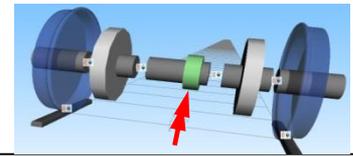


Selbsterregte Radsatz-Torsionsschwingungen von Schienenfahrzeugen mit hoher Kraftschlussausnutzung

Felix Saur – PROSE AG/HTWG Konstanz
HTWG Sommerkolloquium
07.07.2017

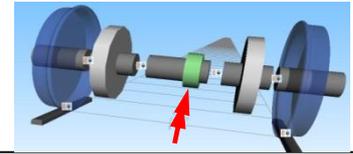
Prof. Dr.-Ing. Jens Weber – HTWG Konstanz
Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht – TU Dresden

Agenda



- 1 Vorstellung
- 2 Einführung
- 3 Messung
- 4 Auswertung und Analyse
- 5 Weiteres Vorgehen

Vorstellung



- **Doktorand**
 - Felix Saur, Gärtlistrasse 22, CH-8239 Dörflingen
 - Geburtsdatum: 04.10.1985
 - Kontakt: felixsaur@t-online.de, +49 (0)175 2626029

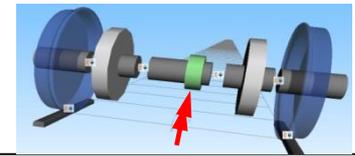
- **Studium**
 - 09/06 – 02/10; Bachelorstudium MKE (Konstruktion & Entwicklung) – HTWG Konstanz
 - 03/10 – 04/12; Masterstudium ASE (Automotive System Engineering) – HTWG Konstanz

- **Berufserfahrung**
 - 05/12 – 09/16; Berechnungsingenieur - Lauftechnik, Alstom Transport
 - 10/16 – heute; Ingenieur – Lauf- und Messtechnik, PROSE AG

- **Thema der Dissertation**
 - Selbsterregte Radsatz-Torsionsschwingungen von Schienenfahrzeugen mit hoher Kraftschlussausnutzung

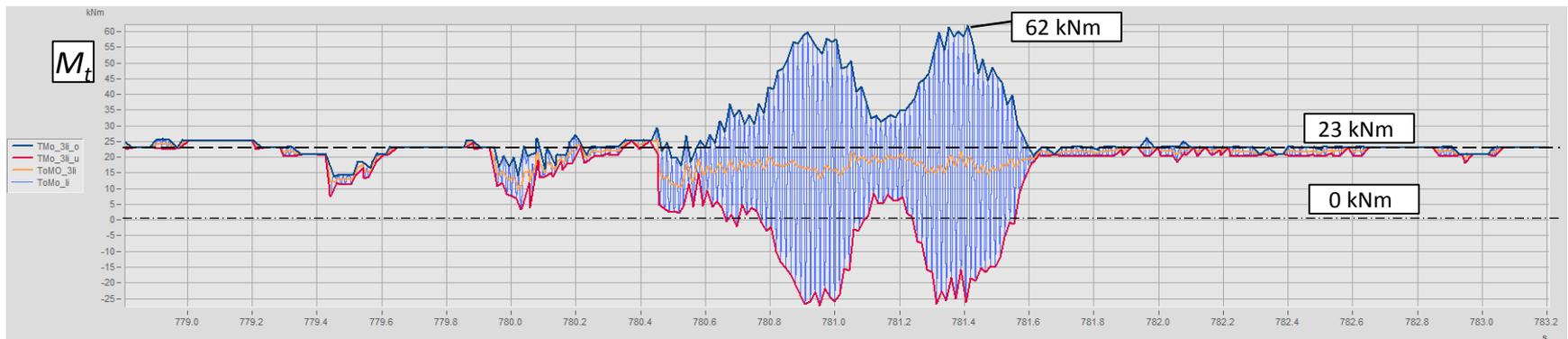
- **Geplanter Zeitraum**
 - 01/2017 – 06/2020

Einführung



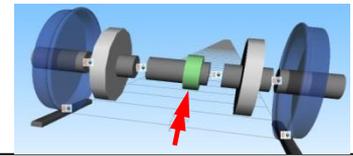
■ Veranlassung

- Feststellung von Radverdrehungen bei Traxx-Lokomotiven durch EBA (Eisenbahn-Bundesamt) 2010
- Überbeanspruchung der Radsatzwelle durch hohe Torsionsmomente (Rad-Welle-Verbindung, Pressverband)
- Torsionsschwingungen (Rollieren) als verantwortlich identifiziert
- EN 13104 - Auslegung von Radsätzen berücksichtigt keine Torsionsschwingungen
- EBA fordert seit 2011 einen zusätzlichen Nachweis bzgl. Dauer-/Betriebsfestigkeit von Radsatzwellen unter Berücksichtigung von Torsionsschwingungen
- Keine Vorgaben vom EBA zum Nachweis formuliert
- Nachweisführung unterliegt den jeweiligen Schienenfahrzeugeherstellern

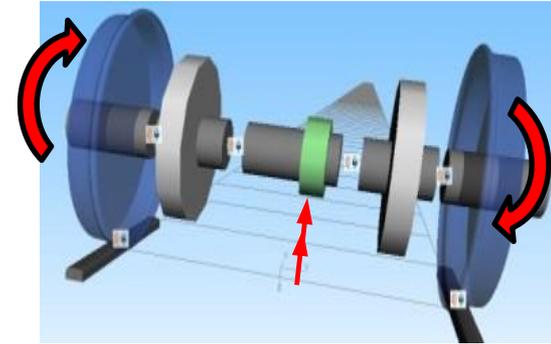


Dynamisches Torsionsmoment übersteigt quasistatisches Torsionsmoment um ein Vielfaches!

Theoretische Grundlagen



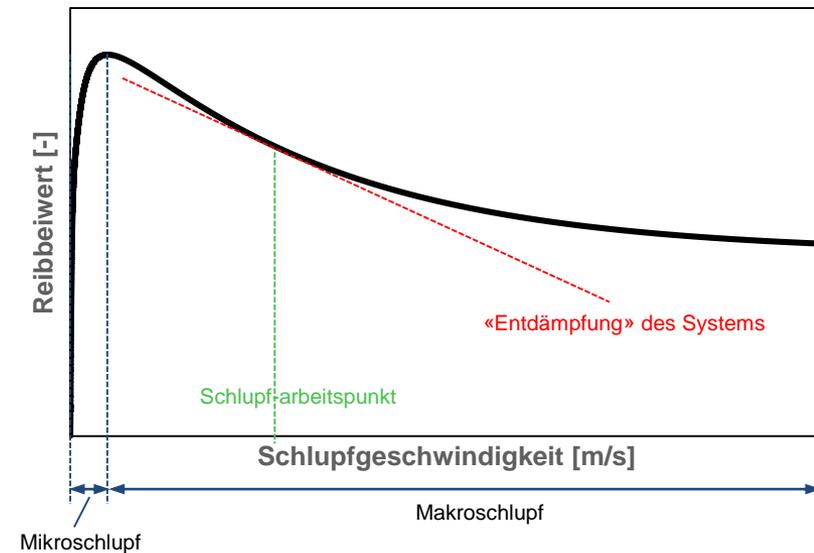
- Torsionsschwingungen des Radsatzes
 - Selbsterregte Schwingung (Reibschwingung)
 - Gegenphasige Drehbewegung von linker und rechter Radscheibe
 - Oszilliert mit Eigenfrequenz der Radsatzwelle (60 Hz – 120 Hz)
 - Auftreten nicht durch Verstimmung der Eigenfrequenz beeinflussbar
 - Nur durch Entzug der Energiequelle (Zug- / Bremskraft) vermeidbar
 - Ursache im Kraftschluss des Rad-Schiene-Kontakts



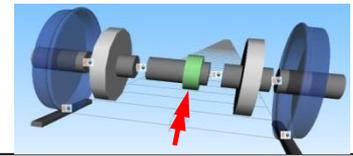
- Kraftschlusschlupfkurve
 - Instabilität bei abfallender Charakteristik
 - Abhängig von Randbedingungen:
 - Witterung - Luftfeuchtigkeit & Temperatur
 - Konditionierung der Kontaktflächen
 -
 - **Keine Einflussnahme im Regelbetrieb möglich!**

- Antriebssteuerung
 - Vorgabe Antriebsmoment und Schlupf-arbeitspunkt
 - Abhängig von Fahrzeugeigenschaften:
 - Antriebskonfiguration & Motorcharakteristik
 - Betriebssituation
 - **Beschränkte Einflussnahme im Betrieb möglich!**

Schematische Darstellung

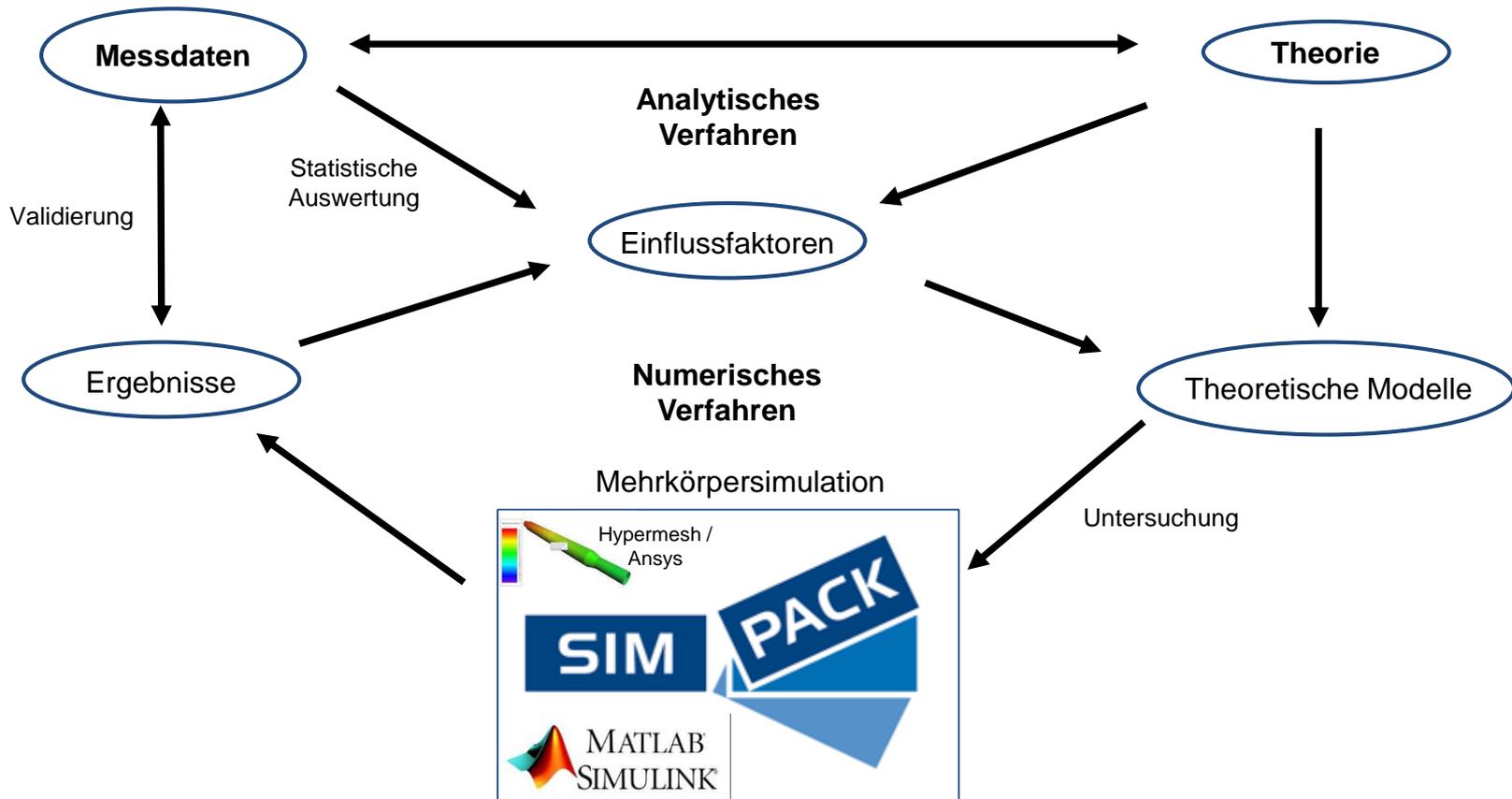
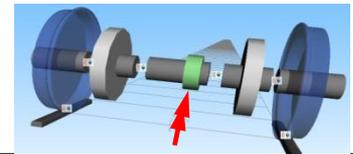


Ziel der Arbeit

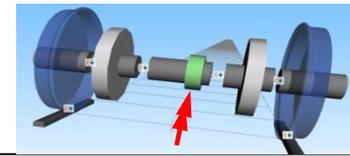


- Auswertung und Analyse von Messdaten verschiedener Schienenfahrzeuge
 - Lokomotive, Hochgeschwindigkeitszüge, Nahverkehrszüge
 - Statistische Auswertung und Klassifizierung von Torsionsschwingungen
 - Zusammenhang zwischen Fahrdynamik und Neigung zu Torsionsschwingungen
- Identifizierung und Analyse von Einflussfaktoren selbsterregter Torsionsschwingungen
 - Kritische Kraftschlussfunktionen und Rad-Schiene Verhältnisse (Reibverhältnisse)
 - Konstruktive Parameter der Radsatzwelle und ggf. Radsatzführung
 - Antriebsstrangkonfiguration (Tatzlager-, Hohlwellen-, Kardantrieb)
 - Antriebsstrang (z.B. Kardan-, Gelenkwelle und Radsatzgetriebe)
 - Antriebs- und Bremsregelungskonzepte (Gleit- und Schleuderschutz)
- Massnahmen zur Reduktion von Torsionsschwingungen
 - Konstruktive Vorschläge zur Radsatzwellengeometrie (z.B. Durchmesser)
 - Antriebs- und Bremssteuerung
- **Entwicklung eines Berechnungswerkzeugs zur analytischen und numerischen Ermittlung realitätsnaher Torsionsmomente infolge von Torsionsschwingungen**

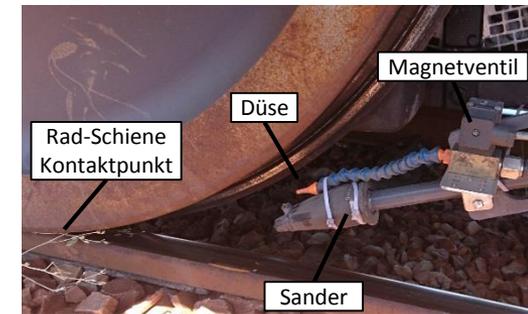
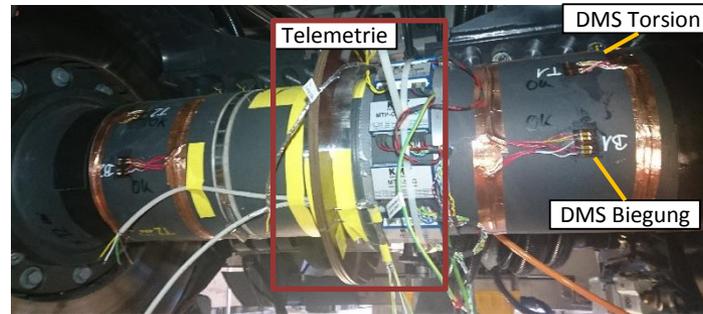
Methodik



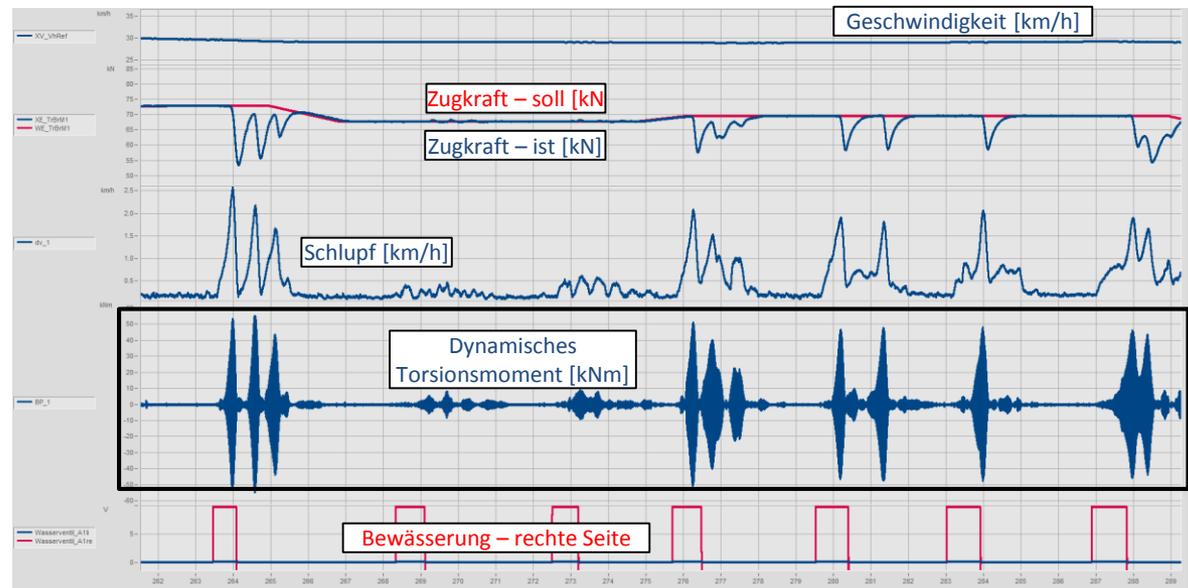
Messung von Torsionsschwingungen



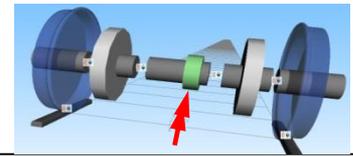
- Messaufbau
 - Zugkonfiguration: Bremslokomotiven, Messwagen
 - Messstellen: Torsionsspannungen der RSW
 - Messequipment: Messverstärker, Telemetrie, A/D-Wandler
 - Spezialequipment: künstliche Bewässerungsanlage



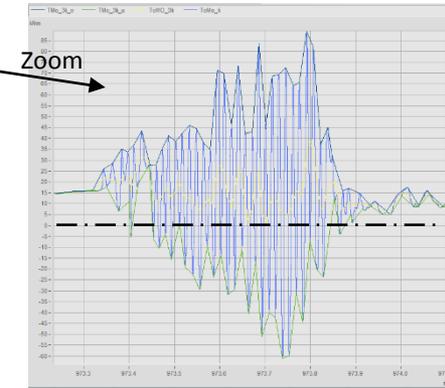
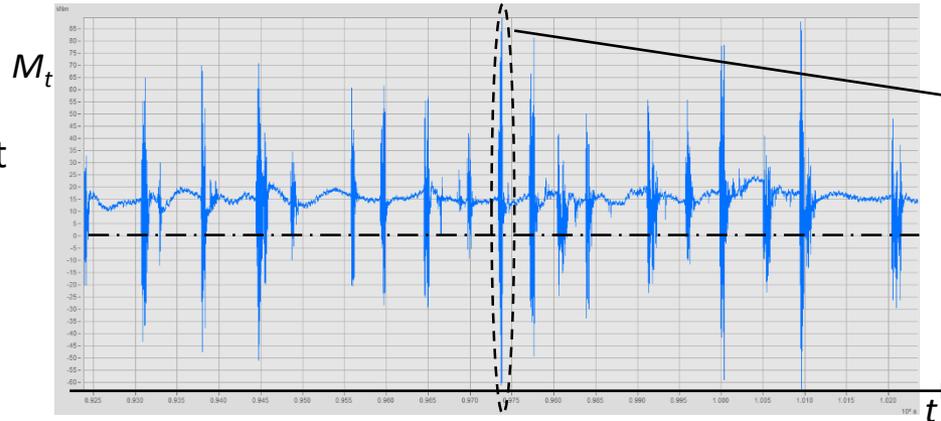
- Versuchsdurchführung
 - Versuchsstrecke: gerade vs. kurvenreich
 - Betriebszustand: Beladung und Antriebs-Software
 - künstliche Bewässerung: situativ vs. automatisiert



Auswertung von Torsionsschwingungen

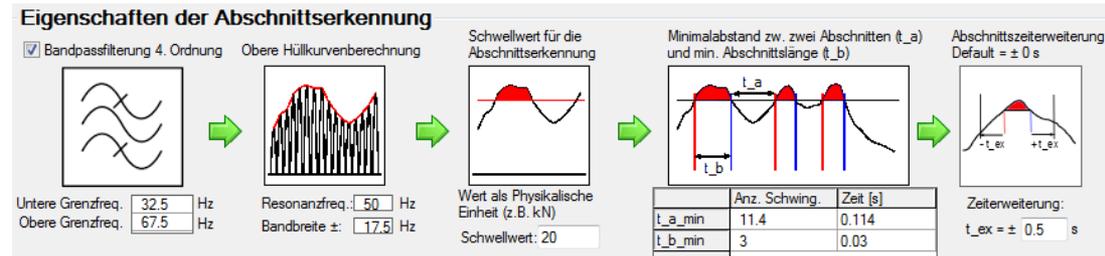


Gesamt-torsionsmoment
Torsionsschwingung überlagert quasistatischen Anteil von Anfahren und Bremsen

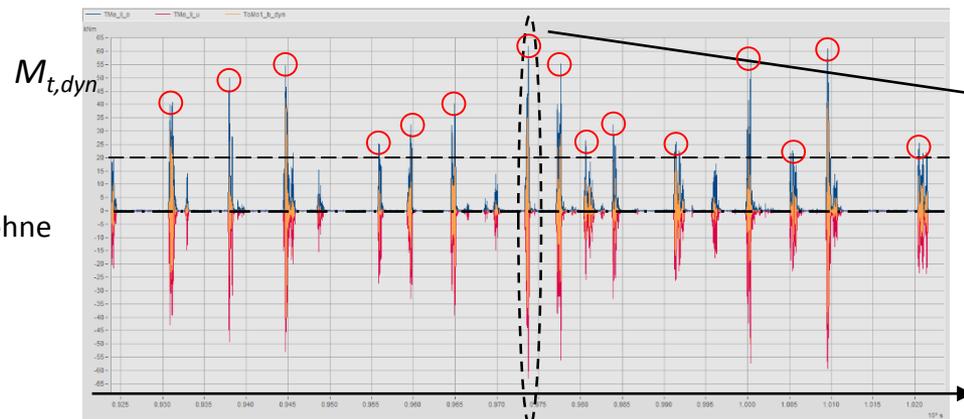


Auswertalgorithmus

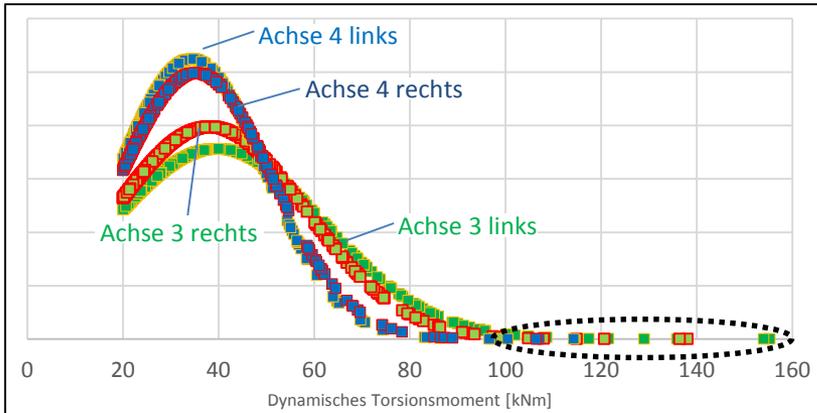
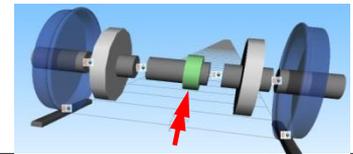
- Bestimmung der Eigenfrequenz
- Bandpassfilterung (ohne Phasenverschiebung!)
- Definition von Schwellwert, Mindestlänge, Sollwertunterschreitungsdauer und Zeiterweiterung
- Erstellung von Torsionsereignissen



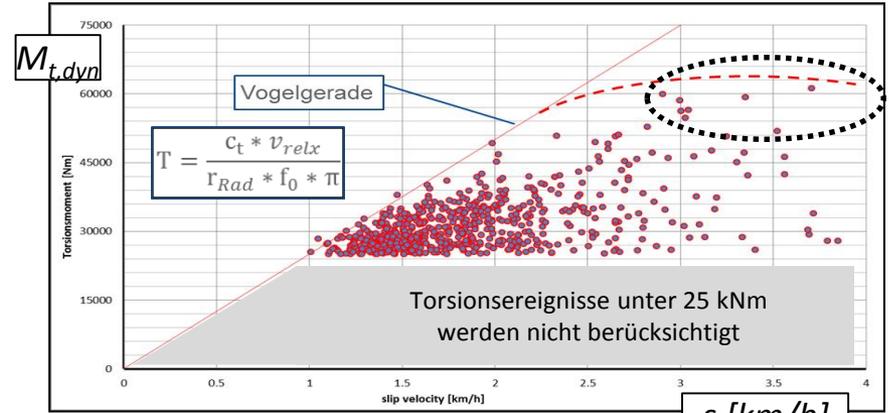
Dynamisches Torsionsmoment
Schwingungsamplitude des relevanten Frequenzanteils ohne quasistatischem Anteil des Torsionsmoments



Analyse von Torsionsschwingungen



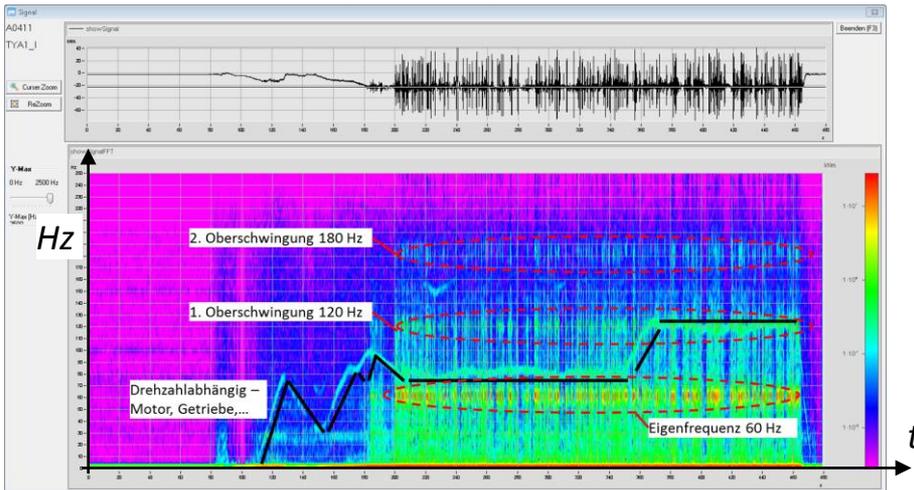
Normalverteilungsfunktionen



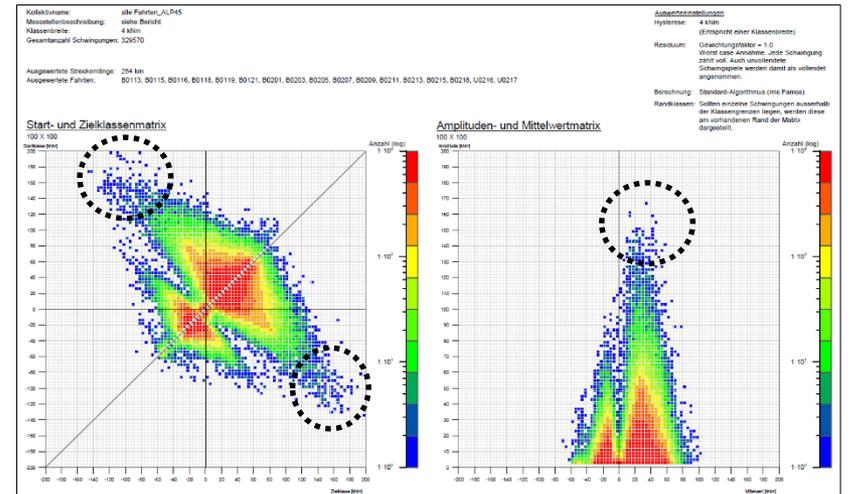
«Vogelgerade»

Analysemöglichkeiten

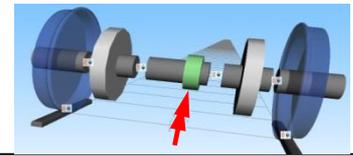
Spektralanalysen



Rainflow-Zählung



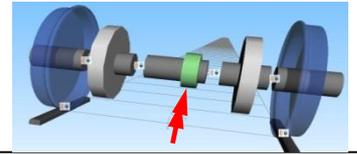
Weiteres Vorgehen



- Vertiefte Auswertung und Durchführung weiterer Versuchsfahrten
 - Vergleich der statistischen Auswertungen verschiedener Antriebskonfigurationen
 - Ableitung verschiedener Kraftschlusscharakteristiken als Input für Simulationen
 - Geplante Messkampagnen
 - Doppelstockzug, August 2017 - Schweiz
 - Nahverkehrszug, Oktober 2017 – Österreich

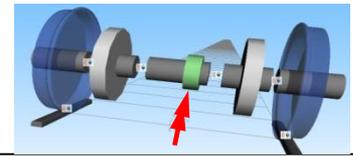
- Abbildung physikalischer Systeme durch mathematische Modelle
 - Modellaufbau von mehreren Teilsystemen:
 - verschiedenen Antriebskonfigurationen - SIMPACK
 - Regelungskonzepten – MATLAB®/Simulink®
 - elektrischer Teilsysteme - MATLAB®/Simulink®
 - FEM-Körpern – ANSYS, HyperMesh
 - Integration aller Teilsysteme in ein komplexes Berechnungsmodell
 - Berechnung via Co-Simulation

- Beanspruchungsanalyse und simulationstechnische Untersuchung von Einflussgrößen



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

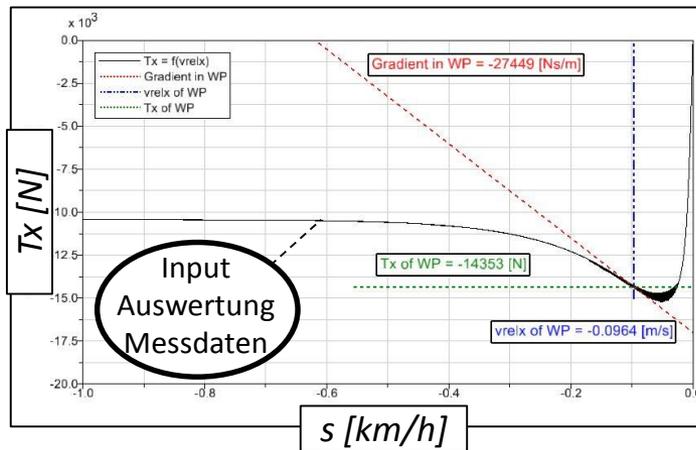
Simulation (1/2)



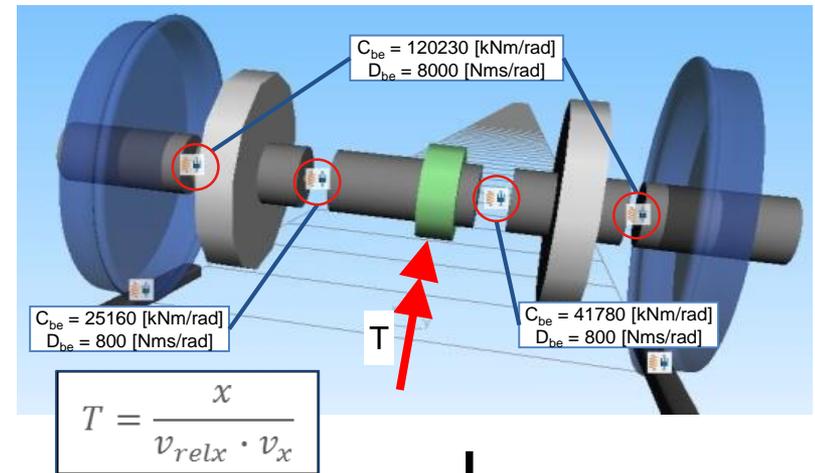
Simulation von Radsatz-Torsionsschwingungen durch Mehrkörpersysteme

Abfallende Kraftschlusscharakteristik nach POLACH Formel:

$$\mu_{v_{relx}} = \mu \cdot \left((1 - A) \cdot e^{-v_{relx} \cdot B} + A \right)$$



Elastisches Radsatzmodell



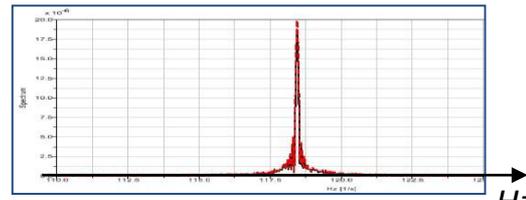
Eigenvalues

Perform eigenvalue calculation

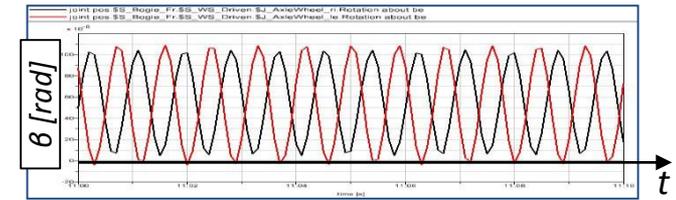
Maximum state derivative at linearization state: joint.st.acc(3): \$S_Bog_1e.\$_Traction_Body =

Mode No. (Pair)	Frequency	Nat. Damping	Undamped Frequency
129/130	111.1631235634525	0.01408514386717671	111.1741521015157
131/132	111.1631235634528	0.01408514386718562	111.174152101516
133/134	118.902684998041	0.0127993833635937	118.9124257661358
135/136	118.902684998056	0.0127993833635914	118.9124257661373

Modalanalyse

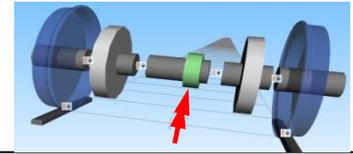


Frequenzanalyse



Gegenphasige Schwingung linke-rechte Radscheibe

Simulation (2/2)



Modellerstellung der elektrischen Teilsysteme in MATLAB®/Simulink®

- Antriebs- und Bremsregelung
 - Verschiedene Regelkonzepte bzgl. Regelgröße (Schlupfgeschwindigkeit, Winkelbeschleunigung des Motors, ...)
 - Auslegung von Gleit- und Schleuderschutz
- Elektromotor
 - Motorcharakteristik Reihen- und Nebenschlussverhalten
 - Vergleich Synchron- vs. Asynchronmotor

