LOGOMOTIVE.

Integrale Lösungen für Gesamtsysteme

AKUSTIK-SIMULATION UND -MANAGEMENT IN DER FAHRZEUGENTWICKLUNG

SCHIENENFAHRZEUGTAGUNG 2026
GRAZ

Dr. Andreas Hegendörfer, Sven Otto und Dr. Marco Engelhard

ÜBERSICHT

1. Motivation: Warum ist die Akustik von Fahrzeugen wichtig?
2. Akustische Simulationsmethoden
3. Akustischer Simulationsprozess mit LogoSound
4. Validierung LogoSound
5. Ablauf Akustikmanagement
6. Ausgewählte Projekte



Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

MOTIVATION: WARUM IST DIE AKUSTIK VON FAHRZEUGEN WICHTIG

- Akustik von Fahrzeugen ist zulassungsrelevant!
  - TSI NOISE setzt Grenzwerte fest
  - Empfehlungen Bundesverband Schienennahverkehr (BSN) deutlich niedriger

	Anfahrgeräusch $L_{p,AFmax}$ [dB(A)]	80 km/h Vorbeifahrt $L_{pAeq,TP}$ [dB(A)]	Standgeräusch $L_{pAeq,T}$ [dB(A)]
Elektrotriebzüge (neu)	80, 71	80, 75	65, 55

⇨ Tendenz der Grenzwerte fallend



➢ <u>Akustiksimulationen minimieren das Risiko für teurere nachträgliche Änderungen</u>

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

MOTIVATION: WARUM IST DIE AKUSTIK VON FAHRZEUGEN WICHTIG

- Betreiber bevorzugen leise Züge
- Weniger Lärm → höhere Akzeptanz
- Markt- & Technologieführerschaft
- Weniger Infrastrukturmaßnahmen erforderlich → Kostensenkungen

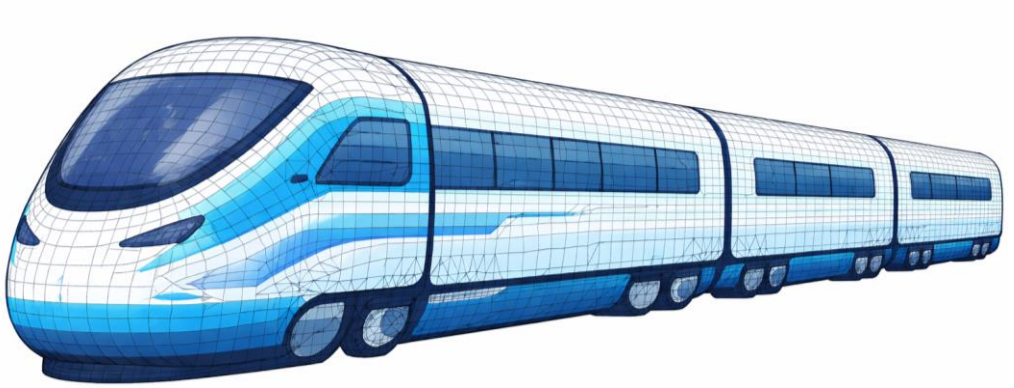


➢ Akustiksimulationen ermöglichen das Erreichen der Ziele

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

SIMULATIONSMETHODEN IN DER BAHNAKUSTIK

- Finite-Elemente Methode (FEM)
  - Hoher Aufwand für Modellierung und Berechnung
- Ray-Tracing Verfahren
  - Gültig für hohe Frequenzen
  - Hoher Aufwand Modellierung und Berechnung
- Statistische Energiemethoden (SEA)
  - Hoher Aufwand für Modellierung
  - Kein Außenschallmodell

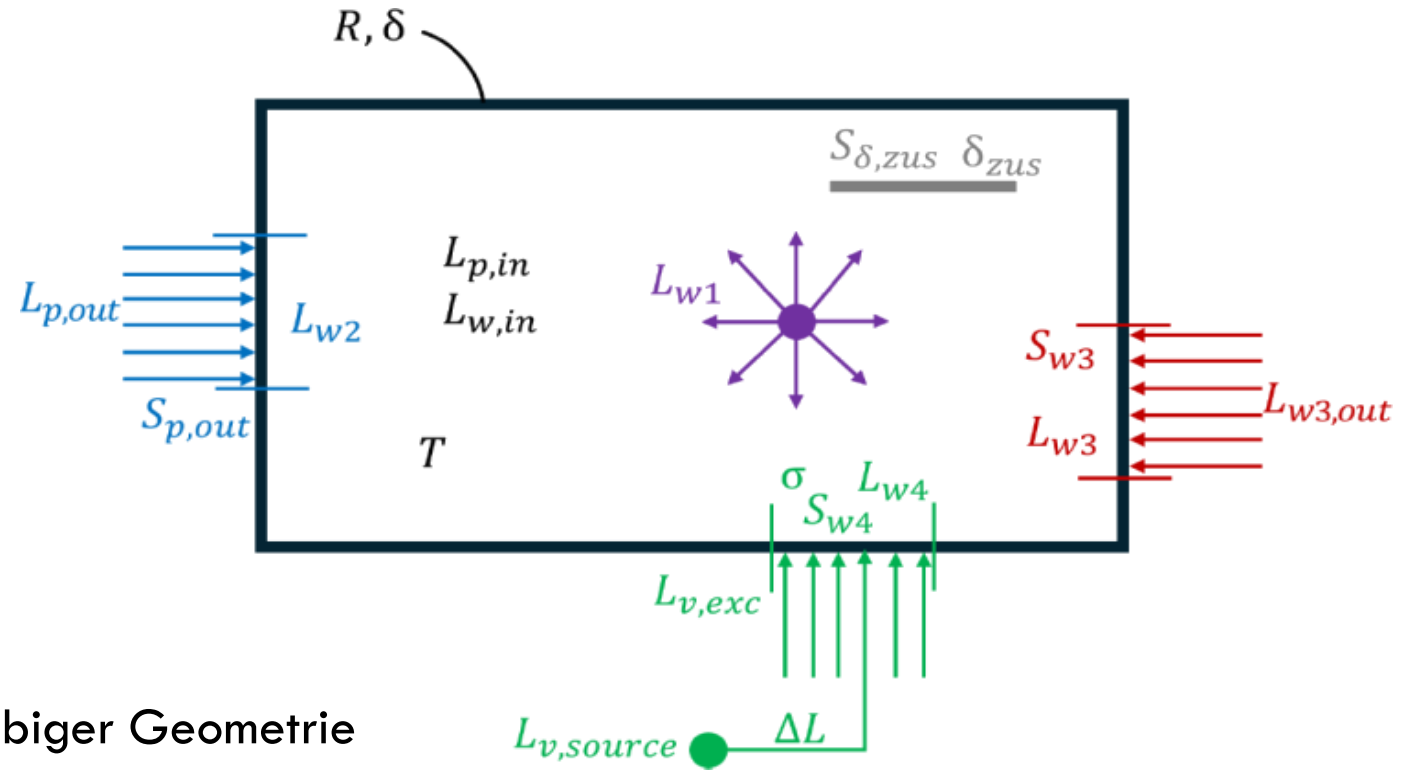


Entwicklung von **LogoSound:** Spezialisiertes Tool für Bahnindustrie

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

Innenschallmodell (spezialisierter SEA-Ansatz)

$$L_{p,in} = L_{W,in} - 10\,log\left(\bar{\tau}S_{ges} + \bar{\delta}S_{ges}\right) + 6\,dB$$



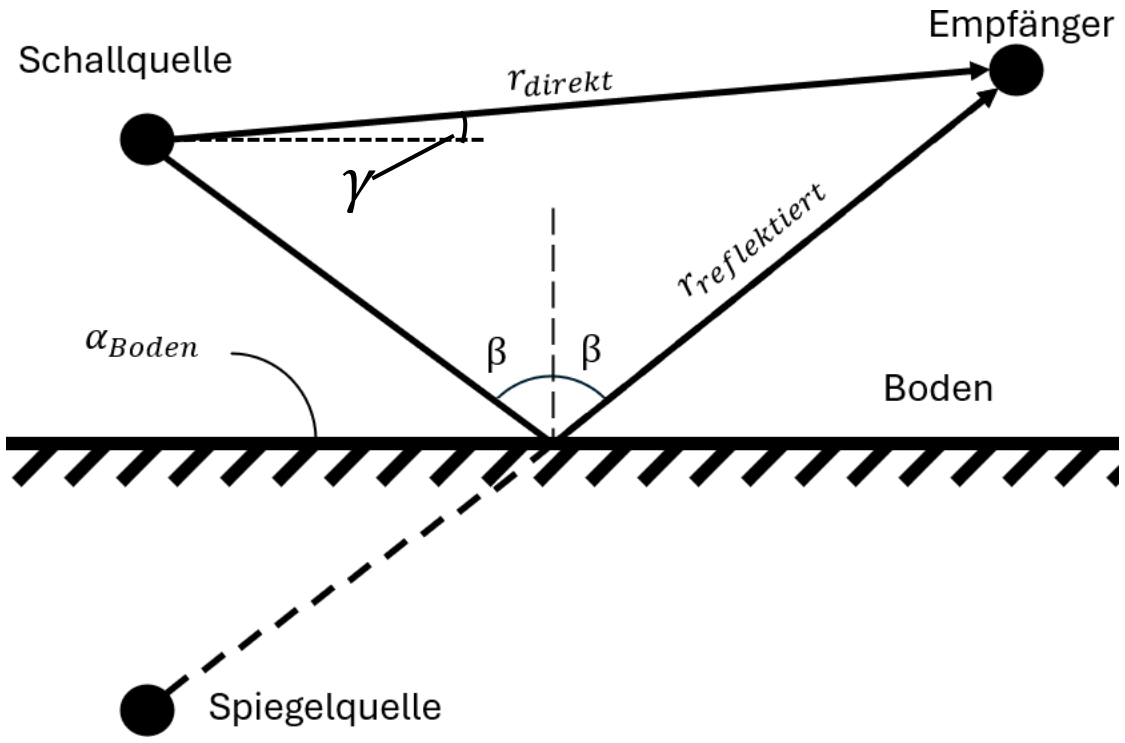
- Unterteilung des Zuges in Volumen mit beliebiger Geometrie
- Annahmen: diffuses Schallfeld und stationärer Zustand
- Kopplung der Volumen über Trennflächen und über Außenschallmodell möglich

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

Außenschallmodell

$$L_p(r) = L_W - 20log\left(\frac{r}{m}\right) - 11dB + \mathrm{D}$$

gleichmäßige Ausbreitung in alle Richtungen — Direktivität

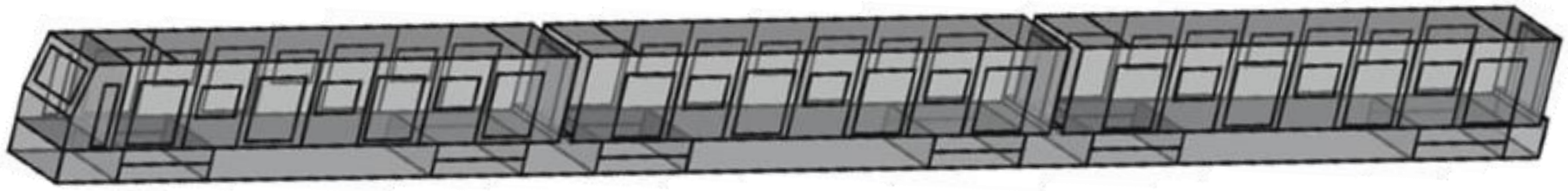


- Schallausbreitung von der Quelle unter Berücksichtigung von Direktivität, z.B. abhängig von γ
- Berücksichtigung der Direktivität der Reflexionen am Boden, z.B. abhängig von β
- Simulation von Freifeld, Tunnel und weiteren Szenarien möglich

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

AKUSTISCHER SIMULATIONSPROZESS MIT LOGOSOUND

- Betrachtung eines Zuges mit 6 Wagen (sym.)
- Freifeld
- Berechnung
  - Schalldruckpegel Innen nach ISO 3381
  - Schalldruckpegel Außen nach ISO 3095
- Diskretisierung in LogoSound:

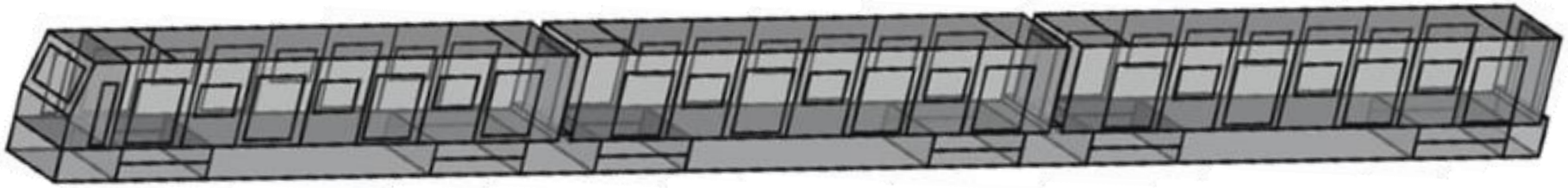


sym.

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

Parametrisierung des Modells

- Schallbarrieren: Böden, Seitenwände, Fenster, Türen, Dächer
- Luftschallquellen
  - Antriebseinheit: Rad/Schiene Kontakt, Motor, Getriebe, Stromumrichter, Transformator
  - Hilfsaggregate: Hauptkompressor, Klimaanlagen in Fahrerkabine und Passagierbereichen
- Körperschall: Klimaanlagen Fahrerkabine und Passagierbereiche, Hauptluftkompressor
- Nachhallzeiten: Passagierbereiche, Fahrerkabine, Gangways



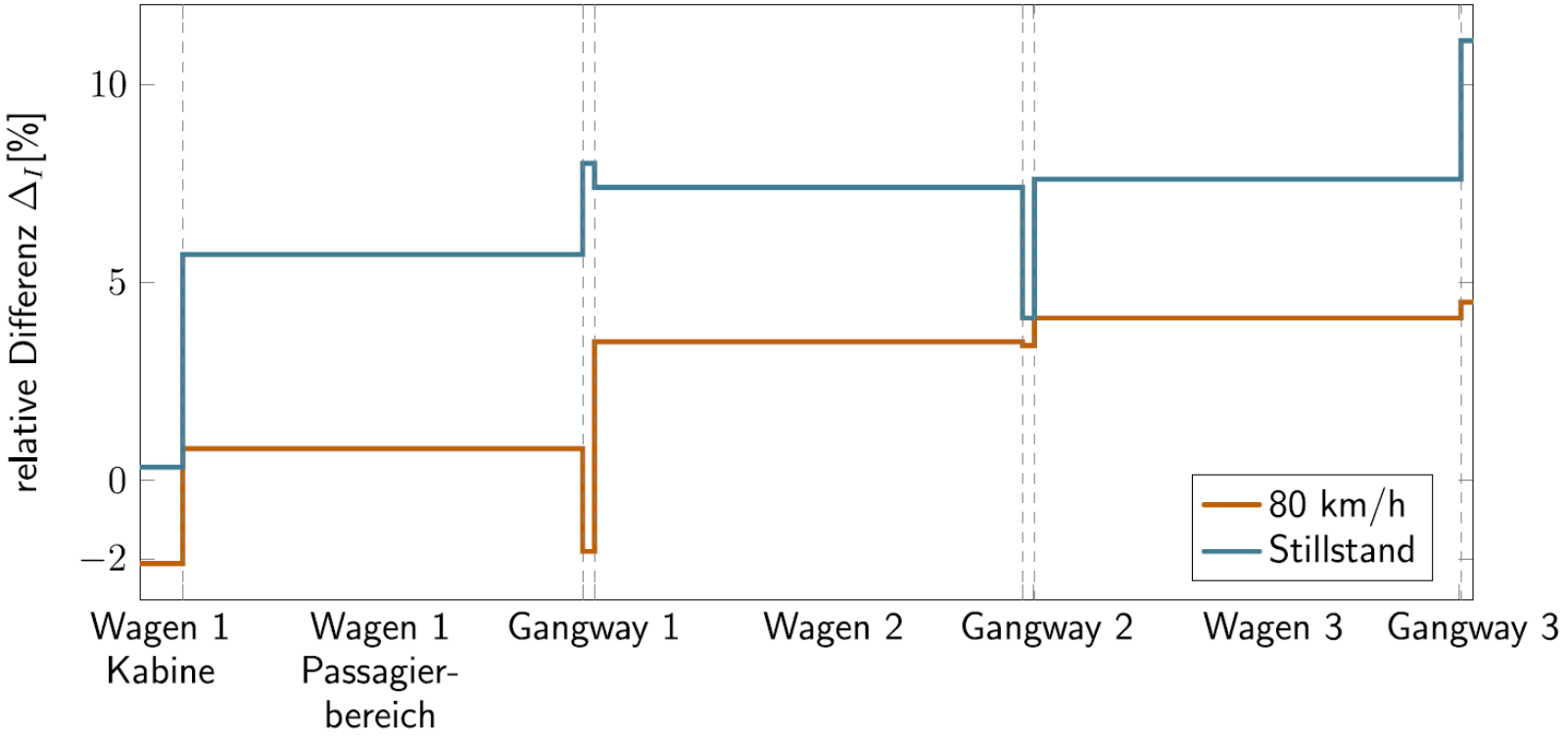
sym.

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

VERGLEICH SIMULATIONSERGEBNISSE MIT EXPERIMENTELLEN DATEN

Innenschall nach ISO 3381

$$\Delta_I = \frac{X_{S,I} - X_{M,I}}{X_{M,I}} * 100\%$$

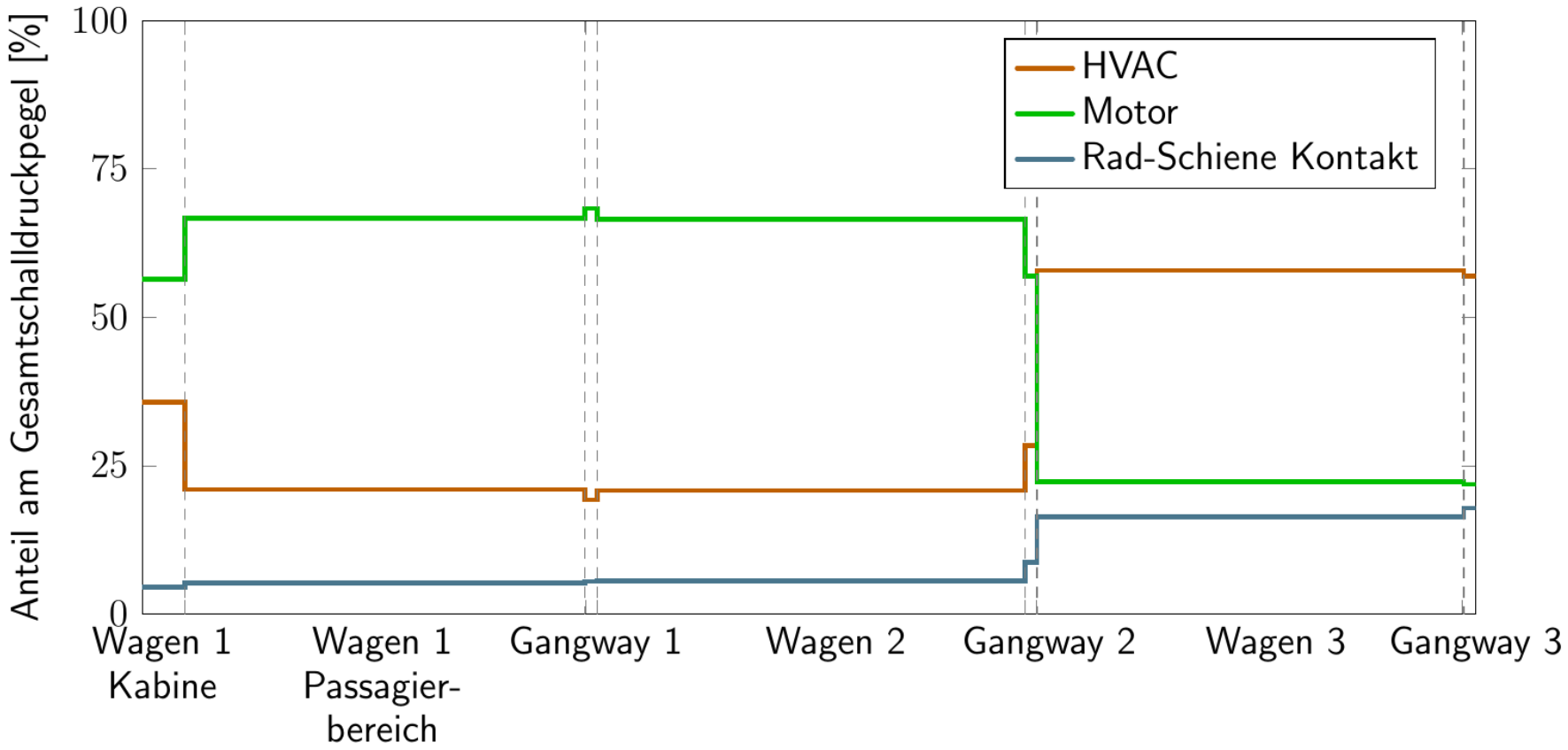


- Allgemein hohe Übereinstimmung
- Für Stillstand HVAC dominante Schallquelle; Keine Berücksichtigung der Transmissionsdämpfung der Luftverteilkanäle in Simulation, da unkritisch.

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

ANTEIL AM GESAMTSCHALLDRUCKPEGEL BEI FAHRT MIT 80 KM/H

- Innenschall nach ISO 3381 für die Fahrt mit 80 km/h
- Einfluss der einzelnen Schallquellen

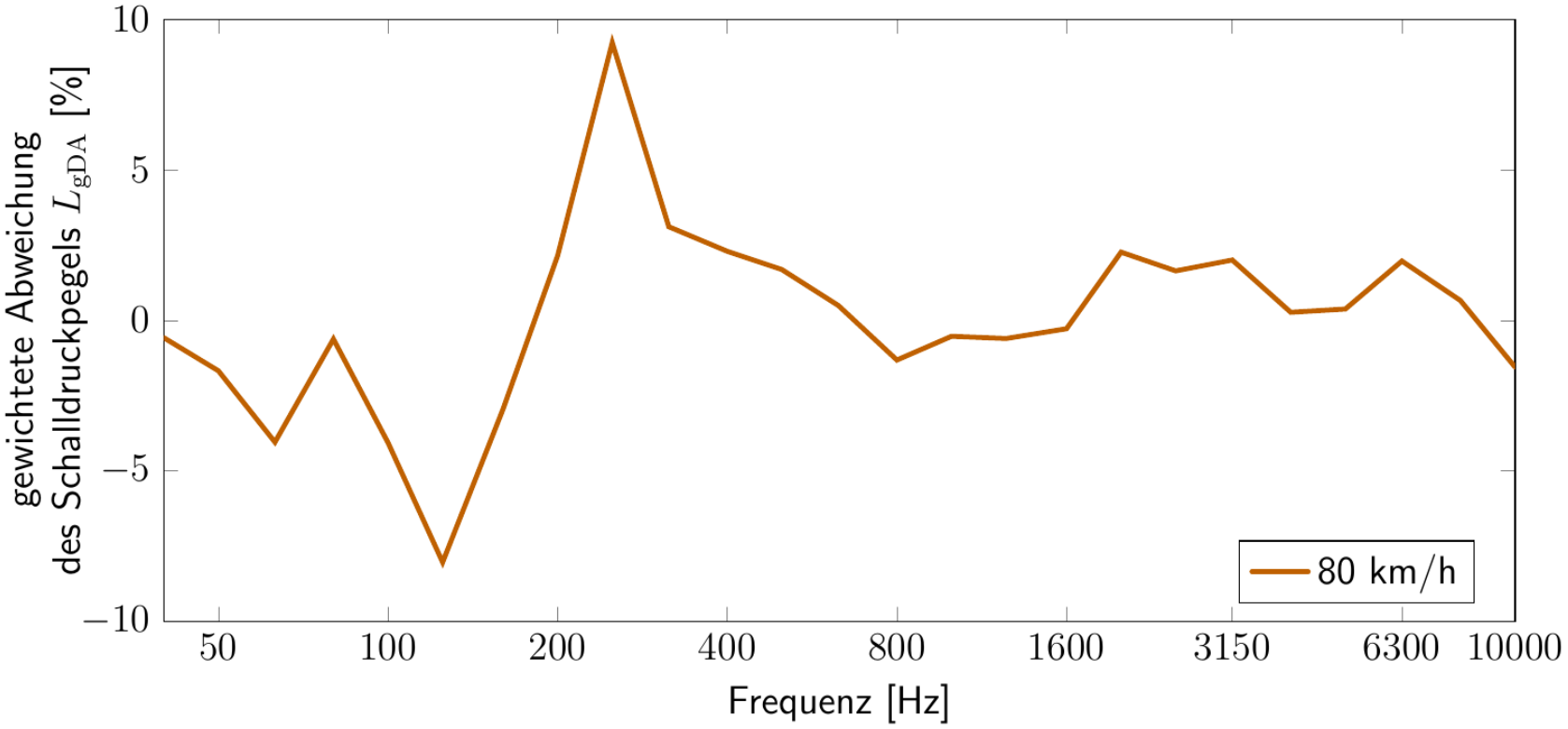


Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

Außenschall nach ISO 3095

- Vergleich Spektrum für 80 km/h Vorbeifahrt

Betriebszustand	Relative Abweichung [%]
Stillstand	3.8
80 km/h Vorbeifahrt	-1.3



$$L_{gDA} = \frac{(X_{M,A} - X_A) * X_{M,A} * 100\%}{X_{M,A,sum}{}^2}$$

$X_{M,A}$ = äquivalente Schalldruckpegel der Messung

X_A = äquivalente Schalldruckpegel der Simulation

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

Validierung

- Innenschall

Betriebszustand	Max. Relative Abweichung [%]
Stillstand	<10*
80 km/h Vorbeifahrt	< 5

* Keine Berücksichtigung von Transmissionsdämpfung HVAC

- Außenschall

Betriebszustand	Max. Relative Abweichung [%]
Stillstand	3.8
80 km/h Vorbeifahrt	-1.3

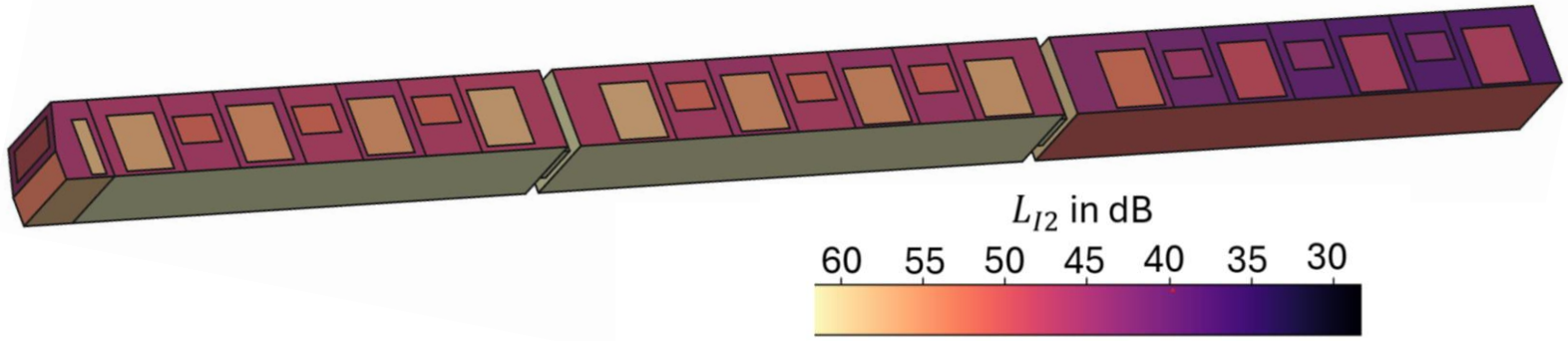
Hohe Genauigkeit von LogoSound



Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

OPTIMIERUNG

- Motor nach Simulationen kritische Schallquelle für 80 km/h
- Auftreten der höchsten Schalldruckpegel zwischen 400 und 1600 Hz



durch Schallbarrieren hindurchdringende Schallintensitätspegel bei Fahrt mit 80 km/h

- Innenschall
  - Höchste Schallintensitätspegel für Boden und Türen →Erhöhung Schalldämmmaß
  - Frequenzen über 400 Hz können wirksam mit Unterflurabsorptionsmaterial gemindert werden
- Außenschall
  - Reduzierung durch Schürzen im Bereich der angetriebenen Räder möglich

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

ABLAUFPROZESS VON AKUSTIKMANAGEMENT IN DER FAHRZEUGENTWICKLUNG



Definition der Akustikzielwerte

Sammlung & Festlegung der Akustikparameter von Komponenten-herstellern

Erstellung Simulations-modell

Messdaten für vergleichbares Fahrzeug verfügbar?

ja

Kalibrierung/Validierung des Simulationsmodells anhand Messdaten

nein

Durchführung Akustiksimulation

Grenzwerte eingehalten?

ja

nein

Erarbeitung Verbesserungsmaßnahmen

Ableitung von Komponenten-spezifikationen

Assembly-test Messungen möglich?

nein

Abnahme-messung

ja

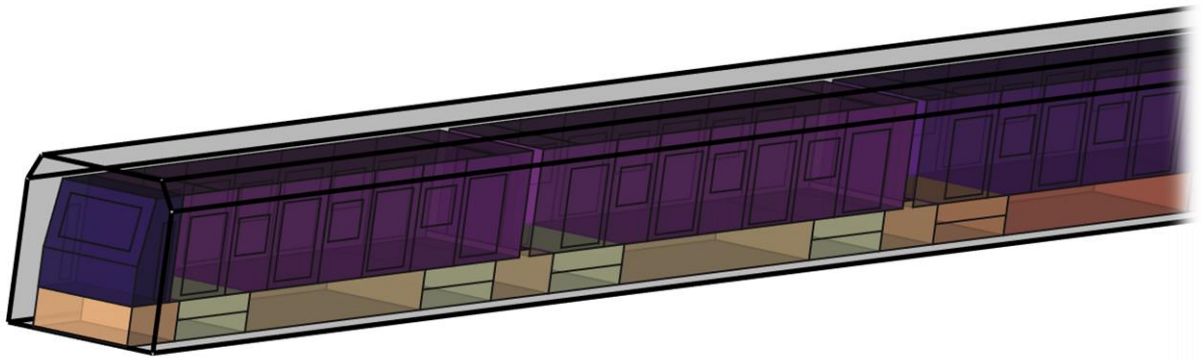
Durchführung Assembly-Test Messungen

Validierung Simulationsmodell

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

Akustikmanagement einer U-Bahn für Shanghai

- Beantwortung der Fragen
  - Hält die U-Bahn die Grenzwerte im Tunnel ein?
  - Welche Schallleistung dürfen die einzelnen Komponenten abgeben?



- Durchführung von Simulationen der U-Bahn im Tunnel
  - Änderungsvorschläge, um die Einhaltung der Grenzwerte sicherzustellen
  - Ableiten von Grenzwerten für Komponenten → **Lieferspezifikationen**

- Vorteile für den Kunden
  - **Minimierung des Risikos teurer Nachbesserungen**
  - Qualitativ hochwertiges Produkt

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

Akustikmanagement für einen Expresszug eines europäischen Herstellers

- Aufgaben
  - Beurteilung des aktuellen Zustands des Fahrzeugs/Risikoanalyse
  - Identifikation von akustischen Schwachstellen

- Erstellung eines akustischen Simulationsmodells
  - Berücksichtigung von verschiedenen Betriebszuständen
  - Berücksichtigung von Aerodynamik in LogoSound



- Resultate
  - **Maximale Reduzierung des Schalldruckpegels im Innenraum: 9 dB(A)**
  - Einhaltung der akustischen Ziele

Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.

ZUSAMMENFASSUNG

- Bahnlärm ist zulassungsrelevant – Akustik wird künftig noch wichtiger
- Simulationen sind für leise Züge erforderlich
- LogoSound ist eine benutzerfreundliche Lösung für Innen- und Außenschallsimulationen von Gesamtfahrzeugen
- Validierung zeigt hohe Genauigkeit von LogoSound
- Projekt-Highlights zeigen nahtlose Integration des Akustikmanagements in den Entwicklungsprozess



Restricted © LogoMotive GmbH 2026. All rights reserved.