

# RAILplus Simulationstag

Virtual Vehicle Research GmbH  
DB Systemtechnik GmbH  
BAUGRUND DRESDEN  
Stadler Rail AG



# AGENDA



## Ziele

Beantwortung der Fragen:

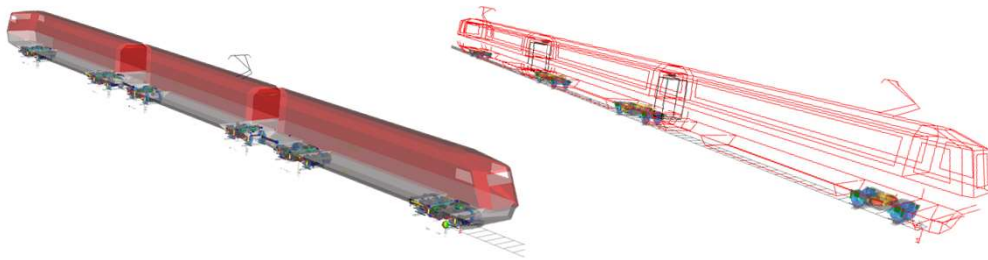
1. Welche Simulationsmethoden werden im Eisenbahnwesen angewandt?
2. Welche Problemstellungen können damit untersucht werden?
3. Vorteil von Simulationen gegenüber Feldversuchen?

## Nicht-Ziel(e)

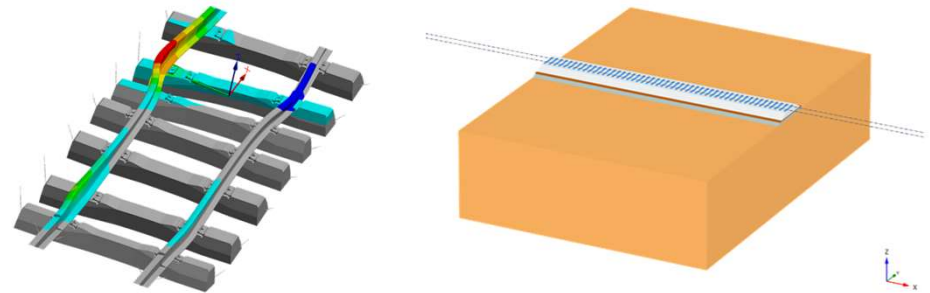
- Es soll kein tiefgründiges Verständnis für die vorgestellten Simulationsmodelle aufgebaut werden!!

# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörper Simulation (MKS)



## Finite Elemente Methode (FEM)

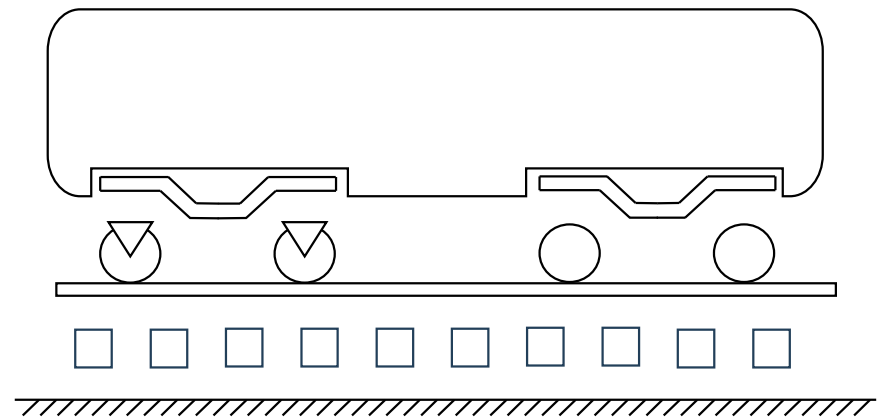


# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörpersimulation

Prinzip und Funktionsweise:

- System aus starren oder flexiblen Körpern
- Verbindungen über Gelenke, Federn, Dämpfer, Kontakte
- Berechnet Bewegungen und Kräfte

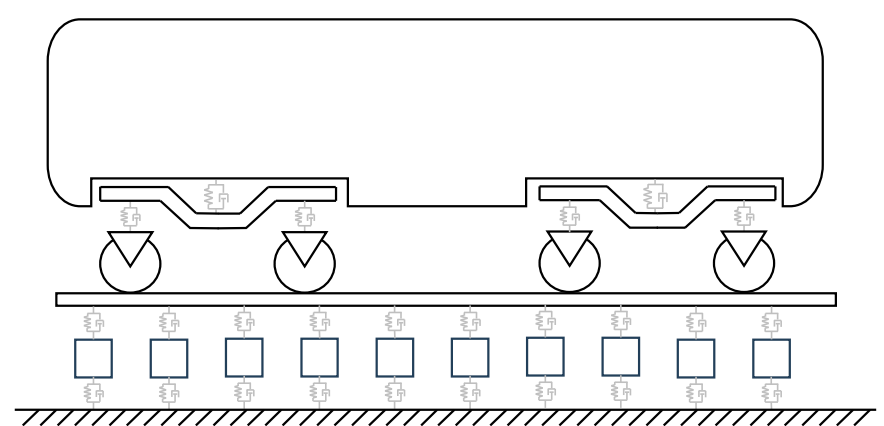


# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörpersimulation

Prinzip und Funktionsweise:

- System aus starren oder flexiblen Körpern
- Verbindungen über Gelenke, Federn, Dämpfer, Kontakte
- Berechnet Bewegungen und Kräfte

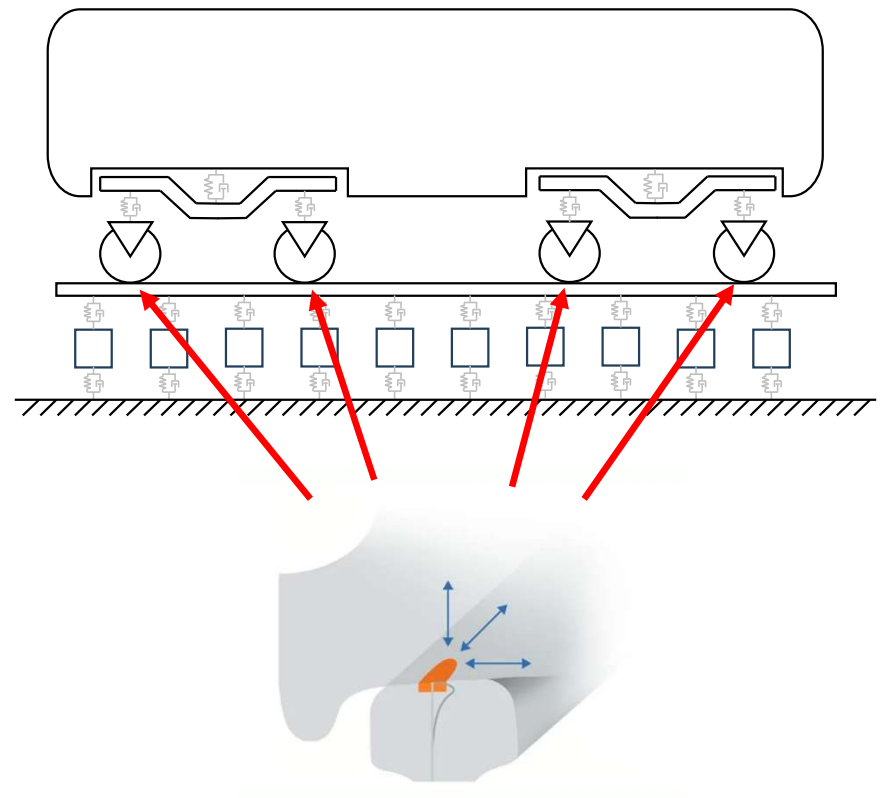


# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörpersimulation

Prinzip und Funktionsweise:

- System aus starren oder flexiblen Körpern
- Verbindungen über Gelenke, Federn, Dämpfer, Kontakte
- Berechnet Bewegungen und Kräfte



# SIMULATIONSMETHODEN

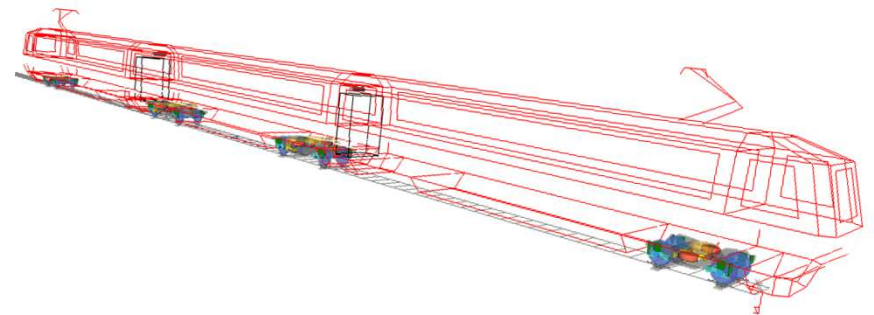
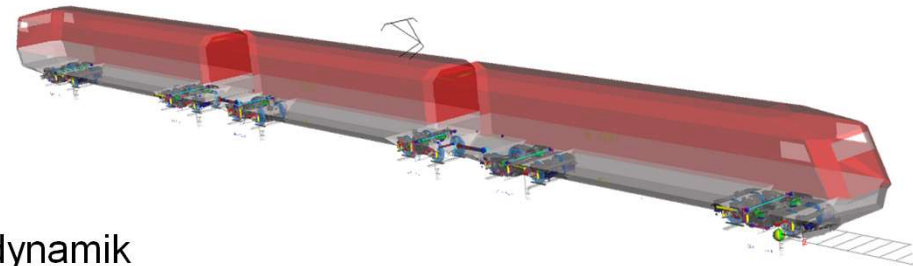
## Mehrkörpersimulation

Prinzip und Funktionsweise:

- System aus starren oder flexiblen Körpern
- Verbindungen über Gelenke, Federn, Dämpfer, Kontakte
- Berechnet Bewegungen und Kräfte

Anwendung im Eisenbahnwesen:

- Fahrzeugdynamik und Laufverhalten – Schienenfahrzeugdynamik
- Gleisdynamik
- Schwingungs- und Komfortanalysen
- Interaktion Rad-Schiene
- ...



# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörpersimulation

Prinzip und Funktionsweise:

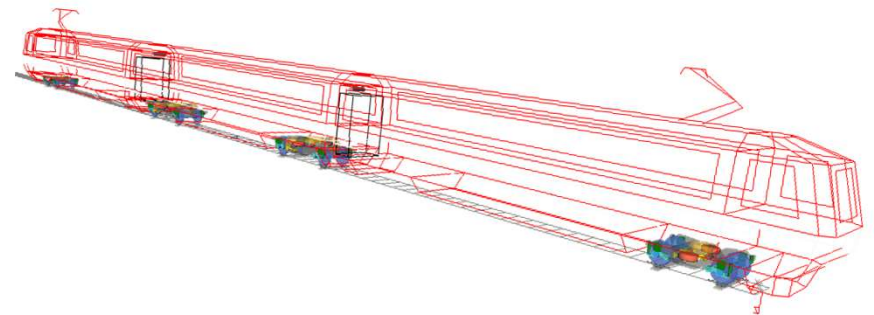
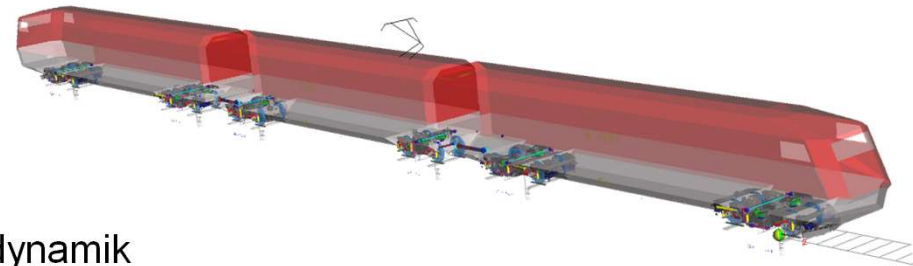
- System aus starren oder flexiblen Körpern
- Verbindungen über Gelenke, Federn, Dämpfer, Kontakte
- Berechnet Bewegungen und Kräfte

Anwendung im Eisenbahnwesen:

- Fahrzeugdynamik und Laufverhalten – Schienenfahrzeugdynamik
- Gleisdynamik
- Schwingungs- und Komfortanalysen
- Interaktion Rad-Schiene
- ...

Behandelte Fragestellungen in der heutigen Tagung:

- Bogenlaufverhalten **STADLER** 



# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörpersimulation

Prinzip und Funktionsweise:

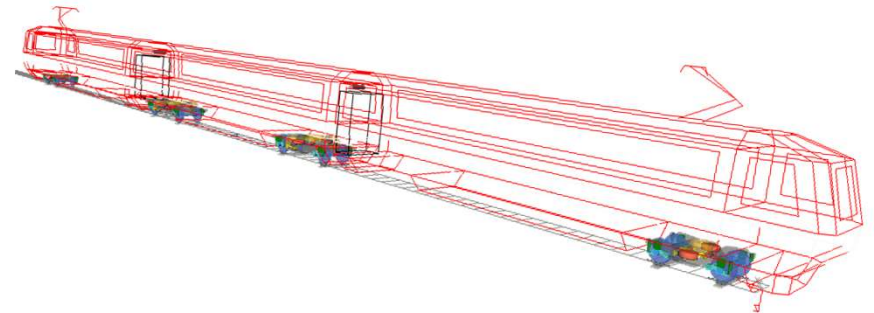
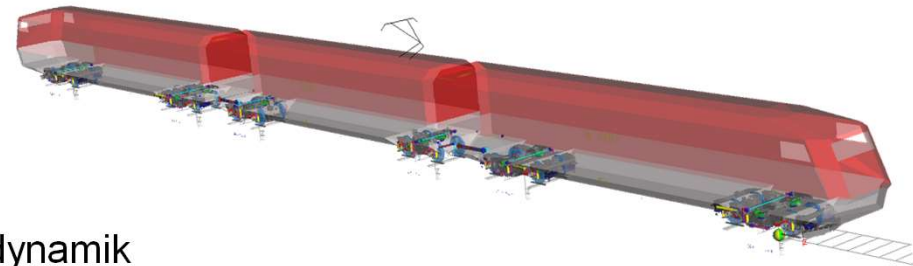
- System aus starren oder flexiblen Körpern
- Verbindungen über Gelenke, Federn, Dämpfer, Kontakte
- Berechnet Bewegungen und Kräfte

Anwendung im Eisenbahnwesen:

- Fahrzeugdynamik und Laufverhalten – Schienenfahrzeugdynamik
- Gleisdynamik
- Schwingungs- und Komfortanalysen
- Interaktion Rad-Schiene
- ...

Behandelte Fragestellungen in der heutigen Tagung:

- Bogenlaufverhalten  
- Statischer Verschleiß 

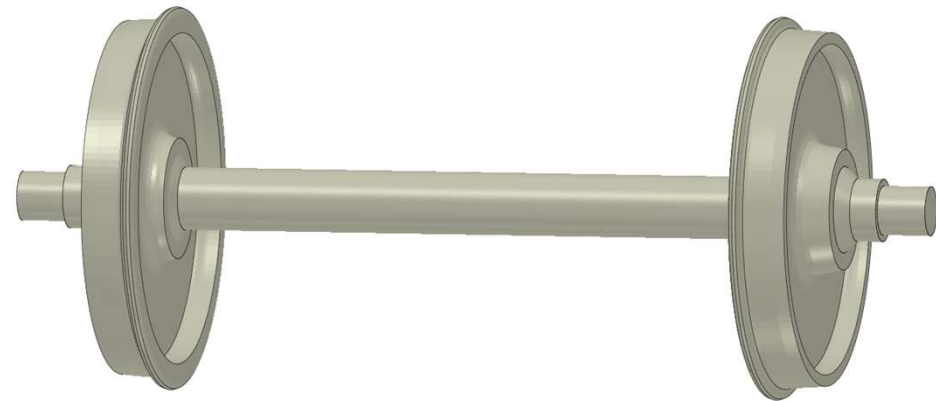


# SIMULATIONSMETHODEN

## Finite Elemente Methode

Prinzip und Funktionsweise:

- Diskretisierung des Bauteils in finite Elemente
- Berechnung von Verformungen, Spannungen, Dehnungen...

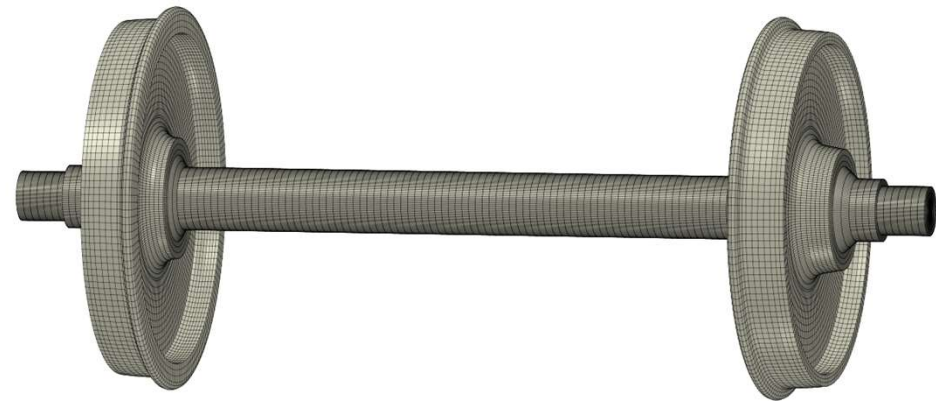


# SIMULATIONSMETHODEN

## Finite Elemente Methode

Prinzip und Funktionsweise:

- Diskretisierung des Bauteils in finite Elemente
- Berechnung von Verformungen, Spannungen, Dehnungen...

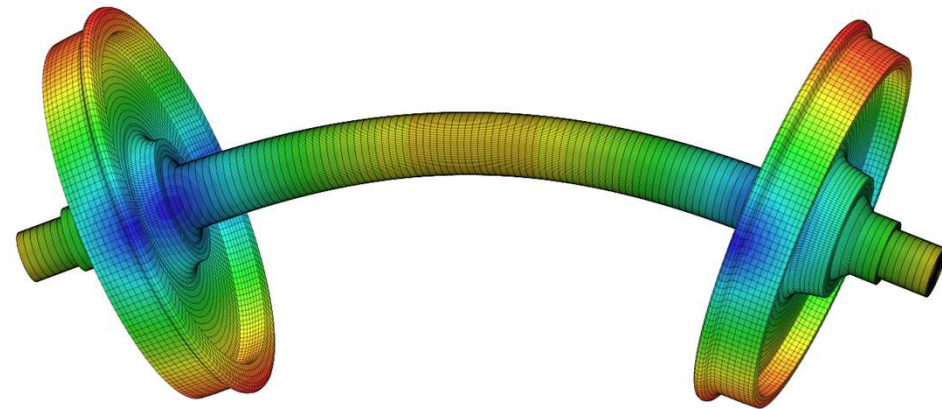


# SIMULATIONSMETHODEN

## Finite Elemente Methode

Prinzip und Funktionsweise:

- Diskretisierung des Bauteils in finite Elemente
- Berechnung von Verformungen, Spannungen, Dehnungen...

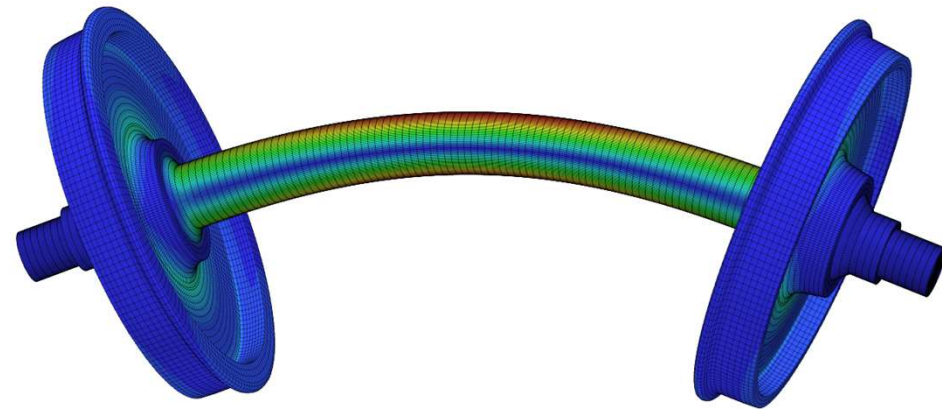


# SIMULATIONSMETHODEN

## Finite Elemente Methode

Prinzip und Funktionsweise:

- Diskretisierung des Bauteils in finite Elemente
- Berechnung von Verformungen, Spannungen, Dehnungen...



# SIMULATIONSMETHODEN

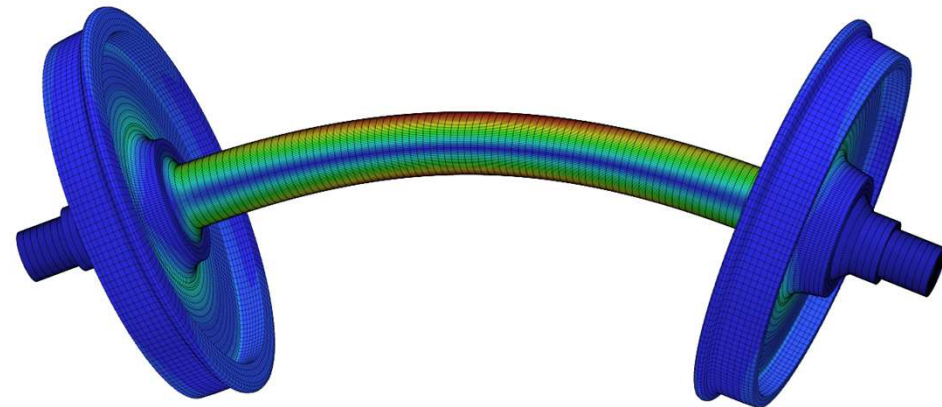
## Finite Elemente Methode

Prinzip und Funktionsweise:

- Diskretisierung des Bauteils in finite Elemente
- Berechnung von Verformungen, Spannungen, Dehnungen...

Anwendung in der Schienenfahrzeugtechnik:

- Festigkeits- und Lebensdauernachweise
- Rissinitiierung und Risswachstum
- Thermomechanische Belastungen bei Bremsvorgängen
- ...



# SIMULATIONSMETHODEN

## Finite Elemente Methode

Prinzip und Funktionsweise:

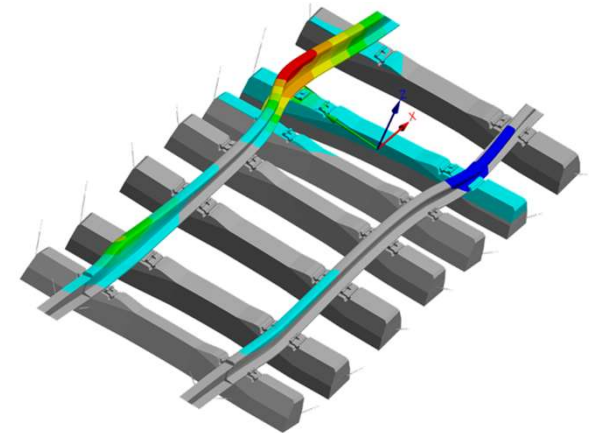
- Diskretisierung des Bauteils in finite Elemente
- Berechnung von Verformungen, Spannungen, Dehnungen...

Anwendung in der Schienenfahrzeugtechnik:

- Festigkeits- und Lebensdauernachweise
- Rissinitiierung und Risswachstum
- Thermomechanische Belastungen bei Bremsvorgängen
- ...

Behandelte Fragestellungen in der heutigen Tagung:

- Nicht durch Schienenfahrkanten-Verschleiß bedingte Spurerweiterung



# SIMULATIONSMETHODEN

## Finite Elemente Methode

Prinzip und Funktionsweise:

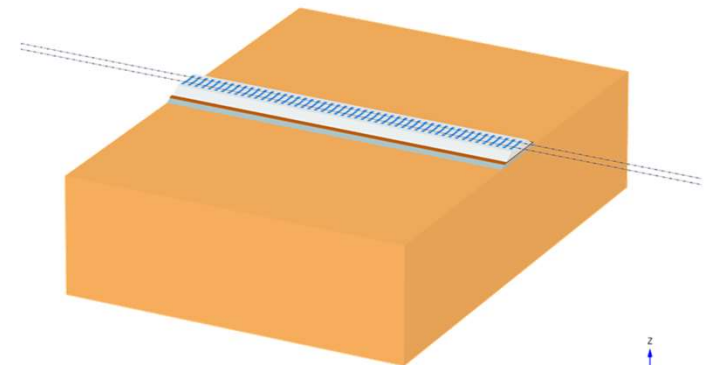
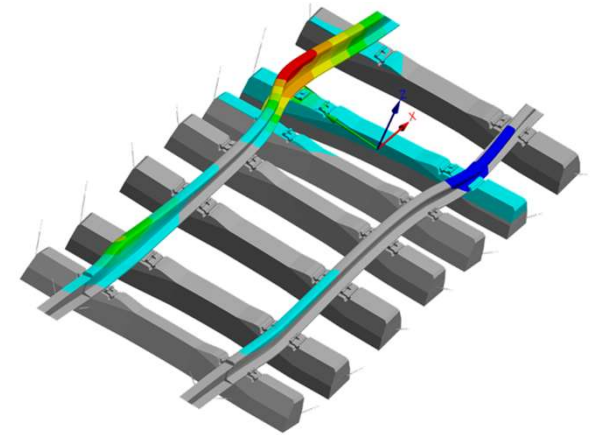
- Diskretisierung des Bauteils in finite Elemente
- Berechnung von Verformungen, Spannungen, Dehnungen...

Anwendung in der Schienenfahrzeugtechnik:

- Festigkeits- und Lebensdauernachweise
- Rissinitiierung und Risswachstum
- Thermomechanische Belastungen bei Bremsvorgängen
- ...

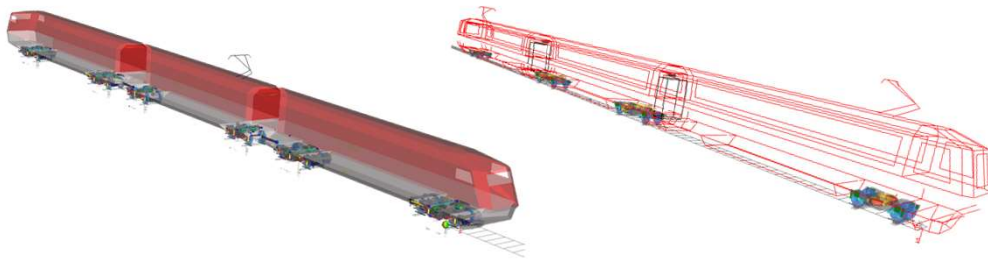
Behandelte Fragestellungen in der heutigen Tagung:

- Nicht durch Schienenfahrkanten-Verschleiß bedingte Spurerweiterung
- Untergrunduntersuchungen  
Wechselwirkung Oberbaukomponenten / Unterbau

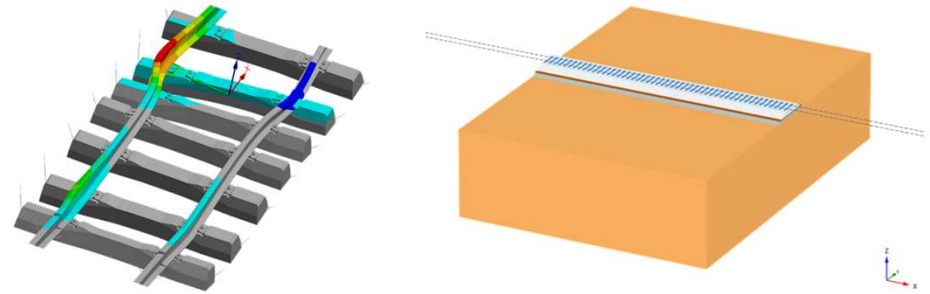


# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörper Simulation (MKS)

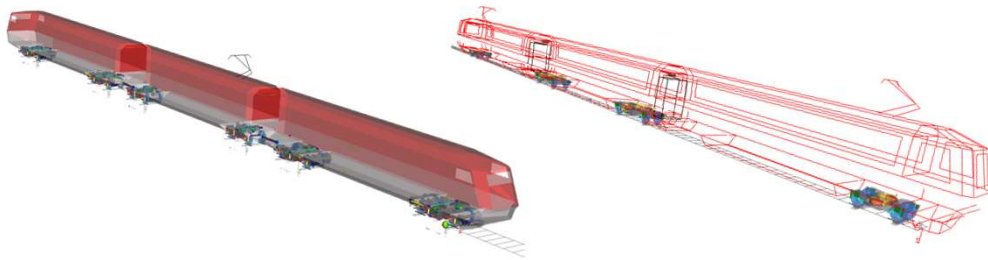


## Finite Elemente Methode (FEM)

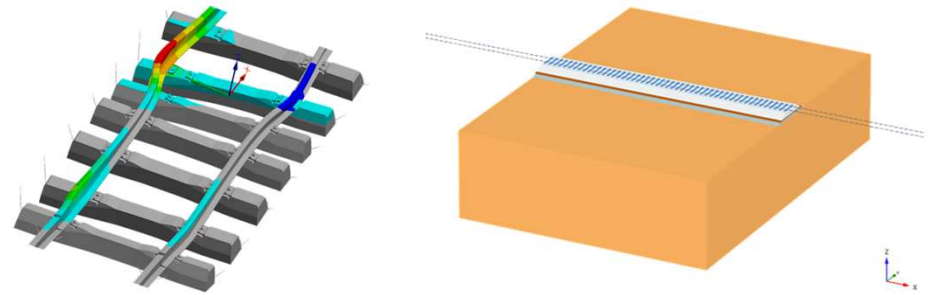


# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörper Simulation (MKS)



## Finite Elemente Methode (FEM)



## Spezialisierte Simulationsmethoden

# PROBLEMSTELLUNG

## Zustandsbasiertes Reibungsmodell

Behandelte Fragestellungen in der heutigen Tagung:

- Welches Konditionierungsmittel ist geeignet?
- Wie wirkt sich die Applikationsmenge aus?
- Optimierung der Applikationsintervalle
- Einfluss von Temperatur und Umgebungsbedingungen
- Transport und Abtrag des Mittels über mehrere Überfahrten

virtual  vehicle



# PROBLEMSTELLUNG

## Zustandsbasiertes Reibungsmodell

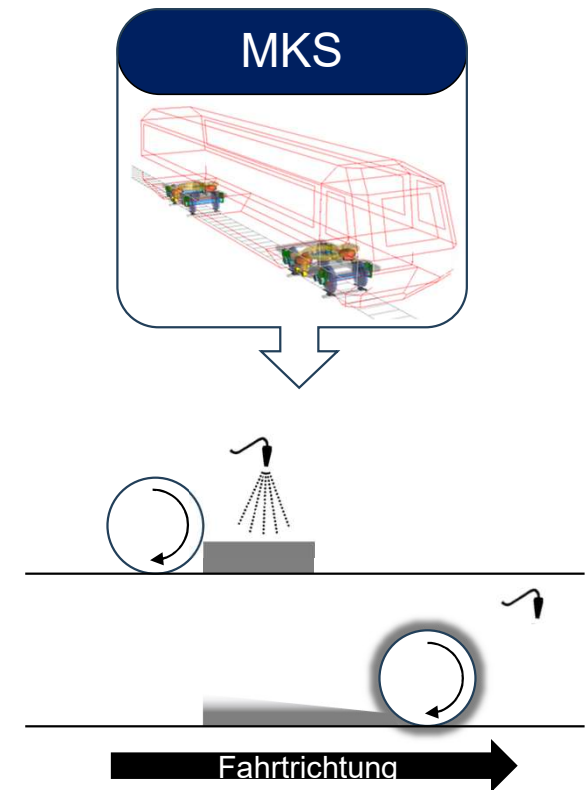
Behandelte Fragestellungen in der heutigen Tagung:

- Welches Konditionierungsmittel ist geeignet?
- Wie wirkt sich die Applikationsmenge aus?
- Optimierung der Applikationsintervalle
- Einfluss von Temperatur und Umgebungsbedingungen
- Transport und Abtrag des Mittels über mehrere Überfahrten



Prinzip und Funktionsweise:

- Input: Rad-Schiene Kontaktinteraktion aus der MKS
- Modellierung von:
  - Aufnahme des Mittels im Kontakt
  - Transport entlang der Schiene
  - Zustandsabhängiger Reibwert  $\mu$



# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörpersimulation unter Berücksichtigung elastischer Körper

Behandelte Fragestellungen in der heutigen Tagung:

- Minderungsmaßnahmen von dynamischen Verschleiß
  - Schlupfwellen in engen Bögen
  - Polygone auf den Rädern

virtual  vehicle



# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörpersimulation unter Berücksichtigung elastischer Körper

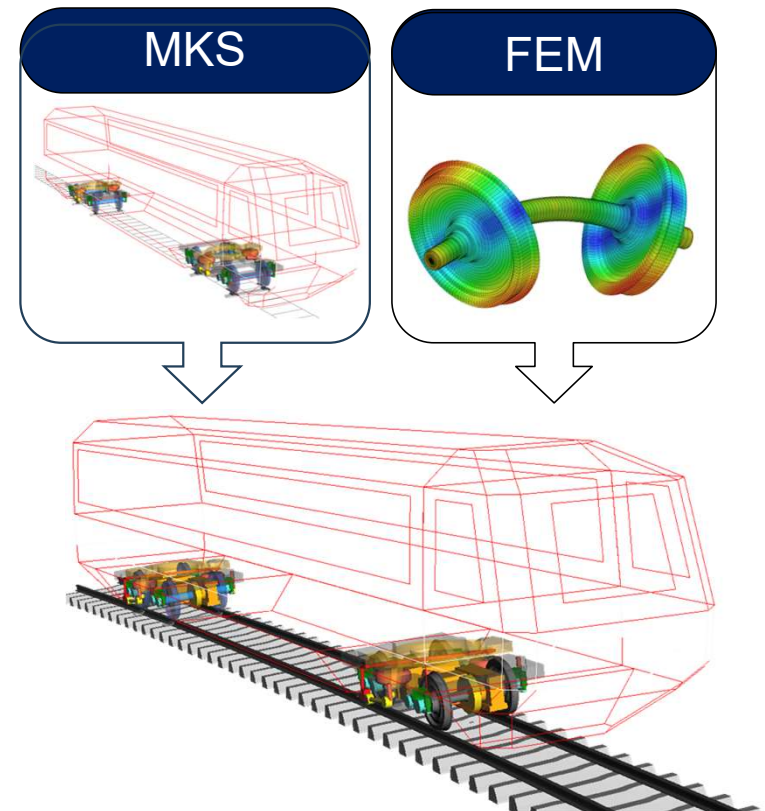
Behandelte Fragestellungen in der heutigen Tagung:

- Minderungsmaßnahmen von dynamischen Verschleiß
  - Schlupfwellen in engen Bögen
  - Polygone auf den Rädern



Prinzip und Funktionsweise:

- Berücksichtigung der Strukturdynamischen Eigenschaften von Radsätzen und Fahrweg.
- Erweiterung der klassischen Mehrkörpersimulation (MKS) durch elastische Komponenten aus der Finite Elemente Methode (FEM).
- Berechnung der Anregungen des gekoppelten Systems Fahrzeug- Fahrweg während der Bogenfahrt und der daraus resultierende dynamische Verschleiß.

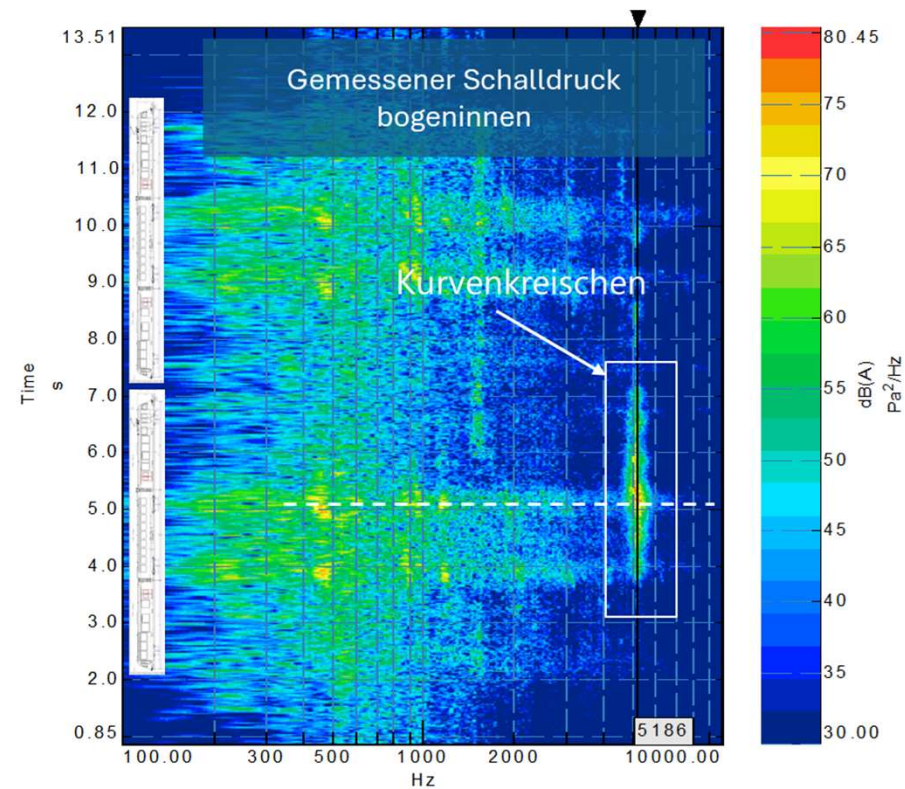


# PROBLEMSTELLUNG

## Stabilitätsmodell zur Prognose von Kurvenkreischen

Behandelte Fragestellungen in der heutigen Tagung:

- Analyse von Minderungsmaßnahmen von Kurvenkreischen in engen Bögen bei Meterspurbahnen



# PROBLEMSTELLUNG

## Stabilitätsmodell zur Prognose von Kurvenkreischen

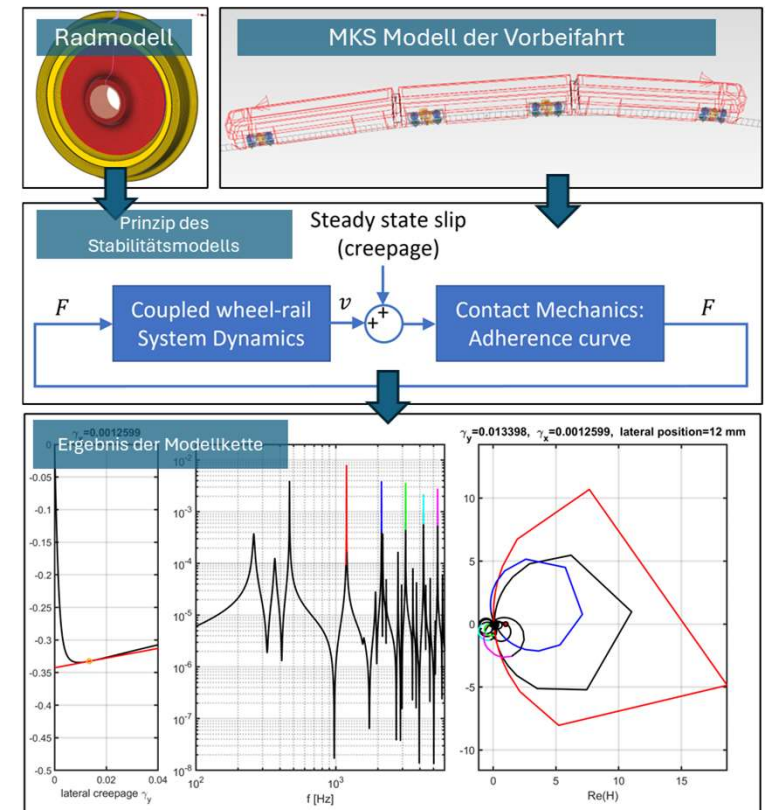
Behandelte Fragestellungen in der heutigen Tagung:

- Analyse von Minderungsmaßnahmen von Kurvenkreischen in engen Bögen bei Meterspurbahnen



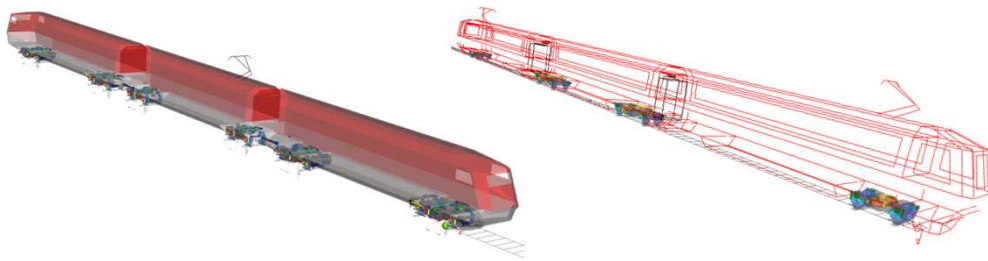
Prinzip und Funktionsweise:

- Gekoppelte Modellkette zur Analyse von Kurvenkreischen
- Modellbasis bestehend aus der Fahrzeugdynamik während der Bogenfahrt (MKS) und Radmoden (FEM)
- Berechnung der dynamischen Instabilität der Räder unter diesen Betriebsbedingungen

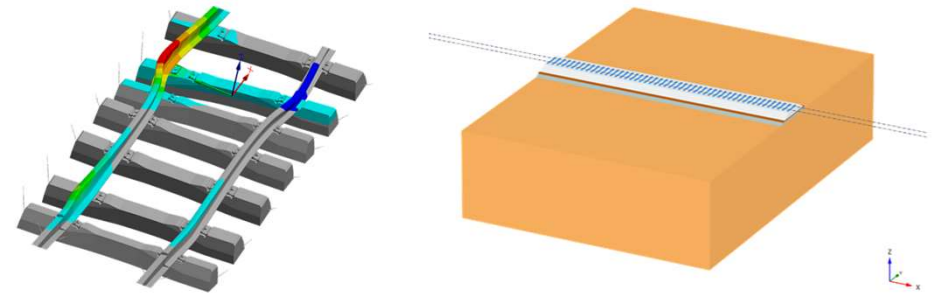


# SIMULATIONSMETHODEN

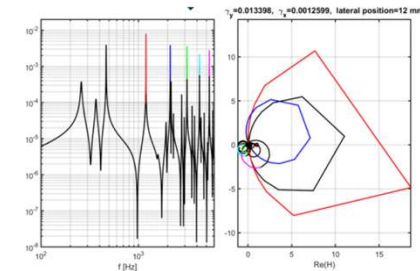
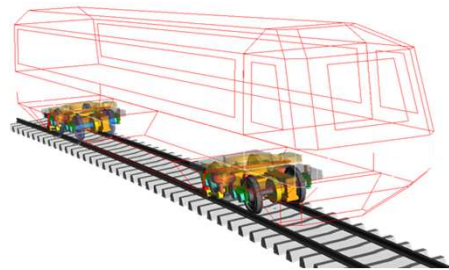
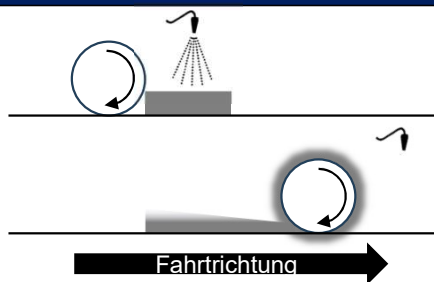
## Mehrkörper Simulation (MKS)



## Finite Elemente Methode (FEM)



## Spezialisierte Simulationsmethoden



# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörper Simulation (MKS)

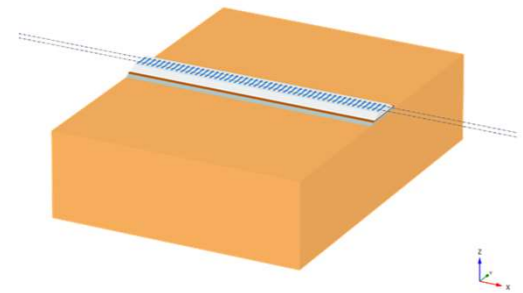
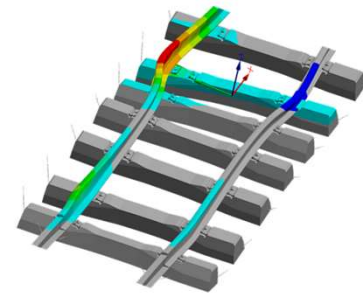
Bogenlaufverhalten



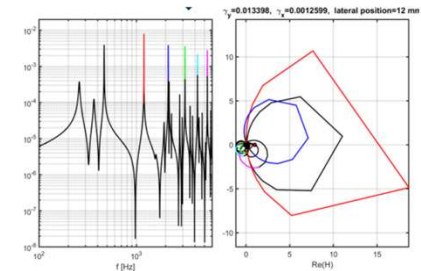
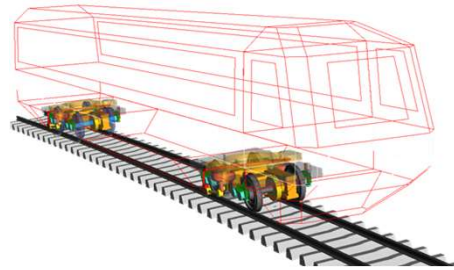
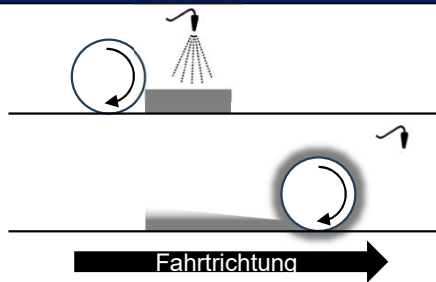
Statischer Verschleiß



## Finite Elemente Methode (FEM)



## Spezialisierte Simulationsmethoden



# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörper Simulation (MKS)

Bogenlaufverhalten



Statischer Verschleiß



## Finite Elemente Methode (FEM)

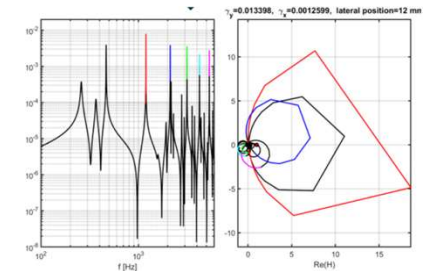
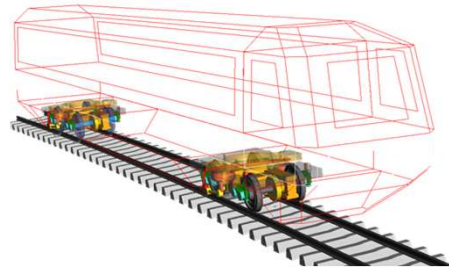
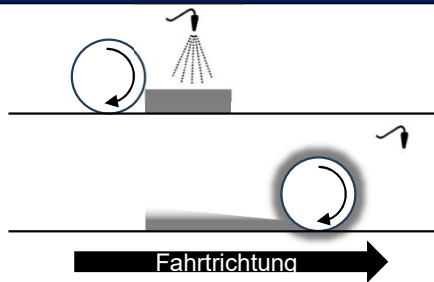
Nicht durch Schienenfahrkanten-Verschleiß bedingte Spurerweiterung



Untergrunduntersuchungen  
Wechselwirkung Oberbaukomponenten / Unterbau



## Spezialisierte Simulationsmethoden



# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörper Simulation (MKS)

Bogenlaufverhalten



Statischer Verschleiß



## Finite Elemente Methode (FEM)

Nicht durch Schienenfahrkanten-Verschleiß bedingte Spurerweiterung

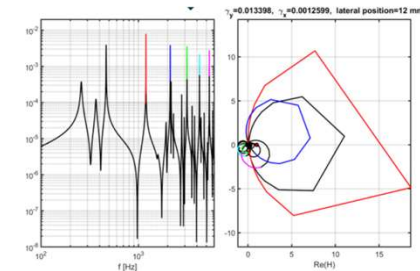
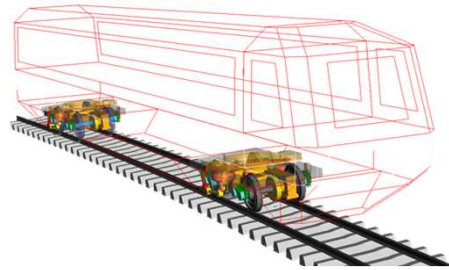


Untergrunduntersuchungen  
Wechselwirkung Oberbaukomponenten / Unterbau



## Spezialisierte Simulationsmethoden

Bewertung und Optimierung des Einsatzes von Konditionierungsmitteln unter realen Betriebs- und Umgebungsbedingungen.



# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörper Simulation (MKS)

Bogenlaufverhalten



Statischer Verschleiß



## Finite Elemente Methode (FEM)

Nicht durch Schienenfahrkanten-Verschleiß bedingte Spurerweiterung



Untergrunduntersuchungen  
Wechselwirkung Oberbaukomponenten / Unterbau

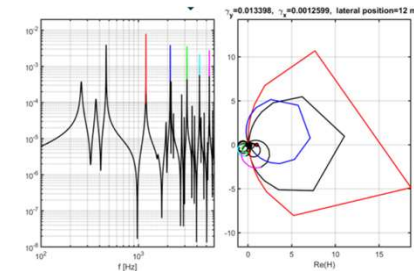


## Spezialisierte Simulationsmethoden

Bewertung und Optimierung des Einsatzes von Konditionierungsmitteln unter realen Betriebs- und Umgebungsbedingungen.



Schlupfwellen in engen Bögen  
Polygone auf den Rädern



# SIMULATIONSMETHODEN

## Mehrkörper Simulation (MKS)

Bogenlaufverhalten



Statischer Verschleiß



## Finite Elemente Methode (FEM)

Nicht durch Schienenfahrkanten-Verschleiß bedingte Spurerweiterung



Untergrunduntersuchungen  
Wechselwirkung Oberbaukomponenten / Unterbau



## Spezialisierte Simulationsmethoden

Bewertung und Optimierung des Einsatzes von Konditionierungsmitteln unter realen Betriebs- und Umgebungsbedingungen.



Schlupfwellen in engen Bögen  
Polygone auf den Rädern



Analyse von Maßnahmen zur Minderung von Kurvenkreischen in engen Bögen

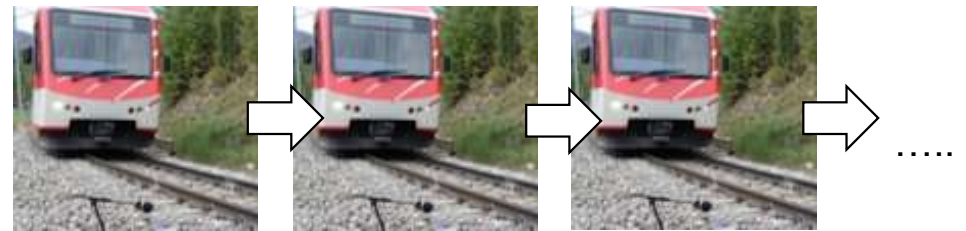


# SIMULATION / FELDVERSUCHE

## Warum simulieren?

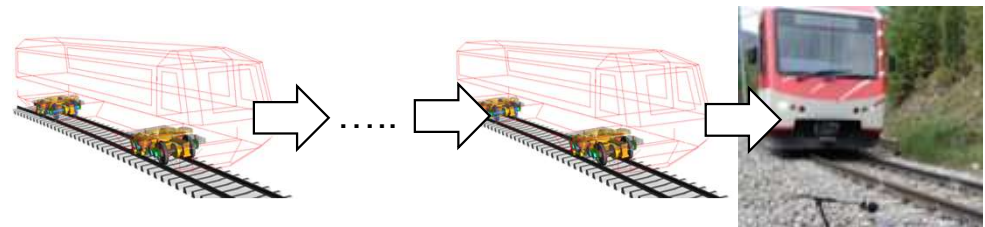
### *Feldversuche:*

- Reale Betriebsbedingungen nur eingeschränkt kontrollierbar
- Messbarkeit vieler Größen begrenzt
- Hoher Zeit und Kostenaufwand bei Parameter- und Variantenstudien



### *Simulation*

- Randbedingungen und Parameter gezielt einstellbar
- Vollständiger Zugriff auf Systemgrößen und Zustandsvariablen
- Effiziente Untersuchung von Varianten und Maßnahmen
- Reduzierter Kosten- und Zeitaufwand
- Sicherstellung der Übertragbarkeit zwischen Bahnen



# SIMULATION / FELDVERSUCHE

## Können Feldversuche durch Simulationen ersetzt werden?

*Simulationen ermöglichen, die Zahl der notwendigen Versuche erheblich zu reduzieren und so eine breite Palette an Maßnahmen zu untersuchen.*

*Feldversuche bleiben jedoch unverzichtbar, um Modelle zu kalibrieren, zu validieren. Zudem müssen die mittels Simulation ermittelten Maßnahmen vor der Umsetzung im Feld verifiziert werden.*

