

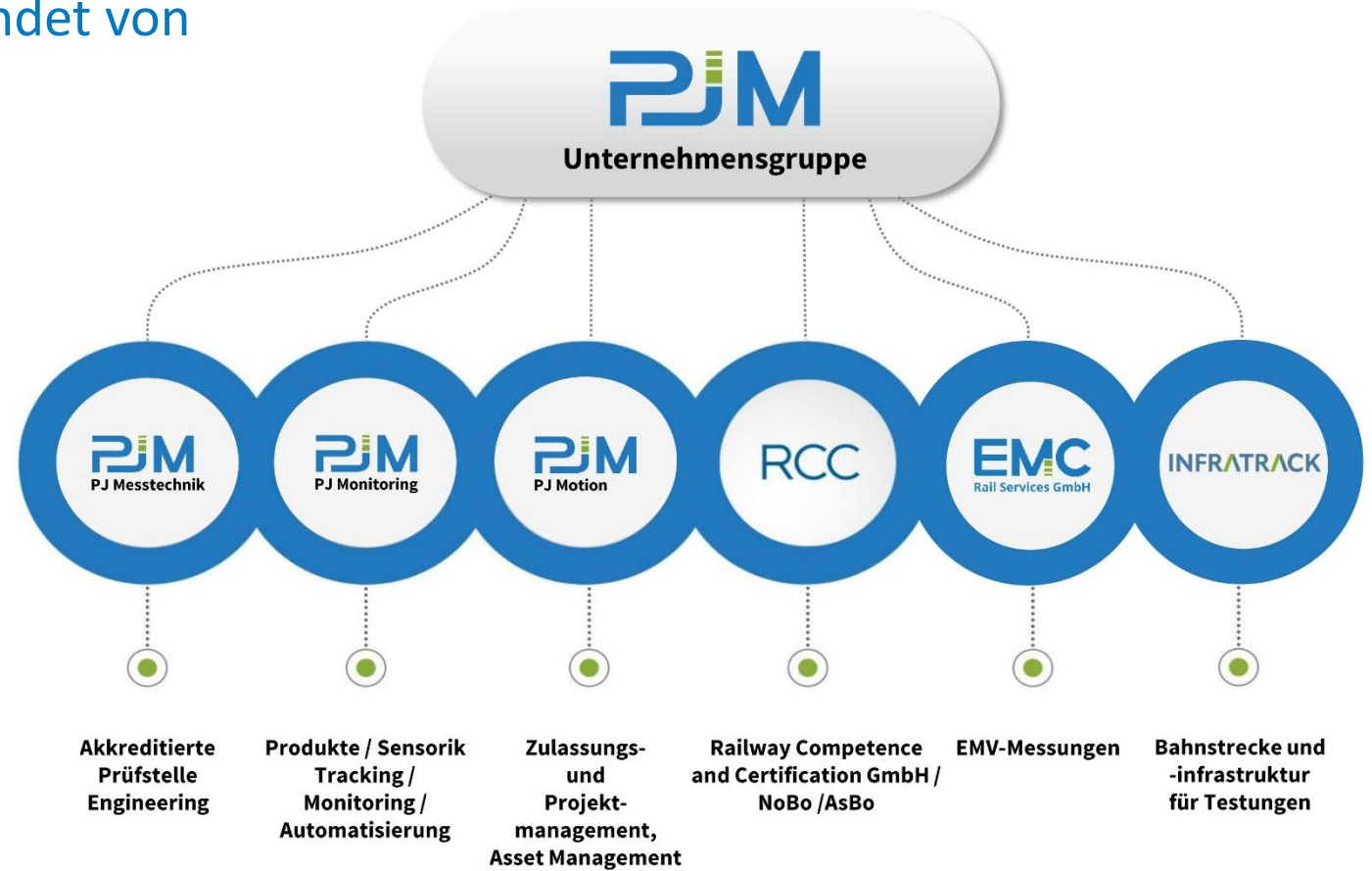


Absicherung des dynamischen Zusammenwirkens zwischen Stromabnehmer und Oberleitung

PJM, April 2026

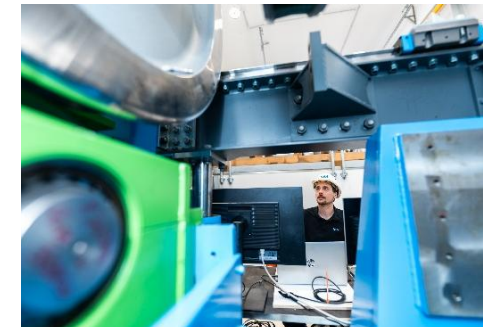
PJM Gruppe

- › 2006 als Spin-off der TU Graz gegründet von
 - › Dipl.-Ing. Günter Petschnig
 - › Dipl.-Ing. Dr. Martin Joch
- › 90+ Mitarbeiter*innen
- › Tätig im Bahnsektor



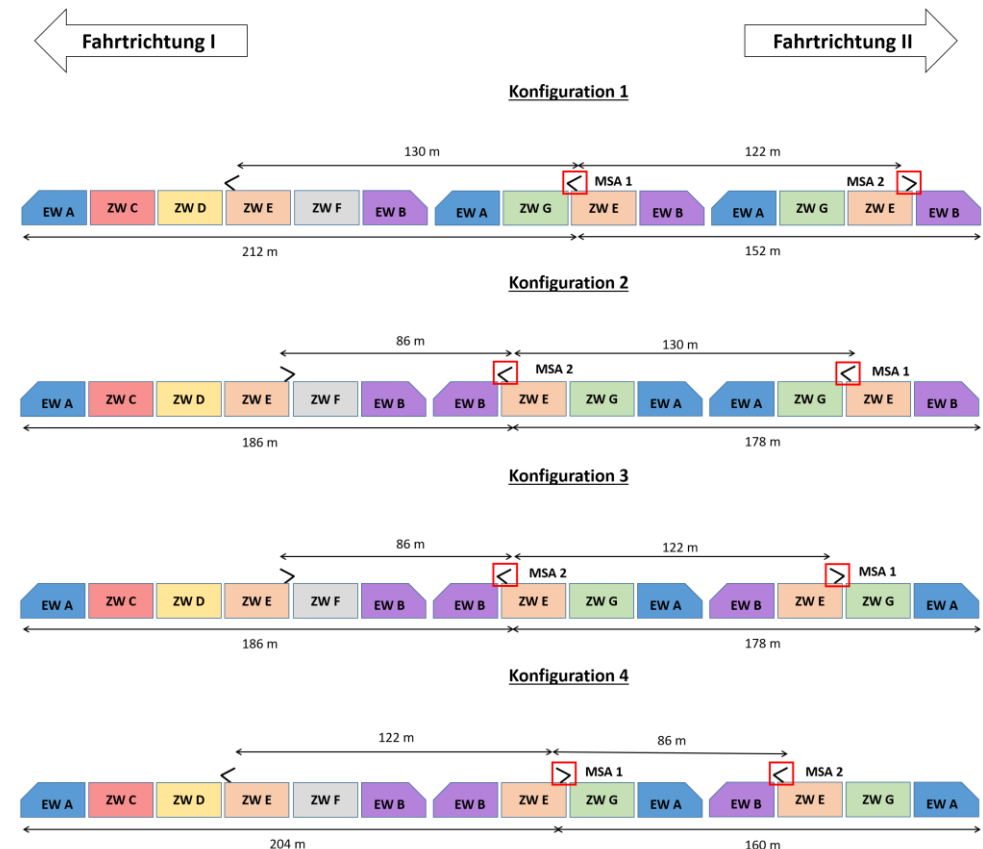
PJ Messtechnik

- › ISO/IEC 17025 akkreditierte Prüfstelle für den Schienenverkehr
- › Prüf-Dienstleistungen
 - › Lauftechnik & Fahrkomfort sowie Messradsätze
 - › Betriebsfestigkeit
 - › Bremse & Gleitschutz
 - › Schall & Vibrationen
 - › Aerodynamik
 - › EMV
 - › Stromabnehmer-Oberleitung
- › Engineering
 - › Festigkeitsnachweis
 - › Mehrkörper-Simulation



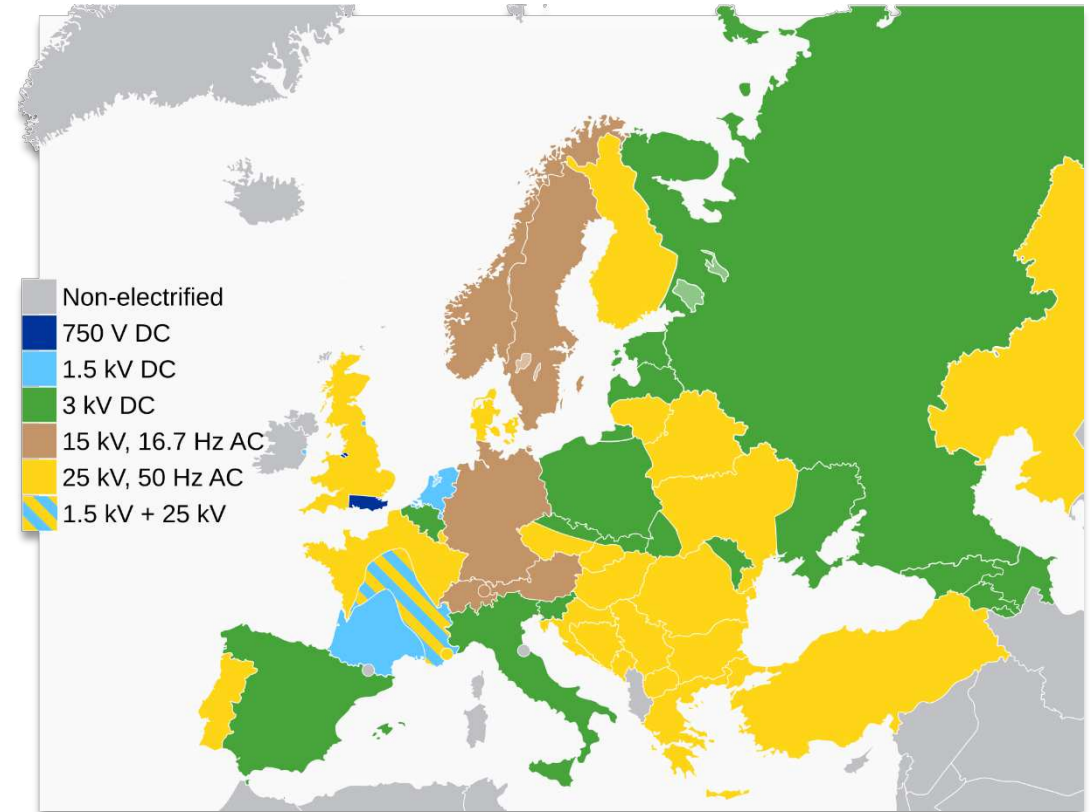
Herausforderung Mehrfachtraktion

- › Bei Mehrfachtraktion können schnell hunderte bis tausende verschiedene Konfigurationen entstehen:
 - › Unterschiedliche Stromabnehmerabstände
 - › 2 Fahrtrichtungen
 - › 2 Stromabnehmerausrichtungen: Knie/Spiess
- › Mit dem hoch effizienten Simulationstool von PJM können **tausende** Konfigurationen innerhalb von 24h mit einem handelsüblichen PC simuliert werden.
- › Durch die Simulation können die Worst-Case Konfigurationen ermittelt werden, welche dann durch Messungen untersucht werden.



Verordnungen, Normen und Regelwerke

- › Gesetzliche Grundlae
 - › Technische Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI)
 - › Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen (LOC&PAS)
 - › Energie (ENE)
- › Komponentennormen
 - › EN 50119
 - › EN 50206
- › Detaillierungen für EU-Netz
 - › EN 50367
- › Messung
 - › EN 50317
- › Simulation
 - › EN 50318
- › Nationale Regelwerke
 - › ÖBB Regelwerk 50.02.01
 - › DB Technische Netzzugangsbedingungen (TNB)
 - › ...



Bahnstromsysteme in Europa [Quelle: Wikipedia]

Simulation - Mehrfachtraktion

- › Aufgrund von dringend benötigten Kapazitätssteigerungen im Personenverkehr werden mehrere Triebzüge gekuppelt → Doppeltraktion oder Dreifachtraktion gängig
- › Mehrere gekuppelte Triebzüge „versperren“ die Strecke gleichermaßen wie 1 Triebzug, haben jedoch die doppelte bis 3-fache Kapazität → enorme Kapazitätssteigerung.
- › Die Interaktion zwischen Stromabnehmer und Oberleitung ist eine komplexe und hoch dynamische mechanische Schwingung.
- › Mehrere Stromabnehmer regen die Oberleitung simultan an und es kommt zu Überlagerungseffekten in der Oberleitungsschwingung.

Simulation

EN 50318: „Bahnanwendungen – Stromabnahmesysteme – Validierung von Simulationssystemen für das dynamische Zusammenwirken zwischen Dachstromabnehmer und Oberleitung“

Welche realen Oberleitungsdaten sind in Norm enthalten?

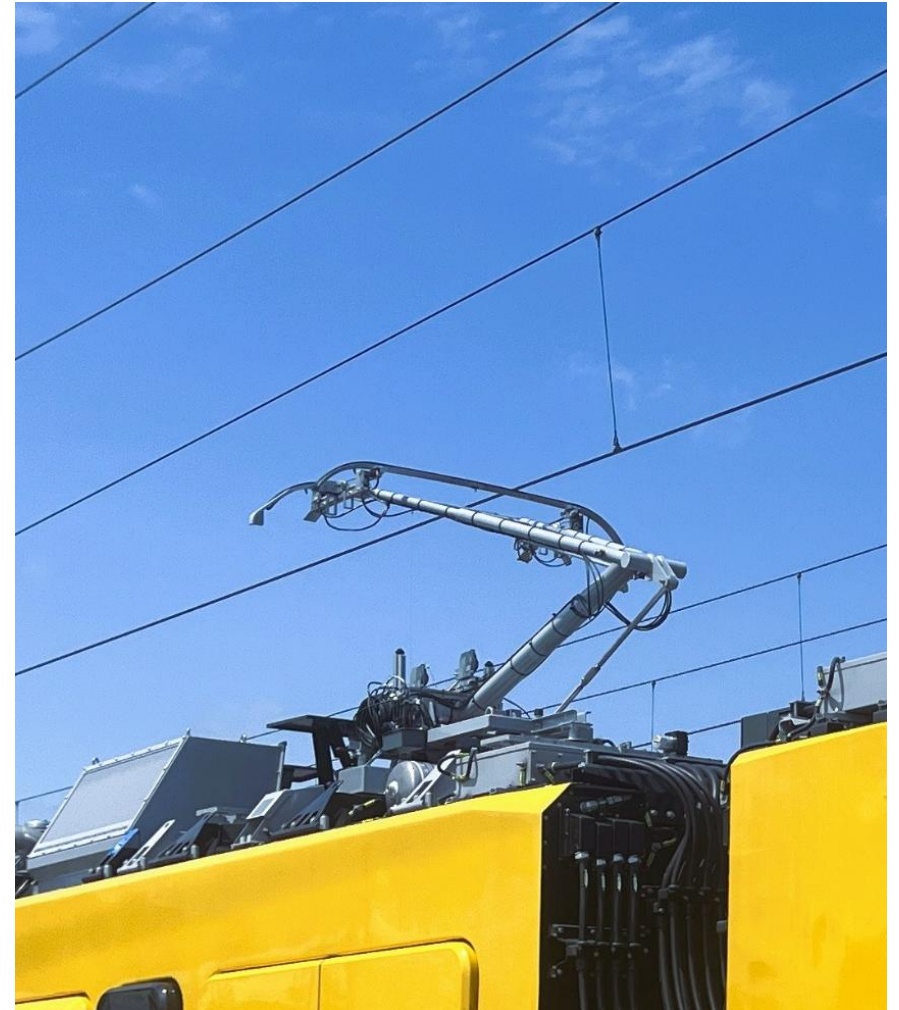
- › DC-Oberleitung ohne Y-Aufhängung
- › AC-Oberleitung ohne Y-Aufhängung
- › AC-Oberleitung mit Y-Aufhängung

Modellierung Oberleitung

- › Finite-Elemente-Modell (FEM)

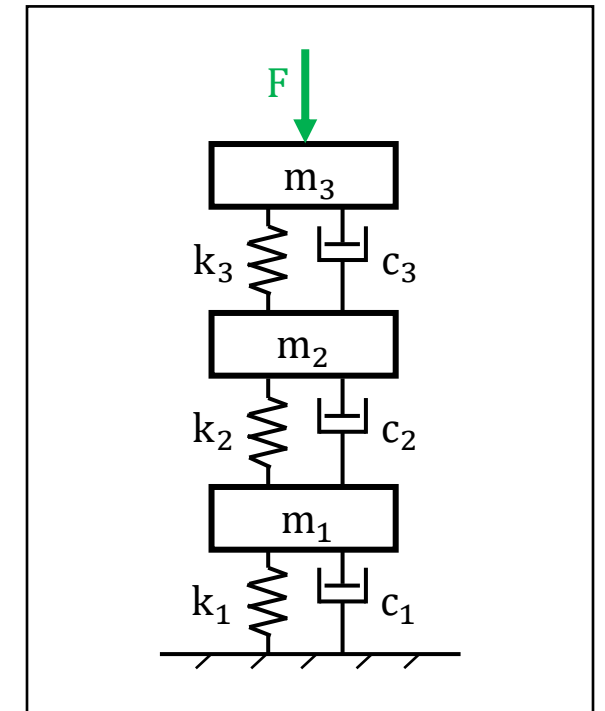
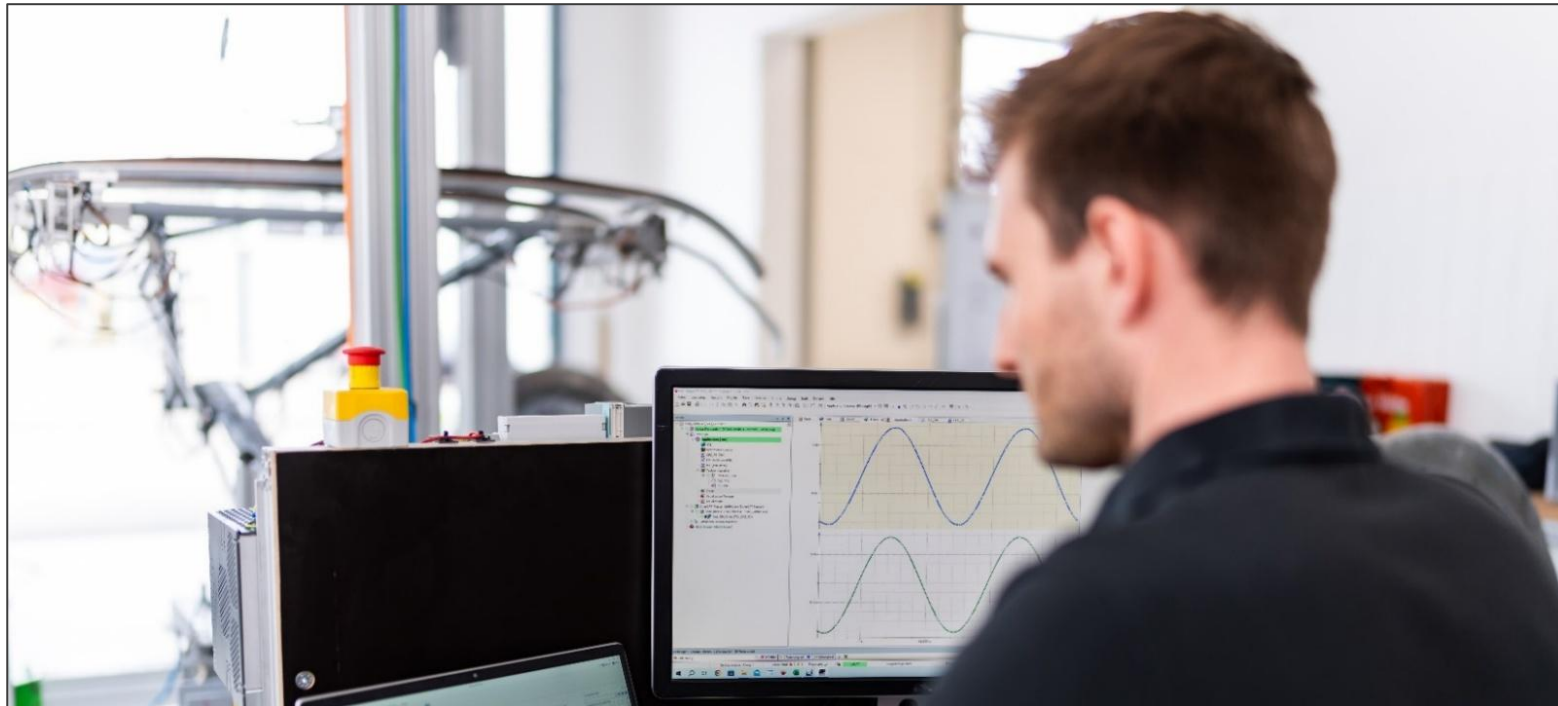
Modellierung Dachstromabnehmer

- › Modelle mit konzentrierten Parametern
- › Übertragungsfunktionsmodelle
- › Mehrkörpermodelle
- › Physisches Modell: Hardware-in-the-Loop



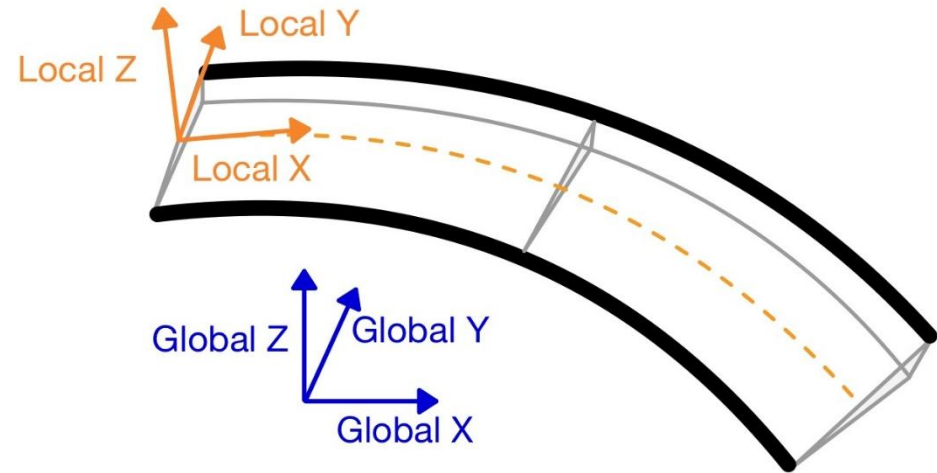
Simulation - Stromabnehmermodell

- › Diskretes Modell mit konzentrierten Parametern des Stromabnehmers
- › Parameteridentifikation am PJM-Prüfstand möglich



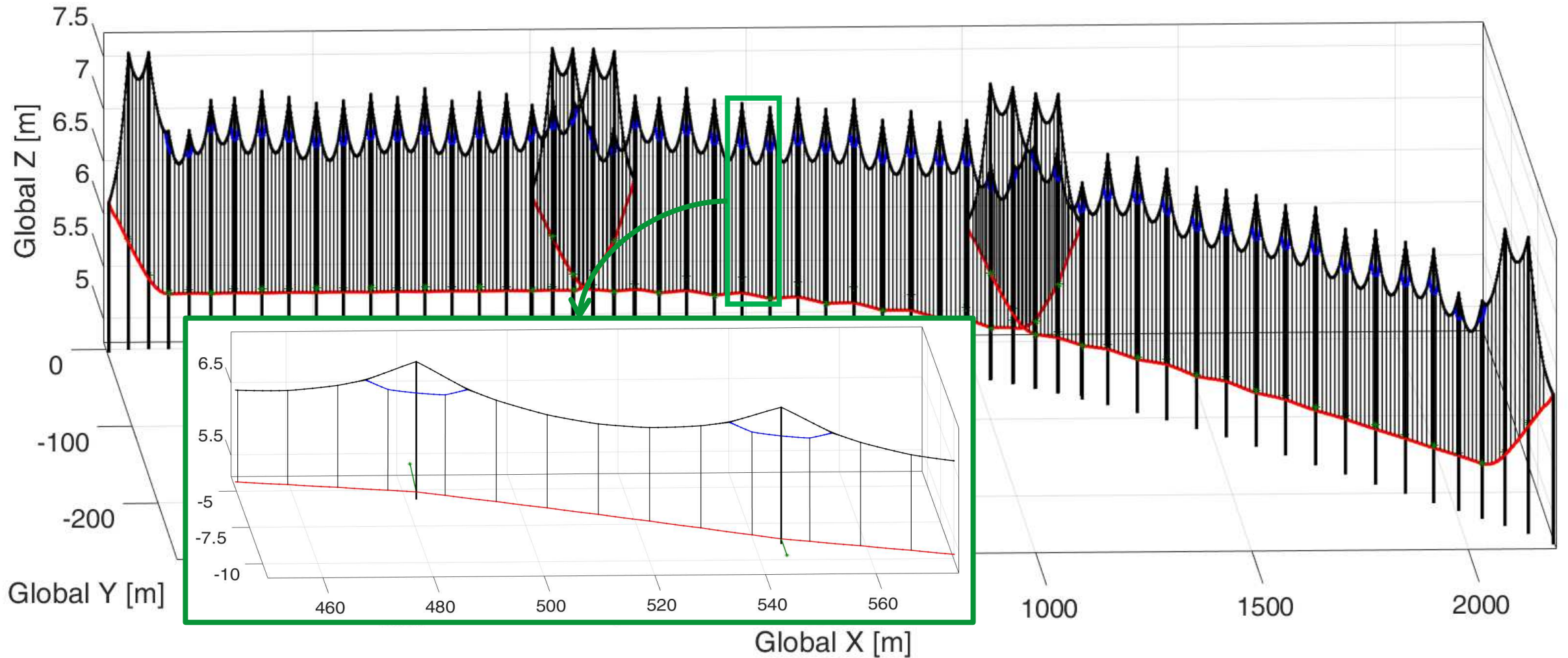
Simulation - Oberleitungsmodell

- › FEM in MATLAB implementiert
 - › Berechnung vertikaler und horizontaler Dynamik
 - › Inklusiver Kurven und Überhöhung des Gleises
- › Durchknicken der Hänger modelliert
- › Seitenhalter
 - › Analytisches Ersatzmodell
 - › Co-Simulation
 - › FEM Modell



<p>PDE:</p> $\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = f(x, t)$ <p>Simulationansatz mit Vorspann- und Steifigkeitstermen</p>	<p>FE-Methode</p> <p>schwache Form: - Hermit'sche Balkenelemente</p>	<p>ODE System:</p> $M\ddot{q} + D(q(t))\dot{q} + K(q(t))q = F(q(t))$ <p>Zeitabhängige Systemmatrizen und Kräfte</p>
---	---	--

Simulation - Oberleitungsmodell



Simulation – Stromabnehmermodell & Oberleitungsmodell

- › Kopplung Oberleitung und Stromabnehmer
 - › über Kontaktkraft
 - › Co-Simulation und Hardware-in-the-Loop möglich
- › Betrachtung mehrerer Stromabnehmer pro Zug
- › Implizite numerische Integration (Newmark-beta-Verfahren)

ODE System:

$$M\ddot{q} + D(q)\dot{q} + K(q) = F(q)$$

Newmark-beta-Verfahren:

$$\beta = \frac{1}{4} \text{ und } \gamma = \frac{1}{2}$$

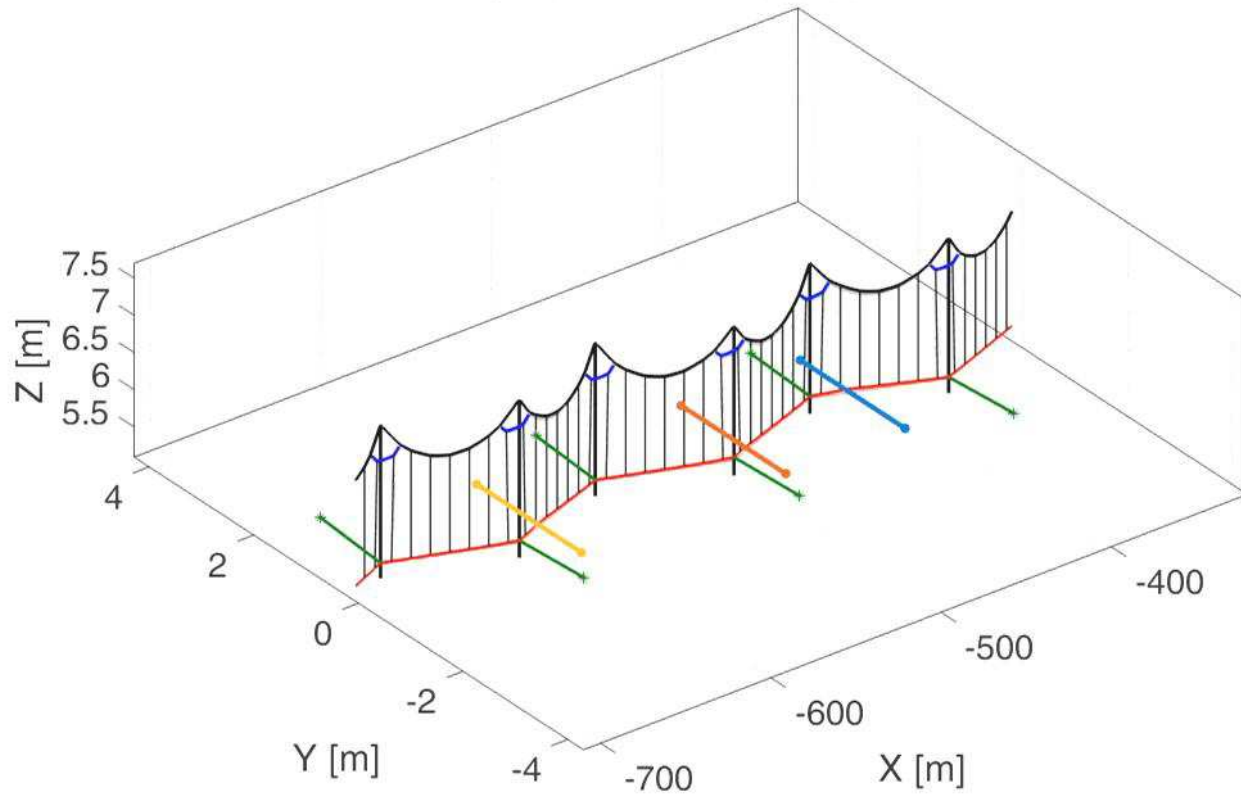
$$\rightarrow \ddot{q} = \frac{1}{2}(\ddot{q}_{n+1} + \ddot{q}_n)$$

Konstante mittlere Beschleunigung

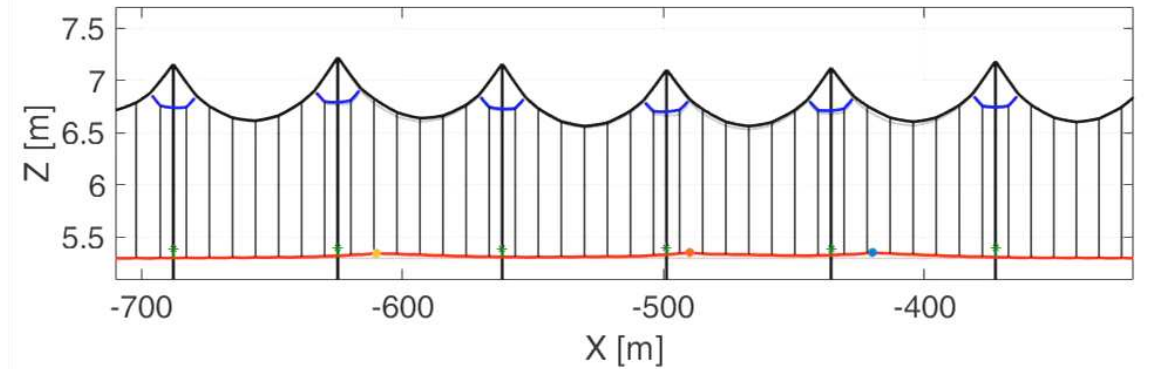
Zustandsvektor der DoF: $q(t)$
→ Kontaktkraft

Simulation - Mehrfachtraktion

Simulation Time: 0.00 s



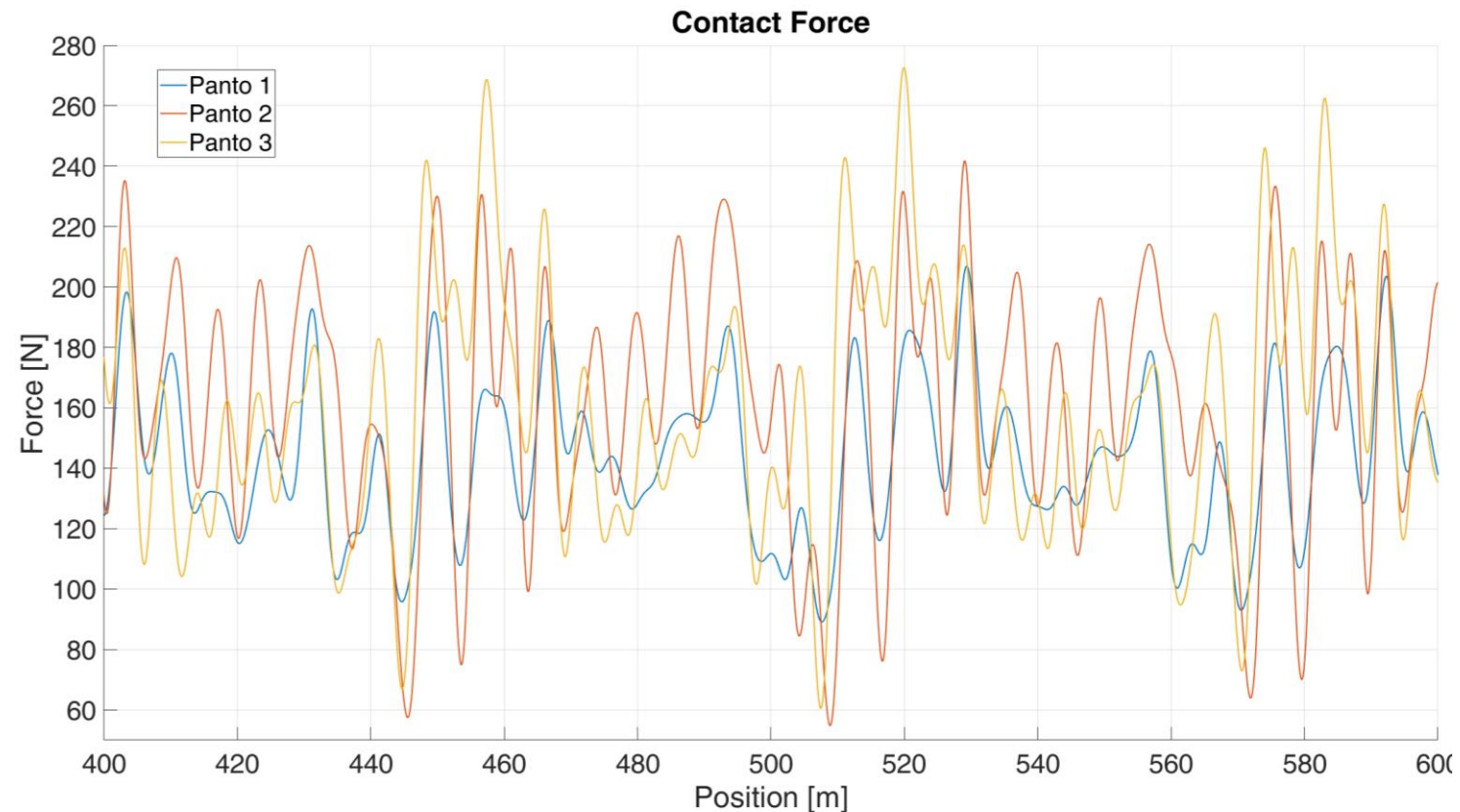
Simulation Time: 0.00 s



Simulation - Mehrfachtraktion

Kontaktkraftverlauf

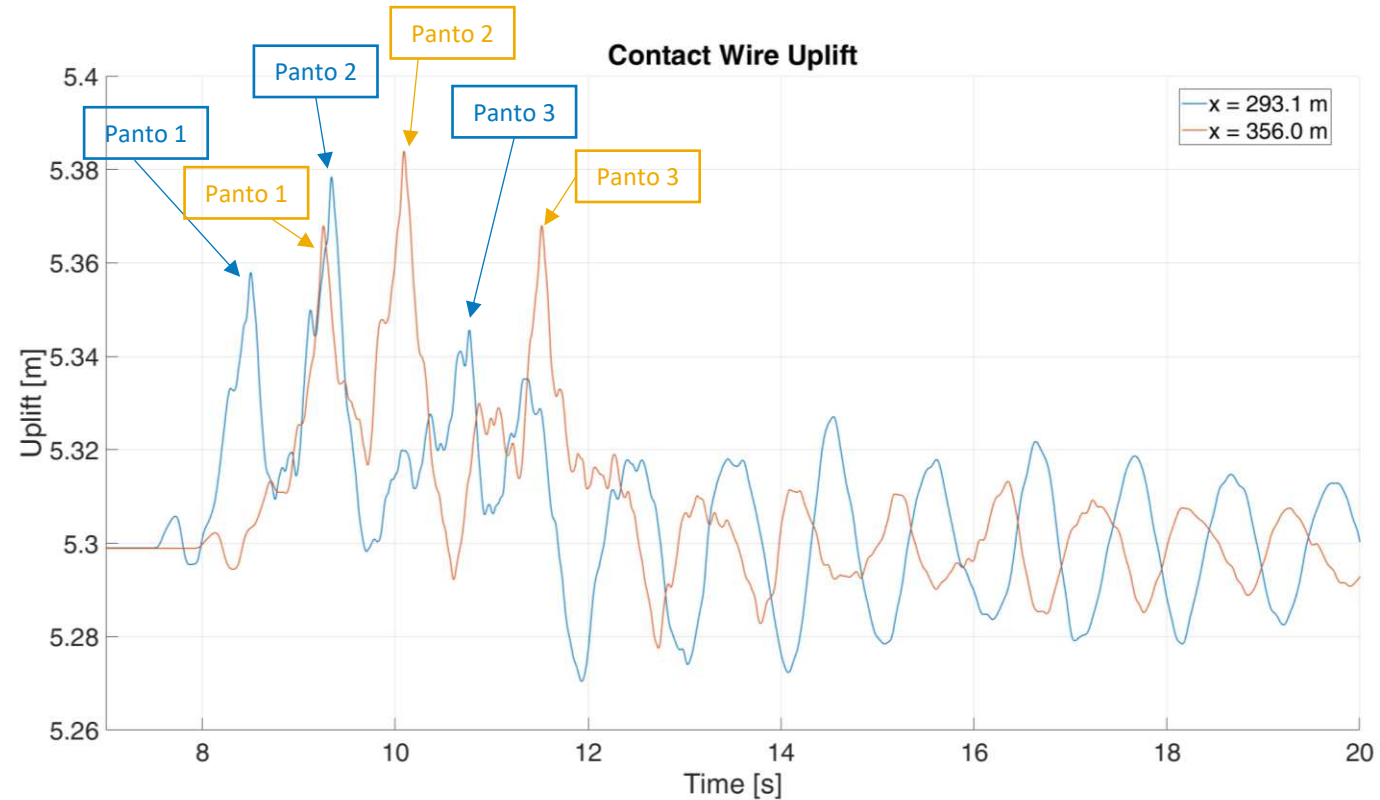
- › Der vorlaufende Stromabnehmer (Panto 1), zeigt ein deutlich ruhigeren Kontaktkraftverlauf.
- › Die nachlaufenden Stromabnehmer zeigen eine erhöhte Dynamik.



Simulation - Mehrfachtraktion

Fahrdrahtanhub

- › Fahrdrahtanhub durch Panto 1 aus der Ruhelage fällt geringer aus.
- › Fahrdrahtanhub durch Panto 2 höher, da Fahrdraht schon vorangeregt.



Messung nach EN 50317

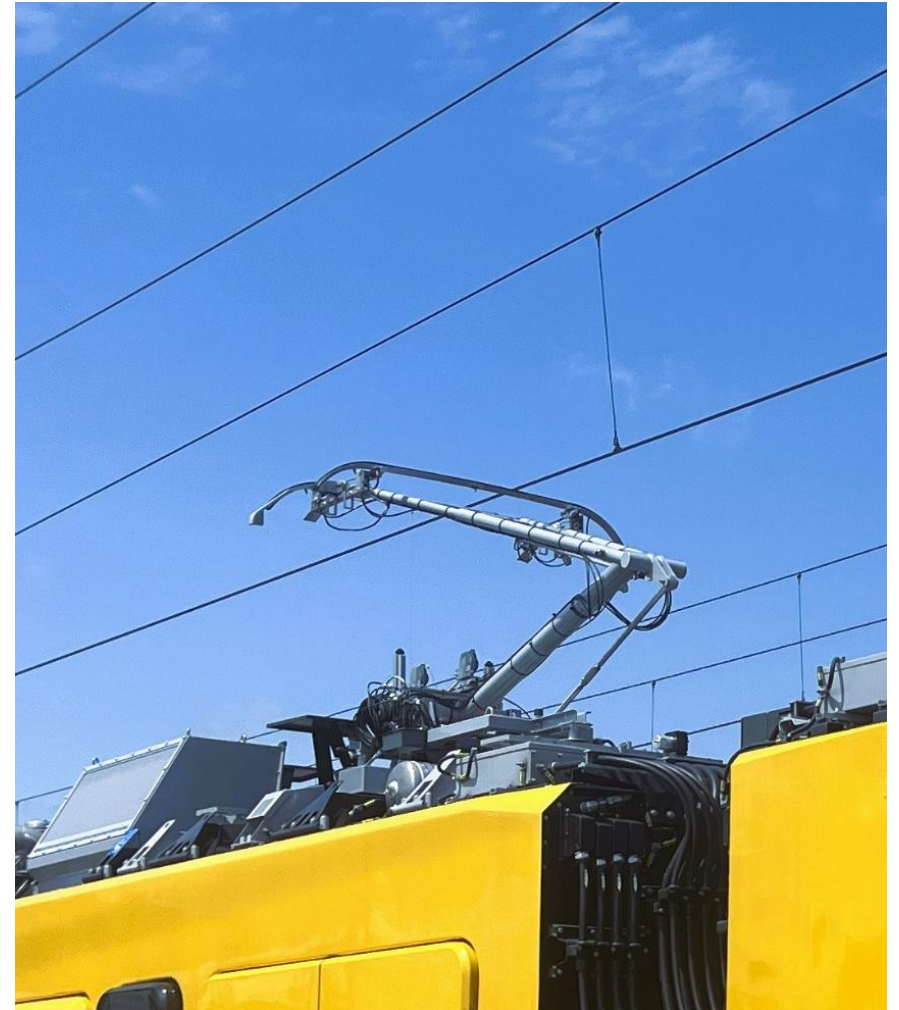
EN 50317: „Anforderungen und Validierung von Messungen des dynamischen Zusammenwirkens zwischen Stromabnehmer und Oberleitung“

Was muss gemessen werden?

- › Kontaktkraft und Anhub
 - › Mittlere Kontaktkraft
 - › Standardabweichung der Kontaktkraft
 - › Anhub am Stützpunkt beim Stromabnehmerdurchgang
 - › Vertikale Verschiebung des Kontaktpunktes

oder

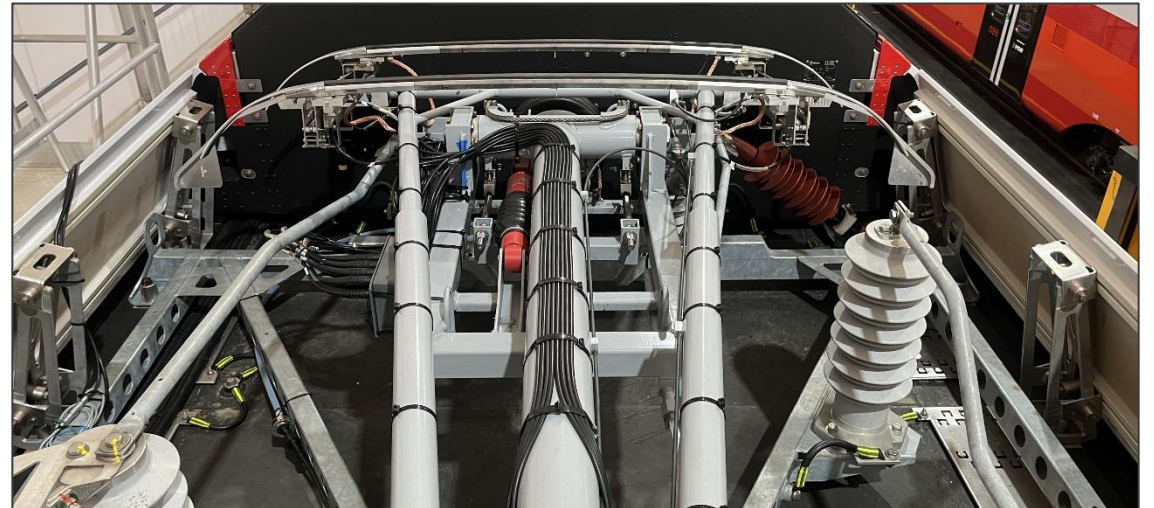
- › Lichtbogen und Anhub
 - › Prozentsatz der Lichtbögen
 - › Anhub am Stützpunkt beim Stromabnehmerdurchgang
 - › Vertikale Verschiebung des Kontaktpunktes



Messung der Kontaktkraft

Ablauf

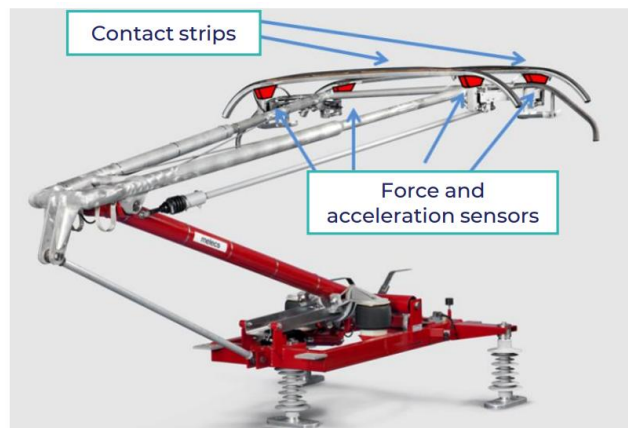
- › Umbau zum Messstromabnehmer
- › Kalibrierung am Prüfstand
- › Montage am Fahrzeug
- › Schnurmessung
- › Kontaktkraftmessung



Messung der Kontaktkraft

Ablauf

- › Umbau zum Messstromabnehmer
- › Kalibrierung am Prüfstand
- › Montage am Fahrzeug
- › Schnurmessung
- › Kontaktkraftmessung

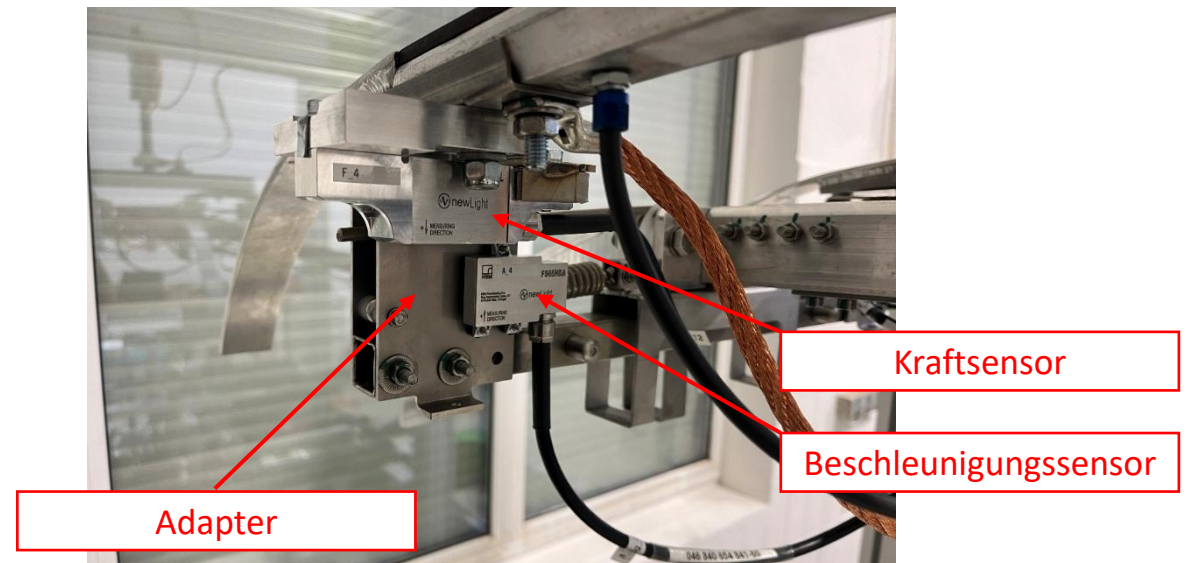


HBK - Sensoren

- › Optische Sensoren
- › Kann nicht durch elektromagnetische Störungen beeinflusst werden

PJM

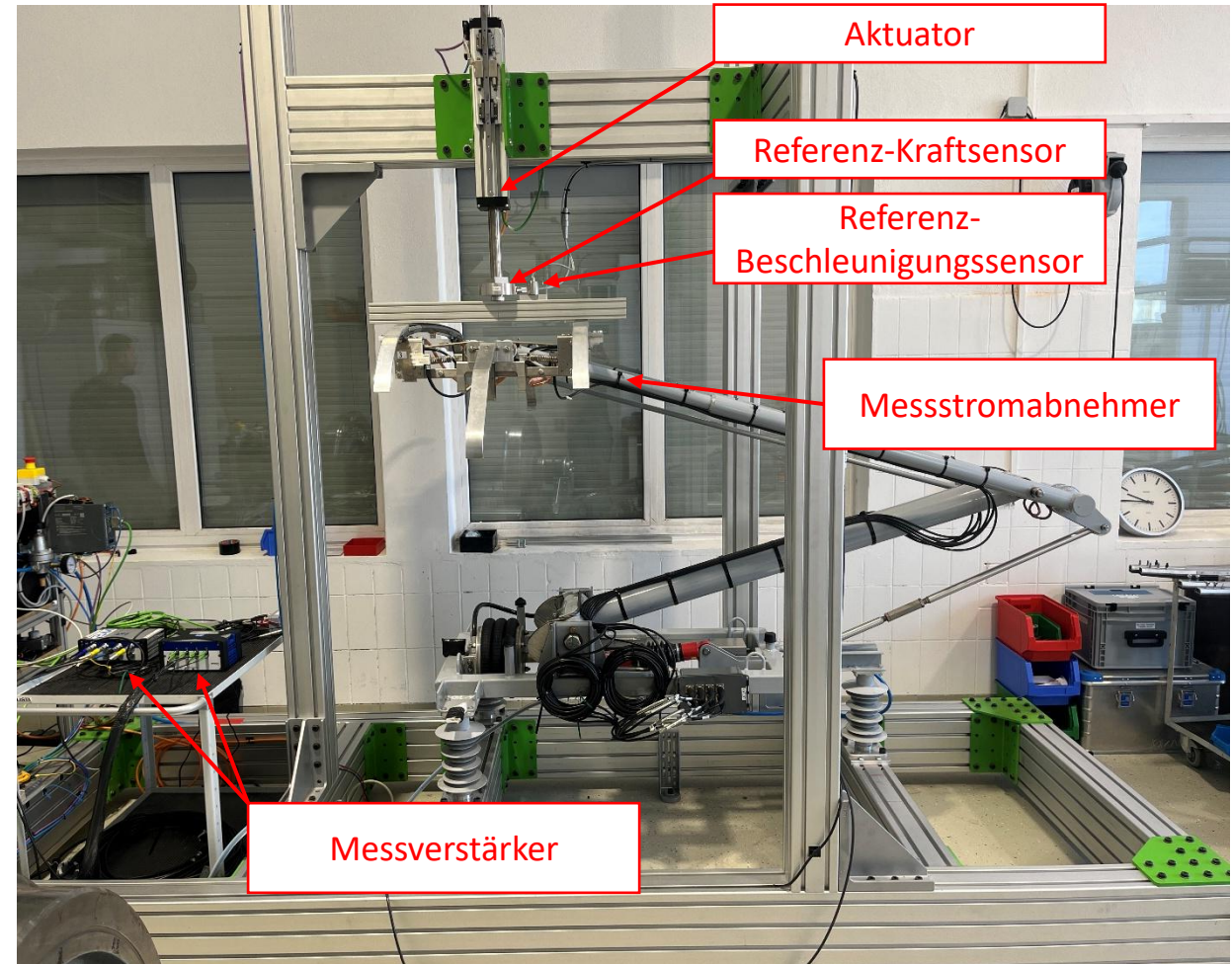
- › PJM konstruiert und fertigt Adapter.



Messung der Kontaktkraft

Ablauf

- › Umbau zum Messstromabnehmer
- › Kalibrierung am Prüfstand
- › Montage am Fahrzeug
- › Schnurmessung
- › Kontaktkraftmessung



Messung der Kontaktkraft

Ablauf

- › Umbau zum Messstromabnehmer
- › Kalibrierung am Prüfstand
- › Montage am Fahrzeug
- › Schnurmessung
- › Kontaktkraftmessung



Messung der Kontaktkraft

Ablauf

- › Umbau zum Messstromabnehmer
- › Kalibrierung am Prüfstand
- › Montage am Fahrzeug
- › Schnurmessung
- › Kontaktkraftmessung



Messung der Kontaktkraft

Ablauf

- › Umbau zum Messstromabnehmer
- › Kalibrierung am Prüfstand
- › Montage am Fahrzeug
- › Schnurmessung
- › Kontaktkraftmessung

Was muss installiert werden?

- › Zugdach:
 - › Messstromabnehmer:
 - › 4 x Kraftsensor
 - › 4 x Beschleunigungssensor
 - › Schnurkraft-Messvorrichtung:
 - › 2 x Kraftsensor
 - › 2 x Seilzug
 - › Kamera für visuelle Begutachtung während der Messung
 - › Seilzugpotentiometer zur Messung der Stromabnehmerhöhe
 - › GPS für Positionierung und Geschwindigkeit
 - › Temperatur- und Feuchtigkeitssensor
 - › Automatic dropping device (ADD) – Simulation eines Schleifleistenbruchs
- › Im Zug:
 - › Drucksensor (Stromabnehmer wird pneumatisch gesteuert)
 - › Verbindung zum Fahrzeugnetzwerk (CAN-Bus, EtherCAT) um Fahrzeugsignale abzugreifen
 - › Messverstärker

Messung der Kontaktkraft

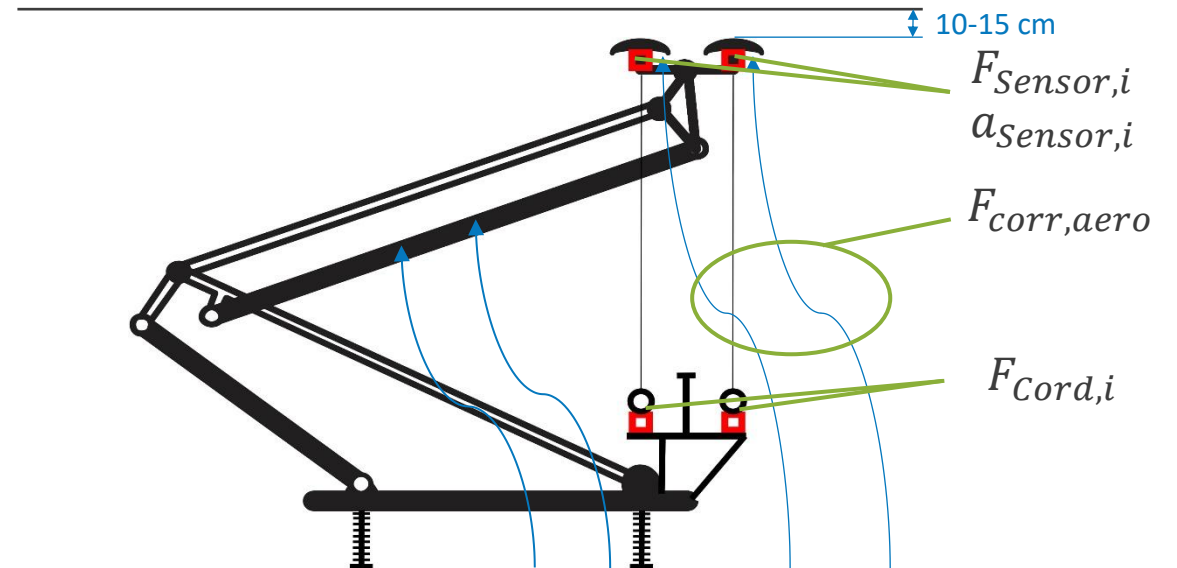
Ablauf

- › Umbau zum Messstromabnehmer
- › Kalibrierung am Prüfstand
- › Montage am Fahrzeug
- › Schnurmessung
- › Kontaktkraftmessung

$$F_{corr,aero} = \sum_{i=1}^{i=2} F_{Cord,i} - \sum_{i=1}^{k_f} F_{Sensor,i}$$

Wozu eine Schnurmessung durchführen?

- › Messung der mittleren Gesamtanpresskraft – EN 50317 Kap. 6
- › Messung der aerodyn. Korrekturfaktoren – EN 50317 Kap 7.4
- › Die aerodyn. Kräfte welche auf die Schleifleisten wirken, können von den Kraftsensoren nicht detektiert werden.
- › Mittels Schnüren wird der Stromabnehmer 10-15 cm unterhalb der Fahrleitung abgespannt.



Messung der Kontaktkraft

Ablauf

- › Umbau zum Messstromabnehmer
- › Kalibrierung am Prüfstand
- › Montage am Fahrzeug
- › Schnurmessung
- › **Kontaktkraftmessung**

$$F_c = \sum_{i=1}^{k_f} F_{Sensor,i} + \frac{m_{above}}{k_a} \cdot \sum_{i=1}^{k_a} a_{Sensor,i} + F_{corr,aero}$$

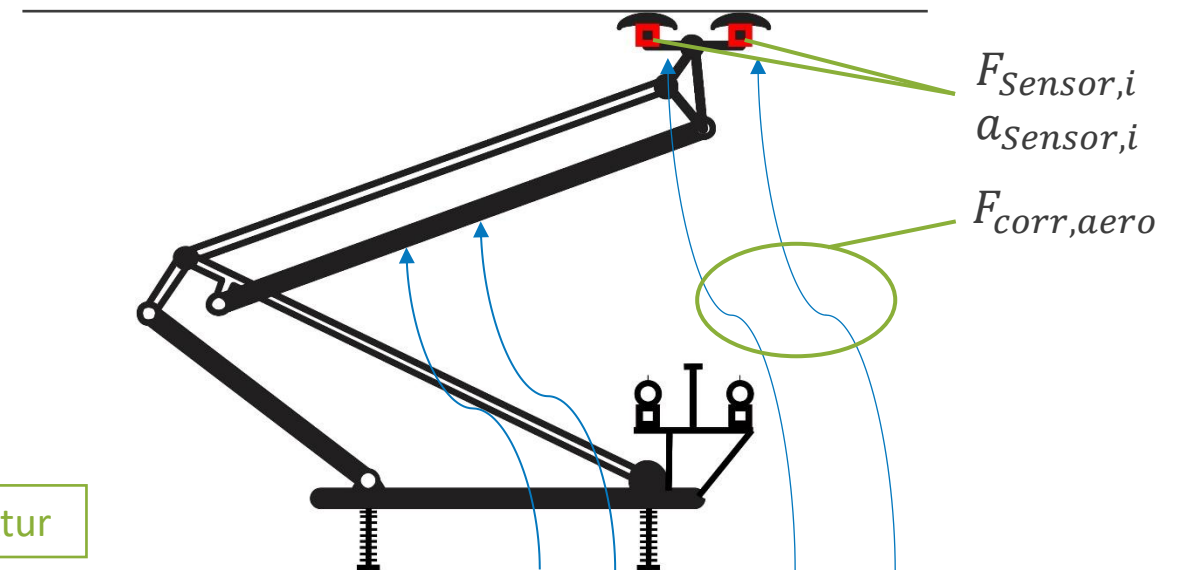
Kraftsensoren

Massenträgheiten

Aerodyn. Korrektur

Messung der Kontaktkraft – EN 50317 Kap. 7

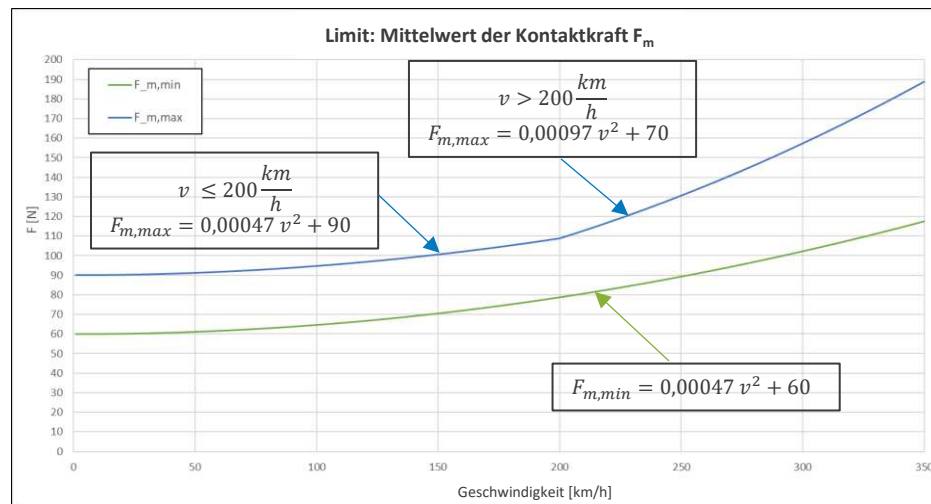
- › Die Kontaktkraft setzt sich aus folgenden Termen zusammen:
 - › Kräfte über Kraftsensoren F_{Sensor}
 - › Korrektur der Massenträgheiten
 - › Aerodyn. Korrektur (von der Schnurmessung)



Messung der Kontaktkraft

Ablauf

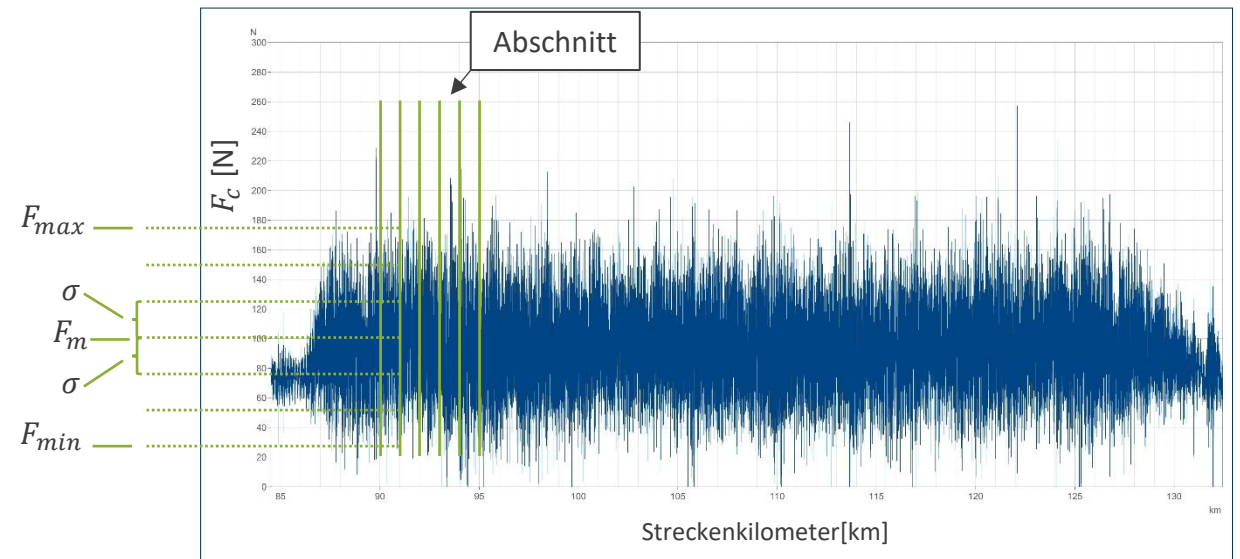
- › Umbau zum Messstromabnehmer
- › Kalibrierung am Prüfstand
- › Montage am Fahrzeug
- › Schnurmessung
- › **Kontaktkraftmessung**



24

Messung der Kontaktkraft nach EN 50317

- › Von der berechneten Kontaktkraft F_c werden folgende Werte abgeleitet:
- › F_m : Mittlere Kontaktkraft innerhalb eines Abschnittes (z.B. 1000 m)
- › σ : Standardabweichung innerhalb eines Abschnittes
- › F_{min} : $F_m - 3 * \sigma$, Statistisches Minimum innerhalb eines Abschnittes
- › F_{max} : $F_m + 3 * \sigma$, Statistisches Maximum innerhalb eines Abschnittes



Messung der Kontaktkraft

Ablauf

- › Umbau zum Messstromabnehmer
- › Kalibrierung am Prüfstand
- › Montage am Fahrzeug
- › Schnurmessung
- › **Kontaktkraftmessung**

Messung der Kontaktkraft nach EN 50317

- › Mit der Kamera kann zeitsynchron zur Messung ein Video der Laufgüte des Stromabnehmers aufgenommen werden



Reference - Stadler KISS 160



Messung nach EN 50317

EN 50317: „Anforderungen und Validierung von Messungen des dynamischen Zusammenwirkens zwischen Stromabnehmer und Oberleitung“

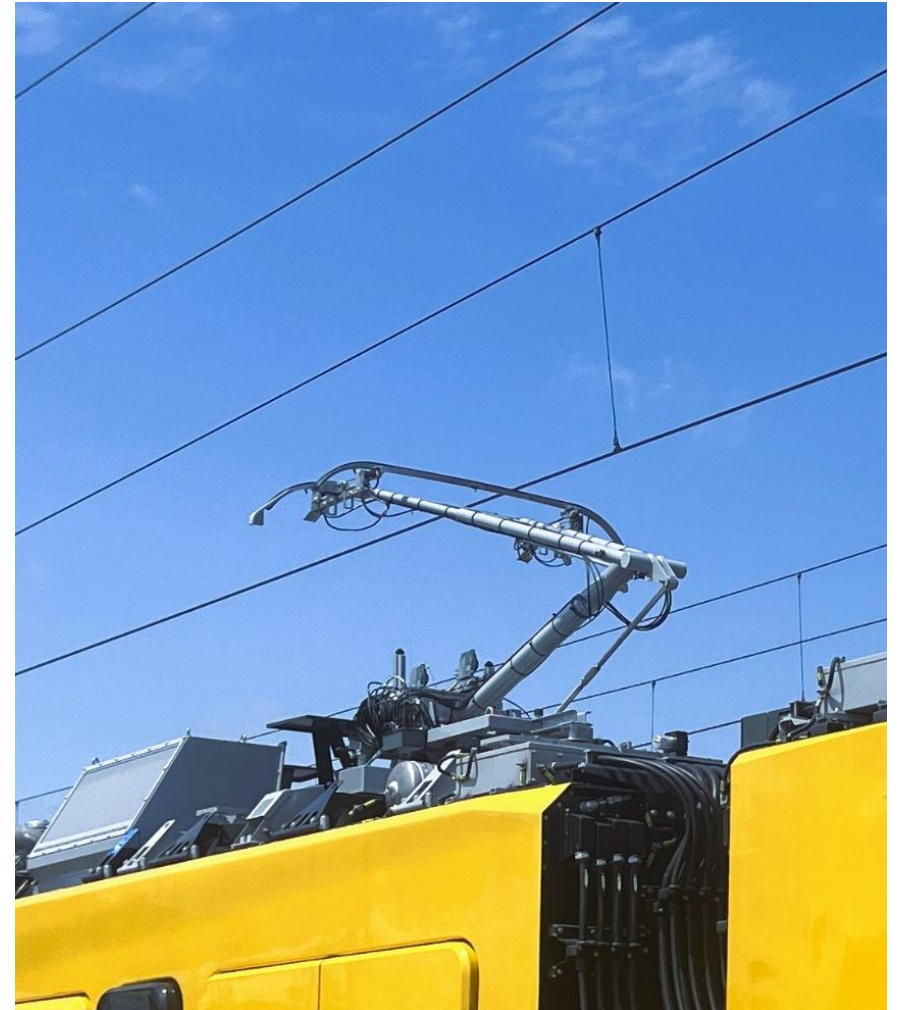
Was muss gemessen werden?

- › Kontaktkraft und **Anhub**
 - › Mittlere Kontaktkraft
 - › Standardabweichung der Kontaktkraft
 - › Anhub am Stützpunkt beim Stromabnehmerdurchgang
 - › Vertikale Verschiebung

oder

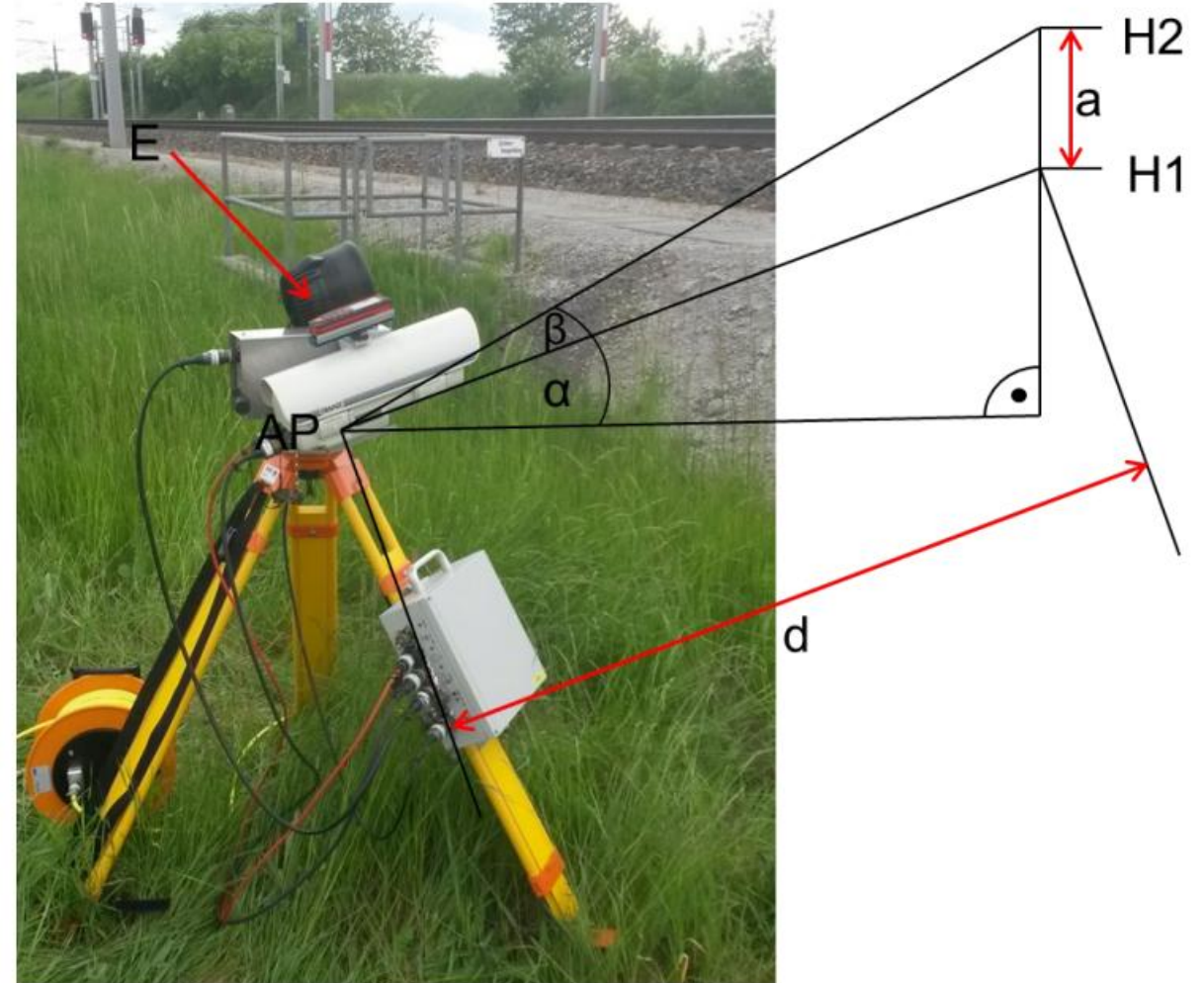
- › Lichtbogen und Anhub
 - › Prozentsatz der Lichtbögen
 - › Anhub am Stützpunkt beim Stromabnehmerdurchgang
 - › Vertikale Verschiebung des Kontaktpunktes

Kontaktkraft ✓



Messung des Fahrdrachthubes

- › Mobiles System welches mittels Kamera und Bilderkennungssoftware funktioniert.
- › Messgenauigkeit von kleiner 5 mm (EN 50317 – 8.3).
- › Max. Anhub am Stützpunkt in Österreich = 120 mm (EN 50367 – Tab B.5)



Beispiel – Mehrfachtraktion – ÖBB Railjet Doppelstock





www.pjm.co.at

Kontakt

Messungen nach EN 50317



Peter Ablasser, MSc

Measurement Engineering &
Data Analysis

Mobil: +43 676 833 19 114

ablasser@pjm.co.at



Stefan Schreck, MSc

Measurement Engineering &
Data Analysis

Mobil: +43 676 833 19 816

schreck@pjm.co.at

Simulationen nach EN 50318



Matthias Zelinka, BSc

Simulation Engineering

Mobil: +43 676 833 19 193

zelinka@pjm.co.at