

# Reduktion von Schwingung und Geräusch an Rad und Schiene - Modellentwicklung, Simulation und Optimierung

Károly Jálícs, István Németh, Godwin Ohenhen, Hans-Herwig Pribsch : Virtual Vehicle

Petra Weidinger: voestalpine Schienen GmbH

Gerald Schleiner: Siemens AG Österreich

SIEMENS

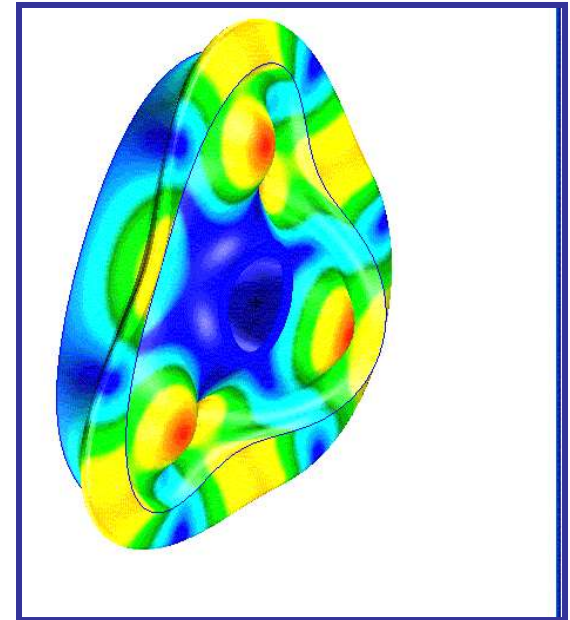
voestalpine

EINEN SCHRITT VORAUS.



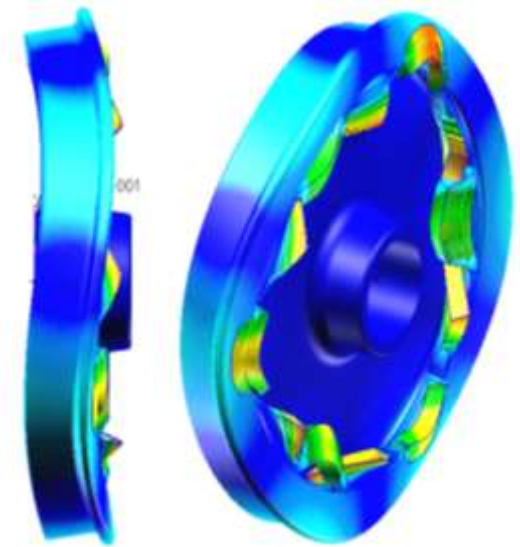
*K2 / K plus Competence Center* - Initiated by the Federal Ministry of Transport, Innovation & Technology (BMVIT) and the Federal Ministry of Economics & Labour (BWA). Funded by FFG, Land Steiermark and Steirische Wirtschaftsförderung (SFG)

- Motivation
- Akustisches Verhalten von Rad und Schiene
  - Anregungsspektren
  - Resonanzverhalten
- Parameteridentifikation von visko-elastischen Materialien
- Berechnungsbeispiele:
  - Radabsorber
  - Schienenabsorber
- Zusammenfassung
- Ausblick



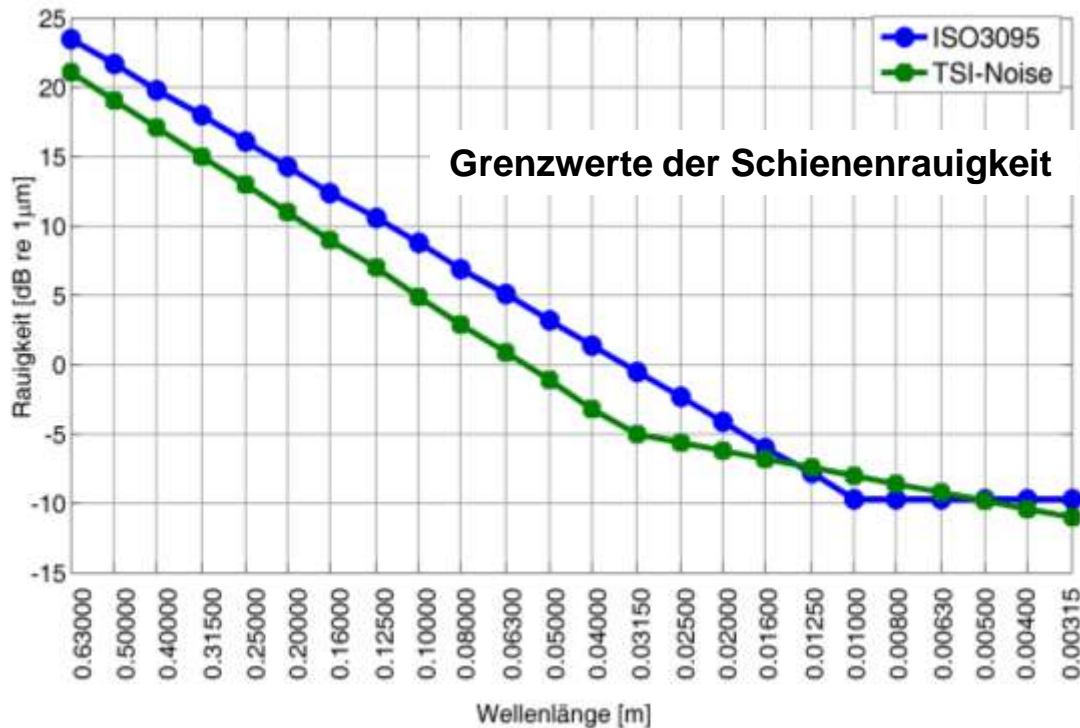
- ▶ **Erhöhung der Rauigkeit durch Fahr- und Bremsvorgänge**
- ▶ **Zunehmende Rauigkeit → Geräuschzunahme**
- ▶ **Konventionelle Lösung, wie z.B. Lärmschutzwand bedeutet einen sehr starken Eingriff in die Umgebung → Landschaft und Sicht**
- ▶ **Lösungen zur Geräuschreduktion am Ort der Entstehung → Rad- und Schienendämpfer**
- ▶ **Die virtuelle Auslegung solche Dämpfer muss noch detailliert untersucht werden → Möglichkeit der Auslegung/Optimierung in der Entwicklungsphase**
- ▶ **Zugänglichkeit von Materialdaten (Verlustfaktor, E-Modul) ist häufig nicht gegeben**

- ▶ **Rollgeräusch ist die dominante Geräuschquelle (in einem breiten Geschwindigkeitsbereich)**
- ▶ **Rauigkeit im akustischen Sinn:**
  - **Unebenheiten: 3 mm – 60 cm Wellenlänge**
  - **Schienenriffeln: 4 -12 cm Wellenlänge**
  - **Radunrundheit**
- ▶ **Anregungsspektren als Basis für die Absorberentwicklung**



## Anregungsspektren als Basis für die Absorberentwicklung

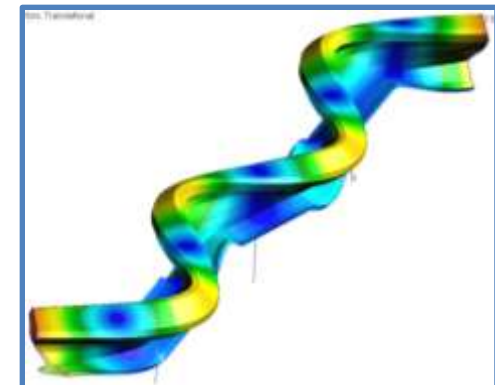
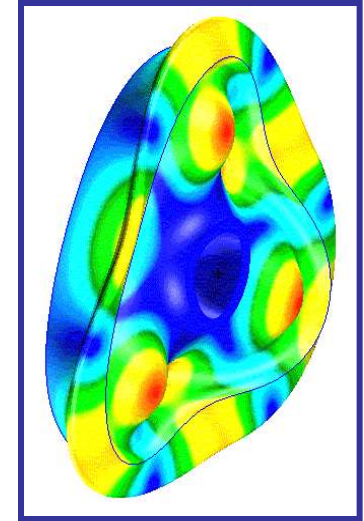
- Relevanz der einzelnen Frequenzbereiche → Gewichtung
- Input für die Simulation von Rad und Schiene





## Resonanzverhalten von Rad und Schiene

- **Hauptgeräuschquelle am Rad:**
  - Radiale und axiale Radmoden (R2, R3, R4, 1L2, 1L3,...)
  - Frequenzbereich: 1 – 3 kHz
- **Hauptgeräuschquelle an der Schiene**
  - Wellenförmige Schwingungen zwischen den Schwellen („pinned-pinned“)
  - Frequenzbereich: 700 Hz – 2 kHz
- **Ziel → Bedämpfung/Tilgung der Moden**



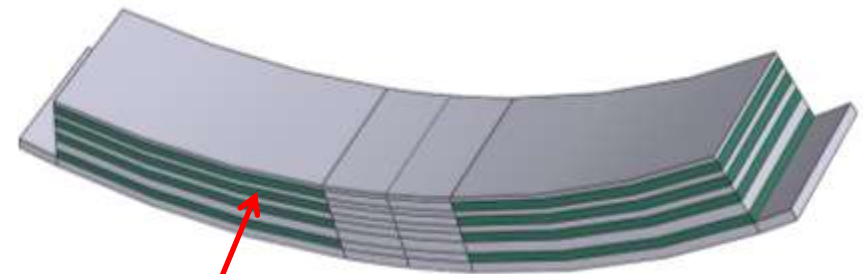
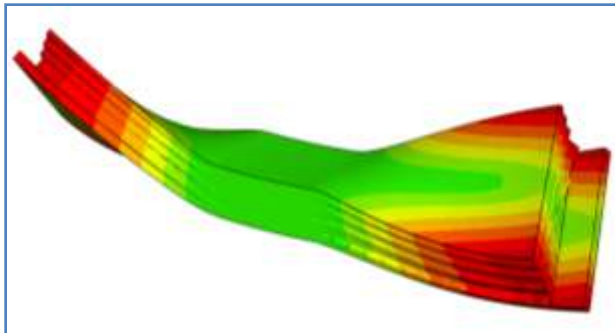
## Aufbau von Rad und Schienenabsorber

- Resonanzabsorber (Zungen, Block,)
- Constrained Layer
- 2 Massen – Tilger, ...



## Gemeinsamkeit aller Varianten

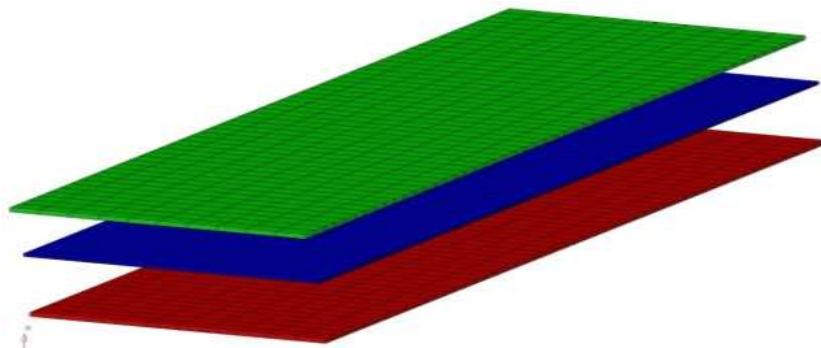
- Alle beinhalten visko-elastische Materialien



visko-elastische Zwischenlage

## Prinzipuntersuchungen mit Probekörpern

- Sandwichplatten
  - 12 Platten mit 12 verschiedene visko-elastische Materialien
  - Materialgruppe: Acryl, Epoxid, Polyurethan
  - FE – Berechnungsmodell und exp. Modalanalyse
- Ziel → Ermittlung von E-Modul und Verlustfaktor

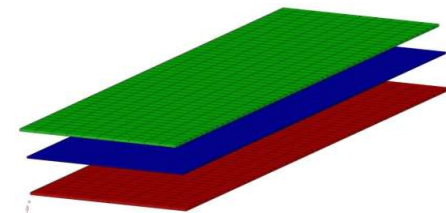




## Prinzipuntersuchungen mit Probekörpern: Bestimmung des E-Moduls der visko-elastischen Zwischenlage

- Bestimmung des E-Moduls der visko-elastischen Zwischenlage durch Optimierungsverfahren → Zielfunktion: die gemessenen Eigenfrequenzen und Eigenformen der Platten
- Gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung für alle 12 Proben
- E-Modul kann nahezu konstant bleiben

Mode Nr.	Frequenz		Diff (%)	Modeform
	Messung (Hz)	Berechnung (Hz)		
1	119	116	3,0	1. Biegung
2	324	317	2,3	2. Biegung
3	331	326	1,5	1. Torsion
4	611	615	0,6	3. Biegung
5	664	664	0,0	2. Torsion
6	974	1002	2,9	4. Biegung
7	1002	1025	2,3	3. Torsion



## Prinzipuntersuchungen mit Probekörpern: Möglichkeiten zur Bestimmung des Verlustfaktors der visko-elastischen Zwischenlage (frequenzabhängig)

- **Anpassung der Dämpfung mit dem Ansatz von Rayleigh:**
  - **Versuch + Simulation**
- **Modal Strain Energy:**
  - **Versuch + Simulation**
- **Oberst Methode / Center Impedance Methode:**
  - **nur Versuch**

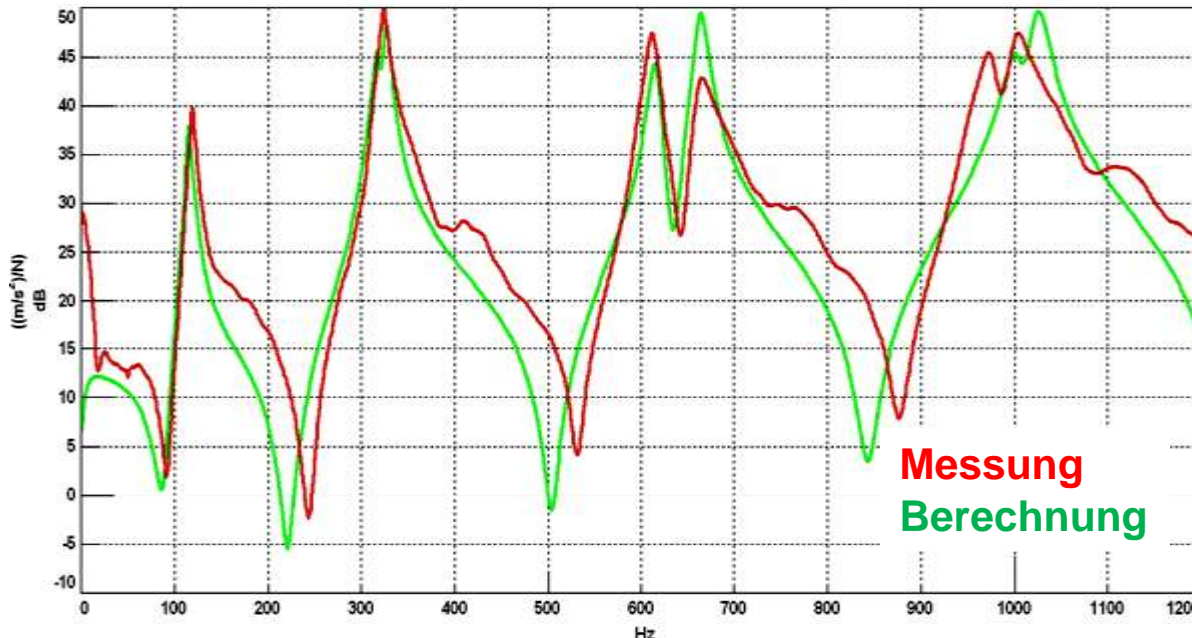
## Prinzipuntersuchungen mit Probekörpern: Möglichkeiten zur Bestimmung des Verlustfaktors der visko-elastischen Zwischenlage (frequenzabhängig)

- Rayleigh Dämpfung  $[D] = \alpha[M] + \beta[K]$ 
  - Annäherung der realen Dämpfung durch die  $\alpha$  und  $\beta$  Faktoren auf Basis der Modalen Dämpfungen von Gesamtstruktur (Sandwich)
- Methode der modalen Dehnungsenergien (MSE)  $\frac{\eta_{gesamt}}{\eta_{visko}} = \frac{SE_{visko}^i}{SE_{gesamt}^i}$ 
  - Berechnung der Dehnungsenergien im visko-elastischen Zwischenlage und in Gesamtstruktur mittels FE
- Oberst Methode (Modifiziert für Sandwichstrukturen)
  - Verhältnis von Verlust- und reversible Energie (mittels Geometriedaten und gemessenen Eigenfrequenzen)

$$\eta_{visko} = \frac{A\eta_{ges}}{(A - B) - 2(A - B)^2 - 2(A\eta_{ges})^2}$$

## Prinzipuntersuchungen mit Probekörpern: Bestimmung des Verlustfaktors der visko-elastischen Zwischenlage

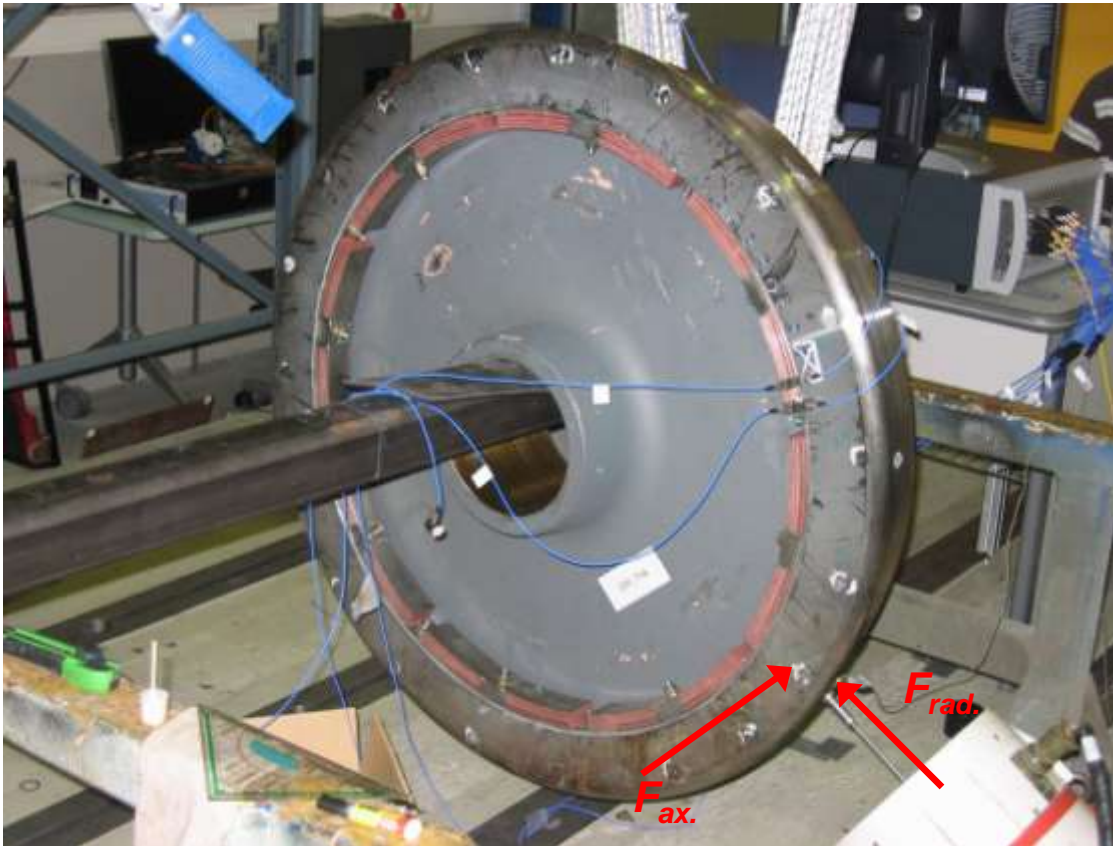
- Beste Resultate liefern: Rayleigh und Oberst Methode
- Gute Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Übertragungsfunktionen



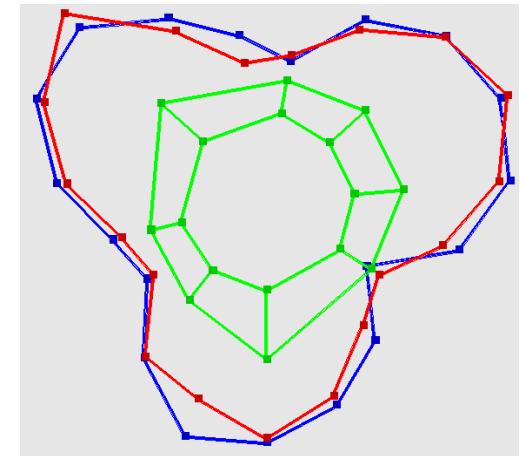


## Vergleichsmessungen: Rad mit BVV Absorber

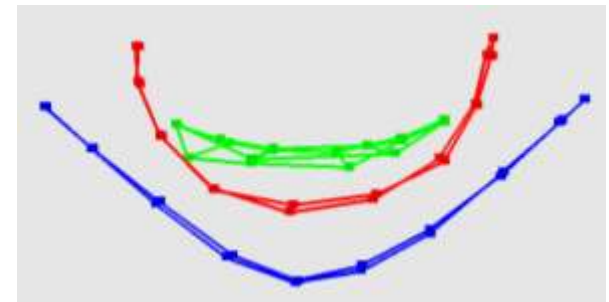
- experimentelle Modalanalyse



R3



0,L2



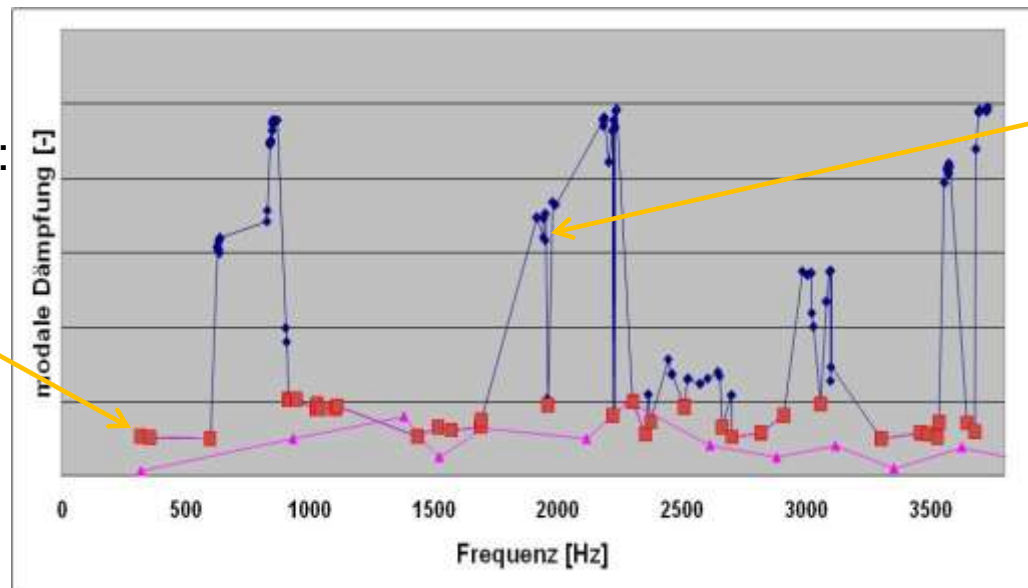


## FE Beispielberechnung: Rad mit Hornabsorber

### ○ Berechnung der Moden des Rades

- Die identifizierten Materialparameter fließen in die Berechnung hinein
- Auswahl der globalen Moden und Vergleich mit den gemessenen

globale Radmoden:  
z.B. 0L1

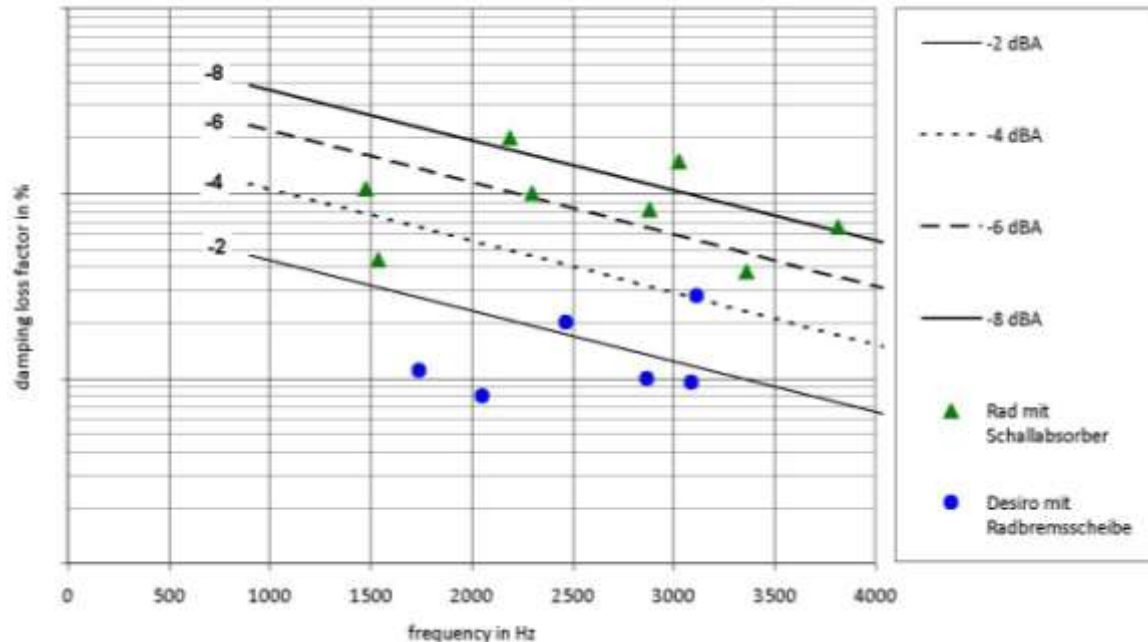


lokale Absorberschwingung

## Beurteilung des Rades (auch mit Absorber) bez. Geräuschabstrahlung

- Durch die modalen Dämpfungen der relevanten globalen Moden des Rades
- Die Geräuschreduktion kann abgeschätzt werden → relative Aussage

Geräuschpegel-Reduktion infolge von Erhöhung der modalen Dämpfung



## Vergleichsmessungen

- 2 m Schienenstück mit verschiedenen Randbedingungen
- experimentelle Modalanalyse mit/ohne Dämpfer

Schiene frei-frei aufgehängt

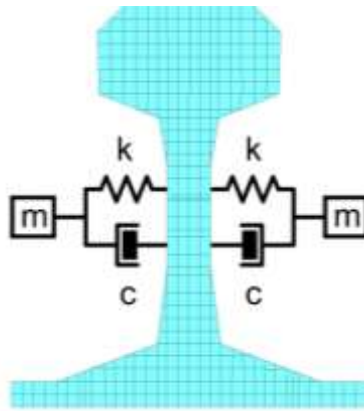


Schiene mit Schwellen am Boden geklemmt

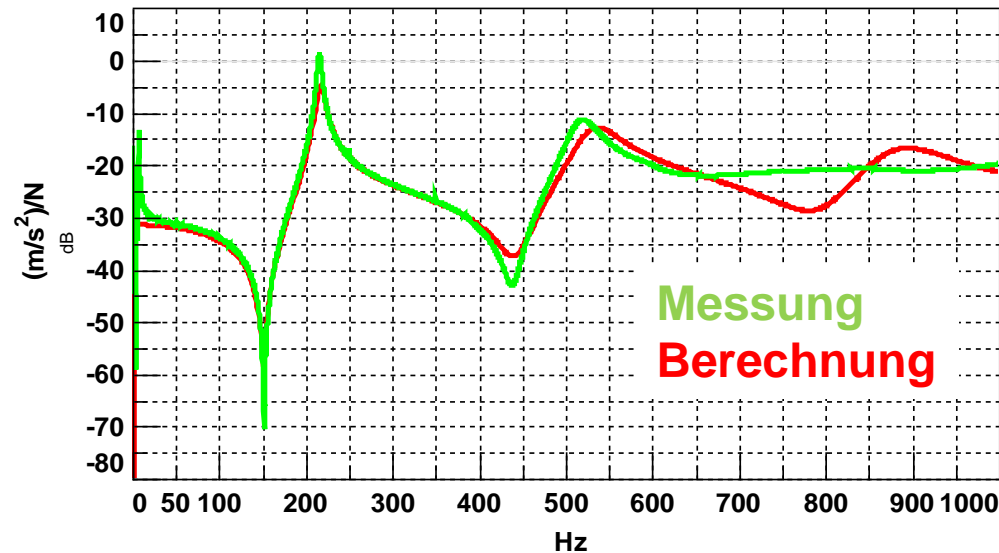


## Modellaufbau und Berechnungen der Scheine

- mit/ohne Dämpfer
- Dämpfer kommerziell erhältlich
- Modellaufbau mit FEM → 2 m langes Schienenstück (frei-frei)
- Die Steifigkeiten und Dämpfungen sind gut abgebildet



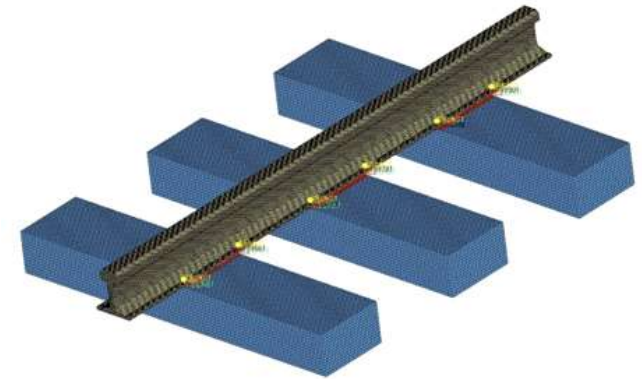
Schiene mit Dämpfer  
schematisch dargestellt



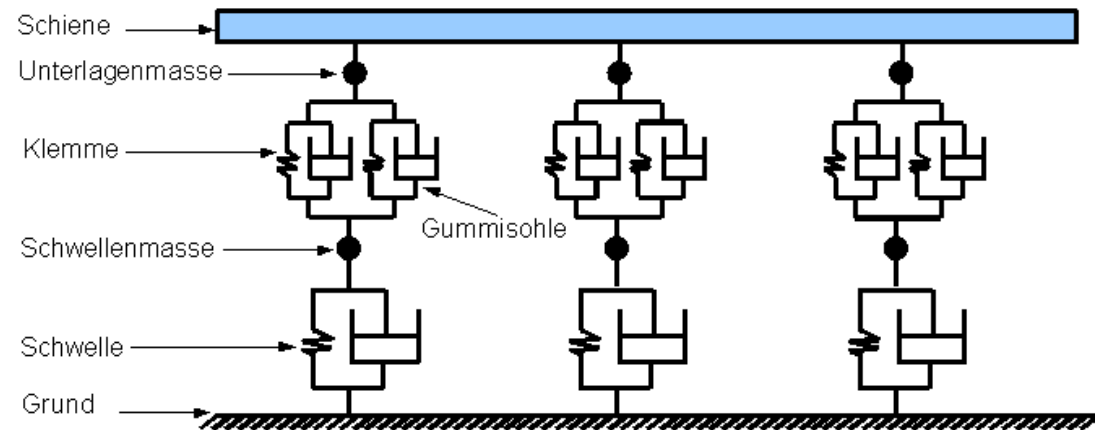


## Modellaufbau und Berechnungen

- mit und ohne Dämpfer
- Modellaufbau mit FEM
  - 2 m langes Schienenstück
  - Berücksichtigung von Klemme, Sohle und Schwellen
  - kein Schotterbett



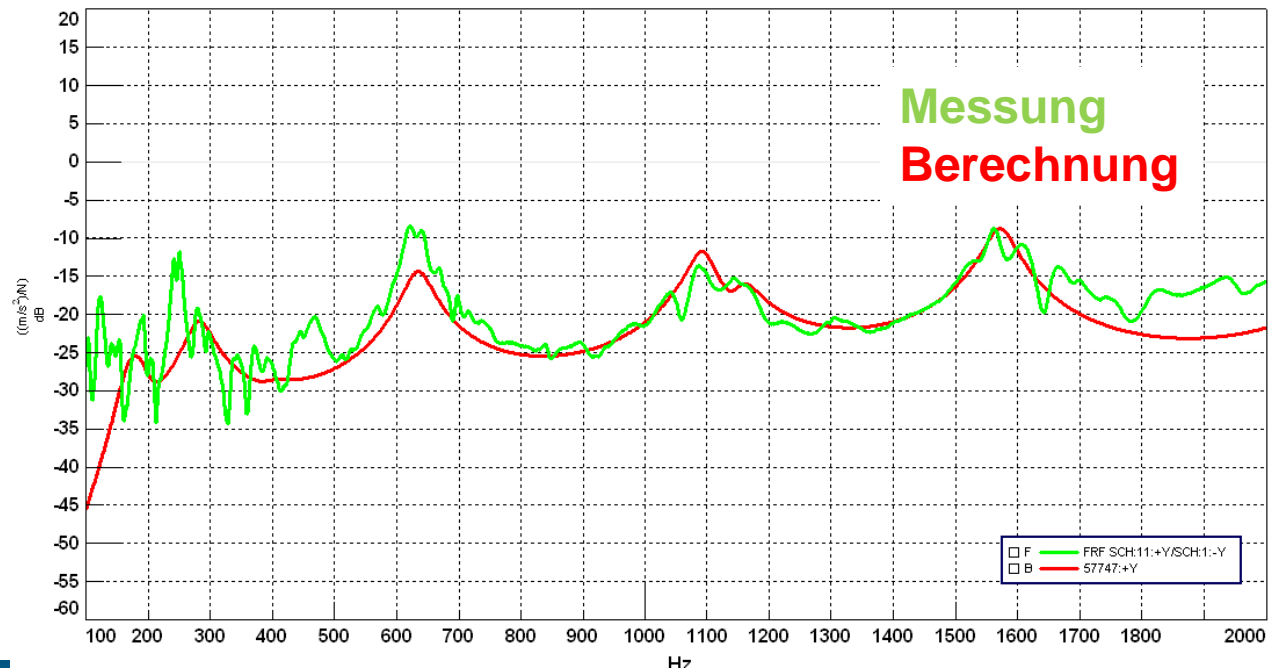
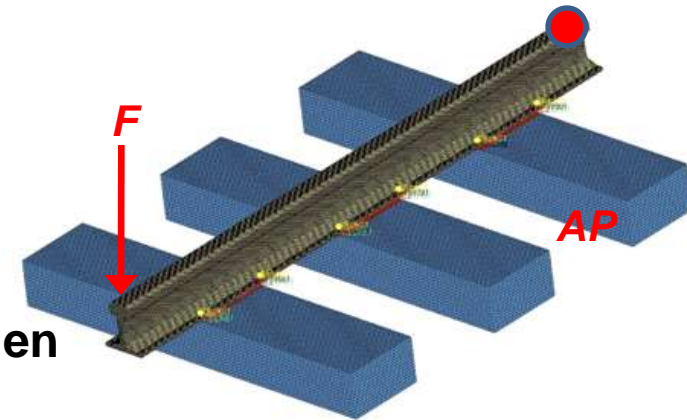
Ausschnitt: 2m Schiene ohne Dämpfer auf Schwellen (nur eine Seite)





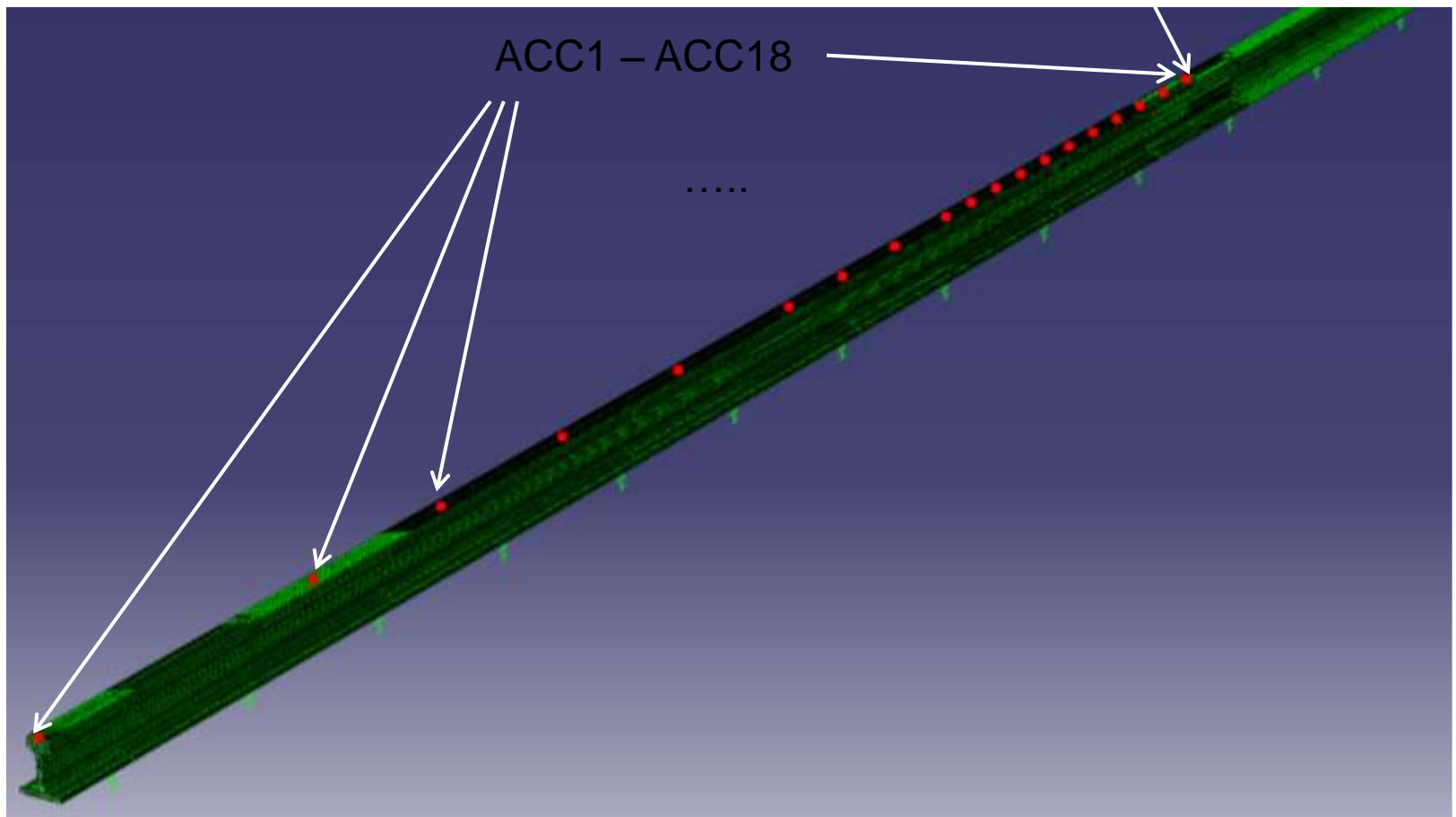
## Modellaufbau und Berechnungen

- Messung-Rechnung Vergleich
- Beispiel: Schiene ohne Dämpfer auf Schwellen
- Die Steifigkeiten und Dämpfungen sind insgesamt gut abgebildet



## Modellaufbau und Berechnungen

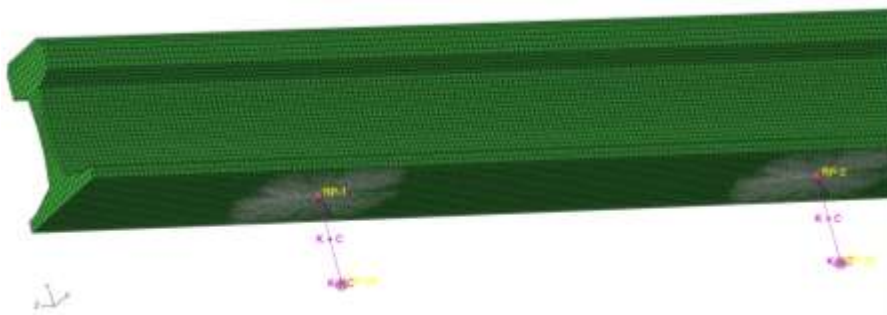
- Berechnung der TDR (in Anlehnung auf TSI)



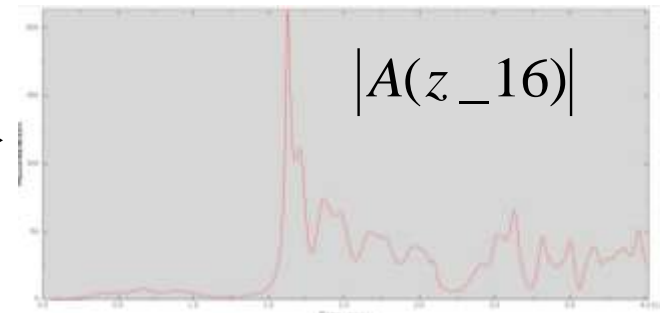
## Modellaufbau und Berechnungen

### ○ Berechnung der TDR (in Anlehnung auf TSI)

Modell



FRF – Beschleunigungen



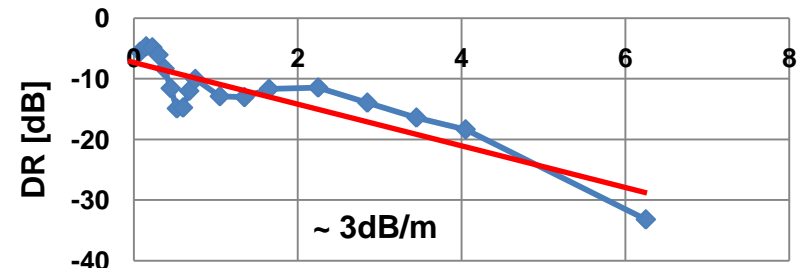
Terzbandfilter

TDR

TDR in dB/m

$$\frac{1}{2\beta} = \int_0^\infty \frac{|A(z)|^2}{|A(0)|^2} dz \approx \sum_{z_i=0}^{z_{\max}} \frac{|A(z_i)|^2}{|A(0)|^2} \Delta z_i \longrightarrow \Delta \approx \frac{4.343 |A(0)|^2}{\sum_{z_i=0}^{z_{\max}} |A(z_i)|^2 \Delta z_i}$$

TDR am 12 m Schienenstück bei 1000 Hz



- ▶ Die Identifikation der Materialparametern von visko-elastischen Materialien - wie E-Modul und Verlustfaktor - ist mit den dargestellten Methoden möglich
- ▶ Die ermittelten Materialparameter liefern gute Ergebnisse bei den Prinzipproben → Eigenfrequenzen und modale Dämpfungen
- ▶ Die Materialdaten sind auch für Absorber von Rad und Schiene verwendbar
- ▶ Die berechneten modalen Dämpfungen des Rades mit Absorber nähern die gemessenen gut an → Modale Dämpfung als Bewertungskriterium für die Geräuschabstrahlung
- ▶ Schiene mit/ohne Absorber und Schiene auf Schwellen zeigen gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation → Parameterverfeinerung ist jedoch noch notwendig

- ▶ **Weiterverfolgung der Parameteridentifikation**
  - **Erstellung einer Materialdatenbank**
  - **Statistische Untersuchungen (Erhöhung der Anzahl der Proben)**
- ▶ **Weitere Verbesserungen am Model Schiene mit/ohne Absorber auf Schwellen**
- ▶ **Berechnung von TDR nach TSI und auch auf Basis der modalen Dämpfung**
- ▶ **Entwicklung und Optimierung neuer Absorber für das Rad und für die Schiene**