen
- Untersuchungen zur Gleisqualität

Zusammenfassung und Ausblick

# Technische Beschreibung



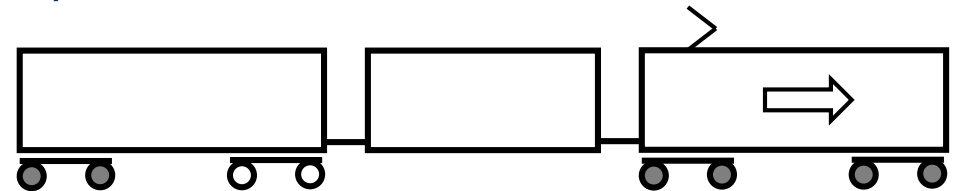
# Technische Beschreibung

## Fahrzeug NGT D8 DD



Einzigartiges **Außendesign**,  
gestaltet von Design-  
Studierenden

- Hersteller: **Bombardier** Transportation (Bautzen)
- klassisches **Drehgestellfahrzeug**, Länge 30 m
- 8 Achsen, davon 6 angetrieben
- Zwei Drehgestellwagen mit eingehängter Sänfte
- Lieferung von **40 Fahrzeugen** 2006 – 2009
- Bau der Messstraßenbahn (Fzg. 3836) „**ab Werk**“, keine Nachrüstlösung

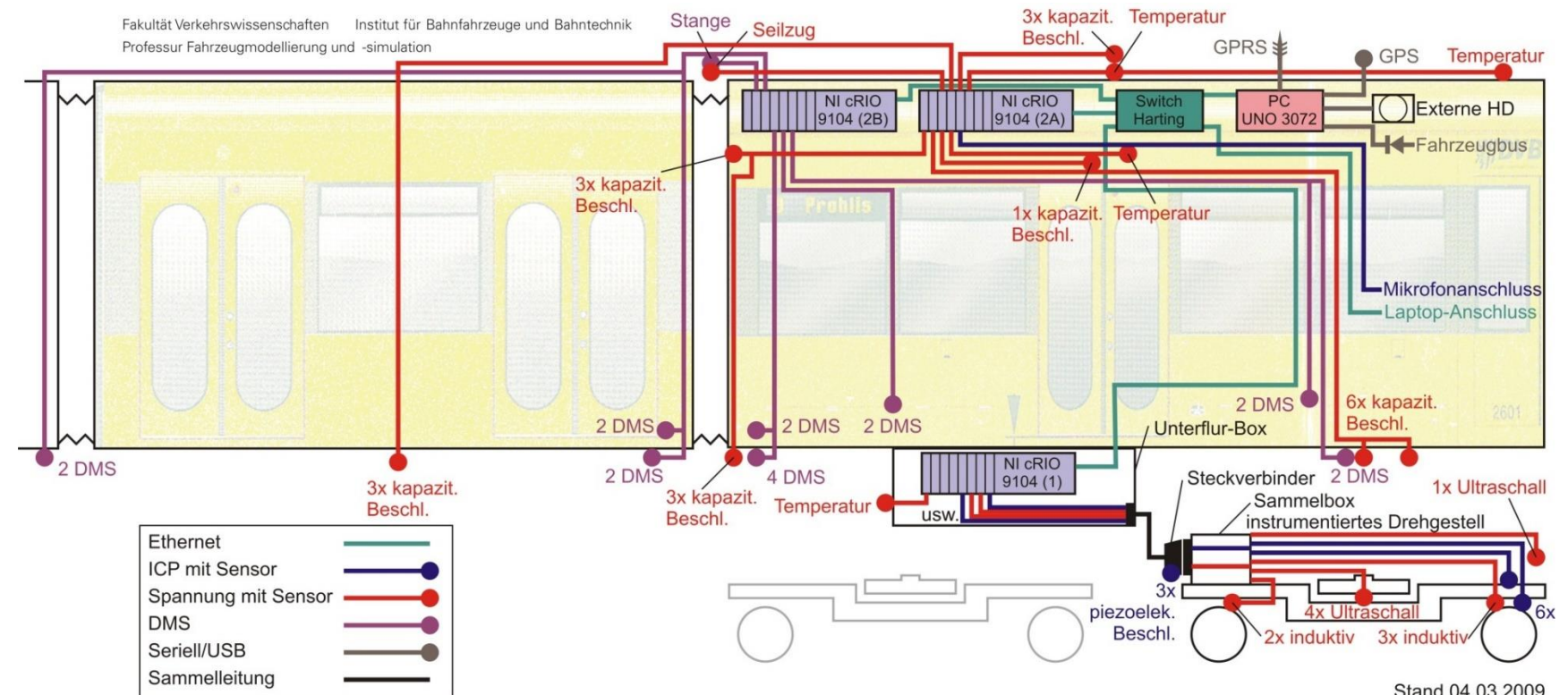


# Technische Beschreibung

## Messtechnik

### 62 Signale aus zusätzlich verbauter Sensorik

Datentransfer durch  
Festplattentausch alle  
6 Wochen



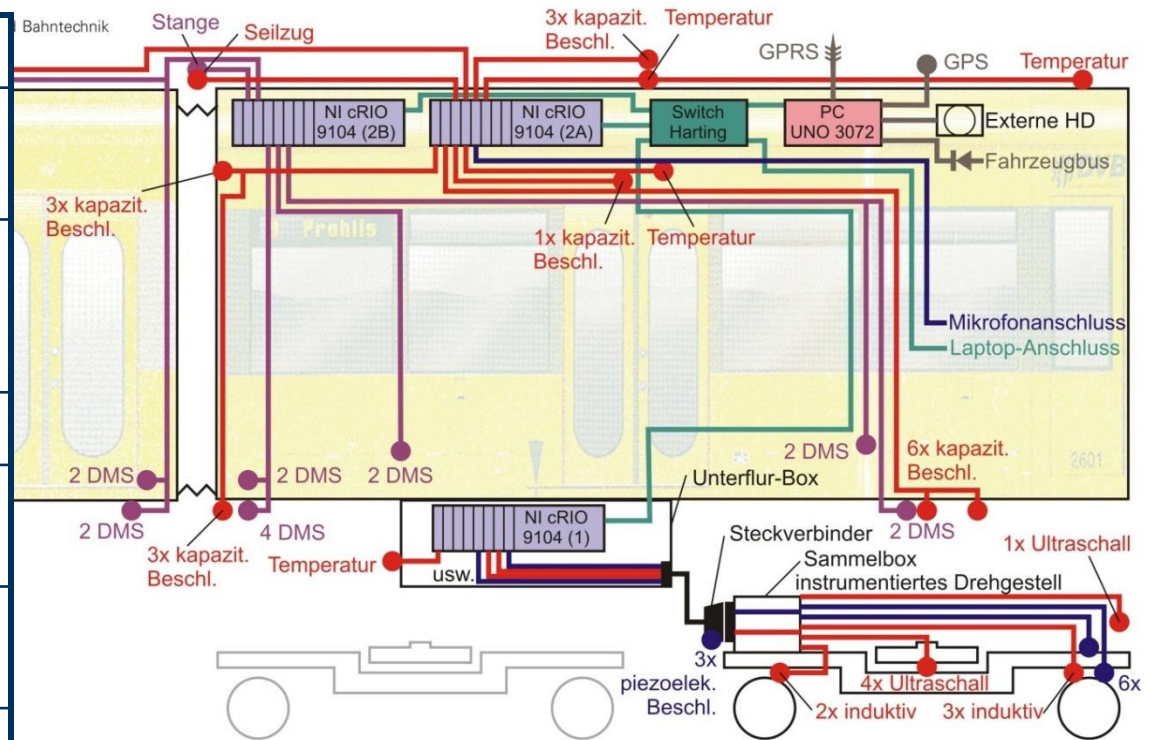


# Technische Beschreibung

## Messtechnik

## 62 Signale aus zusätzlich verbauter Sensorik

Messgröße	Messprinzip	Anz.	Abtaste
Beschleunigung	piezoelektrisch, kapazitiv	28	2kHz, 200Hz;
Weg	induktiv, Ultraschall, Seilzug	11	500Hz
Dehnung	DMS	19	200Hz
Temperatur	elektr. Widerstand	4	1Hz
Busgrößen	Fahrzeugbus (MVB)	54	5Hz bzw. 1Hz
GPS-Daten	GPS-Terminal	6	1Hz



Stand 04.03.2009

# Technische Beschreibung

## Busdaten

- Strom & Spannung am Stromabnehmer
- Elektrische Größen am Stromrichtereingang ( $U$ ,  $I$ ,  $P$ )
- Elektr. Leistung Bremssteller (Bremswiderstand)
- Mechanische Größen an den Fahrmotoren ( $M$ ,  $n$ ,  $P$ )
- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Temperaturen Traktionsausrüstung (z. B. Fahrmotoren)
- Logiksignale (z. B. Magnetschienenbremse ja/nein)



# Neue Erkenntnisse zu Beanspruchungen eines Straßenbahnfahrzeugs im Betrieb

*Roland Rennert*

# Beanspruchungen eines Straßenbahnfahrzeugs

## Ausgangslage

**Auslegungslasten** für StrabFZG normativ vorgegeben

- EN 12663-1
- VDV 152

Überprüfung durch **Streckenmessungen**

- für DG-Rahmen obligatorisch (DIN EN 13749)
- für Wagenkästen empfohlen

„Kurzzeitmessungen“ im gesamten Netz

- Leer und 2/3 Beladung
- Daraus rechnerischer **Betriebsfestigkeitsnachweis** (z.B. mit FKM-Richtlinie)

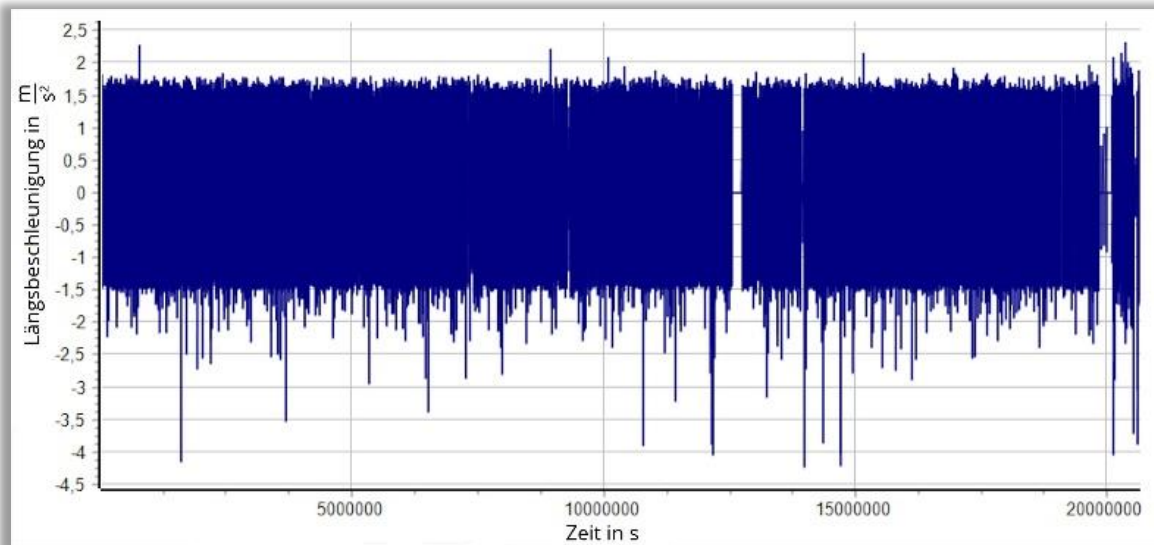


# Beanspruchungen eines Straßenbahnfahrzeugs

## Erkenntnisse

- Kurzzeitmessungen mit 2/3 Beladung sind konservativ
- Langzeitmessungen im Fahrgastbetrieb bis 1 Jahr bestätigen diese Annahme

Aber: 6 Jahre Messzeit mit Dresdner Messstraßenbahn zeigt „**Starkbremsereignisse**“



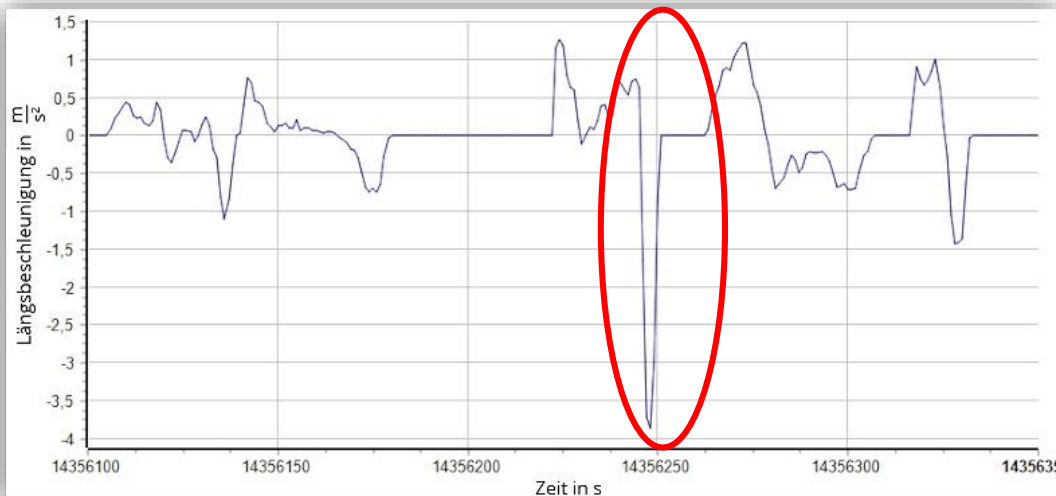


# Beanspruchungen eines Straßenbahnfahrzeugs

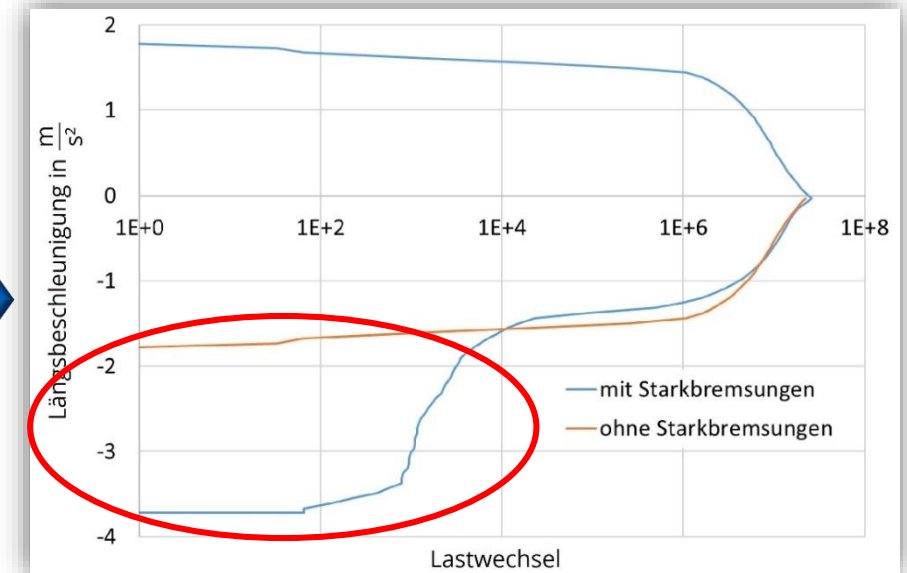
## Erkenntnisse

- Kurzzeitmessungen mit 2/3 Beladung sind konservativ
- Langzeitmessungen im Fahrgastbetrieb bis 1 Jahr bestätigen diese Annahme

Aber: 6 Jahre Messzeit mit Dresdner Messstraßenbahn zeigt „**Starkbremsereignisse**“



signifikante  
Veränderung des  
Lastkollektivs



Auslegungsrelevant?

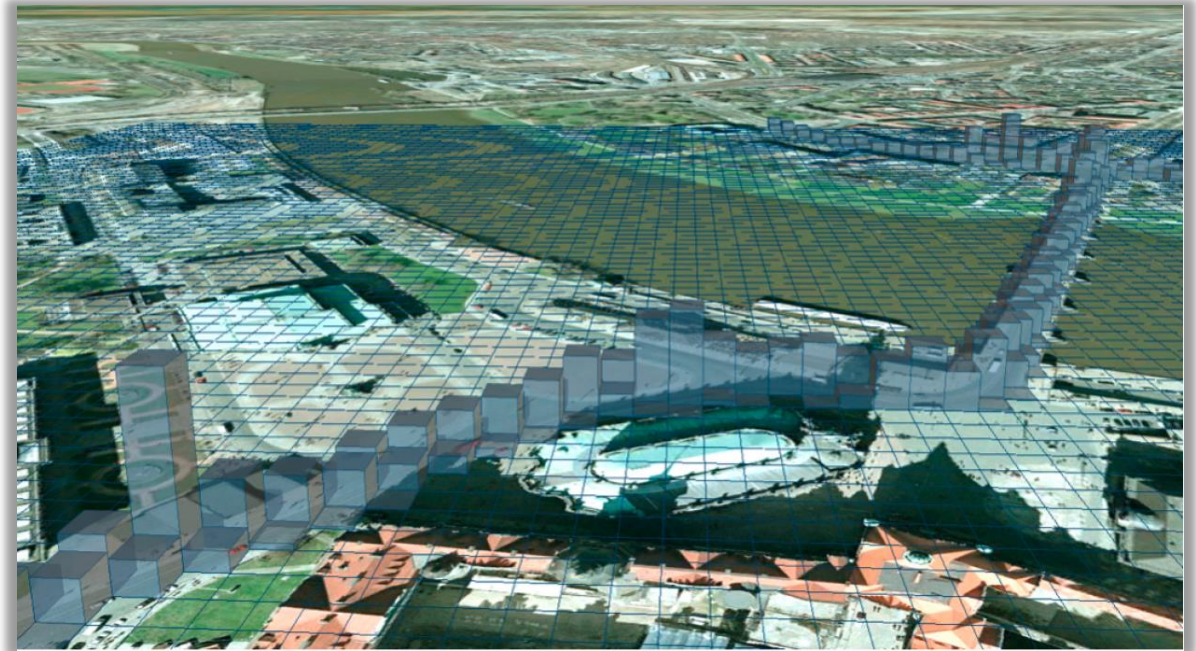
# Gewinnung von Lastkollektiven mit Orts- und Zustandsbezug

*Gero Zechel*

# Lastkollektive mit Orts- und Zustandsbezug

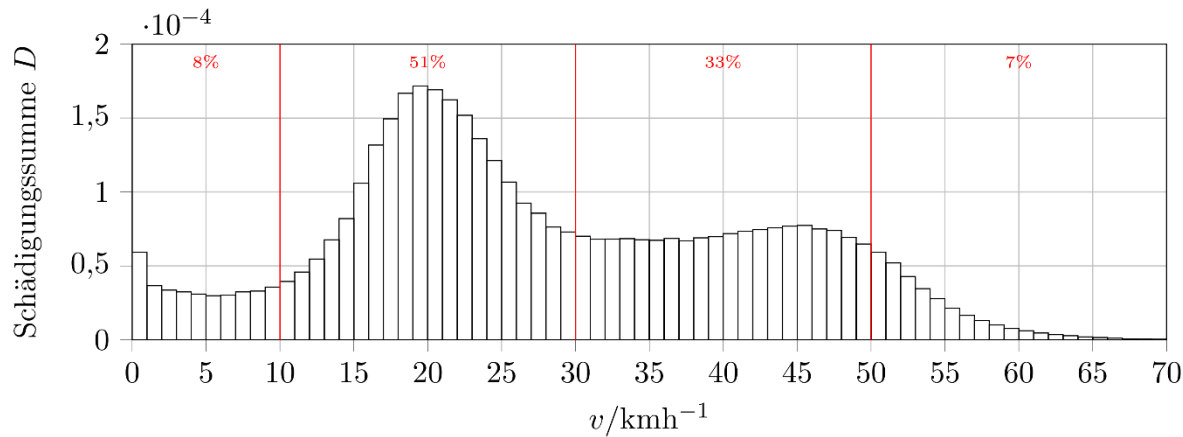
## Rainflowklassierung

- Die Rainflow-Tabelle enthält alle Lastspiele einer Messstelle und protokolliert damit jedes einzelne **Beanspruchungsereignis**.
- Die Rainflowtabelle kann ohne erneute Zählung durch Kontextdaten aus Gleismessung, Fahrzeugmessung und Simulation ergänzt und anhand dieser Daten in **Teiltabellen** zerlegt werden.
- Dies ermöglicht eine Auswertung der Wagenkastenbeanspruchung in Abhängigkeit beliebiger **Einflussfaktoren**.



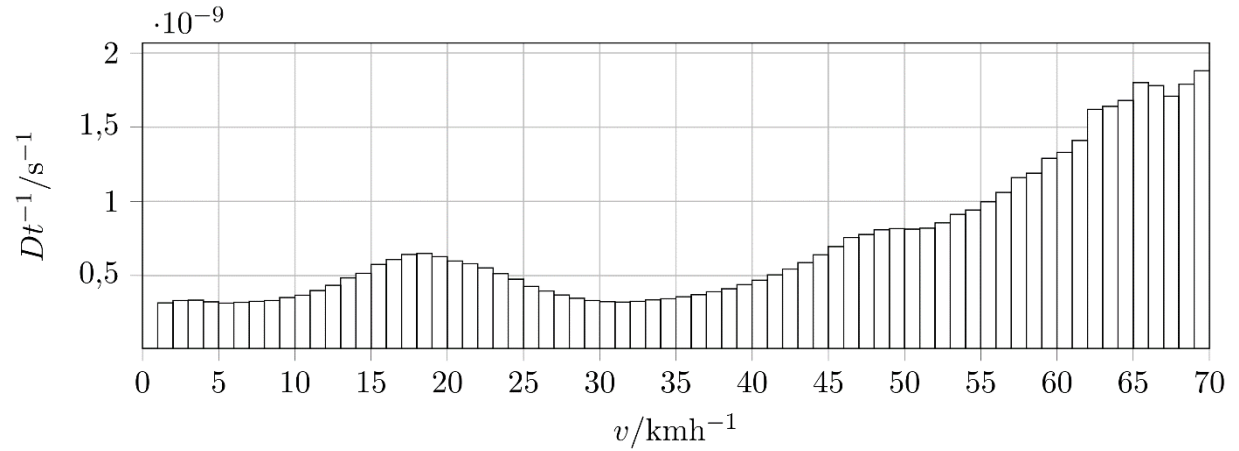
# Lastkollektive mit Orts- und Zustandsbezug

## Beispielauswertungen Geschwindigkeit



### Tatsächliche Beanspruchung

- 51% der Wagenkastenbeanspruchung im Bereich 10 – 30  $\text{km/h}$
- 33% der Wagenkastenbeanspruchung im Bereich 30 – 50  $\text{km/h}$



### Beanspruchung normiert auf Einsatzhäufigkeit

- Hohe Geschwindigkeiten verursachen hohe Beanspruchungen
- Im Kollektiv weniger wichtig, da selten erreicht

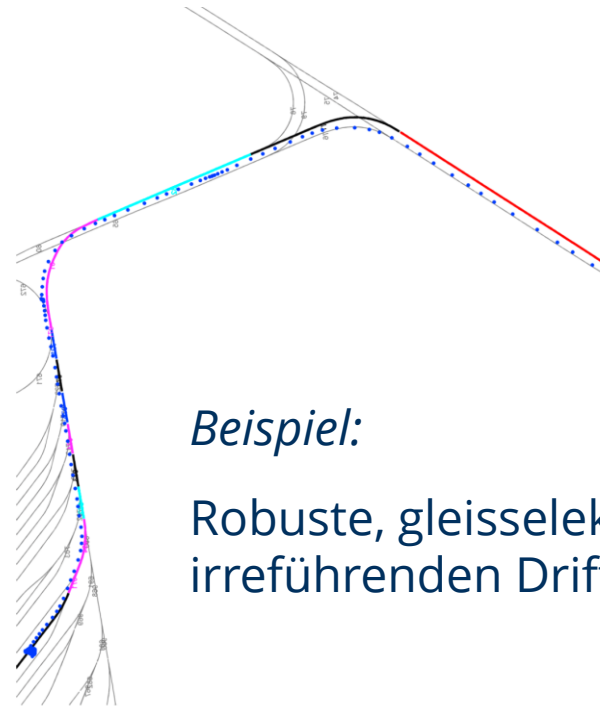
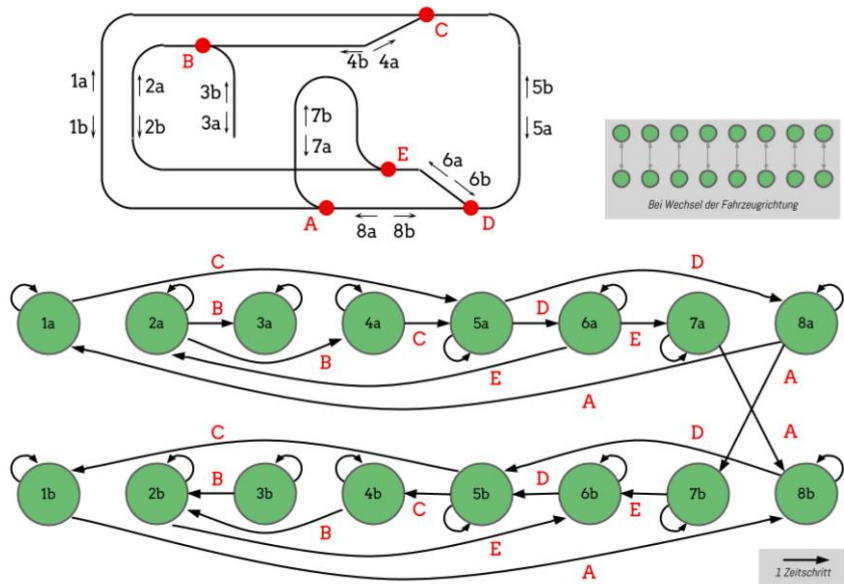
# Lastkollektive mit Orts- und Zustandsbezug

GPS → Strecke

**Ortsbezug** bei Langzeitmessungen „unbekannt“

**GPS** liefert ein Signal, das nicht gleisgenau ist

Algorithmus zur plausiblen **Zuordnung** der GPS-Punkte zum Gleisnetz (Zustandsautomat)



*Beispiel:*

Robuste, gleisselektive Gleiszuweisung trotz irreführenden Drifts des GPS-Signals

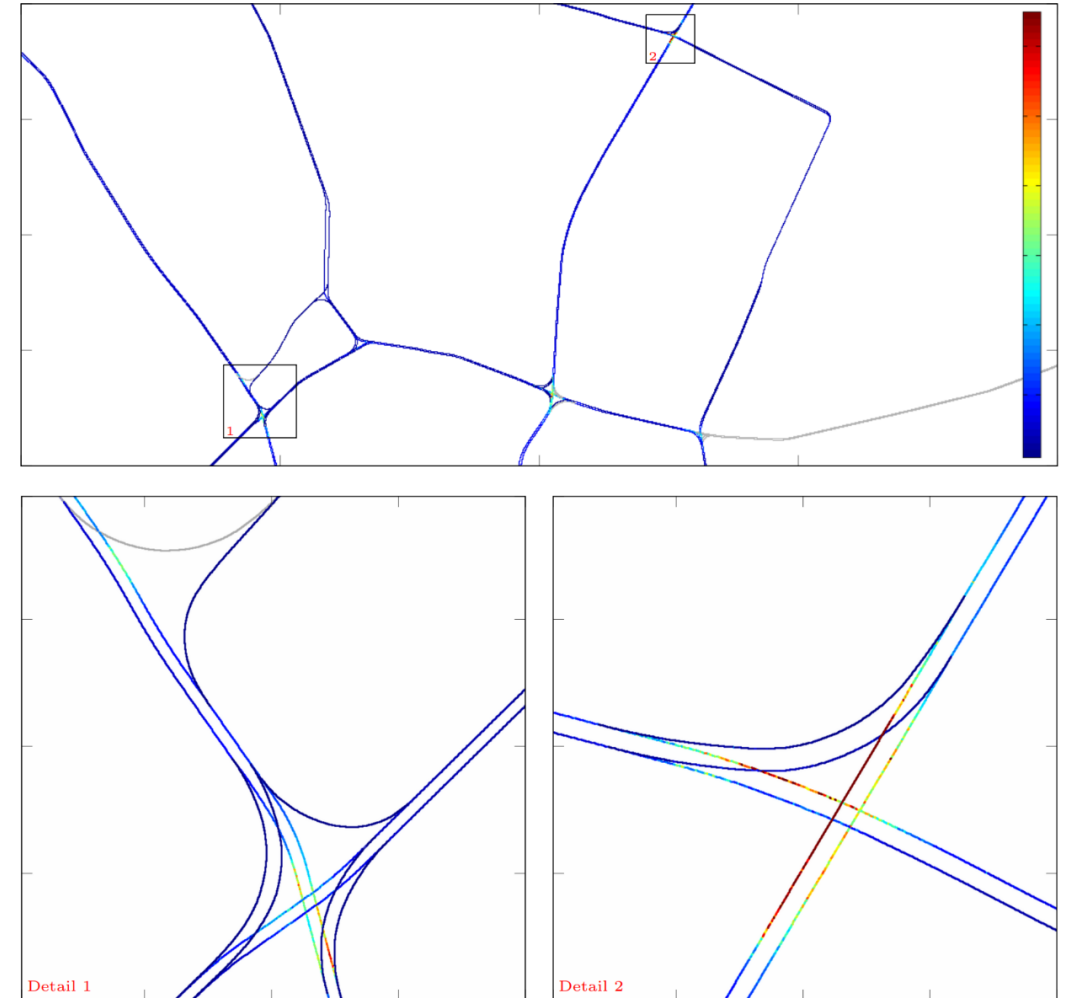


# Lastkollektive mit Orts- und Zustandsbezug

## Beispielauswertungen Ortsbezug

### Gleiszuordnung der aufgezeichneten Messdaten

- $72 \cdot 10^6$  Lastereignisse einer Dehnungsmessstelle am Wagenkasten
  - Gleisabschnitte der Länge 0,25 m
  - Beanspruchung für jeden Abschnitt kumuliert
  - Lastspiele über mehrere Abschnitte werden aufgeteilt
- Quantifizierung der Beanspruchung nach Streckenabschnitten
- Bessere Auslegungslasten

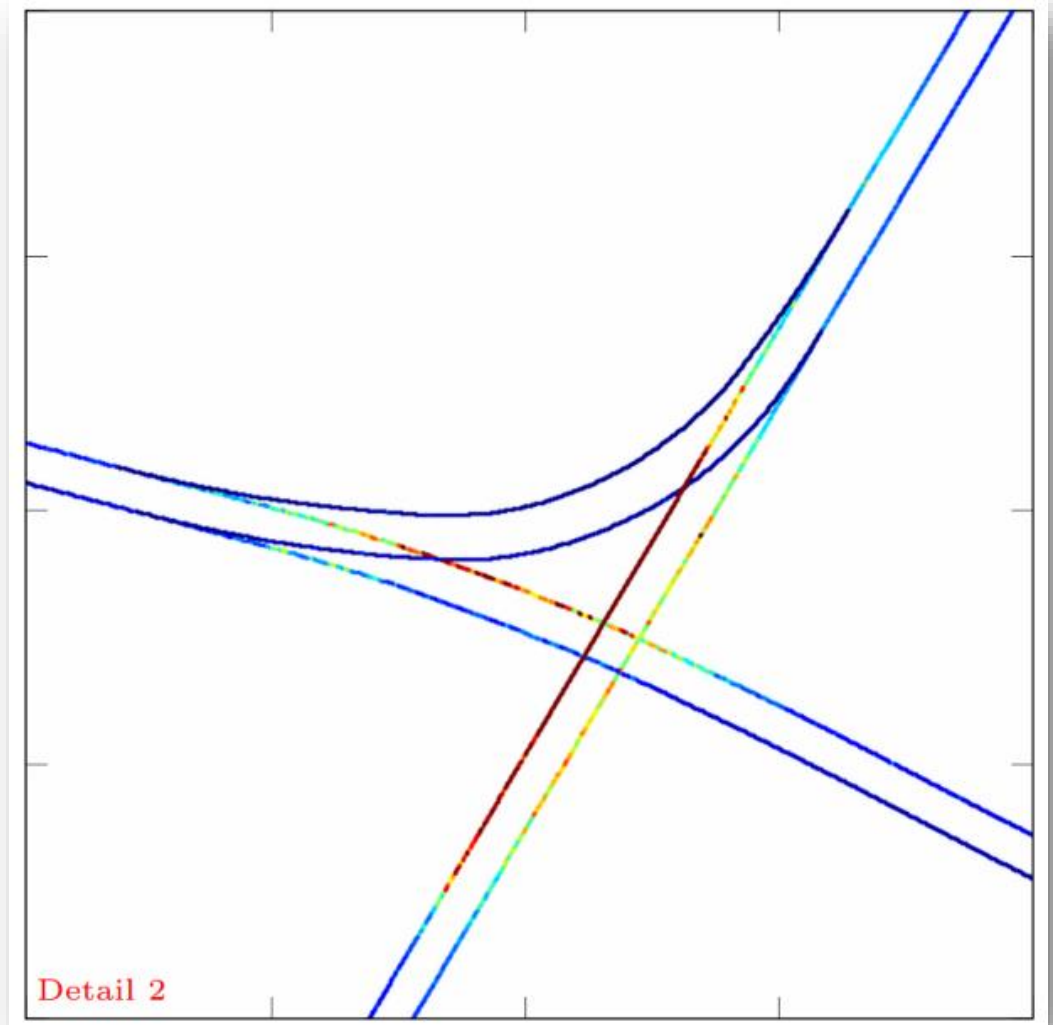


# Lastkollektive mit Orts- und Zustandsbezug

## Beispielauswertungen Ortsbezug

### Gleiszuordnung der aufgezeichneten Messdaten

- $72 \cdot 10^6$  Lastereignisse einer Dehnungsmessstelle am Wagenkasten
  - Gleisabschnitte der Länge 0,25 m
  - Beanspruchung für jeden Abschnitt kumuliert
  - Lastspiele über mehrere Abschnitte werden aufgeteilt
- Quantifizierung der Beanspruchung nach Streckenabschnitten
- Bessere Auslegungslasten



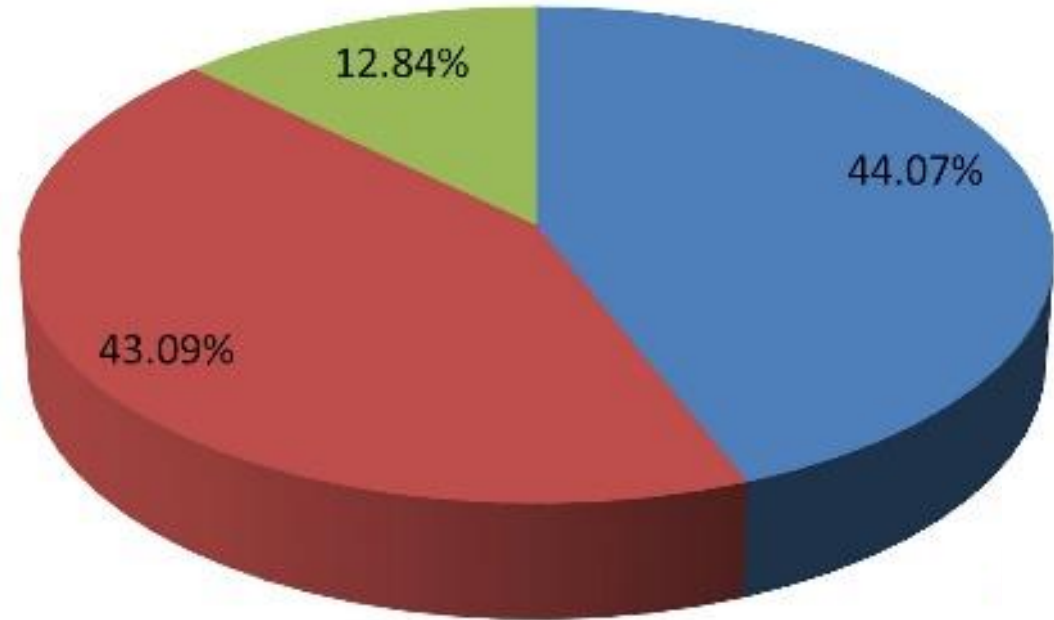
# Energieflüsse und Energiebilanzen

*Gunther Dürrschmidt*

# Energieflüsse und Energiebilanzen

Langzeit-**Energiesaldo** der tatsächlich im Fahrzeug dissipierten Energie:

- Traktion (Fahrwiderstände, Verluste)
  - Nebenverbraucher
  - Bremswiderstand
- 
- Messstraßenbahn ist nicht klimatisiert
  - Rekuperation nur eingeschränkt möglich



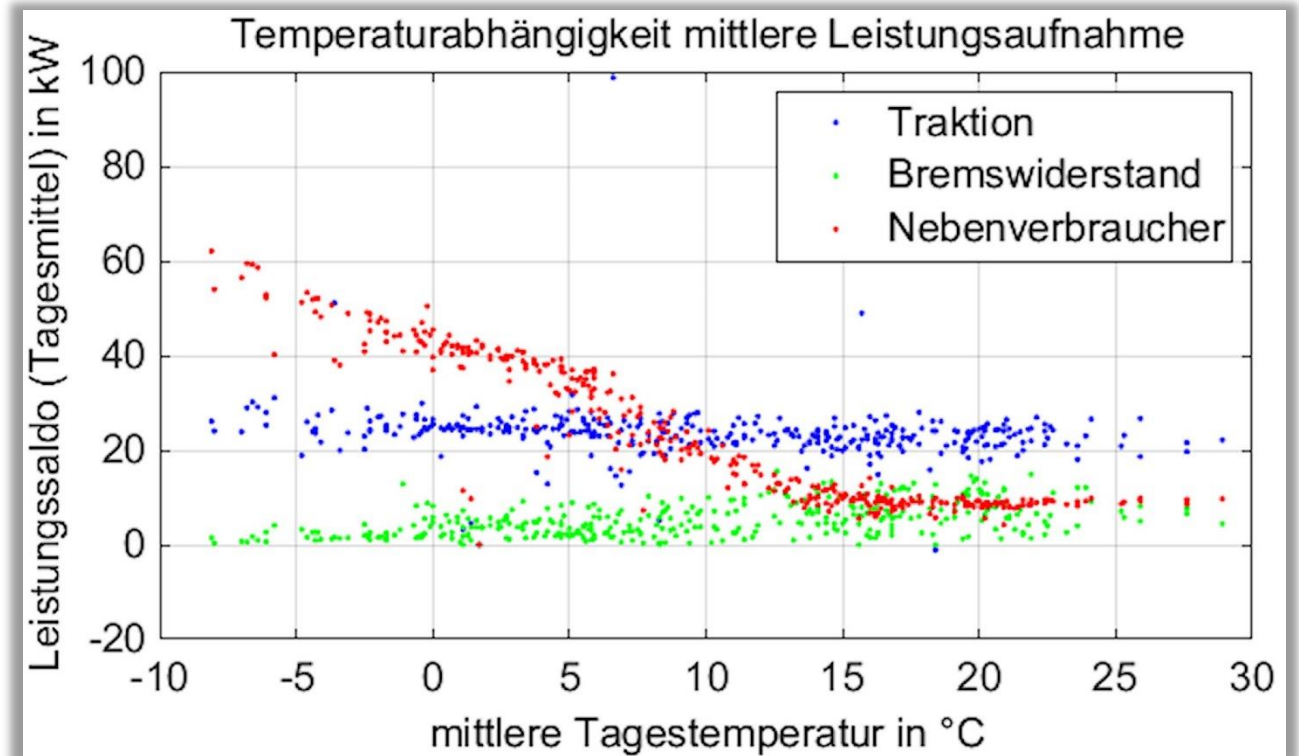
- Energiesaldo Traktion
- Energie Nebenverbraucher
- Energieverlust Bremswiderstand

# Energieflüsse und Energiebilanzen

## Temperaturabhängigkeit

Leistungssaldo nach mittlerer Tagestemperatur

- **Nebenverbraucher**-Leistung bei niedrigen Temperaturen hoch (Heizen im Winter)
- Traktionsleistung (näherungsweise) Temperaturunabhängig
- Einsatz des **Bremswiderstands** vor allem bei warmen Temperaturen





# Energieflüsse und Energiebilanzen

## Ortsabhängigkeit des Bremswiderstand-Einsatzes

- Rekuperation nur innerhalb eines **Unterwerks-**Abschnitts
  - Verbraucher müssen anwesend sein
  - **Lokalisation** von ungünstigen UW-Abschnitten
- **Energiespeicher?**
- rekuperationsfähige UW?



# Ermittlung von Fahrwiderständen

*Gunther Dürrschmidt*

# Ermittlung von Fahrwiderständen

Fahrwiderstand von LRV Fahrzeugen ist wichtig:

- wesentlicher Faktor des **Energiebedarfs** (v.A. bei Fahrzeugen mit Rekuperation)
- fahrdynamische Auslegung
- Abschleppen im Havariefall

Im Gegensatz zur Vollbahn keine allgemeingültigen Formeln

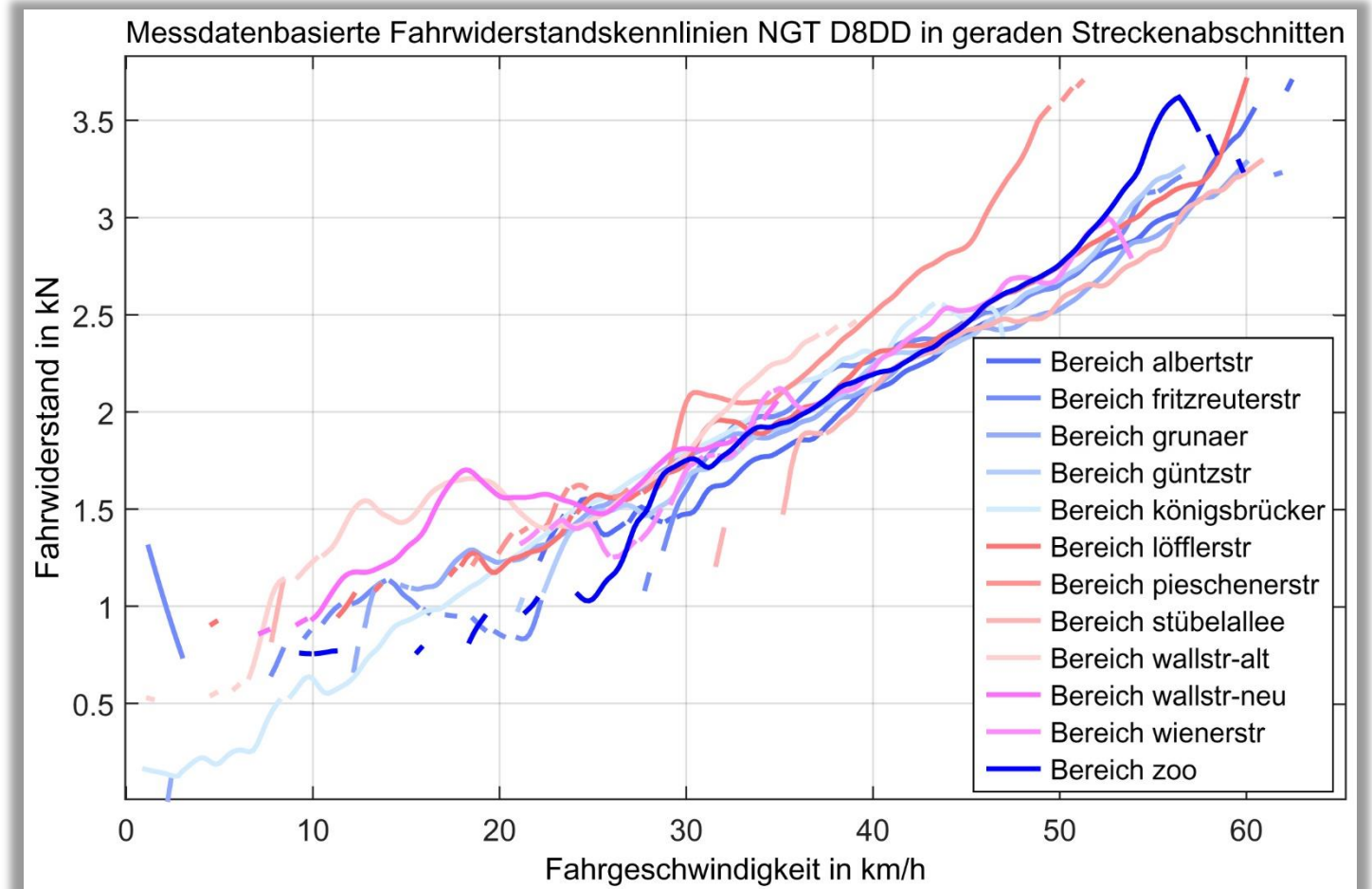
- unterschiedliche Fahrwerkskonfigurationen
- unterschiedliche Antriebskonfigurationen
- enge Radian, Rillenschienen, ...

→ Messstraßenbahn bietet Langzeitdaten zur Identifikation

# Ermittlung von Fahrwiderständen

## Randbedingungen der Messung

- Auswahl bestimmter **Streckenabschnitte**
- Kompensation der **Längsneigung** (Geodaten)
- Fahrtrichtung
- bis zu 1000 Überfahrten





# Ermittlung von Fahrwiderständen

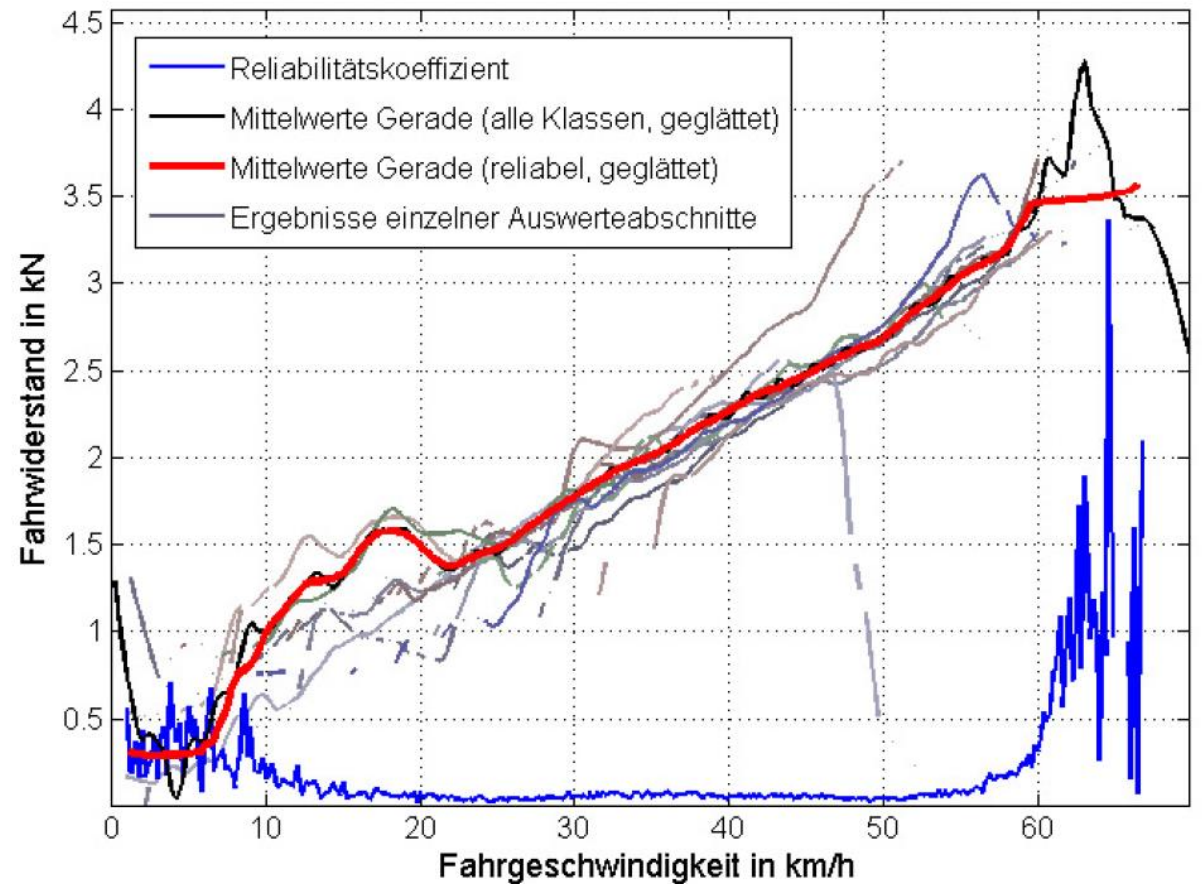
## Ergebnis nach umfangreicher Statistik

$$F_{\text{wid}} = K_0 + K_1 \cdot v + 0,5 \cdot c_w \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot A_q \cdot \left(\frac{v}{3,6}\right)^2$$

Bezeichnung des Koeffizienten	Wert und Einheit
Grundwiderstandskonstante	$K_0 = 350 \text{ N}$
Linearwiderstandskonstante	$K_1 = 40 \text{ N}/\frac{\text{km}}{\text{h}}$
Luftwiderstandsbeiwert	$c_w = 0,48$
mittl. angenommene Luftdichte	$\rho_{\text{Luft}} = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Querschnittsfläche Fahrzeugfront	$A_q = 7,4 \text{ m}^2$

- Dominanz des **linearen** Terms
- Luftwiderstand unbedeutend
- bis 22 km/h Effekte des **Lagerwiderstands**

Messdatenbasierte Fahrwiderstandskennlinie NGT D8DD auf geraden Streckenabschnitten

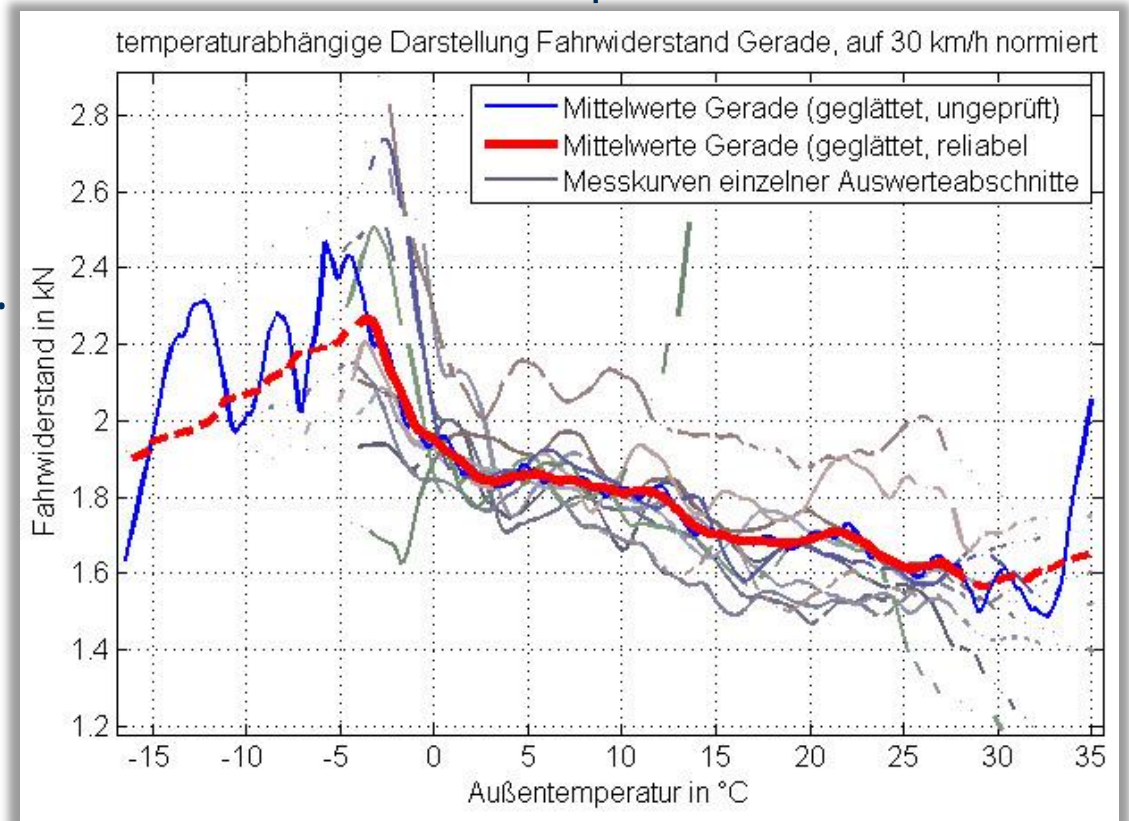




# Ermittlung von Fahrwiderständen

## weitere Effekte

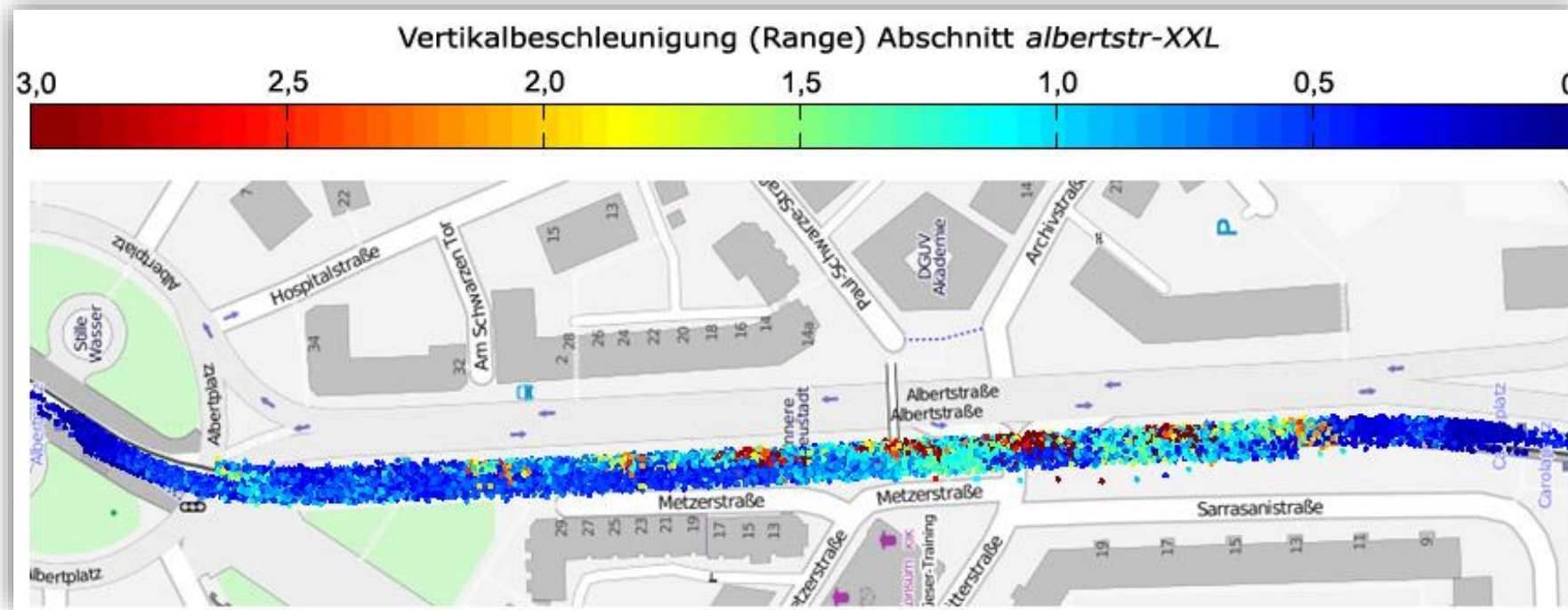
- **Bogenwiderstand** kann das 4- bis 8-fache betragen
- **Dynamischer Widerstand** (Energiedissipation in Federn und Dämpfern) auf schlechter Gleislage beobachtbar
- Unterschied Rillenschiene – Vignolschiene konnte nicht bestätigt werden
- Geringfügiger Einfluss der **Feuchtigkeit** ca. 3%, statistisch abgesichert
- **Temperatureinfluss** signifikant → (abgesicherte) Vermutung: Ölzähigkeit in Getrieben und Radlagern



# Untersuchungen zur Gleisqualität und weitere Auswertungen

*Gunther Dürrschmidt*

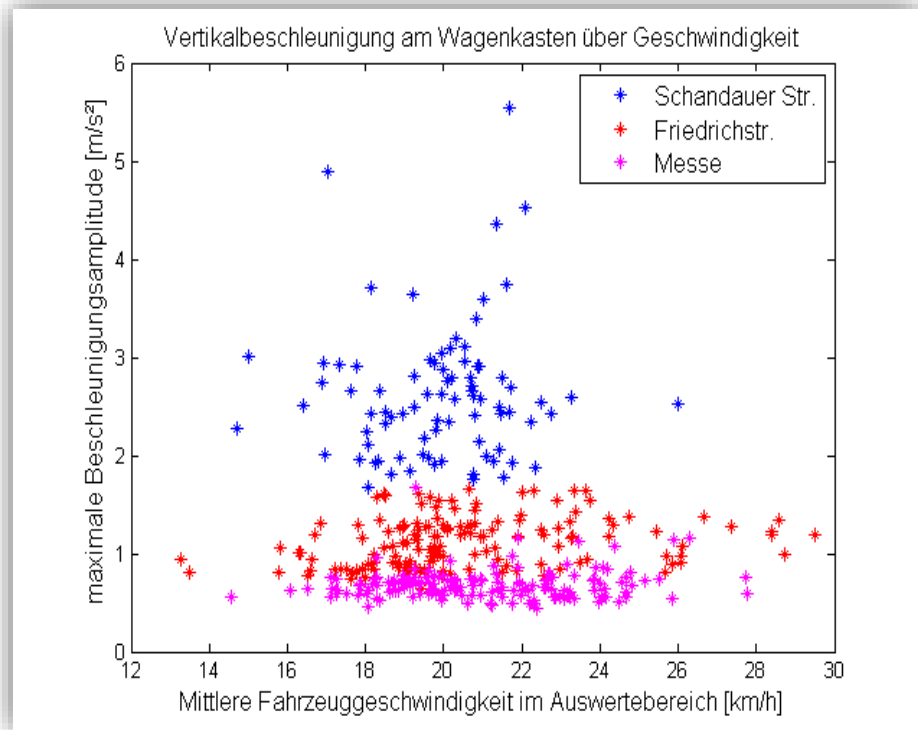
# Gleisqualität und weitere Auswertungen



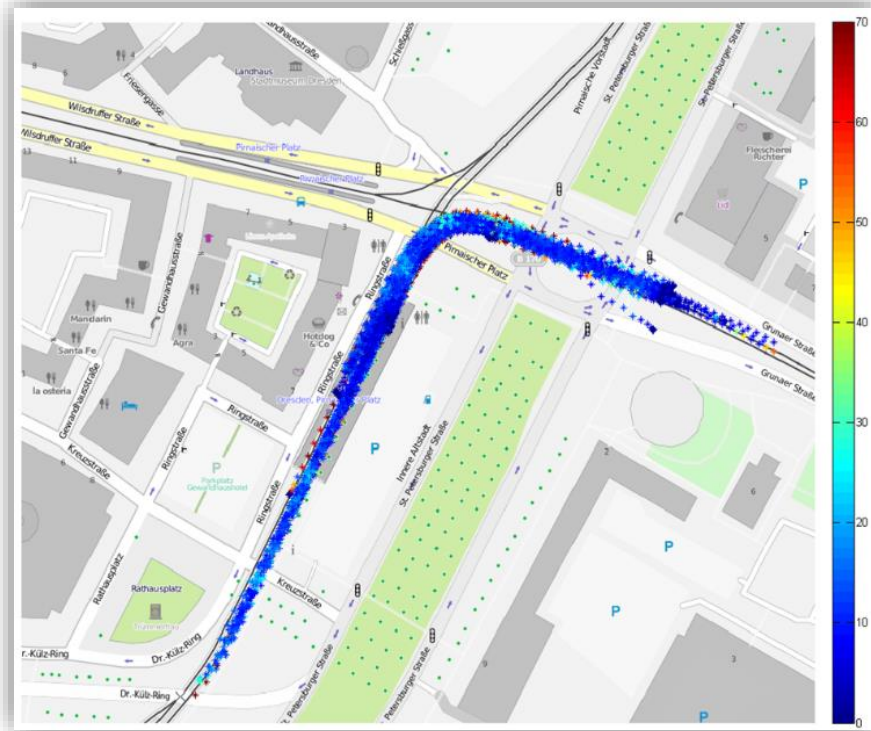
- Regelmäßiges Überfahren der gleichen Strecken
- Beschleunigungswerte → Gleislagequalität
- Identifikation „schlechter Strecken“
- Vergleich von verschiedenen Oberbauformen
- Bild: Auffällige „Wellen“ in einer Fahrtrichtung

# Gleisqualität und weitere Auswertungen

## Stecken verschiedenen „Alters“



## Nachweis des Erfolgs einer Gleisbaumaßnahme



# Zusammenfassung und Ausblick

# Zusammenfassung

Dresdner Messstraßenbahn war ein

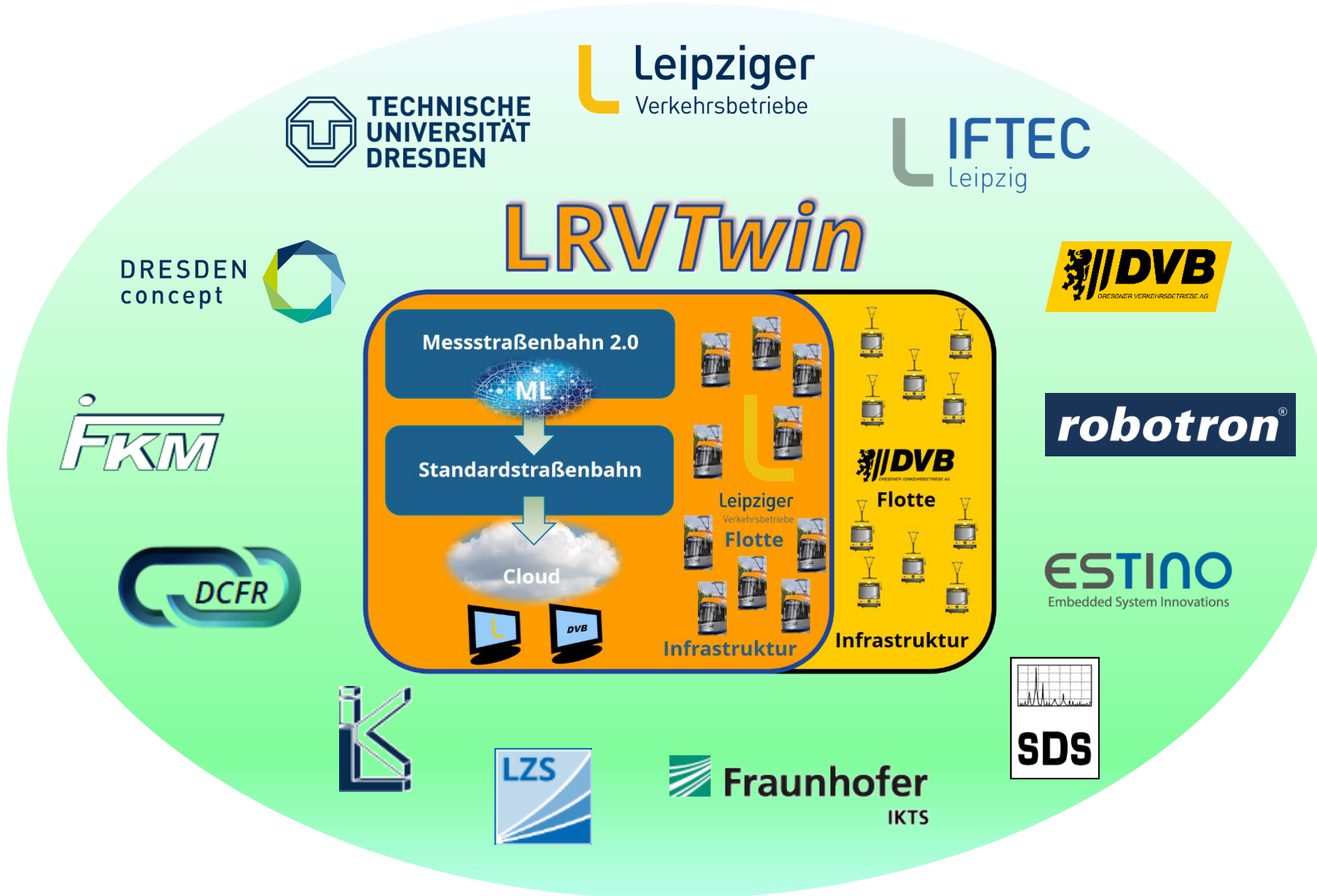
- erfolgreiches **Projekt**
- einzigartiger **Langzeit**versuchsträger
- Beispiel für eine gute **Hochschul-Industrie Kooperation**

Die Dresdner Messstraßenbahn lieferte

- **Erfahrung** im Ausstatten eines Langzeitmessträgers auf der Schiene
- Umfangreiche **Messdaten**
- Material für diverse **Auswerteprojekte**, wiss. Veröffentlichungen und studentische Arbeiten
- Wesentliche Impulse für ein **Folgeprojekt**



# LRVTwin – Projektkonsortium



**mFUND**  
Das Startkapital für die Mobilität 4.0

Gefördert durch:

 Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages