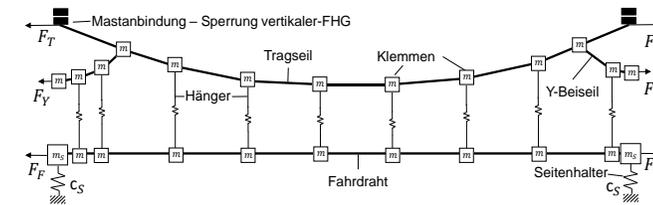




Untersuchungen zum Schwingungsverhalten der Oberleitung bei mehreren Stromabnehmern im Regionalverkehr



Dipl.-Ing. Enrico Brandes, IfB Institut für Bahntechnik GmbH

Prof. Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt, Professur Dynamik und Mechanismentechnik, TU Dresden



Dipl.-Ing. Enrico Brandes

IFB Institut für Bahntechnik GmbH

Tel. +49 351 877 59 61

Wiener Str. 114-116, 01219 Dresden

enrico.brandes@bahntechnik.de

Prof. Dr. Michael Beitelschmidt

TU Dresden

Professur Dynamik und Mechanismentechnik

+49 351 463 37970

Marschnerstraße 30, 01307 Dresden

michael.beitelschmidt@tu-dresden.de

Deutsches Zentrum für
Schienenverkehrsforschung beim



Dieser Vortrag entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „Schwingungsverhalten der Oberleitung bei mehreren Stromabnehmern“ und wurde durch das Deutsche Zentrum für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt (DZSF) unter der Projektnummer 2020-32-W-1202 gefördert.

Einleitung und Motivation

Ergebnisse Vorstudie und Ausschwingversuch eines Kettenwerkes

Modellentwicklung: Theorie und Implementierung

Modellverifizierung nach EN 50318

Projektausblick

Ausgangslage

- bestehende Oberleitungen sind für Ein-Stromabnehmer-Betrieb entwickelt
- Steigende gegenseitige Beeinflussung durch mehrere Stromabnehmer

Herausforderung

- Sicherung der Stromabnahmequalität bei Einsatz multipler Triebzugkonfigurationen
- Qualität der Stromabnahme ist im Rahmen der Zulassung nachzuweisen

Projektziel

- Entwicklung eines vereinfachten Modells
- Nutzung für Zulassungsprozess bis 200 km/h
- Designhilfen bei multiplen Zugkombinationen

Artikel 8

Spezifische Ziele für die TSI ENE

Die Verordnung (EU) Nr. 1301/2014 (TSI ENE) ist in Bezug auf die technischen Anforderungen für den gleichzeitigen Betrieb mehrerer mit den Bestandteilen der Oberleitung in Kontakt stehenden Stromabnehmer zu überarbeiten, der sich aus dem Einsatz von gekoppelten Lokomotiven und Triebzügen ergibt. Ferner sind gegebenenfalls damit zusammenhängende betriebliche Aspekte aufzunehmen.

DELEGIERTER BESCHLUSS (EU) 2017/1474 DER KOMMISSION vom 8. Juni 2017

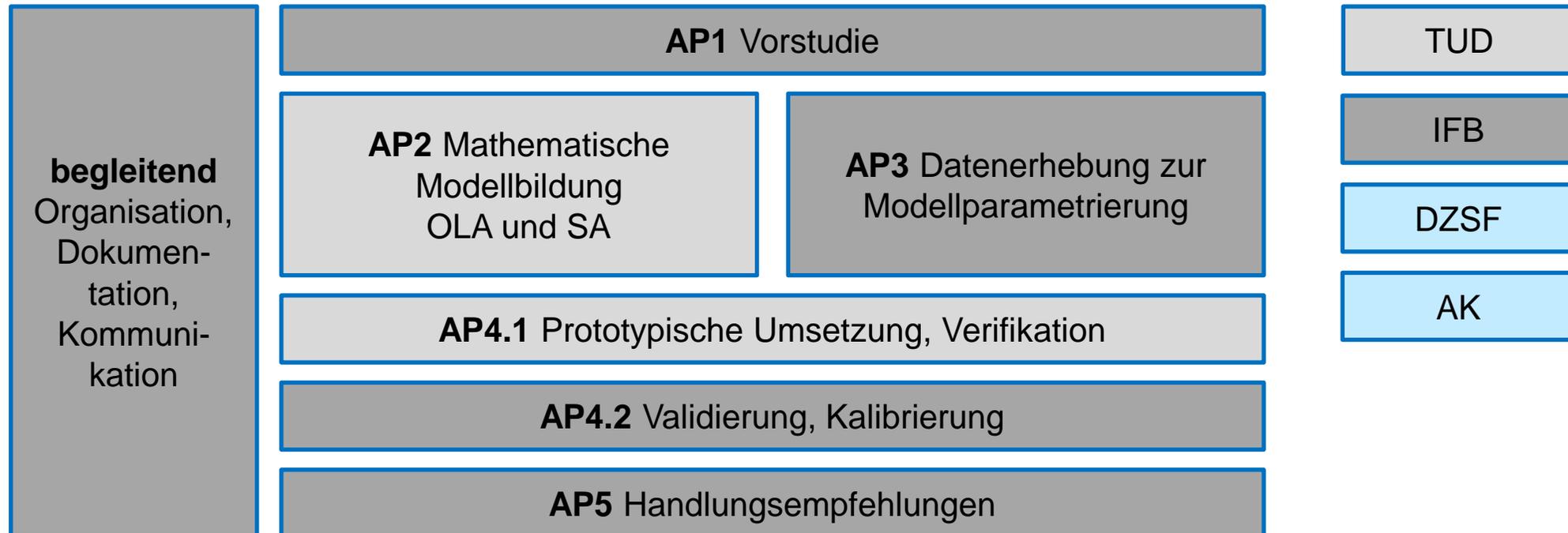
Tabelle 4.2.13

Stromabnehmerabstand für die Auslegung der Oberleitung

Bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit [km/h]	AC — Mindestabstand [m]			3 kV DC — Mindestabstand [m]			1,5 kV DC — Mindestabstand [m]		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Typ									
$v \geq 250$	200			200			200	200	35
$160 < v < 250$	200	85	35	200	115	35	200	85	35
$120 < v \leq 160$	85	85	35	20	20	20	85	35	20
$80 < v \leq 120$	20	15	15	20	15	15	35	20	15
$v \leq 80$	8	8	8	8	8	8	20	8	8

VERORDNUNG (EU) Nr. 1301/2014 DER KOMMISSION vom 18. November 2014

Dynamik der Oberleitung bei Mehrfachstromabnehmerbetrieb (DYNOLA)



OLA – Oberleitungsanlage, SA – Stromabnehmer, IFB – Institut für Bahntechnik, TUD – Technische Universität Dresden, DZSF – Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung, AK – forschungsbegleitender Arbeitskreis



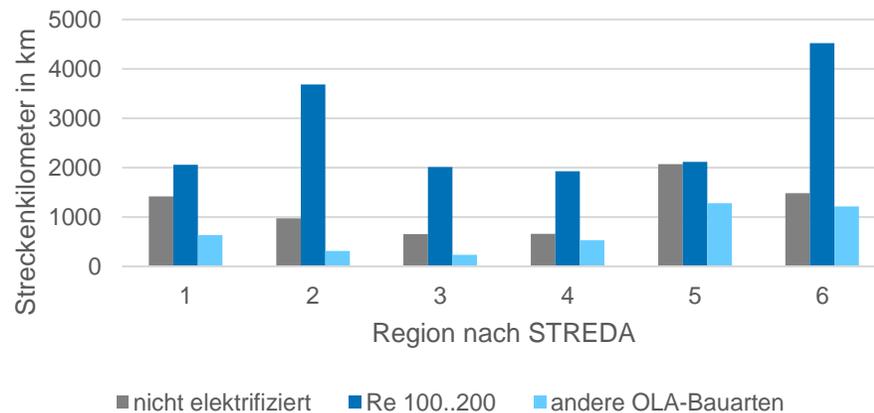
Vorstudie: Streckenanalyse und Anwendungspotential für Mehrfachtraktion in Deutschland

Fragestellung

- Wo befinden sich Bahnstrecken mit den Oberleitungsbauarten Re 100 bis Re 200?

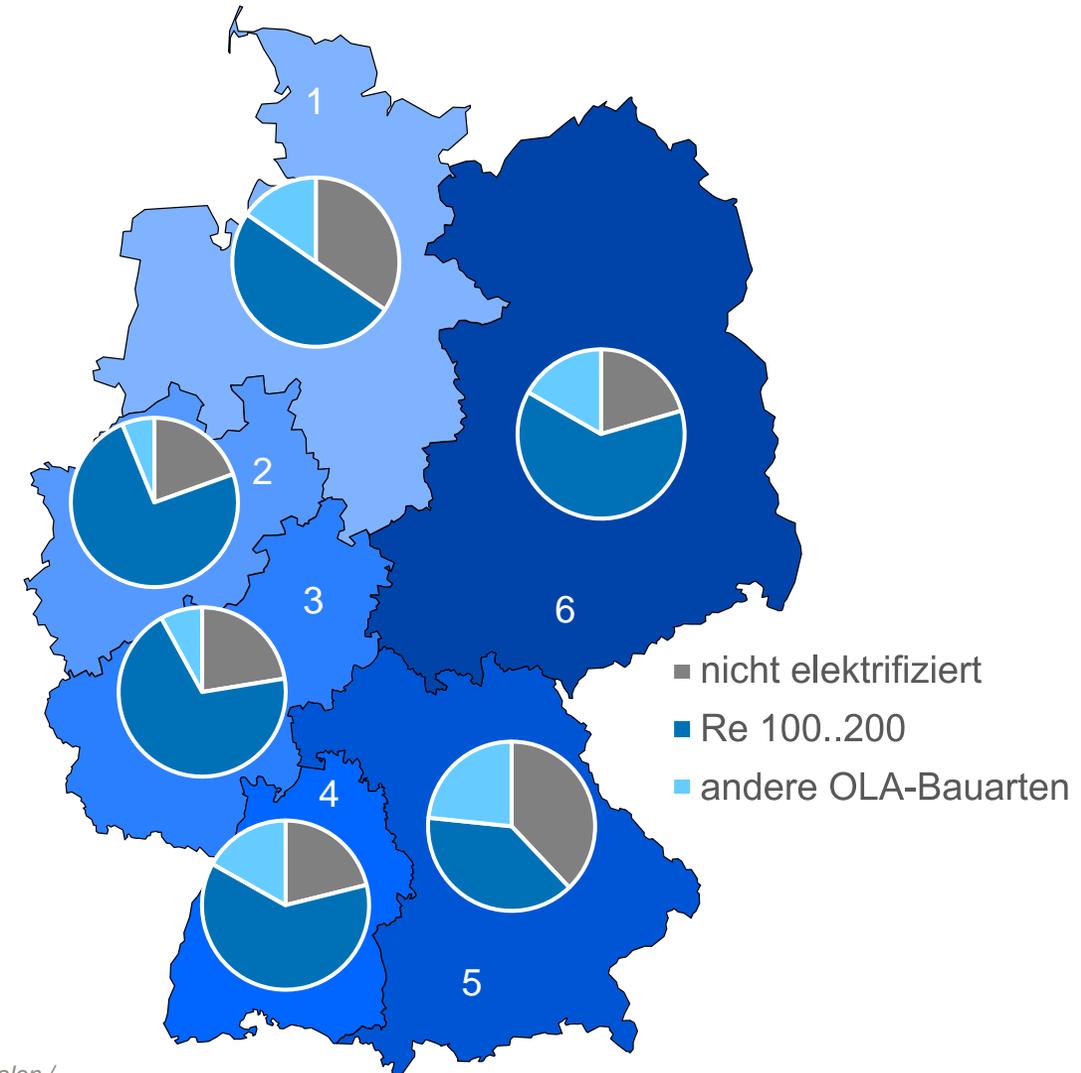
Vorgehen

- Auswertung Datensätze der DB Netz
- Datensatz gefiltert (Geschwindigkeit), bereinigt (Duplikate, Ertüchtigung) und plausibilisiert (weiterer Datensatz)
- Darstellung Streckenkilometer je Gruppe



Einteilung nach STREDA: 1 = Schleswig-Holstein, Niedersachsen, Hamburg und Bremen / 2 = Nordrhein-Westfalen /

3 = Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland 4 = Baden-Württemberg / 5 = Bayern / 6 = Brandenburg, Berlin, Sachsen, Thüringen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt



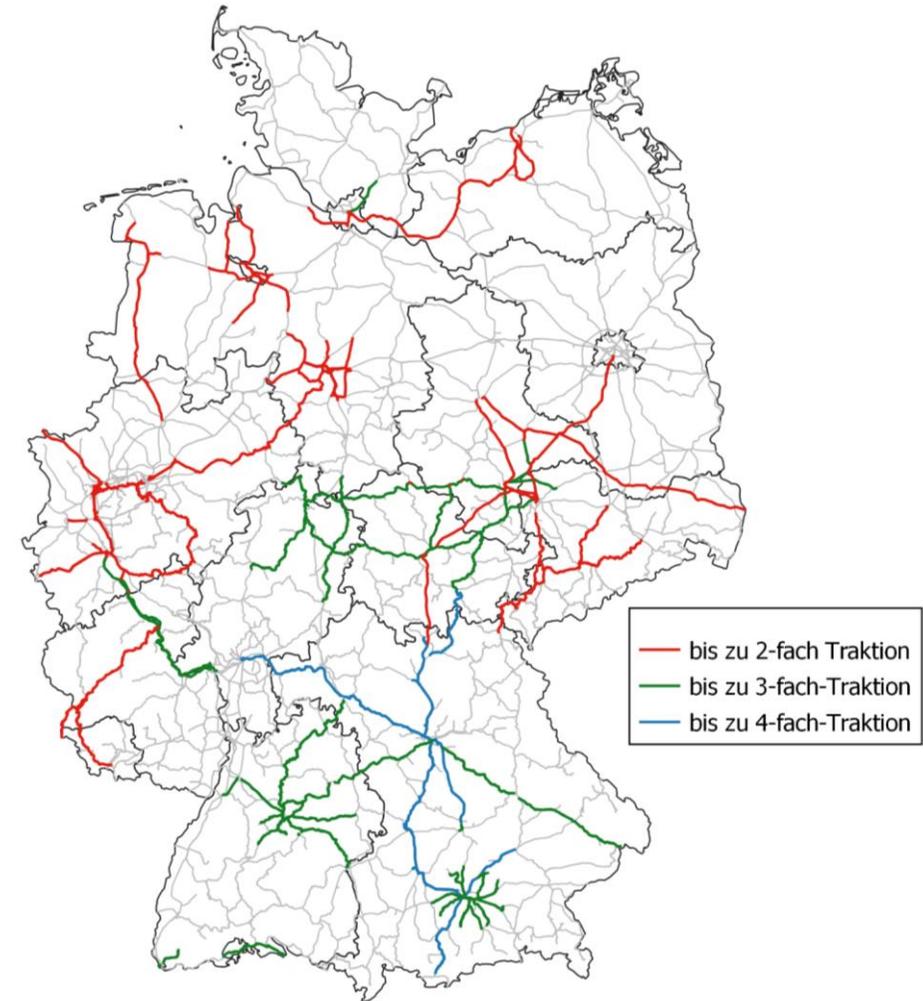
Befragung von 46 EVU und 28 AT; insgesamt Beteiligung an Umfrage von 47 % (Rückläuferquote)

Auszug aus Antworten: Streckenanzahl mit elektrischer Betriebsführung

- 72 % bereits mit elektrischem Oberleitungsbetrieb
- 14 % Planungen für Aus- und Umbau auf elektrischen Oberleitungsbetrieb

Von den angegebenen Strecken mit elektrischem Betrieb werden bedient

- 36 % der Strecken mit „bis zu Doppeltraktion“,
- 15 % der Strecken mit „bis zu Dreifachtraktion“ und
- 5 % der Strecken mit „bis zu Vierfachtraktion“
- Eine Rückmeldung wünscht sich eine Erweiterung auf 6-fach-Traktion.
- ca. die Hälfte der Strecken mit Mehrfachtraktion





Messtechnische Untersuchung

Ausschwingversuch an einer Regeloberleitung Re200 in Lohsa

Durchführung

- Schwingungsmessungen nach Auslenkung an spannungsfreier Re200 Oberleitung vom 13./14.09.21
- Betriebliche Streckensperrung im Rahmen von parallelen Erdungsmessungen des IFB
- Akkreditiertes optisches Prüfverfahren Anhubmessung des Fahrdrabtes (www.anhubmessung.de/)
- Kalibrierte ICP-Beschleunigungssensoren

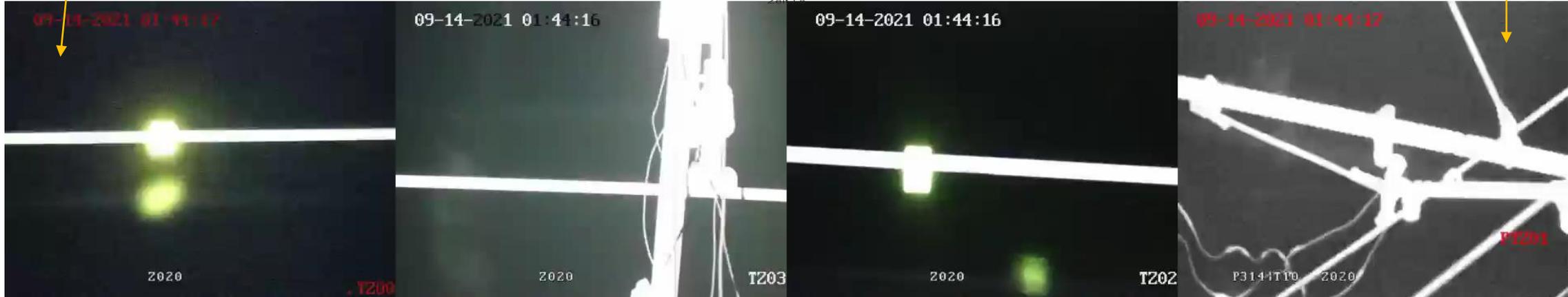
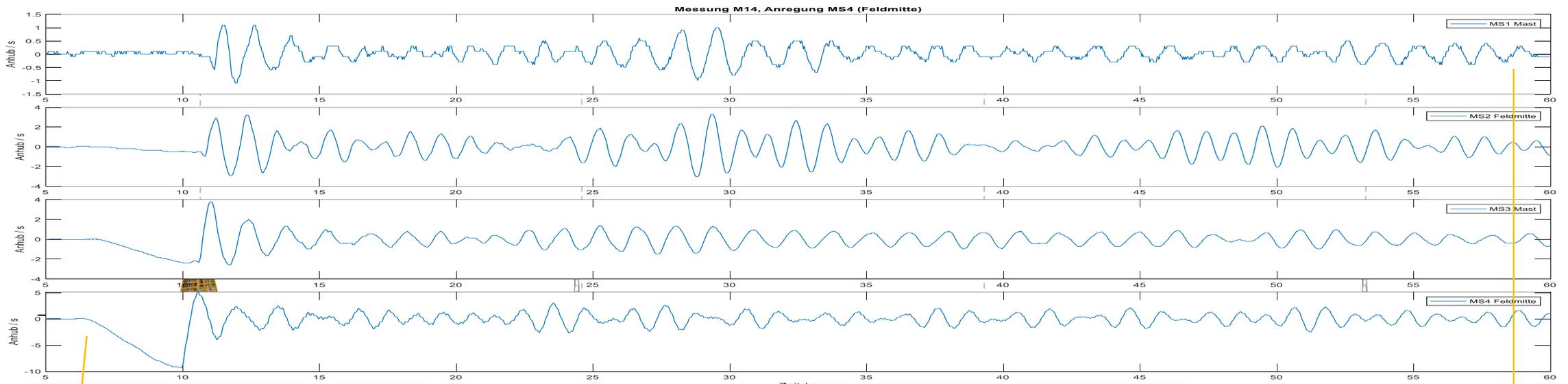
Ziele:

- Erkenntnisse zum prinzipiellen Schwingungsverhalten
- Gewinnung von Messdaten zur Modellvalidierung und Parametrierung (z.B. Dämpfung)

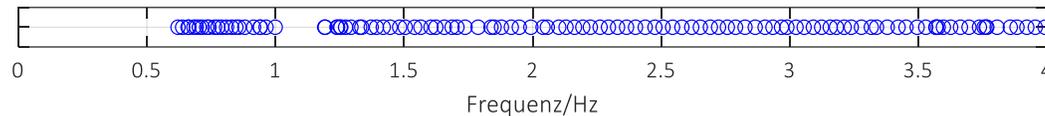


Fotos: Brandes, Beitelschmidt, Hietzge, Noack

Beispielhafte Messung M14

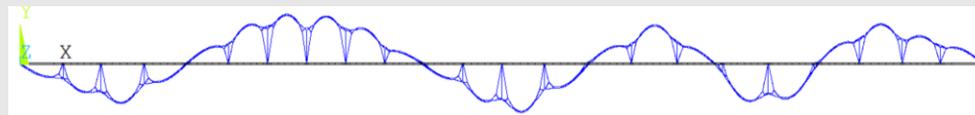


FE-Modell

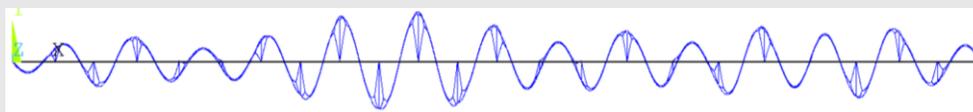


Ergebnis

- Es treten keine Eigenfrequenzen unterhalb von 0,62 Hz auf
- In einem Frequenzband zwischen 1,00 und 1,19 Hz treten ebenfalls keine Eigenfrequenzen auf

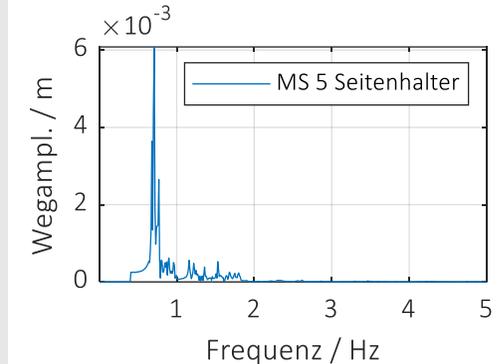
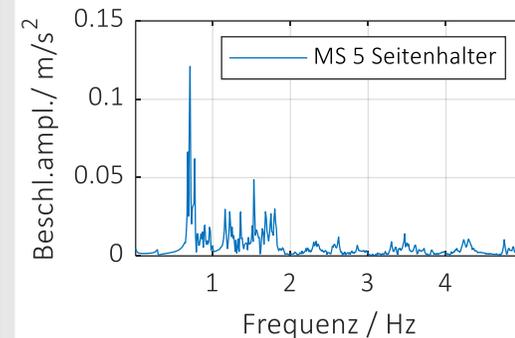


Eigenform der 6ten Eigenfrequenz (0,69 Hz)



Eigenform der 30ten Eigenfrequenz (1,39 Hz)

Messung

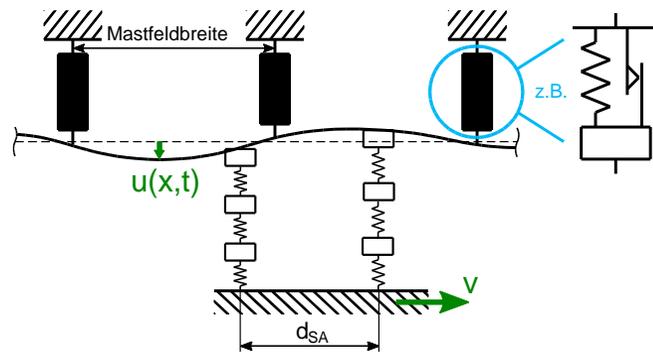


Ergebnis

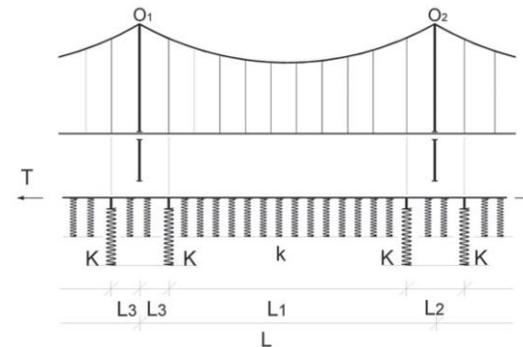
- Klares Maximum bei 0,705 Hz - Eigenform mit lokalem Maximum wird angeregt
- Schwingungen mit einer Frequenz kleiner als 0,63 Hz, zwischen 1 Hz und 1,16 Hz und größer als 2 Hz sind kaum im Beschleunigungssignal vorhanden

Was bedeuten die Erkenntnisse aus dem Ausschwingversuch und den Untersuchungen am FE-Modell für das zu entwickelnde einfache, recheneffiziente Ersatzmodell?

- für die Beschreibung des Schwingungsverhaltens der Oberleitung spielen insbesondere niederfrequente Eigenmoden eine große Rolle
- Bei einem modalen Lösungsansatz (globaler Ritz-Ansatz) kann sich daher zur Beschreibung des grundlegenden Schwingungsverhaltens der Oberleitung auf die unteren Eigenmoden beschränkt werden → hohe Recheneffizienz
- Die Ersatzparameter des recheneffizienten Ersatzmodells können anhand des mittels Ausschwingversuch validierten FE-Modells bestimmt werden



Erweiterung



Antonio Cazzani, Marco Cattani, Raffaele Mauro & Flavio Stochino (2017) A simplified model for railway catenary wire dynamics, European Journal of Environmental and Civil Engineering, 21:7-8, 936-959, DOI: 10.1080/19648189.2016.1245631



Modellentwicklung

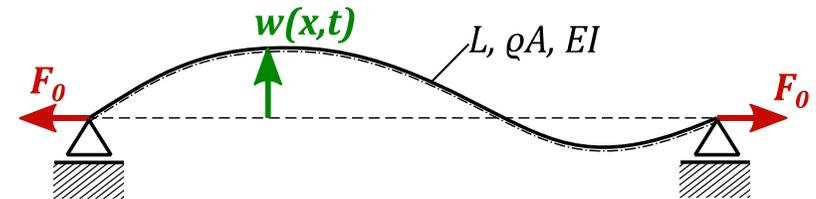
zunächst Theorie...

„So einfach wie möglich, so kompliziert wie nötig“

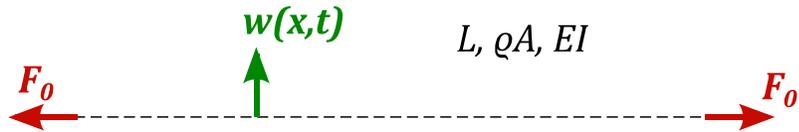
- Ziel des Projekts: Umfangreiche Parameterstudien → kurze Rechenzeiten erforderlich
- Einfache Saitenmodelle sind nicht genau genug
- FEM Modelle neigen zu extremen Rechenzeiten

Unser Ansatz:

- Erweitertes Saitenmodell mit Anbauteilen
- „globale Ansatzfunktionen“, Ritz-Ansatz
- vergleichsweise einfache Gleichungen → Implementation Matlab
- Absicherung mit Rechnungen von Norm-Oberleitungen
- Absicherung mit Ausschwingversuch an einer RE 200



- Darstellung der Modellelemente der Oberleitung über Saitenansatz:



$$\rho A \ddot{w}(x, t) = F_0 w''(x, t)$$

- Lösung über Ritz-Ansatz

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^n u_i(x) \cdot p_i(t) = \bar{u}(x)^T \cdot \bar{p}(t)$$

Zeitlösungen

$$\bar{p}(t) = \begin{pmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \\ \dots \\ p_n(t) \end{pmatrix}$$

Ortslösungen

$$\bar{u}(x) = \begin{pmatrix} u_1(x) \\ u_2(x) \\ \dots \\ u_n(x) \end{pmatrix}$$

- Ansatzfunktionen: globale sinusförmige Ansatzfunktionen über der Länge L

$$\bar{u}(x) = \begin{pmatrix} \sin\left(\pi \frac{x}{L}\right) \\ \sin\left(2\pi \frac{x}{L}\right) \\ \dots \\ \sin\left(n\pi \frac{x}{L}\right) \end{pmatrix}$$

Zeitlösungen zu bestimmen aus:

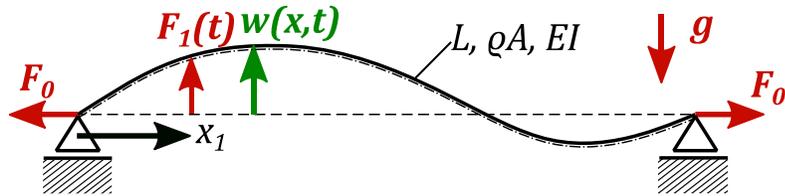
$$\mathbf{M} \ddot{\bar{p}}(t) + \mathbf{D} \dot{\bar{p}}(t) + \mathbf{C} \bar{p}(t) = 0$$

← Massenmatrix

↓ Dämpfungsmatrix

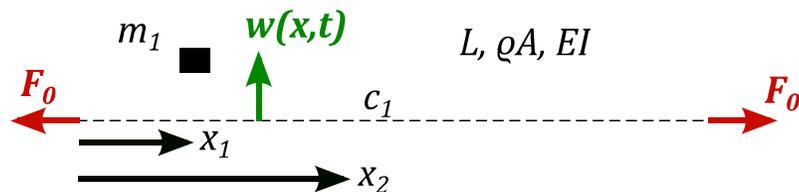
↘ Steifigkeitsmatrix

- Äußere Lasten wie bspw. Stromabnehmerkontaktkraft oder Schwerkraft können über die rechte Seite der Schwingungsdifferentialgleichung berücksichtigt werden



$$\mathbf{M}\bar{\ddot{p}}(t) + \mathbf{D}\bar{\dot{p}}(t) + \mathbf{C}\bar{p}(t) = \bar{\mathbf{F}}(t, x)$$

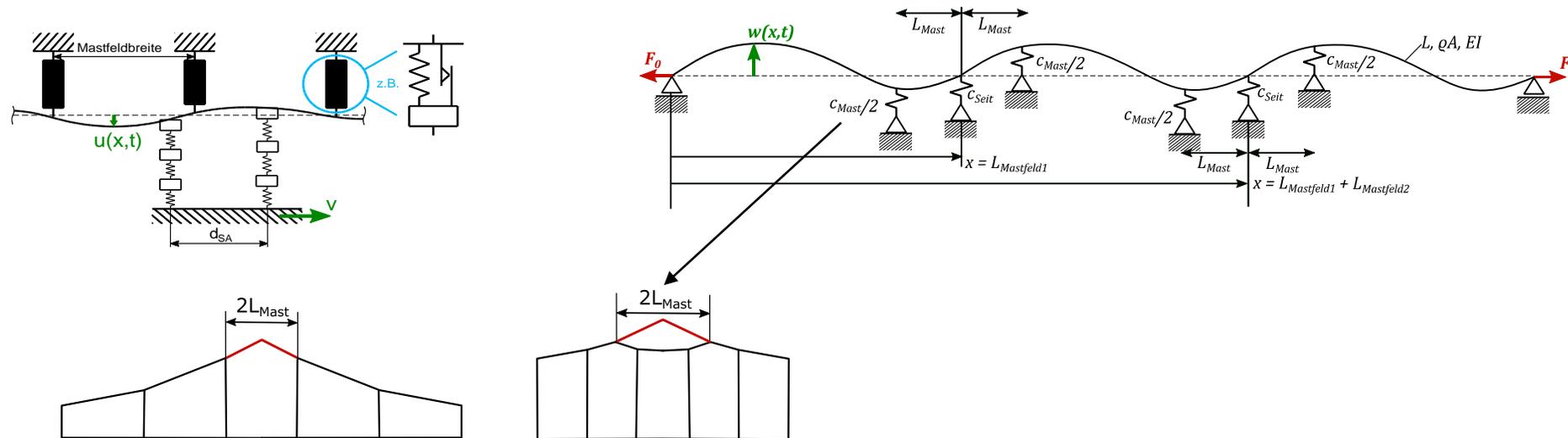
- Auch zeitlich veränderliche Hängerkräfte können so einfach in die Schwingungsdifferentialgleichung integriert werden
- Dabei können auch Bedingungen für das Auftreten von Hängerausknicken einfach eingeführt werden, ohne dass Massen- und Steifigkeitsmatrix in jedem Zeitschritt neu berechnet werden müssen!
- Zusätzliche diskrete Massen und Steifigkeiten werden in die Matrizen auf der linken Seite integriert



Dämpfungsmatrix anschließend über Rayleigh-Dämpfung:

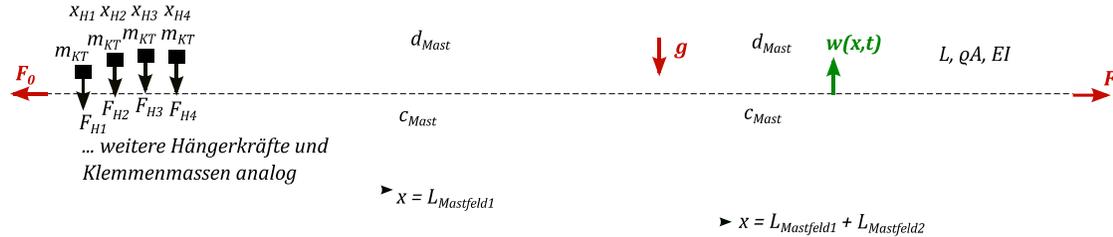
$$\mathbf{D} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{C}$$

- Ursprünglicher Plan: „Ein-Saiten-Modell“ (Kombination aus Fahrdrabt und Tragseil):



- Modell zeigte keine zufriedenstellenden Ergebnisse (Kontaktkräfte und Anhubwerte außerhalb der Grenzen der EN50318)
- Da die Rechenzeiten sehr gering waren und der Modellierungsansatz über Saiten-DGL und globalen Ritzansatz ein „Zwei-Saiten-Modell“ recht einfach zulassen, wurde dieser Ansatz weiterverfolgt

- Mechanisches Ersatzschaubild Tragseil:



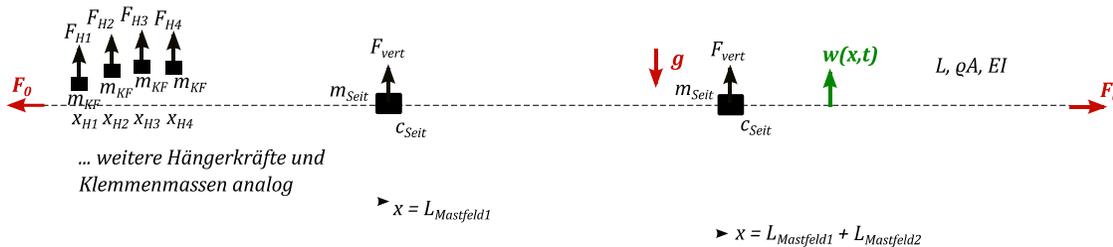
$$M_T \bar{p}''(t) + D_T \bar{p}'(t) + C_T \bar{p}(t) = \bar{F}_T(t)$$



Kopplung über Hänger



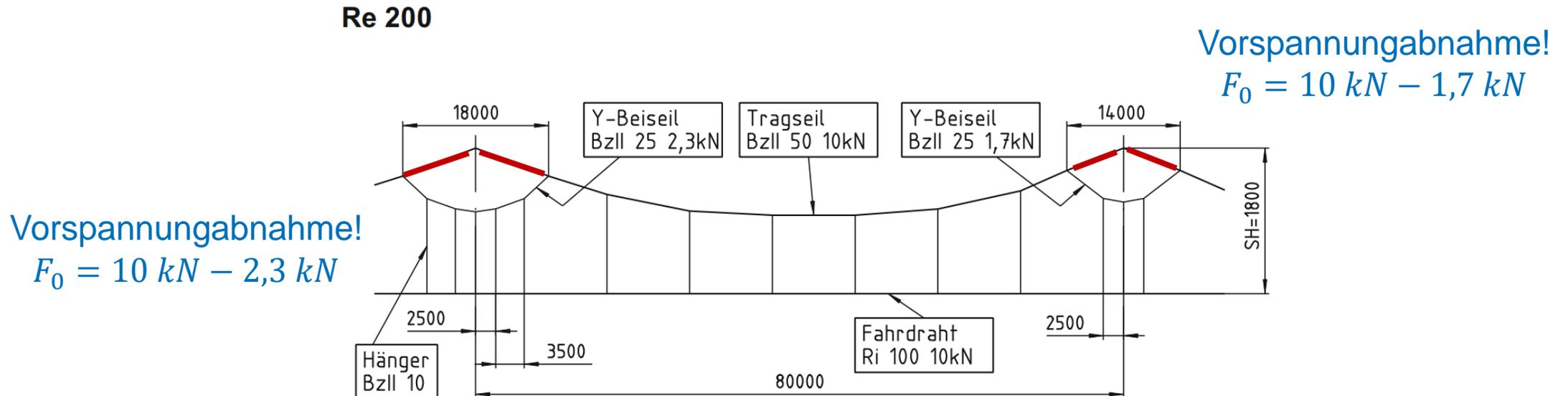
- Mechanisches Ersatzschaubild Fahrdrabt:



$$M_{FD} \bar{p}''(t) + D_{FD} \bar{p}'(t) + C_{FD} \bar{p}(t) = \bar{F}_{FD}(t)$$

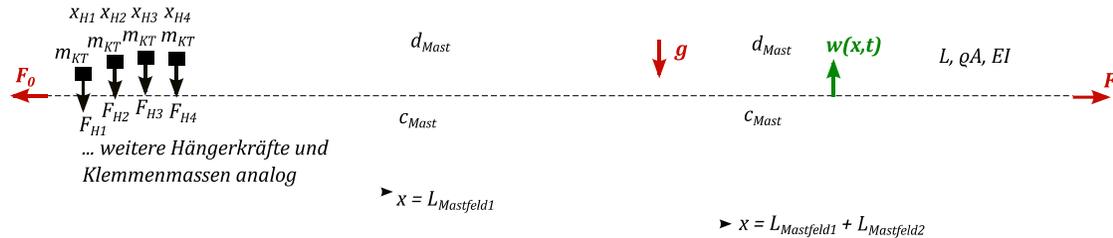
- Hängerkräfte sind Teil der äußeren Kräfte $\bar{F}_T(t)$ und $\bar{F}_{FD}(t)$ und ergeben sich aus der Relativverlagerung von Tragseil und Fahrdrabt an den Hängerpositionen und der Hängersteifigkeit

- Bei der Y-Beiseil Anordnung variiert die Vorspannung im Tragseil



- Saitengleichung $\rho A \ddot{w}(x, t) = F_0(x) w''(x, t)$ jetzt mit ortsabhängigem $F_0(x)$

- Mechanisches Ersatzschaubild Tragseil:

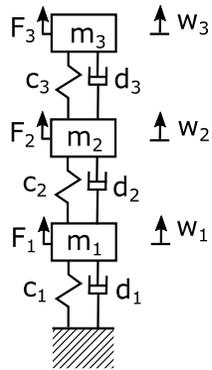


- Massenmatrix wie bei Fahrdraht
- Integral des Ritz-Ansatzes für die Steifigkeitsmatrix mit ortsvariabler Kraft

$$U = \frac{1}{2} \cdot \bar{p}(t)^T \underbrace{\int_0^L F_0(x) \bar{u}'(x) \cdot \bar{u}'(x)^T dx}_{\mathbf{C} \dots \text{Steifigkeitsmatrix}} \cdot \bar{p}(t)$$

- Das Integral könnte abschnittsweise gelöst werden ($F_0(x)$ ist abschnittsweise konstant)
- Numerische Lösung verwendet
- Steifigkeitsmatrix ist voll besetzt $\rightarrow \mathbf{M}_T \bar{p}''(t) + \mathbf{D}_T \bar{p}'(t) + \mathbf{C}_T \bar{p}(t) = \bar{F}_T(t)$

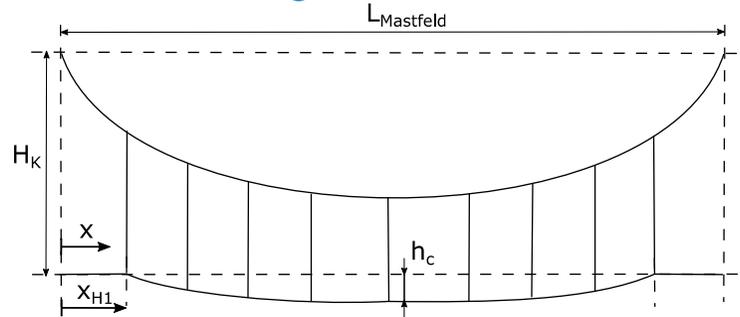
- Mechanisches Ersatzschaubild Stromabnehmer:



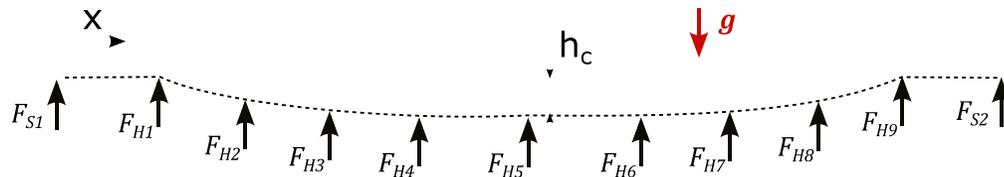
$$\mathbf{M}_{Panto} \bar{\ddot{w}}_{Panto}(t) + \mathbf{D}_{Panto} \bar{\dot{w}}_{Panto}(t) + \mathbf{C}_{Panto} w_{Panto}(t) = \bar{\mathbf{F}}_{Panto}(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{F}_{PantoHead}(t) \end{pmatrix}$$

- Massen-, Dämpfungs- und Steifigkeitsmatrizen einfach bspw. über freischneiden bestimmbar
- 2-, 3- und auch Mehrmassenschwinger können so umgesetzt werden
- Vektor der äußeren Kräfte $\bar{\mathbf{F}}_{Panto}(t)$ beschreibt die Kraft, die auf die einzelnen Ersatzmassen wirkt
- Bspw. $\bar{F}_1(t)$...Balgdruck, $\bar{F}_3(t)$...Windleitbleche
- Kopplung zw. Stromabnehmer und Fahrdrabt über Penalty-Steifigkeit c_{Pen} umgesetzt
- Stromabnehmerkontaktkraft $\bar{F}_{PantoHead}(t)$ ergibt sich aus Relativverlagerung der oberen Stromabnehmermasse und des Fahrdrahtes an der Stromabnehmerposition

- In der Praxis meist nur Vordurchhang bekannt
- Beschreibung der Form des Vordurchhangs über Kettenlinie \rightarrow Kosinus-Hyperbolikus $\cosh()$



- Hängerlängen und -kräfte sind zunächst unbekannt
- Berechnung über Optimierungsalgorithmus, der Hänger- und Seitenhalterkräfte solange verändert, bis der Fahrdraht die vorgegebene Verlagerung an deren Position erreicht



- Hängerkräfte können anschließend auf das Tragseil aufgebracht werden
- Ergebnis: statische Ruhelage Oberleitung mit Vordurchhang zwischen Hängern, Hängerlängen, Hängerkräfte bei deren Überschreitung Hängerausknicken auftritt

- Reduzieren der Ordnung des DGL-Systems von 2 auf 1 durch Zustandsraumdarstellung

$$\mathbf{M}\ddot{\bar{p}}(t) + \mathbf{D}\dot{\bar{p}}(t) + \mathbf{C}\bar{p}(t) = \bar{F}(t)$$

$$\ddot{\bar{p}}(t) = \mathbf{M}^{-1}(\bar{F}(t) - \mathbf{D}\dot{\bar{p}}(t) - \mathbf{C}\bar{p}(t))$$

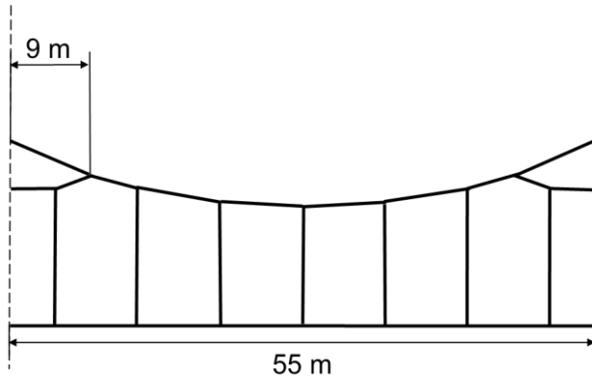
$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \dot{\bar{q}} \\ \bar{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{v} \\ \mathbf{M}^{-1}(\bar{F}(t) - \mathbf{D}\dot{\bar{q}}(t) - \mathbf{C}\bar{q}(t)) \end{pmatrix}$$

- Lösung von DGL-Systemen 1. Ordnung durch Zeitschrittintegration in Matlab über Solver (bspw. ode45, Runge-Kutta-Verfahren) recheneffizient möglich
- Entkoppelte „linke Seite“ der DGL von Fahrdraht, Tragseil, Y-Beiseil und Stromabnehmer
- Beeinflussung der DGL untereinander nur durch den Vektor der äußeren Kräfte
 - Hohe Recheneffizienz!
- Berechnung von Eigenfrequenzen und Eigenvektoren aus Zustandsraumdarstellung über die lineare Systemanalyse einfach umsetzbar



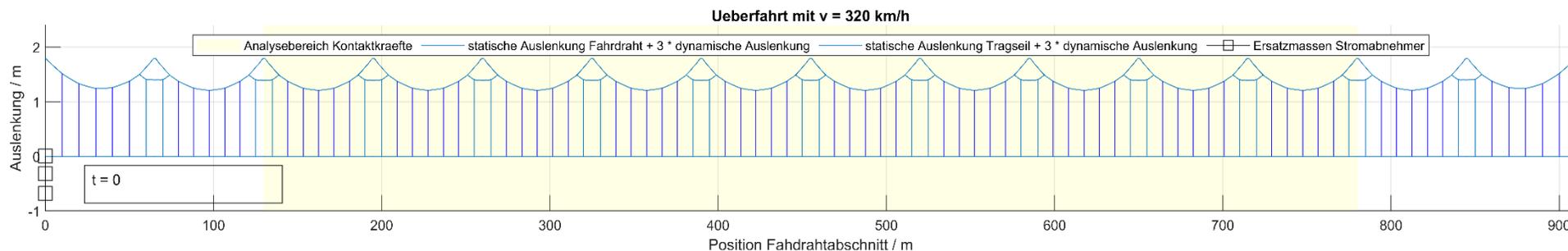
Verifizierung nach EN 50318

- Verifizierung der Grundlagen und Annahmen der Modellentwicklung anhand **EN 50318:2018**
- Oberleitung mit Y-Beiseil
- Identische Beiseillängen an den Masten

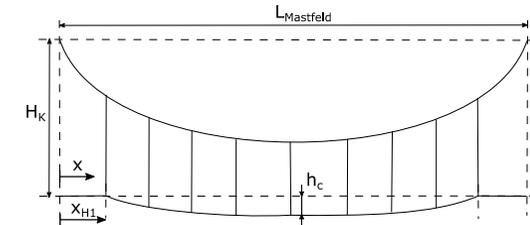
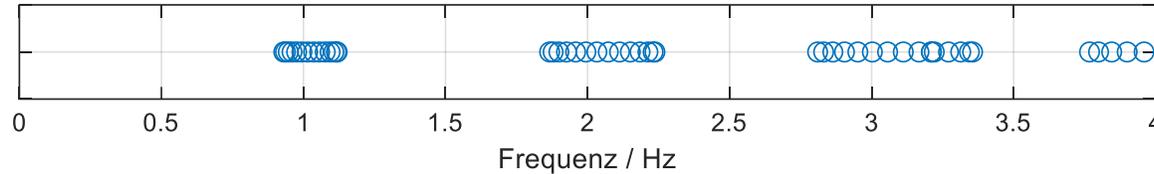


Oberleitung ohne Durchhang

- Weitere Eingangsparameter detailliert angegeben in der **EN 50318:2018**
- Gesamtaufbau Simulationsmodell, Analysebereich nach Norm 10 Mastfelder (gelb)

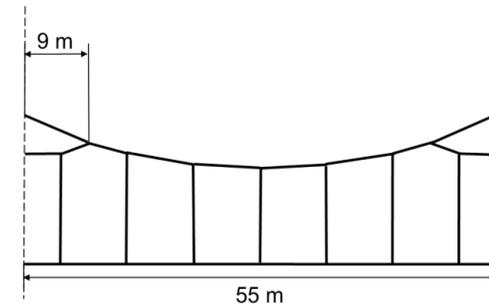
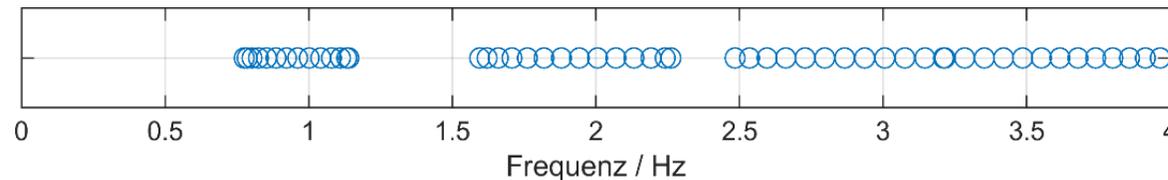


- Eigenfrequenzen der Benchmark-Oberleitung **ohne** Y-Beiseil



- Erste Gruppe kein Schwingungsknoten zwischen den Masten, zweite einen, dritte zwei usw.

- Eigenfrequenzen der Benchmark-Oberleitung **mit** Y-Beiseil:

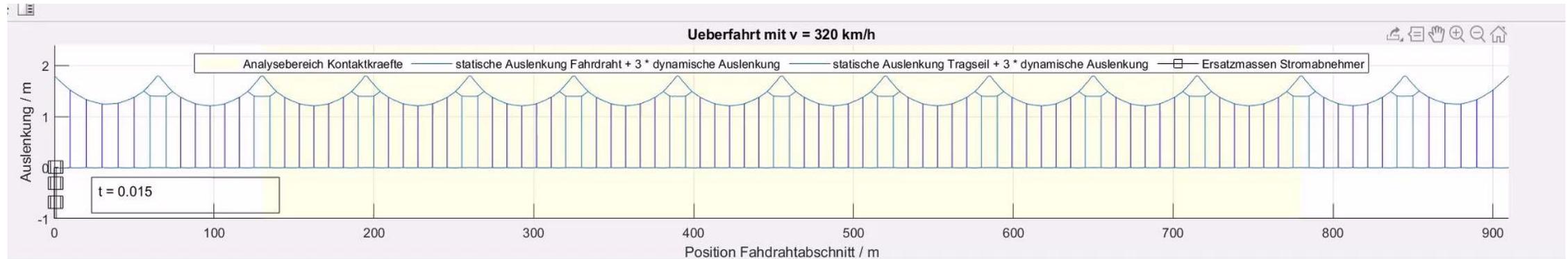


- Das Y-Beiseil führt dazu, dass die Frequenzgruppen näher zusammen rücken
- Es ist zu erwarten, dass sich ein nicht so großer Einfluss der Stromabnehmerabstand /Geschwindigkeits-Kombinationen auf die Simulationsergebnisse zeigt

- Simulation laut Norm mit $v_{Panto} = 320 \text{ km/h}$, zwei Stromabnehmer im Abstand von $d_{Panto} = 200 \text{ m}$
- Geschwindigkeitsabhängige mittlere Kontaktkraft nach EN 50367:

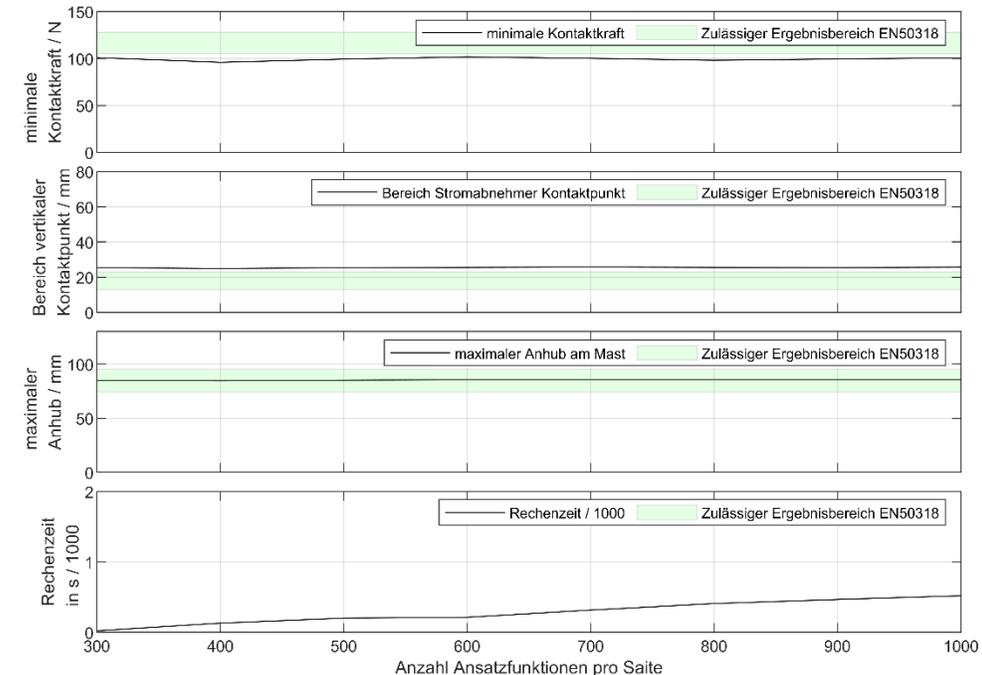
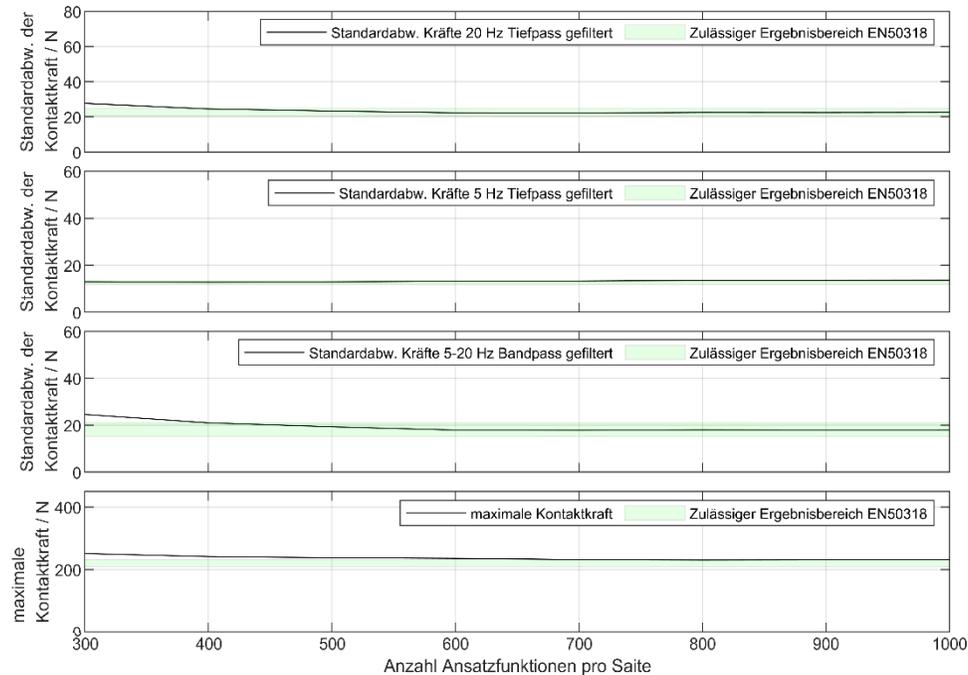
$$F_m = 0,000\ 97\ v_{Panto} + 70 = 169,3 \text{ N}$$

- Demonstrationsvideo aus Matlab (siehe: <https://dresden.bahntechnik.de/owncloud/s/Ci85dRqSTw6fpS9>)



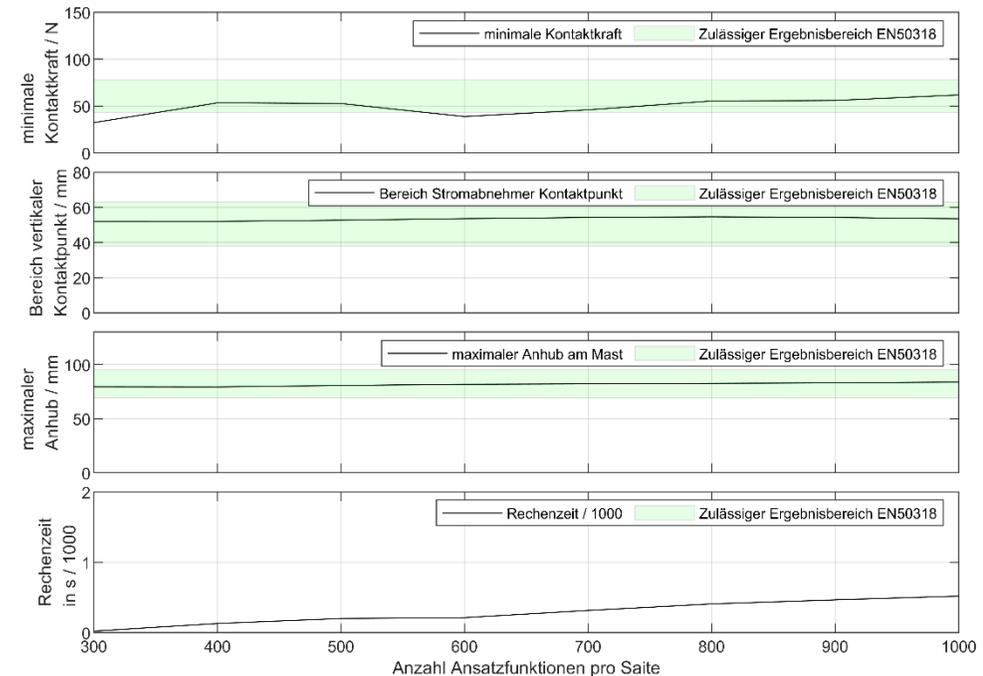
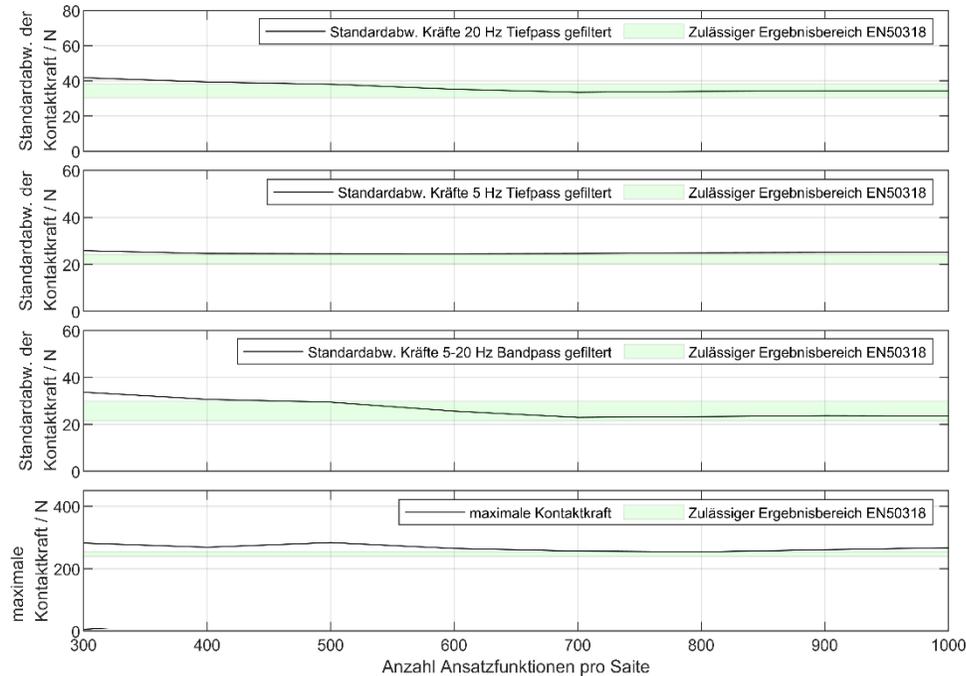
- Auswertung des Kontaktkraftverlaufs der einzelnen Stromabnehmer über der Zeit im gelben Bereich
- Bildung der abgeleiteten Größen wie Standardabweichung, minimale und maximale Kontaktkraft
- Auswertung des Anhubes an einzelnen Masten, bilden des Maximums für jeden SA
- Auswertung der minimalen und maximalen Position der oberen Stromabnehmermasse

- Vorlaufender Stromabnehmer:



- Nahezu alle Ergebnisse innerhalb der Norm bereits bei 500 Ansatzfunktionen und 200 s Rechenzeit

- Nachlaufender Stromabnehmer:



- Nahezu alle Ergebnisse innerhalb der Norm bereits bei 500 Ansatzfunktionen und 200 s Rechenzeit

- 1) Mit dem vorgestellten Modellansatz werden für die Wechselstromoberleitung mit Y-Beiseil Ergebnisse erzielt, die in den Grenzen der EN 50318 liegen, bzw. knapp (1-2 %) außerhalb.
- 2) Die Genauigkeit des Modellansatzes wird durch die Anzahl der Ansatzfunktionen und die Verwendung des mechanischen Ersatzmodells der Saite, das die Biegesteifigkeit des Fahrdrahtes vernachlässigt, beeinflusst.
- 3) Die Nutzung globaler Ansatzfunktionen ermöglicht eine schnelle Modellentwicklung, eine rasche Implementierung und eine hohe Recheneffizienz.
- 4) Die hohe Recheneffizienz erlaubt die Variation der Eingangsgrößen, wie bspw. Stromabnehmerabstand und Fahrgeschwindigkeit, zur Beurteilung der resultierenden Ergebnisgrößen Kontaktkraft und Fahrdrahtanhub an den Maststandorten. Es lassen sich Parameterstudien durchführen. Hieraus lassen sich Empfehlungen für zu bevorzugende Zugkonfigurationen ableiten.



Projektausblick

- ❖ Abschluss des Projektes erfolgt im Februar 2023
- ❖ Weitere Validierung des Modells
- ❖ Durchführung von Parameterstudien
- ❖ Ableitung von Handlungsempfehlungen für die weitere Normungsarbeit
- ❖ Abschließende Dokumentation
- ❖ Veröffentlichung der Ergebnisse im Frühjahr 2023 (acrps)

