

Grundlagen der Schienenfahrzeugtechnik



05 Komfort

Dr.-Ing. Michael Karatas

Siemens Mobility GmbH
Krefeld-Uerdingen

michael.karatas@siemens.com



Gliederung



Komfort

- Schwingungskomfort – Grundbegriffe
- Schwingungskomfort – Systemverhalten
- Akustikkomfort – Einführung
- Akustikkomfort – Lärmmanagement
- Akustikkomfort – Prognose

Überblick



- I. Einführung
- II. Zugfördermittel
- III. Wagenkasten
- IV. Fahrtechnik / Systemkinematik
- V. Komfort**
- VI. Antrieb
- VII. Bremse

Gliederung



Komfort

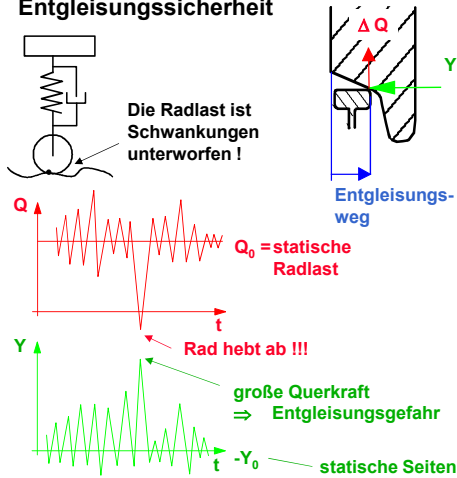
- Schwingungskomfort – Grundbegriffe
- Schwingungskomfort – Systemverhalten
- Akustikkomfort – Einführung
- Akustikkomfort – Lärmmanagement
- Akustikkomfort – Prognose

5.1 Schwingungskomfort - Grundbegriffe

Beurteilungskriterien für Fahrzeug-Schwingung

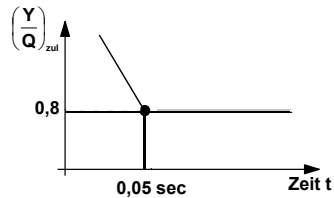


Entgleisungssicherheit



$$\Rightarrow \text{Entgleisungssicherheit} \approx \left(\frac{Y}{Q} \right)_{\text{tats}} \leq \left[\frac{Y}{Q} \right]_{\text{zul}}$$

Die Zeit spielt allerdings auch eine Rolle. Kürzeste Vergrößerungen von $\frac{Y}{Q}$ wirken sich nicht aus.



Entgleisung nach UIC 518, wenn $\frac{Y_{\max}}{Q_{\min}} > 0,8$



5.1 Schwingungskomfort - Grundbegriffe

Weitere Effekte durch Schwingungen



Weitere Effekte durch Schwingungen:

Bauteilbeanspruchungen:

$$\Delta Q \Rightarrow \text{Werkstoffspannung}$$

$$Y \Rightarrow \text{"}$$

Bauteilverschleiß:

Verschleiß: Oberflächenabtrag von Bauteilen, die sich in Anwesenheit von Reibung und Kräften relativ zueinander bewegen.

$$P = F \cdot w$$

Reibleistung = Kraft · Relativgeschwindigkeit

$$p = p(t) \text{ mit } F(t) \text{ und } w(t); \quad \text{Verschleiß} \approx \int_0^t p(t) dt$$

Energieverbrauch:

beim Schienenfahrzeug nicht zu verachten!

Laufunruhewiderstände können in die gleichen Größenordnungen kommen wie Rollwiderstände.

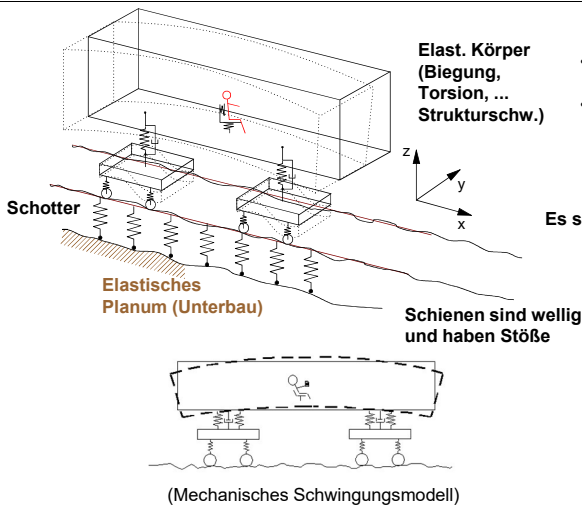
(Finden sich wieder im geschwindigkeitsproportionalen Summanden der Fahrwiderstandsformel)

Zentrales Kriterium bzgl. der Schwingungen ist aber der Fahrkomfort!



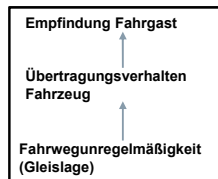
5.1 Schwingungskomfort - Grundbegriffe

Schwingungssystem Schienenfahrzeuge



- Das Schienenfahrzeug ist ein Mehrkörpersystem (MKS).
- Die resultierende Schwingung ist die Überlagerung von Festkörper- und Strukturschwingungen.

Es schwingt immer das ganze System!



Norm UIC 513 / EN 12299
Komfortbeurteilung



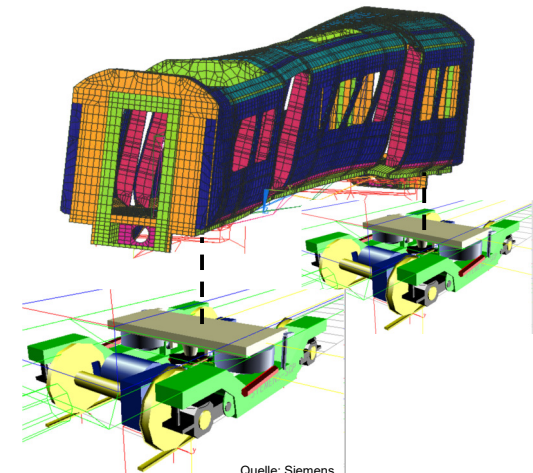
5.1 Schwingungskomfort - Grundbegriffe

Schwingungssystem Schienenfahrzeuge



elastischer Körper

Mehrkörpersystem



Quelle: Siemens



5.1 Schwingungskomfort - Grundbegriffe

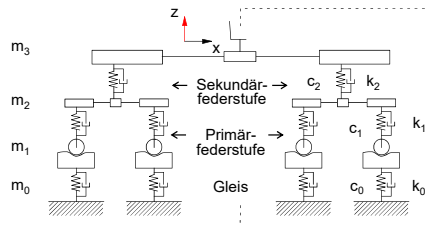
Modellbildung



Grundregel: Modell so einfach wie möglich machen, so dass aber der zu untersuchende Effekt beobachtet werden kann.

Betrachtungen in bestimmten Achsen:

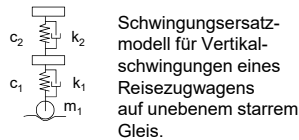
Z - Ersatzmodell (Vertikal)



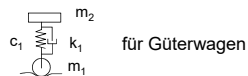
- Indizes:
- 0 - Gleis
 - 1 - Radsatz
 - 2 - Drehgestell
 - 3 - Wagenkasten

Wenn die Nickbewegung des Kastens nicht interessiert, reicht die Beschränkung auf eine Hälfte.

Noch ein einfacheres Modell:



Schwingungersatzmodell für Vertikalschwingungen eines Reisezugwagens auf unebenem starrem Gleis.



für Güterwagen

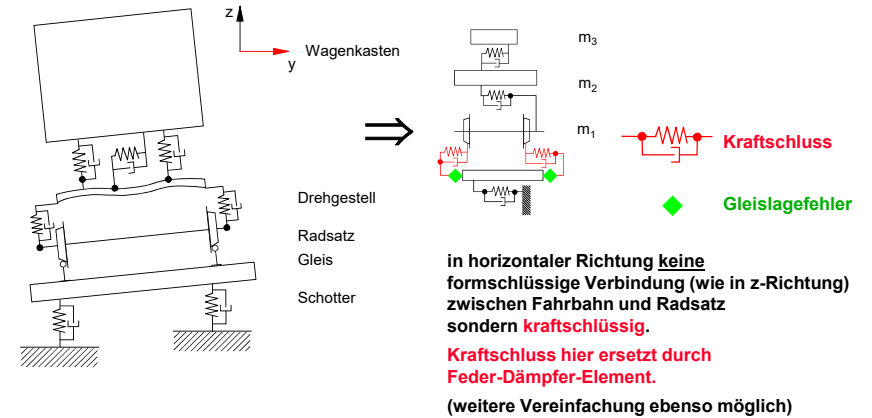


5.1 Schwingungskomfort - Grundbegriffe

Modellbildung



Y - Ersatzmodell (Horizontal)

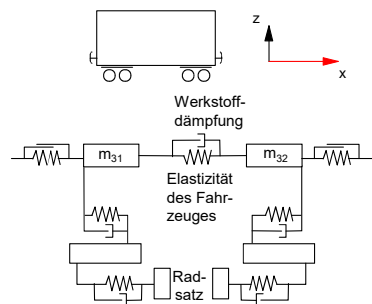


5.1 Schwingungskomfort - Grundbegriffe

Modellbildung

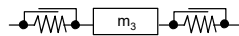


X - Ersatzmodell (Längsrichtung)



(Die kraftschlüssige Verbindung Rad-Schiene ist hier bewusst ausgespart (Schlupf etc ...)
 Hier interessiert nur das Schwingungsverhalten des Wagens in sich.)

Extreme Reduzierung:



Abstraktion führt zu:

- Verlust an Genauigkeit
- Gewinn an Verständlichkeit (Erkennen des Wesentlichen)



5.1 Schwingungskomfort - Grundbegriffe

Fahrkomfort

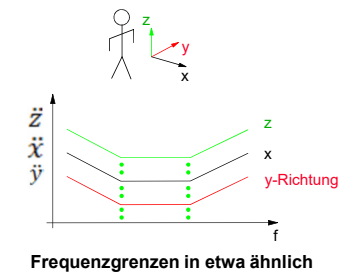
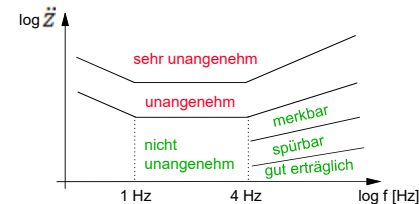


Versuchsaufbau prinzipiell:

Schwingung ist gekennzeichnet durch Amplitude und Frequenz.

Ergebnis der Versuche:
 Das Schwingempfinden des Menschen hängt von der Schwingbeschleunigung \ddot{z} ab!

Prinzipielles Ergebnis*:



Ursache: „Magenaufhängung“ hat Eigenfrequenzen von ~ 1 bis 4 Hz
 andere Grenzen: -Gehirn bei höchsten Frequenzen
 -Gleichgewichtsorgan (Seekrankheit) bei Neigetechnik !

*gilt für sitzende und stehende Personen

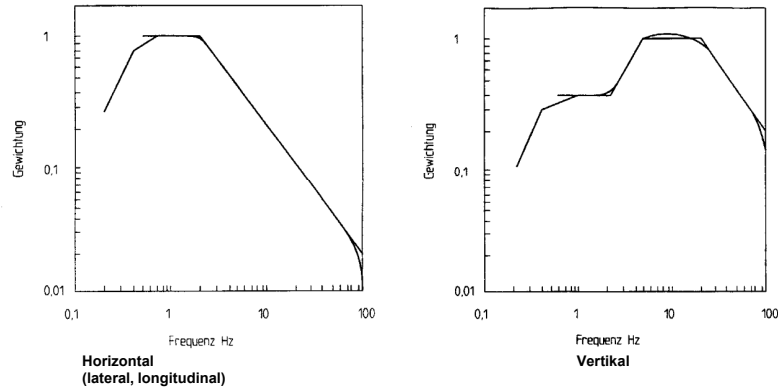


5.1 Schwingungskomfort - Grundbegriffe Fahrkomfort

Fahrkomfort = Empfindung von Beschleunigungen

Frequenzbewertungsfunktionen nach menschlichem Empfinden

UIC 513 / EN 12299



5.1 Schwingungskomfort - Grundbegriffe Fahrkomfort

Verfahren:

- W_z - Wertziffer (DB) 1942 Dr. Sperling
- Ermüdungsdauerverfahren (SNCF)
- Riding Comfort Coefficient (Japan)
- Ride Index
- ISO-Kriterien

UIC: Internationaler Eisenbahnverband
ORE: Office de Recherches et d'Essais (ersetzt durch ERRI)
ERRI: European Railway Research Institute

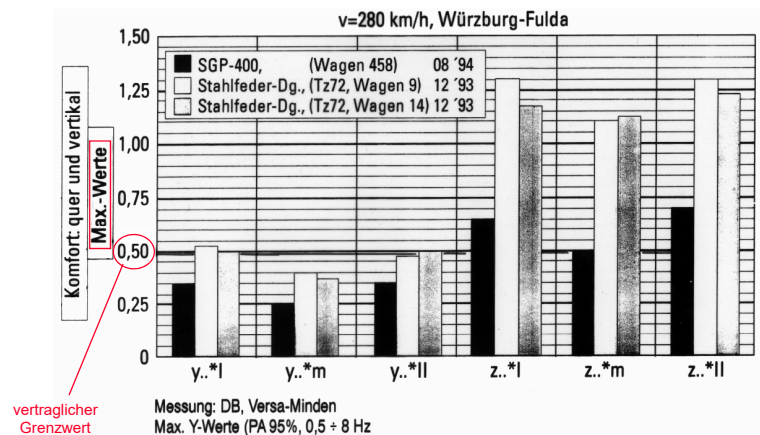
Oft vertragliche Vereinbarungen zwischen Kunde und Fahrzeughersteller !

Die wichtigsten Normen im europäischen Bereich

- UIC 513 (Fahrkomfort)
- EN 12299 Fahrkomfort für Fahrgäste
- VDI 2057 „Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen“, Mai 1987
- ORE Bericht B 153 RP8 „Mechanische Schwingungen, Messung und Analyse der Schwingungen, denen Reisende und das Fahrpersonal in Schienenfahrzeugen ausgesetzt sind“ 09/86

5.1 Schwingungskomfort - Grundbegriffe Beispiel Fahrkomfortmessung

SGP-400 Streckenversuche Beispiel aus ICE2-Entwicklung



Gliederung

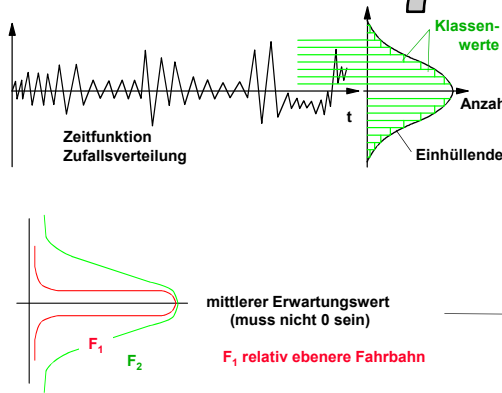
Komfort

- Schwingungskomfort – Grundbegriffe
- Schwingungskomfort – Systemverhalten
- Akustikkomfort – Einführung
- Akustikkomfort – Lärmmanagement
- Akustikkomfort – Prognose

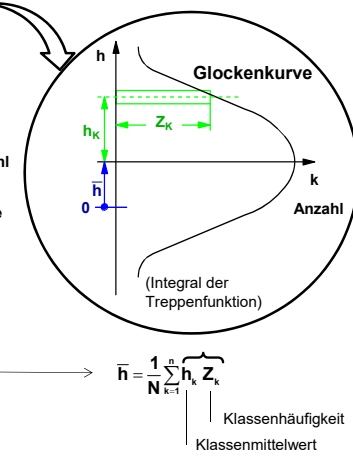
5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten Fahrbahnunebenheiten

Zeitverhalten:

Es gibt keine Sinusfahrbahnen!



Amplitudenverhalten:



5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten Fahrbahnunebenheiten

Amplitudenverhalten

Wahrscheinlichkeitsrechnung

In der Technik und Natur findet man oft Messwerte, die annähernd entsprechend der Gauß'schen Normalverteilung streuen. Die Standardabweichung σ beschreibt die „Breite“ der Glockenkurve.

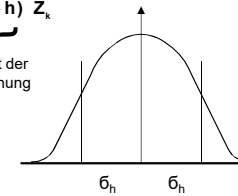
Es gibt verschiedene Typen von „Glocken“. Bei der Gauß'schen Normalverteilung gilt:

	δ_h	liegen	68,3%	aller Werte
innerhalb	δ_h	liegen	31,7%	aller Werte
außerhalb	$2 \delta_h$	liegen	4,6%	aller Werte
innerhalb	$2,58 \delta_h$	liegen	99,4%	aller Werte
außerhalb	$2,58 \delta_h$	liegen	0,6%	aller Werte
innerhalb	$3 \delta_h$	liegen	99,7%	aller Werte
außerhalb	$3 \delta_h$	liegen	0,3%	aller Werte
innerhalb	$3,29 \delta_h$	liegen	99,9%	aller Werte
außerhalb	$3,29 \delta_h$	liegen	0,1%	aller Werte

$$\text{Varianz: } \sigma_h^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n (h_k - \bar{h})^2 Z_k$$

mittlere quadratische Abweichung

Quadrat der Abweichung

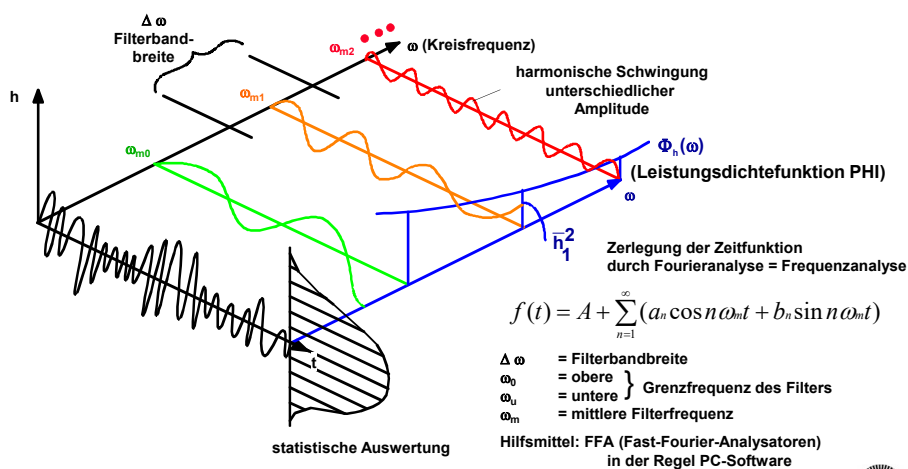


- Innerhalb $\pm \sigma$ liegen 2/3 aller Messwerte.
- Bei σ liegen die Wendepunkte der Kurve
- Nebenbei: die Methode SixSigma im Qualitätswesen bezieht sich auf diese Standardabweichung. Die Toleranzgrenze soll 6σ vom Mittelwert entfernt sein.
- Der IQ ist beispielsweise auch normalverteilt mit 100 als Mittelwert

- \bar{h} = Mittelwert
- k = (Amplituden)- Klasse
- h_k = Klassenmittelwert
- Z_k = Klassenhäufigkeit
- n = Anzahl der Klassen
- N = Anzahl der Ereignisse $N = \sum_{k=1}^n Z_k$

5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten Fahrbahnunebenheiten

Frequenzverhalten



$$f(t) = A + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

- $\Delta \omega$ = Filterbandbreite
- ω_0 = obere } Grenzfrequenz des Filters
- ω_u = untere }
- ω_m = mittlere Filterfrequenz

Hilfsmittel: FFA (Fast-Fourier-Analysatoren) in der Regel PC-Software

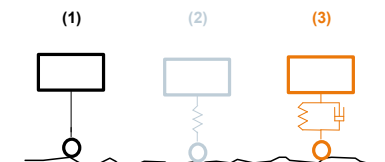
5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten Fahrzeug-Übertragungsverhalten

Einfache Fahrzeugmodelle

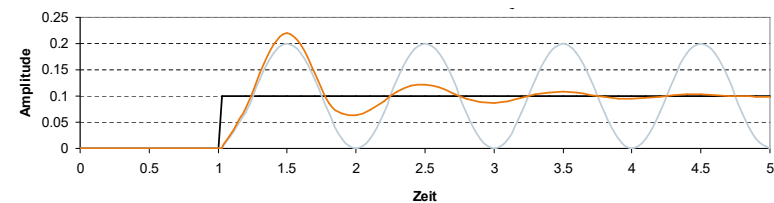
Sprungantwort

- Fahrbahn; (1) ungefedert
- (2) gefedert; ungedämpft
- (3) gefedert; gedämpft

Zeitbereich



Einfluss der Federung und Dämpfung



5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten Fahrzeug-Übertragungsverhalten

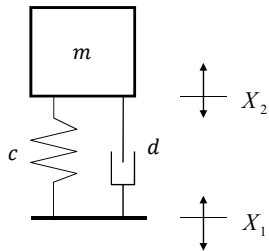
Frequenzbereich

Einfache Fahrzeugmodelle

Ein-Massen-Schwinger

s - Laplacevariable $s = j\omega$

Übertragungsfunktion



$$X_2(ms^2 + ds + c) = X_1(ds + c)$$

$$\frac{X_2}{X_1} = \frac{\frac{d}{m}s + \omega_0^2}{s^2 + \frac{d}{m}s + \omega_0^2} = \frac{2D\omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + 2D\omega_0 s + \omega_0^2}$$

mit: $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$; $D = \frac{d}{2m\omega_0}$

$$\frac{X_2}{X_1}(j\omega^*) = \frac{2Dj\omega^* + 1}{-(\omega^*)^2 + 2Dj\omega^* + 1}$$

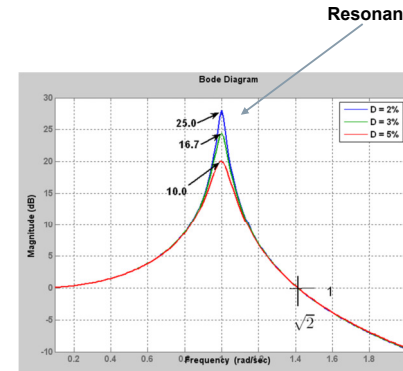
mit: $\omega^* = \frac{\omega}{\omega_0}$



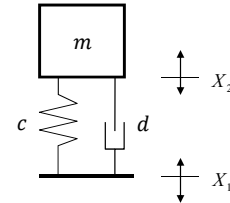
5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten Fahrzeug-Übertragungsverhalten

Frequenzbereich

Resonanz und Dämpfung



1-Massen-Schwinger



$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$; $D = \frac{d}{2m\omega_0}$

$$\frac{X_2}{X_1}(j\omega^*) = \frac{2Dj\omega^* + 1}{-(\omega^*)^2 + 2Dj\omega^* + 1}; \quad \omega^* = \frac{\omega}{\omega_0}$$



5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten Fahrzeug-Übertragungsverhalten

Frequenzbereich

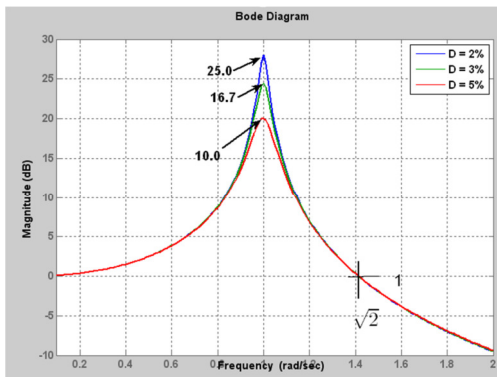
Themen der Fahrkomfortauslegung

Dämpfung

- Strukturdynamik ist leider gering gedämpft (D = 2%)
- Hohe Dämpfung von Sekundärdämpfern erhöht Übertragung im überkritischen Bereich jenseits Eigenfrequenz

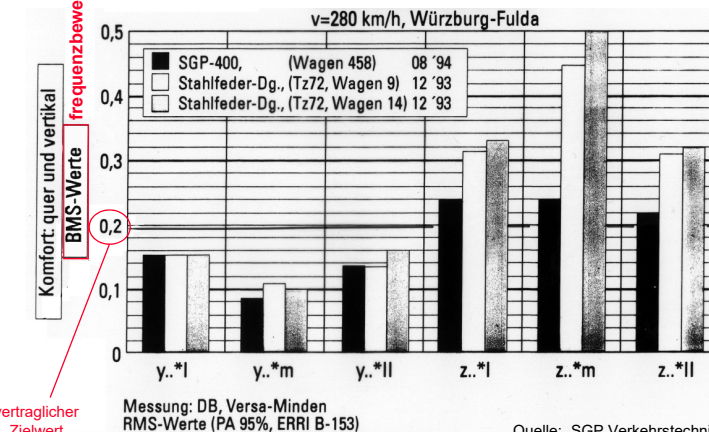
Entkopplung

- Luftfeder (starke Entkopplung da niedrige Steifigkeit / Tauchfrequenz Wagenkasten und geringe Dämpfung)
- Anordnung von Dämpfern z.B. zu Nickpol DG
- Frequenzabstand (Resonanz) z.B. DG-Tauchen / WK-Biegung



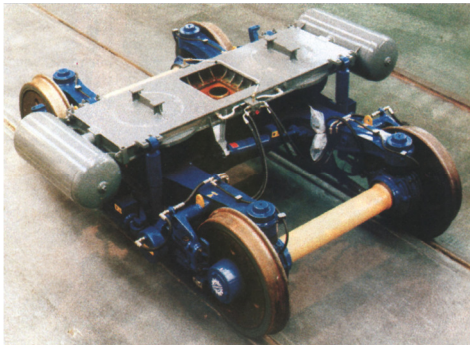
5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten Beispiel Fahrkomfortmessung (Frequenz)

SGP-400 Streckenfahrversuche Beispiel aus ICE2-Entwicklung

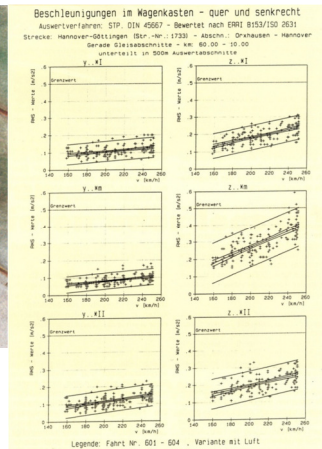


5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten

Beispiel aus Entwicklungsbericht der DB AG



Leichtbaudreihgestell B 5003 (3,3t)
der Firma Bombardier-Talbot



RMS- Werte des Drehgestells B 5003 unter
Nahverkehrswagen Horizontal- quer und vertikal

Quelle: ETR 48 (1999), H.9: Dr. von Madayski;
Fahrwerktechnik - im Zusammenwirken mit
dem Fahrzeug und dem Fahrzeugkasten

5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten

Mehrkörpersimulation (MKS)

Aufgabenstellungen für die Mehrkörpersimulation

- Stabilitätsuntersuchungen
- Analyse der Fahrzeugbewegungen
- Komfortberechnungen
- Simulation im Vergleich zu Versuchen

Hilfsmittel: Programmsysteme wie SIMPACK, ADAMS

5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten

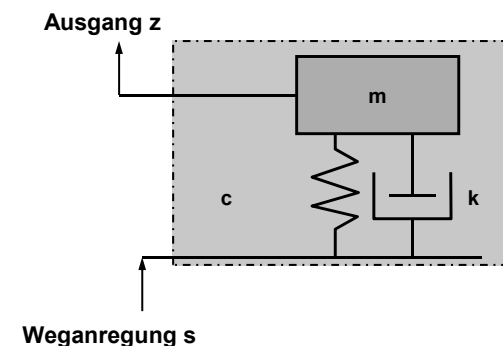
Statische und dynamische Analyse

Methoden der statischen und dynamischen Analyse

- **Statische Analyse**
 - Nominelle Schnittkräfte für eine gegebene Lage des MKS
 - Berechnung der Gleichgewichtslage des MKS
- **Dynamische Analyse**
 - Eigenwerte, Eigenvektoren, Amplitudenfrequenzgänge für lineare Systeme
 - Spektrale Leistungsdichten bei stochastischen Anregungen
 - Integration im Zeitbereich für nichtlineare Modelle

5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten

Möglichkeit der Modellierung (I)



Ausgänge

- Wege
- Geschwindigkeiten
- Beschleunigungen
- Kräfte/Momente
- usw.

Eingänge

- Wege
- Kräfte/Momente
- usw.

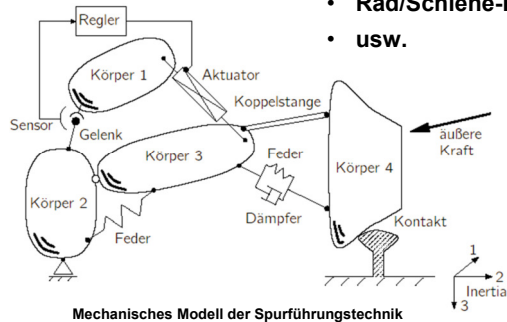
5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten Möglichkeit der Modellierung (II)

Körper

- starre Körper
- Rotoren
- elastische Körper
- usw.

Verbindungen

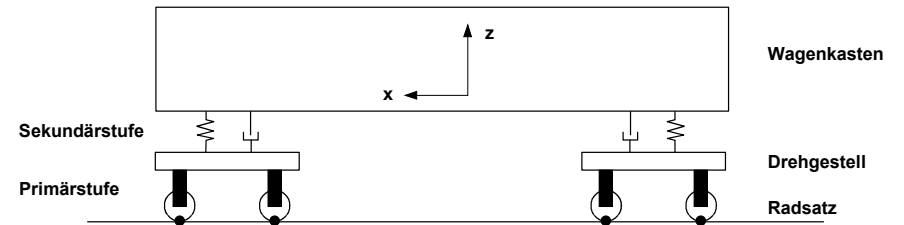
- Gelenke
- Federn
- Dämpfer
- Rad/Schiene-Koppelemente
- usw.



Mechanisches Modell der Spurführungstechnik

5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten Schwingungstechnisches Ersatzsystem

Übersicht über das schwingungstechnische Ersatzsystem für den Bvmz - ICE - Mittelwagen



Massen

Wagenkastenmasse	1 x 38.802 kg
Drehgestellmasse	2 x 3.360 kg
Radsatzmasse	4 x 1.760 kg

Primärstufe Vertikalfederung	8 x $1,033 \cdot 10^6 \text{N/m}$
Querfederung	8 x $6,25 \cdot 10^6 \text{N/m}$
Vertikaldämpfung	8 x $1,2 \cdot 10^4 \text{Nsec/m}$

- **Rad/Schiene - Verbindung**
- Radprofil S1002
- Schienenprofil UIC 60

Sekundärstufe Vertikalfederung	4 x $7,73 \cdot 10^5 \text{N/m}$
Querfederung	4 x $3,6 \cdot 10^5 \text{N/m}$
Vertikaldämpfung	4 x $2,0 \cdot 10^4 \text{Nsec/m}$

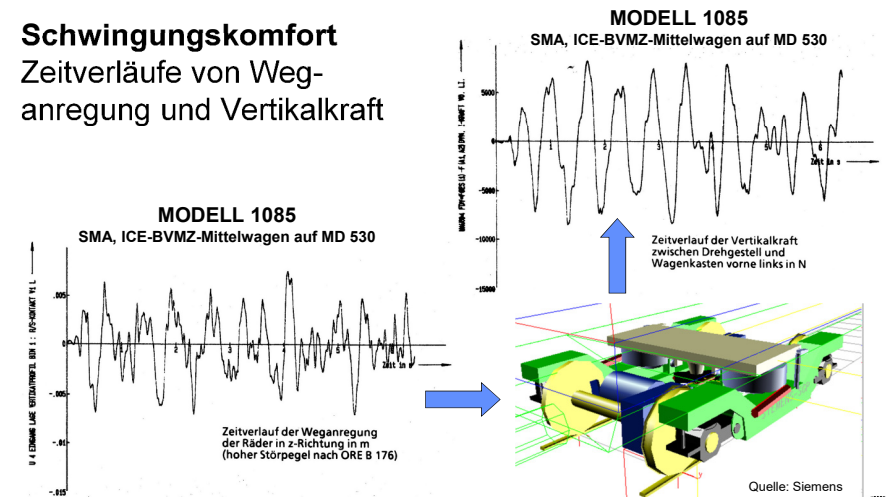
5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten Auswahl von Eigenfrequenzen und Eigenformen

Auswahl von Eigenfrequenzen und Eigenformen des
Bvmz - ICE - Mittelwagens auf MD 530

Beschreibung der Eigenform	Frequenz im MKS-Modell	Frequenz im FE-Modell
Gleichphasiges Wanken von Wagenkasten und Drehgestellen	0,68 Hz	0,73 Hz
Wenden des Wagenkastens	1,14 Hz	1,16 Hz
Gleichphasiges Tauchen des Wagenkastens und der Drehgestelle	1,20 Hz	1,16 Hz
Gegenphasiges Wanken von Wagenkasten und Drehgestellen	1,22 Hz	1,19 Hz
Nicken des Wagenkastens, Gegenphasiges Tauchen der Drehgestelle	1,47 Hz	1,43 Hz
Gleichphasiges Tauchen der Drehgestelle, gegenphasig zum Wagenkasten	6,59 Hz	6,43 Hz
Gegenphasiges Tauchen der Drehgestelle	6,61 Hz	6,47 Hz
Wanken der Drehgestelle, Wagenkasten bleibt in Ruhe	≈ 11,5 Hz	≈ 12,0 Hz

5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten Zeitverlauf

Schwingungskomfort
Zeitverläufe von Weg-
anregung und Vertikalkraft

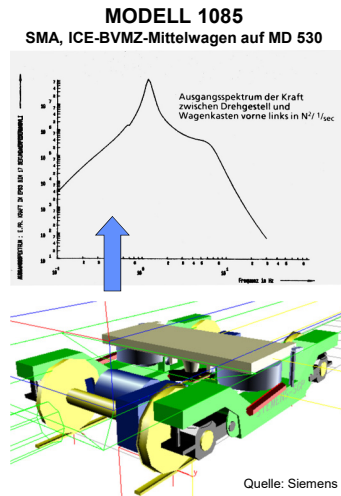
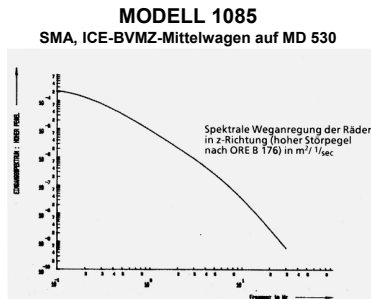


5.2 Schwingungskomfort - Systemverhalten

Spektralverlauf

Schwingungskomfort

Spektrale Verläufe von Weg-
anregung und Vertikalkraft



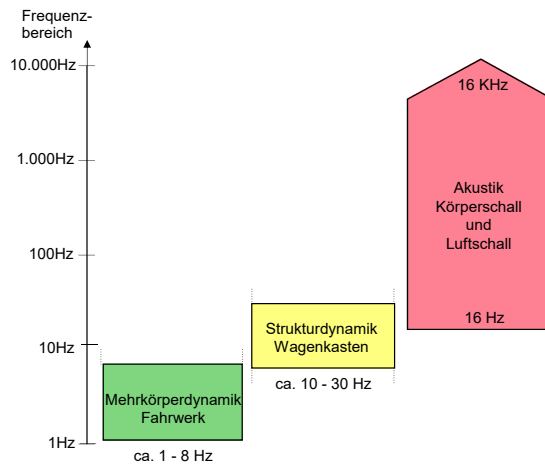
Gliederung

Komfort

- Schwingungskomfort – Grundbegriffe
- Schwingungskomfort – Systemverhalten
- Akustikkomfort – Einführung
- Akustikkomfort – Lärmmanagement
- Akustikkomfort – Prognose

5.3 Akustikkomfort - Einführung

Typische Frequenzbereiche



5.3 Akustikkomfort - Einführung

Was ist ein Pegel?

- Pegel L ist der Logarithmus einer Größe P bezogen auf einen Bezugswert P_0
→ Einheit Bel

$$L = \lg \frac{P}{P_0} [B]$$

➤ Gängiger ist:

$$L = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_0} [dB]$$

- Bei Feldgrößen (elektrische Spannung, Stromstärke, Schalldruck) ist das Quadrat des Effektivwertes proportional zur Energie

$$L_U = 10 \cdot \lg \frac{U^2}{U_0^2} [dB]$$

$$\rightarrow L_U = 20 \cdot \lg \frac{U}{U_0} [dB]$$

5.3 Akustikkomfort - Einführung Schalldruckpegel

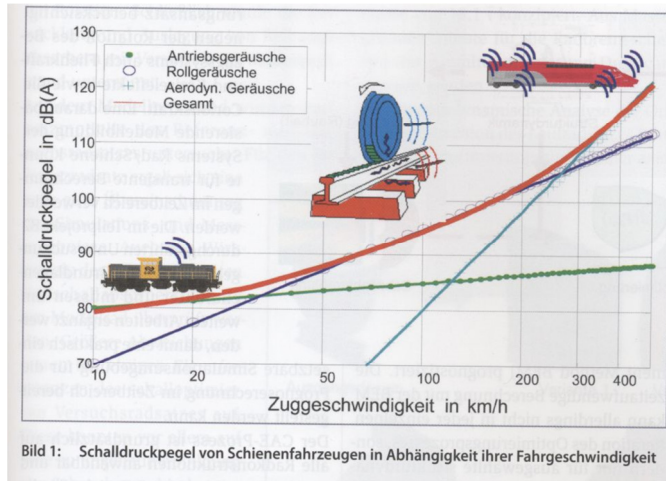


Bild 1: Schalldruckpegel von Schienenfahrzeugen in Abhängigkeit ihrer Fahrgeschwindigkeit

5.3 Akustikkomfort - Einführung Diesel-Triebwagen



2-teiliger dieselelektrischer Triebzug VT 610



2-teiliger dieselhydraulischer Triebzug VT 628.4



2-teiliger dieselhydraulischer Triebzug DM'90



Dieselmechanischer Triebwagen RegioSprinter

Quelle:
Siemens

5.3 Akustikkomfort - Einführung Hochgeschwindigkeitszüge



ICE 1



ICE 2



ICE 3



ICT

Quelle:
Siemens

5.3 Akustikkomfort - Einführung Konzepte

Steigende akustische Anforderungen bei modernen Zugkonzepten

Quelle: Siemens



Triebkopfkonzept

- ICE 1, ICE 2
- $V_{max} = 280$ km/h
- Konzentrierte Schallquellen im Triebkopf



Triebzugkonzept

- ICT, ICE 3
- $V_{max} = 330$ km/h
- Schallquellen unterflur verteilt
- Innengeräusch kritischer bei Stand und Fahrt

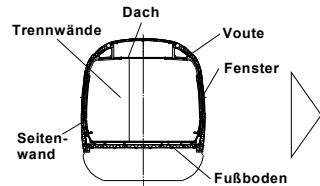
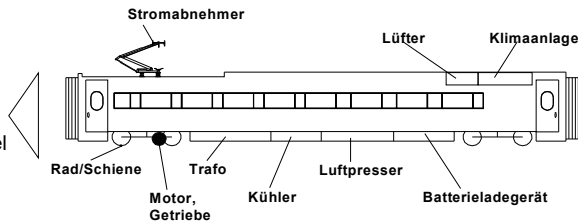
5.3 Akustikkomfort - Einführung

Schallquellen und -dämpfung am Fahrzeug

Umfang der Akustikbilanzierung für das Gesamtsystem

Schallerzeugung

Es existieren eine Fülle von Aggregaten, die den Luft- und Körperschall-pegel beeinflussen.

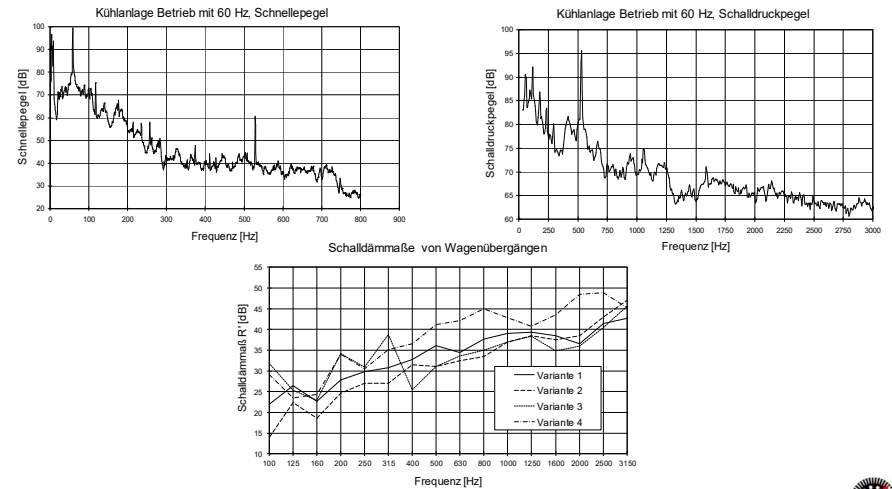


Schallübertragung

Ein Schienenfahrzeug besitzt konstruktionsbedingt Bereiche unterschiedlichster Schalldämmung und Schalldämpfung.

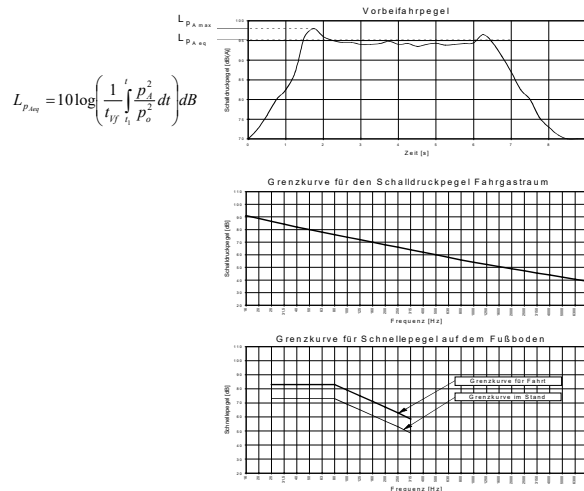
5.3 Akustikkomfort - Einführung

Typische Schallquellen und Schalldämmung



5.3 Akustikkomfort - Einführung

Art der akustischen Anforderungen



Quelle: Siemens

5.3 Akustikkomfort - Einführung

Maßnahmen zur akustischen Optimierung

Passive Maßnahmen

- Schwerematten (mit Metallpulver gefüllte Gummimatten, über Motorbereichen)
- Innenraumabsorption (Lochdecken)
- Körperschalldämpfung (Schwere Beschichtung, „Antidöhn“)
- Luftschalldämmung (Minderung des Schalldurchgangs, z.B. Fenster)
- Impedanzerhöhung (lokale Masse- und Steifigkeitskonzentration, an Krafteinleitungsstellen)
- passive Tilger (Feder-Masse-System, Radabsorber)



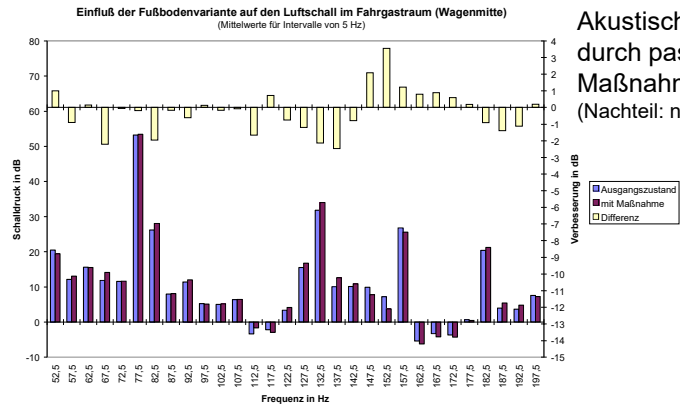
Radabsorber
Quelle: Internet, Fa. Schrey & Veith

Aktive Maßnahmen

- Schwingungstilgung durch aktive Tilger (elektrodynamische Shaker)
 - lokal: an der Krafteinleitungsstelle
 - global: an Schwingungsbäuchen der Gesamtstruktur

5.3 Akustikkomfort - Einführung

Maßnahmen zur akustischen Optimierung



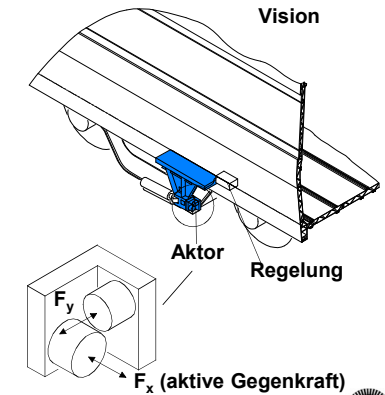
Akustische Verbesserung durch passive akustische Maßnahme (Nachteil: nicht frequenzselektiv)

Maßnahme: Erhöhung der Steifigkeit der Fußbodenplatte (Alu-Sandwich-anstatt Holzplatte) und Schwerefolie auf der Bodenplatte

5.3 Akustikkomfort - Einführung

Maßnahmen zur akustischen Optimierung

Aktive Elemente für Körperschall, Anordnung
(Vorteil: Wirkung kann auf bestimmte Frequenzen ausgelegt werden)

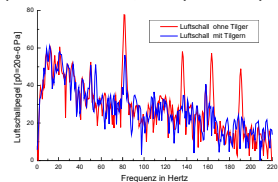


(Partner: Fa. Freudenberg, Schwingungstechnik)

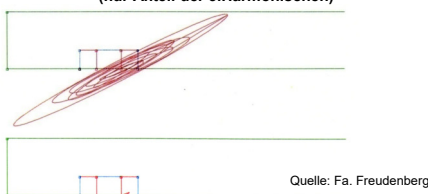
5.3 Akustikkomfort - Einführung

Aktive Elemente für Körperschall - Ergebnisse

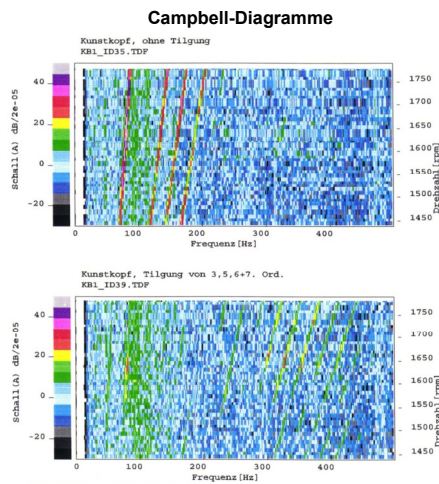
Luftschallpegel in Wagenmitte bei Anregung an der Schlingerdämpferkonsole entsprechend einer Radfrequenz von $f = 27,3$ Hz (280km/h)



Bewegung der Spitze des Schlingerdämpfers (nur Anteil der 3. Harmonischen)



Quelle: Fa. Freudenberg



5.3 Akustikkomfort - Einführung

Vergleich aktive/passive Maßnahmen

Passive akustische Maßnahmen:

- Sind geeignet, den Summenpegel zu reduzieren
- Gezielte Reduktion in bestimmten Frequenzbereichen ist sehr schwer zu realisieren
- Passive Tilger können nur konstante Peaks bzw. tonale Anteile reduzieren

Aktive akustische Maßnahmen:

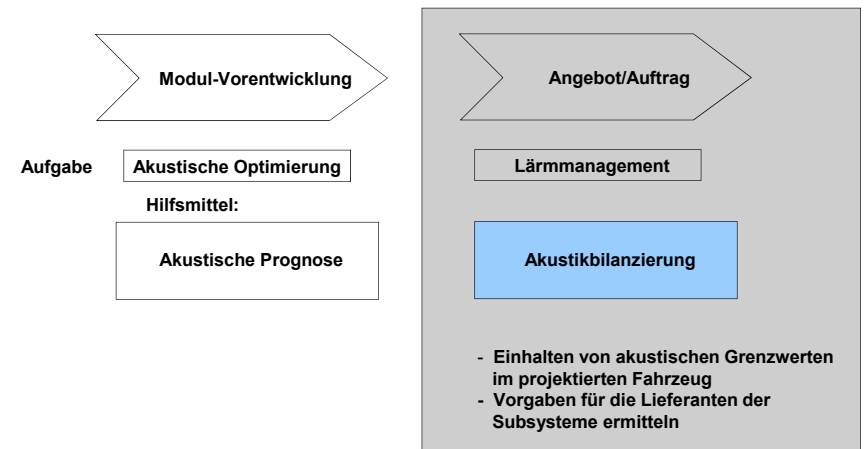
- Sind die einzige Lösung, frequenzveränderliche tonale Anteile gezielt zu bekämpfen
- Sind bei spezieller Regelung auch breitbandig einsetzbar
- Erfordern wenig Mehrgewicht
- Erfordern höheren Entwicklungsaufwand durch Kombination Mechanik und Elektronik
- Erfordern Komponenten, die dauerhaft ausgelegt werden müssen

Gliederung

Komfort

- Schwingungskomfort – Grundbegriffe
- Schwingungskomfort – Systemverhalten
- Akustikkomfort – Einführung
- Akustikkomfort – Lärmmanagement
- Akustikkomfort – Prognose

5.4 Akustikkomfort - Lärmmanagement Warum und wann Akustikbilanzierung?



5.4 Akustikkomfort - Lärmmanagement Akustische Vorgaben für HGV-Züge

- **Außengeräusch:**
 - Abstellbetrieb
 - Stand im Bahnhof
 - Anfahrgeräusch
 - Schallpegel bei V_{max}
 - Schallpegel bei V_{max} hinter Schallschutzwand
 - Bremsgeräusche

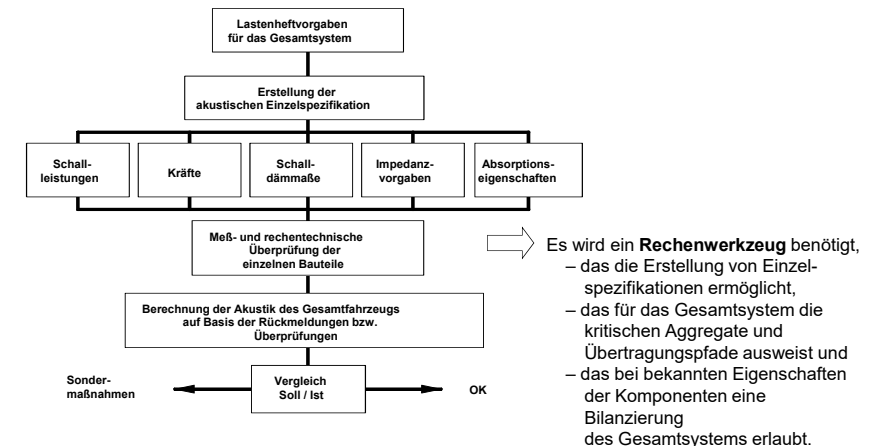
- **Innengeräusch:**
 - Stand
 - Fahrt bei V_{max}
 - Fahrt bei V_{max} im Tunnel

jeweils für:

 - Einstiegs-/Vorräume
 - Fahrgastraum
 - Wagenübergang
 - (Telefonzellen)
 - Führerraum

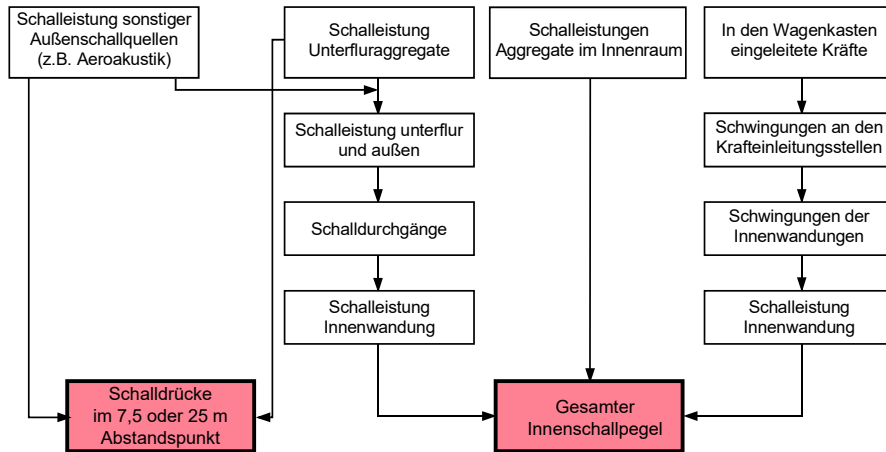
- **Körperschall:** (Schwingungen am Fußboden)
 - Stand
 - Fahrt bei V_{max}

5.4 Akustikkomfort - Lärmmanagement Prinzip des Lärmmanagements



5.4 Akustikkomfort - Lärmmanagement

Flußdiagramm zum Schallberechnungsverfahren



5.4 Akustikkomfort - Lärmmanagement

Eingangsgrößen für die Akustikbilanz



Notwendige Eingangsgrößen

Schalleistungen und Schwingungsverhalten der Komponenten

Körperschallverhalten

Absorptionsverhalten, Dämpfung

Schalldämmungen

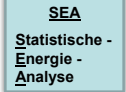
Datengewinnung

- Lieferant
- Messungen

- Messungen am Gesamtsystem
- analytische Bestimmungen durch Berechnungsverfahren (SEA, FE)

- Erfahrungswerte
- Messungen an Materialien
- Messungen am Gesamtsystem
- Berechnungsverfahren (SEA, FE)

- Messungen
- Berechnungsverfahren (SEA, FE)



Akustische Datenbank

5.4 Akustikkomfort - Lärmmanagement

Warum und wann Akustikbilanzierung?



Die Aufgabe der akustischen Messungen und Versuche ist sehr umfangreich. Als Hilfsmittel zur Dokumentation benötigen die Akustikexperten eine akustische Datenbank.

Aeroakustische Windkanaluntersuchungen:

- Dachgeräteverkleidung
- Stromabnehmeroptimierung
- Drehgestellschürzen

Laboruntersuchungen zur Schallminderung von Radgeräuschen:

- Optimierung und Anpassung von Radabsorbieren
- Überprüfung an einem Erprobungsträger

Untersuchungen an Materialien zur:

- Bedämpfung des Rohbaus (Spritzisolation)
- Luftschallabsorption

Optimierung der Schalldämmung verschiedener Komponenten:

- Außentüren
- Innentüren
- Wagenübergänge
- Fußbodenaufbauten
- Deckendämmung

Luft- und Körperschalloptimierung an:

- Batterieladegerät
- ZSU
- ASR
- Stromrichterkühlanlagen
- Trafokühlanlagen
- Bordnetztrafo
- Drossellüfter

Untersuchungen auf Prüfständen und an Erprobungsträgern:

- Fahrmotorlüfter
- Fahrmotor
- Pulsmusteroptimierung (Fahrmotor)
- Getriebe
- Klimaanlage
- Array-Messungen

Untersuchungen in einem Fahrzeugmodell:

- Messungen zur Absorption und Schallausbreitung im Fahrgastinnenraum
- Untersuchungen zur Brennpunktbildung im Führerstand

Gliederung

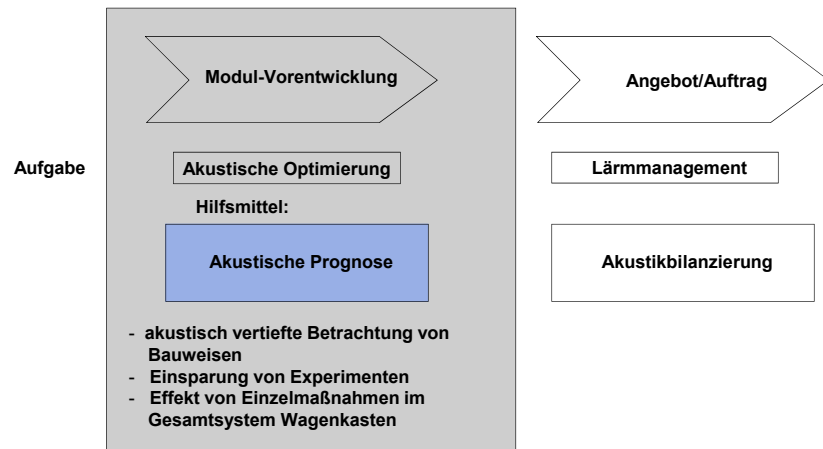


Komfort

- Schwingungskomfort – Grundbegriffe
- Schwingungskomfort – Systemverhalten
- Akustikkomfort – Einführung
- Akustikkomfort – Lärmmanagement
- Akustikkomfort – Prognose

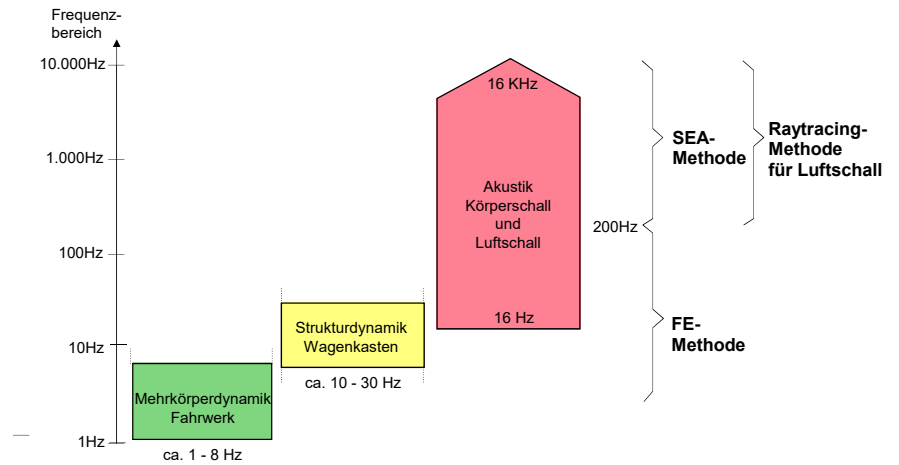
5.5 Akustikkomfort - Prognose

Warum und wann akustische Prognose?



5.5 Akustikkomfort - Prognose

Typische Frequenzbereiche und Methoden



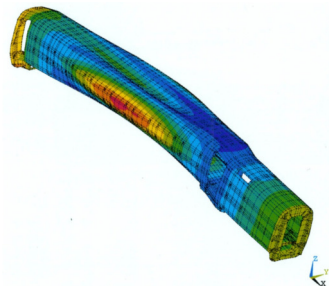
5.5 Akustikkomfort - Prognose

Schwingungsformen

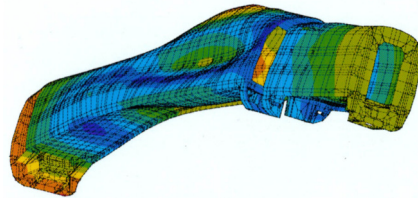
Strukturdynamik zwischen ca. 10 Hz und 30 Hz

➤ Die Schwingungsformen sind mit der FE-Methode erfassbar

Beispiel: Vertikale Biegung 10 Hz



Beispiel: Atemschwingung 13,5 Hz



Quelle: Siemens

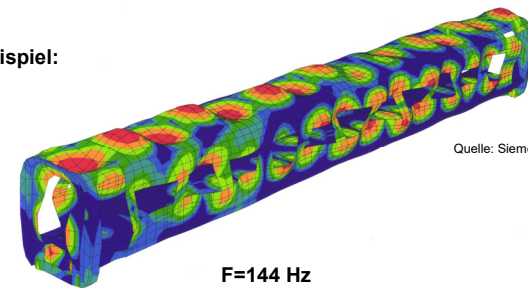
5.5 Akustikkomfort - Prognose

Akustische Prognose unter 200 Hz

Körperschall unter 200 Hz

Die Schwingungsformen sind mit der FE-Methode erfassbar

Beispiel:



Quelle: Siemens

F=144 Hz

Die Modendichte ist sehr hoch
Peaks entstehen nicht durch Resonanzen des Wagenkastens
Peaks entstehen durch die Anregung.

Konsequenz: erweiterte Finite-Elemente-Methode anwenden

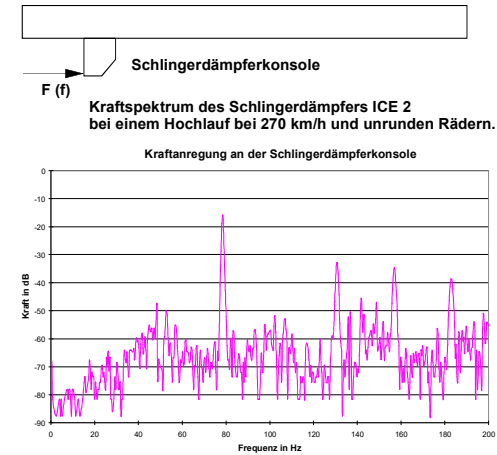
5.5 Akustikkomfort - Prognose Körperschall unter 200 Hz mittels FE-Methode

Körperschall unter 200 Hz

- Ziel ist die Untersuchung von tonalen Anregungen
 - Brummen durch unrunde Räder
 - Vibrationen von schwingfähigen Komponenten
 - Anregungen durch Aggregate wie Lüfter, E-Motoren, Dieselmotoren
- Erweiterte FE-Modelle
 - Alu-Profile des Rohbaus als Schalen-Elemente
 - Luftschichten zwischen Rohbau und Innenverkleidung als Volumenelemente
 - Innenverkleidung und Fußboden als Schalenelemente
 - Innenraum als Volumen-Elemente
 - Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit von Dämpfung und Absorption

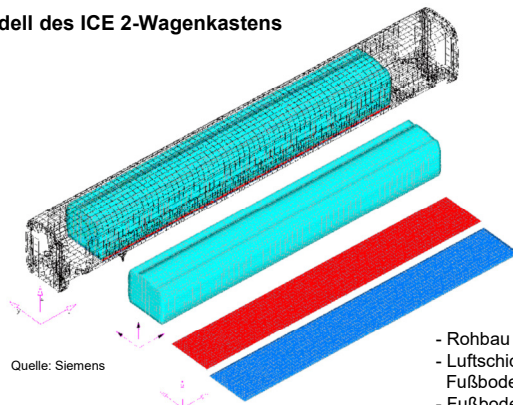
5.5 Akustikkomfort - Prognose Kraftspektrum unter 200 Hz mittels FE-Methode

Anregungsspektrum



5.5 Akustikkomfort - Prognose FE-Methode – Modell des Wagenkastens

FE-Modell des ICE 2-Wagenkastens

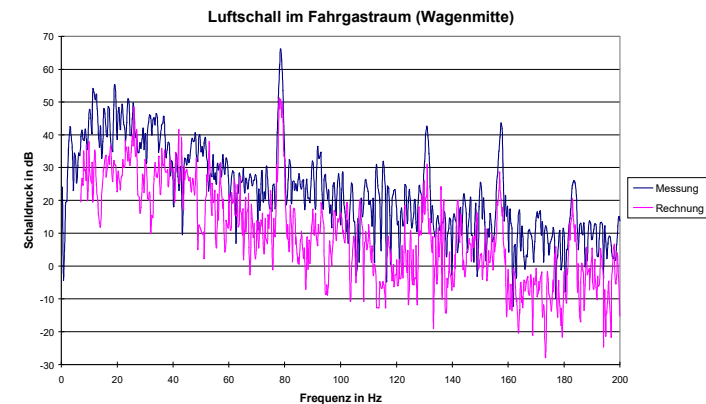


Quelle: Siemens

- Rohbau aus 4-Knoten-Schalenelementen
- Luftschicht zwischen Rohbau und Fußboden aus Fluidelementen
- Fußbodenplatte aus Schalenelementen mit den Parametern von Holz
- Innenraum aus Fluidelementen

5.5 Akustikkomfort - Prognose FE-Methode – Vergleich Rechnung/Messung

Anregung: Kraftspektrum an der Schlingerdämpferkonsole
Messung: Luftschalldruck im Innenraum unter 200 Hz

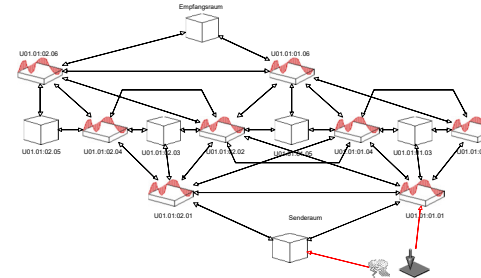


5.5 Akustikkomfort - Prognose Körperschall über 200 Hz

- Hohe Modendichte
- Kleine Wellenlänge im Verhältnis zu charakteristischen Fahrzeugabmessungen
- FE-Modellierung scheitert (ca. 6 Elemente pro Wellenlänge, riesiges FE-System)
- Die Schwingungsformen sind nicht diskret identifizierbar
- Anstatt deterministischer Betrachtung erfolgt statistische Mittelung
- Des Energieinhaltes in einem Schwingungssystem
- Für mehrere Schwingungsformen in einem Frequenzbereich
- **Statistische - Energie - Analyse SEA**

5.5 Akustikkomfort - Prognose SEA-Methode

Typische SEA-Modelle bestehen aus vernetzten schwingfähigen Elementen, die mit Schwingungsenergie beaufschlagt werden. Es wird das Gleichgewicht der Energieflüsse berechnet.

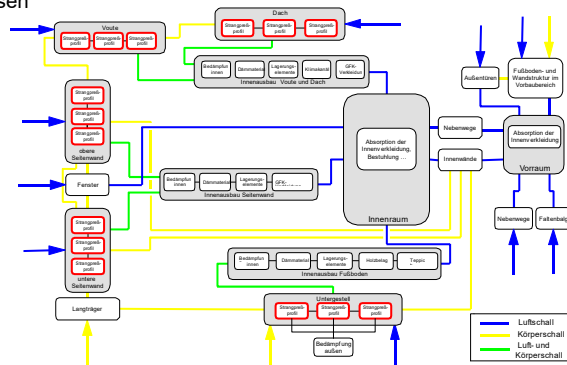


- Die wesentlichen Parameter von Element i :
 - Geometrie, Steifigkeit, Material
 - Modendichte N_i
 - Energieinhalt E_i
 - Eigenverlustfaktor η_i
 - Kopplungsfaktoren η_{ij} zwischen Element i und Element j

Typisch ist ebenfalls, dass einige Parameter aus der Geometrie und Steifigkeit analytisch gewonnen werden können (z.B. Modendichte, spezielle Kopplungsverlustfaktoren). Andere Parameter wie insbesondere Dämpfungen (Eigenverlustfaktoren) müssen im Experiment ermittelt werden.

5.5 Akustikkomfort - Prognose Wesentliches Element Strangpressprofil

Ein kompletter Wagenkasten erfordert ein umfangreiches Modell mit vielen Übertragungsweisen



Wesentliches Element ist das Strangpressprofil !

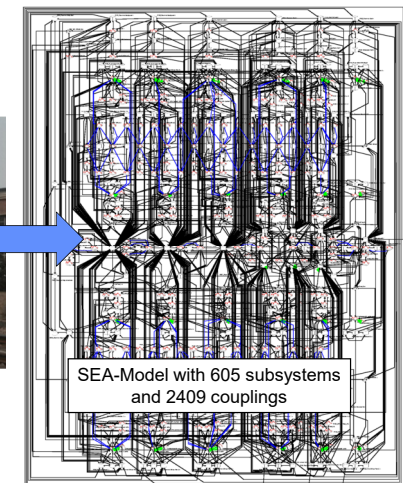
- Folgendes Beispiel:
- Modellierung des Strangpressprofils in SEA
 - Verifikation der Rechnung durch Messung an der Bodenplatte ICE 2

5.5 Akustikkomfort - Prognose SEA-Methode

Modell vom ICE3



Quelle: Siemens



5.5 Akustikkomfort - Prognose

Fazit



- Akustische Maßnahmen müssen gezielt (aktiv, passiv) und problemorientiert ausgewählt werden
- Die Beherrschung der Akustik im Gesamtsystem ist nur mit leistungsfähigen Tools und viel Erfahrung möglich
- Akustikmanagement:
 - Aufwandsreduziertes Überschlagsverfahren (Bilanzierung)
 - Gestützt auf Erfahrung und Messungen
- Akustische Prognose:
 - SEA, FE-Methoden
 - Numerische Vorausberechnung
 - Verifikation durch Messungen
 - Sehr aufwändig

Zusammenfassung



Komfort

- Schwingungskomfort – Grundbegriffe
- Schwingungskomfort – Systemverhalten
- Akustikkomfort – Einführung
- Akustikkomfort – Lärmmanagement
- Akustikkomfort – Prognose

Überblick



- I. Einführung
- II. Zugfördermittel
- III. Wagenkasten
- IV. Fahrtechnik / Systemkinematik
- V. Komfort
- VI. Antrieb
- VII. Bremse

Grundlagen der Schienenfahrzeugtechnik



Quelle: Siemens