

# Psychoakustische Untersuchung von Lärmschutzmaßnahmen bei Bahnlärm

**DI Dr.**

**Christian KASEß**

**Österreichische Akademie der Wissenschaften  
Institut für Schallforschung**

**Weitere Autoren: DI Dr. techn. Thomas MALY, TU-Wien  
Prof. Dr.-Ing. Holger WAUBKE, ÖAW  
Mag. Dr. Günter DINHOBL, ÖBB-Infrastruktur AG**

Das Projekt PASS (FFG 840515) wurde gefördert im Rahmen der Infrastruktur-  
forschung (VIF 2012) vom BMVIT und der ÖBB-Infrastruktur AG

Motivation und Ziele

Messung der Schallimmission

Spektrale Modifikation durch Lärmschutzmaßnahmen

Wahrnehmungstest

- Auswahl repräsentativer Stimuli
- Testdesign und -durchführung

Auswertung und Ergebnisse

- Wahrnehmbarkeitsschwellen
- Lästigkeitsbewertung

Zusammenfassung

## Schalldruckpegel

- Maß zur Beschreibung der Stärke eines Schallereignisses
- A-Bewertung als Annäherung der Eigenschaften des menschlichen Gehörs

## Vorteile

- Einfache Berechnung
- Weite Verbreitung und Implementierung
- Grenzwerte für zulässige Emission und Immissionen

## ABER:

Ist der (A-bewertete) Schalldruckpegel stets am besten geeignet, um die empfundene Lärmbelastung zu bewerten?

## Dose-Response-Relation (Miedema und Oudshoorn,2001)

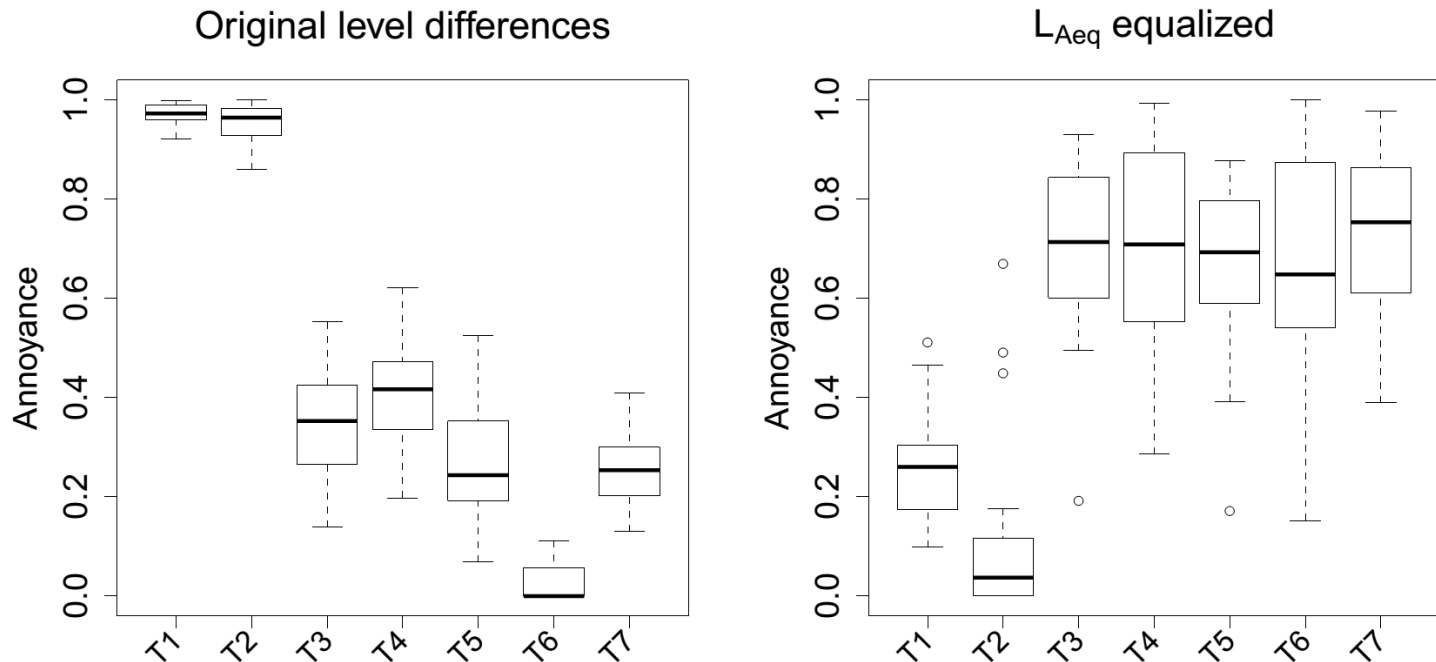
- Anteil der Belästigten als Funktion des A-bewerteten Pegels
- Immissionspegel z.B. Day-Evening-Night-Level
- Beziehung abhängig vom Verkehrsmittel

## Lautheit besserer Deskriptor?

- Ergebnisse von Laborstudien bei Straßenverkehrslärm legen dies nahe
- Höhere Korrelation zwischen Lästigkeit (Unbehagen) und Maßen für die Lautheit unter verschiedenen Bedingungen
  - Mit oder ohne Lärmschutzwand (Nilsson et al. 2008)
  - Verschiedene Straßenbeläge (Raggam et al. 2007)

## Laborstudien: Vergleich bei gleichem A-Pegel

- Hochgeschwindigkeitszug lästiger als konventioneller Zug (Vos 2004)
- Glatte Räder lästiger als raue Räder (Kasess et al. 2013, FFG-Projekt 820719)



## Lärmschutzmaßnahmen

- Senkung des (A-bewerteten) Schalldruckpegels
- Auch spektrale Modifikation

## Ziele der Untersuchungen

- Pegelminderungen, ab welchen Lästigkeitsänderungen wahrgenommen werden
- Zusammenhang zwischen empfundener Lästigkeit von Schallimmissionen und (psycho)akustischen Parametern
- Betrachtete Ausbreitungsbedingungen
  - Ohne Lärmschutzmaßnahme
  - Lärmschutzwand (Höhe 4 m)
  - Lichtraumnahe Lärmschutzwand (Höhe 1 m)
  - Schienenstegdämpfer

## Forschungsprojekt

- Im Rahmen von VIF finanziert durch BMVIT und ÖBB-Infrastruktur AG
- Projektpartner:
  - Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen
  - psiacoustic Umweltforschung und Engineering GmbH

## Eckdaten der Messung

- Nordbahn (km 14,6 nahe Deutsch Wagram)
- zweigleisige Strecke mit Schotteroberbau
- Freifeldausbreitung
- Mischverkehr

## Kunstkopfmesssystem

- Gehörgerechte, räumliche Wiedergabe
- Schallimmission in 25 m  
1,2 m über SOK
- 7 Messtage mit 188 Zügen



## akustische Dauermessstelle acramos®

- Schallemission in 7,5 m Entfernung und 1,2 m über SOK
- Erfassung von ~5000 Zugvorbeifahrten in 2 Monaten

# Spektrale Modifikation durch Lärmschutzwände

Messung verschiedener Maßnahmen an  
verschiedenen Messorten problematisch

- Unterschiedliches Wagenmaterial
- Vorbeifahrtsgeschwindigkeiten
- Gleiszustand
- Messstellengeometrie
- Meteorologische Bedingungen

Für Wahrnehmungstests schlecht geeignet da zu  
viele Einflussfaktoren bestehen



# Spektrale Modifikation durch Lärmschutzwände

## Simulation mittels Randelement-Methode

- 2.5D Simulation erlaubt Verwendung inkohärenter Quellen
- Rechenintensiv, da große Anzahl von 2D Problemen gelöst wird

## Simulationsparameter

- Reflektierender Wagenkasten
- Hochabsorbierend an der Innenseite der Lärmschutzwand
  - Impedanzmodell nach Delany-Bazley
- Absorption des Schotterbettes
  - 3-Schicht Impedanzmodell aus Messungen im Hallraum
- Reflektierender Boden

## Validierung mittels bestehender Messungen

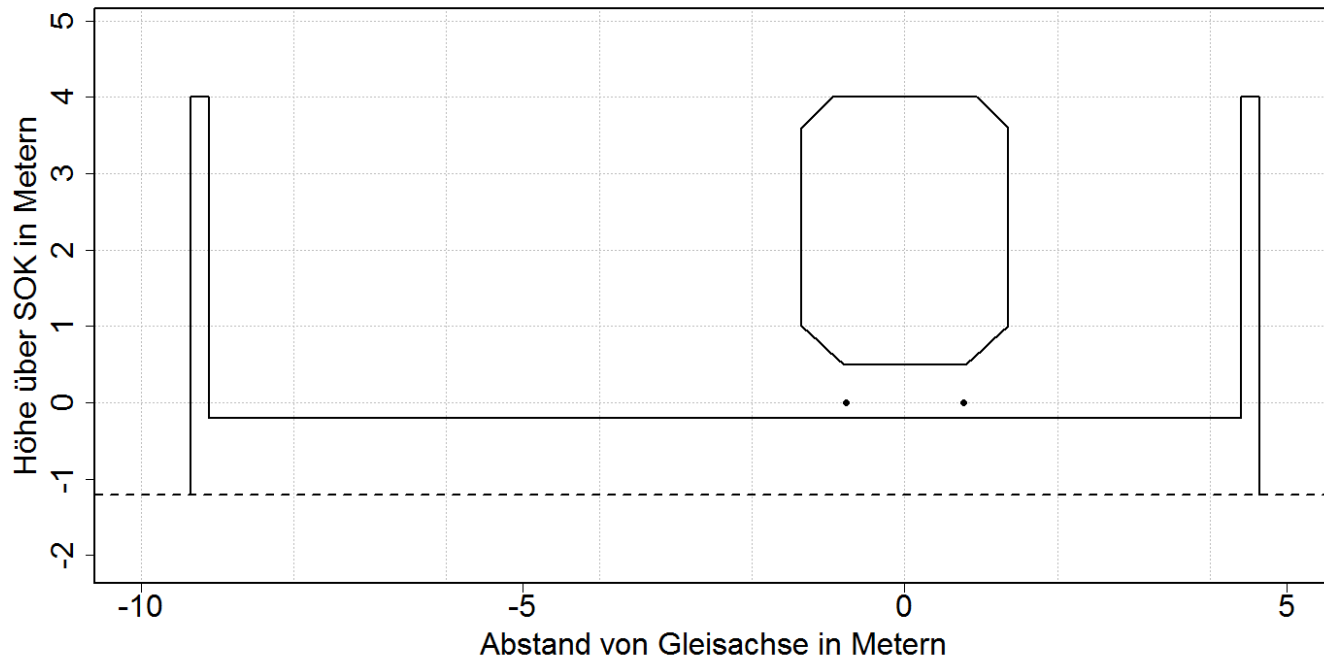
- Gute Übereinstimmung des spektralen Verlaufs des Einfügedämmmaßes

# Spektrale Modifikation durch Lärmschutzwände

## 3 simulierte Querschnitte

- Freifeld mit Bahndamm und Wagenkasten
- Lichtraumnahe niedrige LSW 1 m über SOK (2,2 m zur Gleisachse)
- Konventionelle LSW 4 m über SOK (4,4 m zur Gleisachse)

## Quellen auf Höhe des Rad-Schiene-Kontakts



# Schienenstegdämpfer

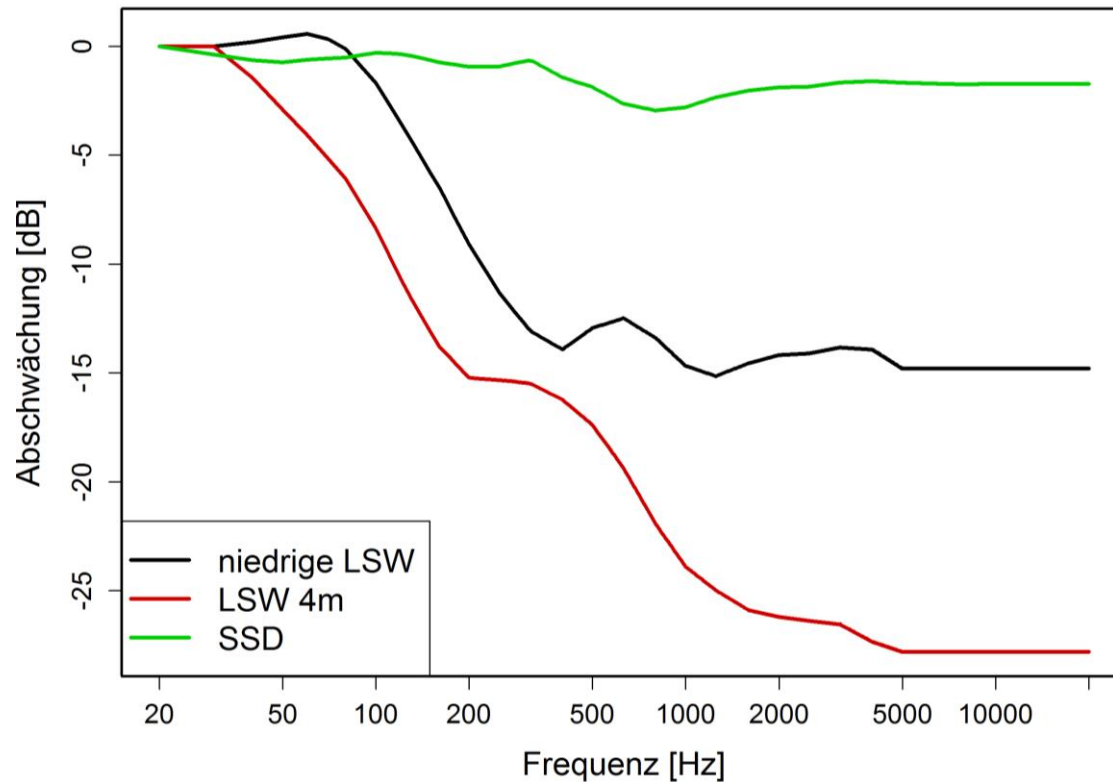
## Ableitung der Wirkung aus bestehenden Messdaten

- 2 Perioden: Referenzperiode und Messung mit SSD
- Messung unmittelbarer neben der Dauermessstelle Deutsch-Wagram

## Berechnungsmethode

- Einschränkung auf 3 Sekunden lange Segmente
  - Mittleres Segment der Vorbeifahrt für Personenzüge
  - Gleitendes Fenster für Güterzüge
- Geschwindigkeitsbereich eingeschränkt
  - 85-95 km/h für Güterzüge, 105-115 km/h für Personenzüge
- Vergleich des Unterschieds zwischen SSD-Messquerschnitt und Dauermessstelle während Referenzperiode und Periode mit SSDs
  - Wetterbedingungen und Geschwindigkeit an beiden Messstellen gleich

# Spektrale Modifikation

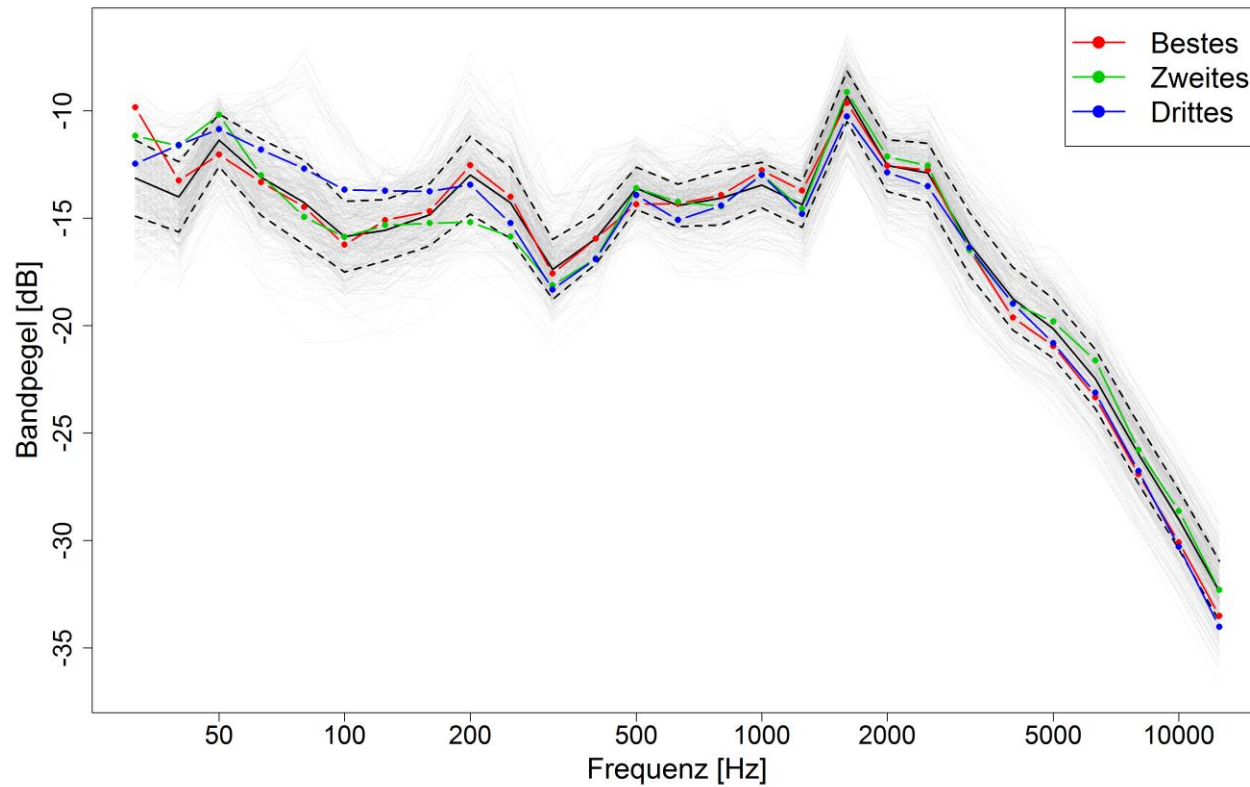


- Wirkung der Schienenstegdämpfer vergleichsweise gering
- Starke Tiefpass-Charakteristik der Maßnahmen

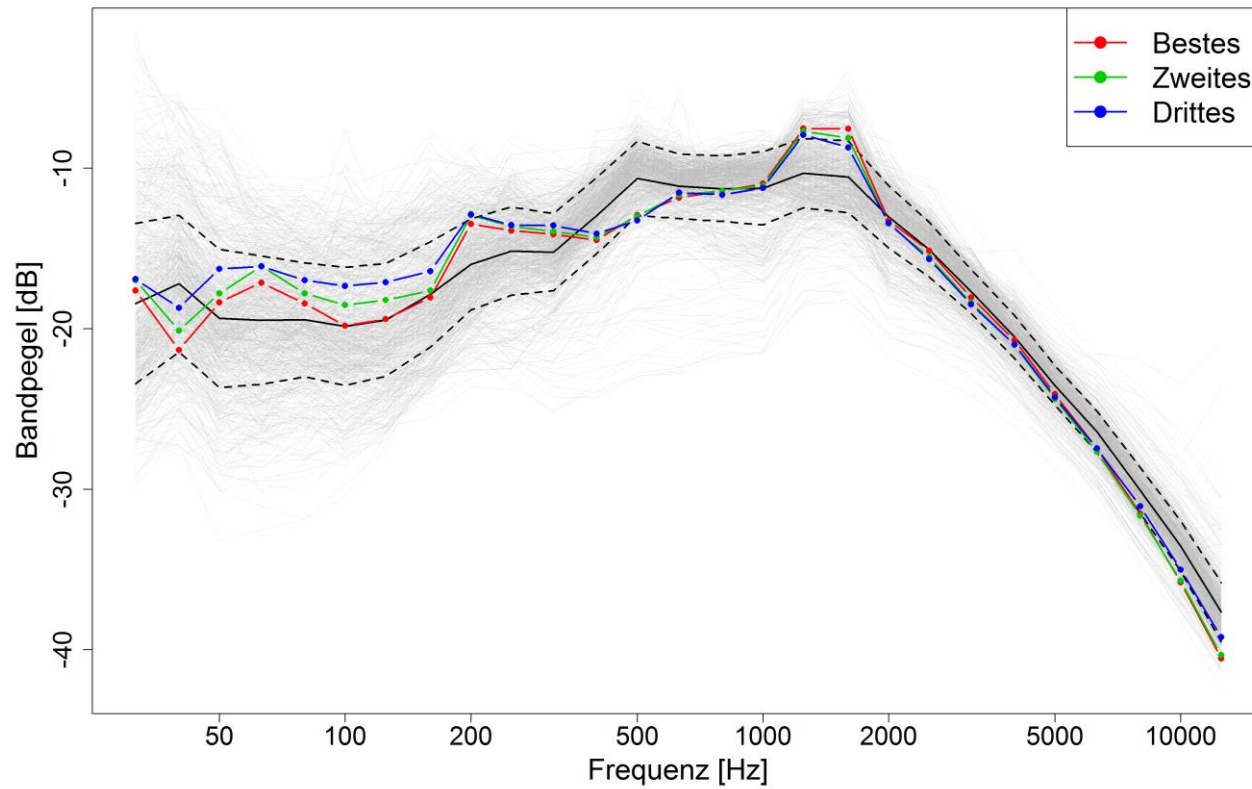
## Auswahl repräsentativer Stimuli

- Unterscheidung Güter- (GZ) und Personenzüge (PZ)
- Stimulusdauer: 3 Sekunden
- Grundmenge: Emissionen der ~5000 Züge in 7,5 m
- Einschränkungen
  - Fahrgeschwindigkeit: GZ: 85-95 km/h, PZ: 105-115 km/h
  - max. Beschleunigung:  $\pm 0,21 \text{ m/s}^2$  ( $\pm 0,75 \text{ km/h je Sekunde}$ )
- Berechnung der mittleren, normalisierten Spektren für GZ und PZ
- Auswahl jener Segmente mit den geringsten, quadratischen Abweichungen

## Personenzüge 105-115 km/h



## Güterzüge 85-95 km/h



## Wahrnehmbarkeitsschwellen

- Welcher Pegelunterschied wird mit oder ohne spektraler Modifikation als weniger lästig erkannt

## Freie Größenschätzung

- Zusammenhang zwischen Lästigkeitsänderung und Änderung der akustischen Parameter

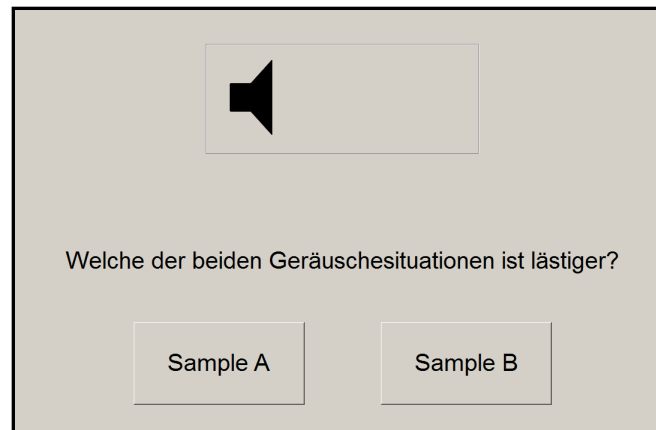
## Verschiedene Bedingungen wurden abgedeckt

- Spektrale Modifikation entsprechend der Lärmschutzmaßnahmen
- Pegelvariation
- Zugtypen



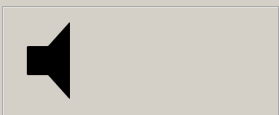
## Adaptiver Paarvergleich

- 3 Referenzpegel: 50, 60 und 70 dB(A)
- Pegel des Vergleichsstimulus abhängig von Antwort des vorangegangenen Paarvergleichs
- Vergleichsstimulus mit und ohne spektraler Modifikation



## Freie Größenschätzung

- numerische Bewertung der Lästigkeit ohne Vorgabe einer Bewertungsskala
- Proportionale Beurteilung der Lästigkeit
- Werte kleiner oder gleich 0 nicht zulässig



Beurteilen Sie die Lästigkeit der Geräuschsituation.

## Testdurchführung

- 40 normalhörende Probanden (davon 24 weibliche Probanden)
- Mittleres Alter:  $27,6 \pm 5$  Jahre
- Gehörgerechte Wiedergabe mittels Kopfhörer
- Reflexionsarmer Raum mit Hintergrundpegel von 17 dB(A)



- Testzeit je Proband: 6 - 7 h, aufgeteilt in 2 Blöcke

## Vorverarbeitung

- Ausschluss problematischer Durchgänge nach anonymisierter Klassifikation durch einen Experten
- Ein Proband ausgeschlossen aufgrund extremer Schwellwerte

## Statistische Analyse

- Linear-Mixed-Effects Model mit 3 Faktoren
  - 2 Zugtypen
  - 4 Ausbreitungsbedingungen
  - 3 Referenzpegel: 50, 60 und 70 dB(A)
- Proband als Zufallsfaktor

## Post-hoc-Tests bei signifikanten Faktoren

Referenzpegel $L_{A3s}$	Freifeld	Schienen- stegdämpfer	niedrige Lärm- schutzwand	Lärmschutz- wand 4 m
50 dB(A)	3,1 dB(A)	3,3 dB(A)	4,1 dB(A)	3,6 dB(A)
60 dB(A)	2,3 dB(A)	2,7 dB(A)	3,4 dB(A)	3,0 dB(A)
70 dB(A)	1,1 dB(A)	1,8 dB(A)	3,2 dB(A)	2,7 dB(A)

## Effekt des Zugtyps

- Schwach signifikant, aber nur 0,25 dB(A)

## Effekt des Referenzpegels

- Höhere Schwellen bei kleineren Referenzpegeln
- Effekt bei starker Modifikation (beide LSWs) schwächer ausgeprägt

## Effekt der Maßnahme

- Nur zwischen Freifeld und niedriger LSW signifikant

## Vorverarbeitung

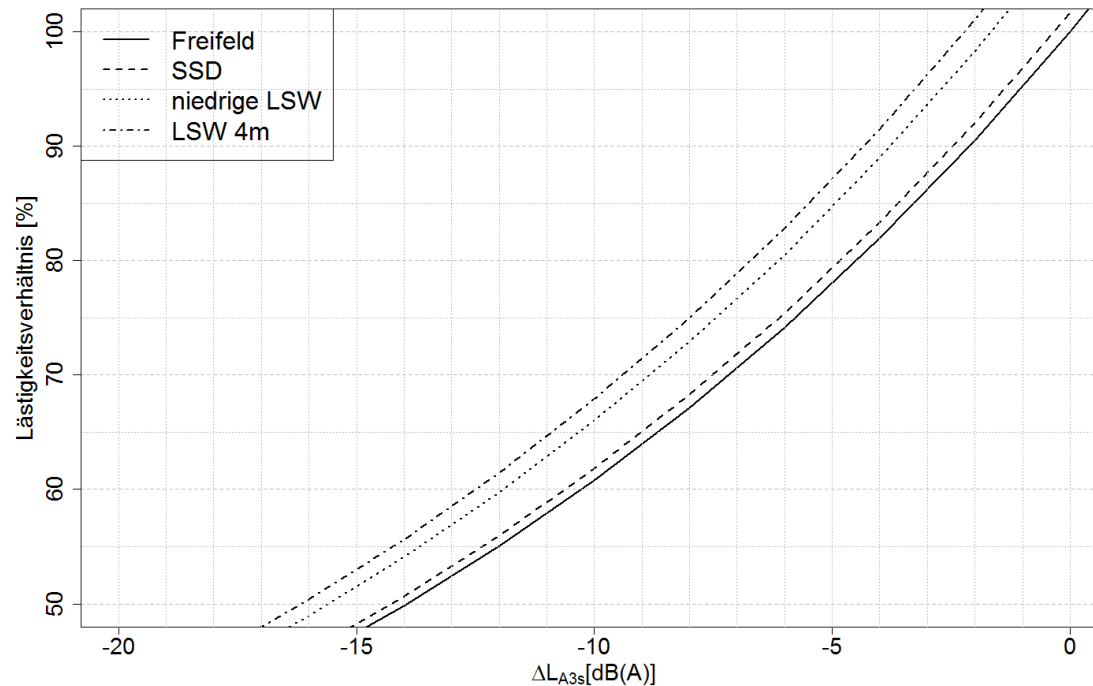
- Lästigkeitsurteile wurden logarithmiert (Basis 2)
- Erhöhung um 1 bedeutet Verdoppelung der Lästigkeit
- Mittelung über 4 Wiederholungen

## Konsistenz der Daten

- Korrelation zwischen Wiederholungen fast immer größer 0,7
- Korrelation mit mittlerem Lästigkeitsurteil fast immer größer 0,8
- Urteile konsistent über Wiederholungen und Probanden

## Auswertung

- Additive lineare Modelle mit  $L_{A3s}$  mit und ohne Maßnahme, Zugtyp
- Modelle mit Lautstärkepegel (Median oder 5%-Quantil) anstatt  $L_{A3s}$
- Stufenweise Modellbildung mittels Kreuzvalidierung
  - Verhindert Überanpassung des Modells an die Daten
  - Bessere Verallgemeinerbarkeit
  - Liefert vergleichbare Ergebnisse

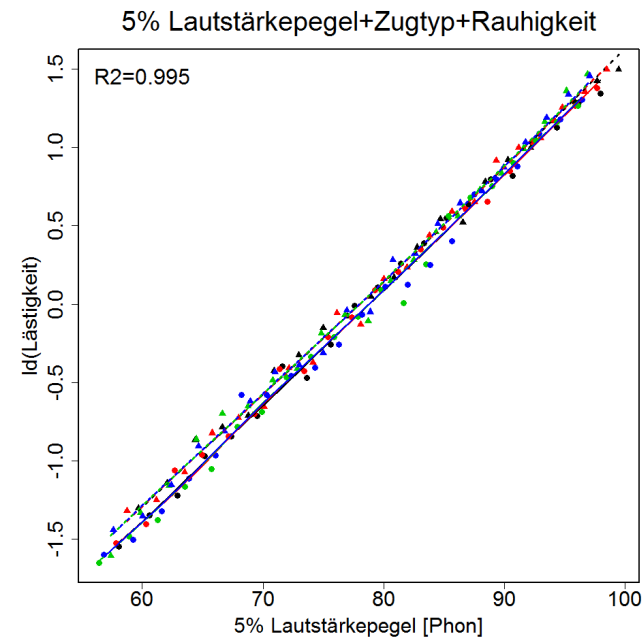
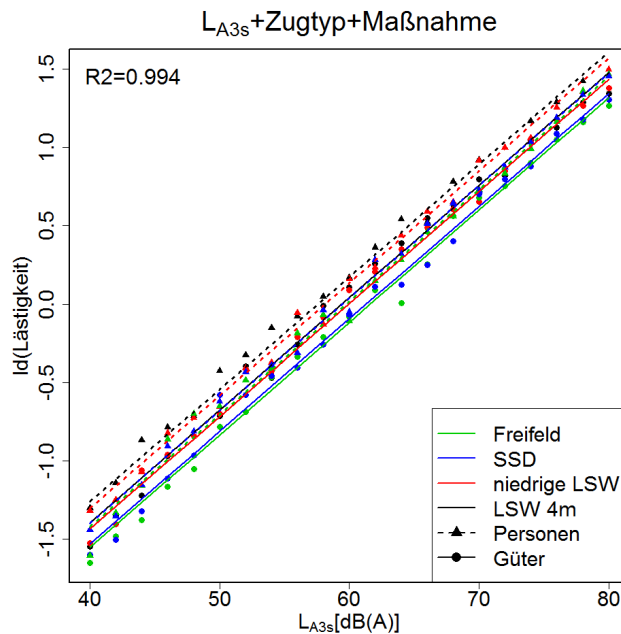


Additives Modell mit Maßnahme,  $L_{A3s}$  und Zugtyp:  $R^2=0,994$  (0.983 für  $L_{A3s}$  )

- Verschiebung aufgrund der verschiedenen Maßnahmen
- Lästigkeit bei Maßnahmen höher bei gleichem  $L_{A3s}$
- Personenzug im Vergleich zu Güterzug um 1,8 dB(A) nach links verschoben

Änderung des Maßnahmeneffekts aufgrund der Zugkategorie signifikant

- Der maximale Fehler liegt aber unter 0,4 dB(A)



## Spitzenlautstärkepegel der Vorbeifahrt erklärt Lästigkeit am Besten

- 5%-Lautstärkepegel alleine vergleichbar mit  $L_{A3s}$ , Zugtyp und Maßnahme
- Der Maßnahmentyp ist vernachlässigbar
- Zugtyp bringt leichte zusätzliche Verbesserung:  $R^2=0,995$
- Lästigkeitsverschiebung durch Zugtyp geringer als beim Modell mit  $L_{A3s}$
- Median der Rauhigkeit verbessert das Modell noch leicht (Kreuzvalidierung)



## Wahrnehmbarkeitsschwellen der Lästigkeit

- Abhängigkeit des Ausgangspegels
- Schienenstegdämpfer: Schwellen im Bereich ihrer Wirkung
- Lärmschutzwände: Schwellen von etwa 3-4 dB(A)

## Lästigkeitshalbierung bei Pegelreduktion

- Freifeld: Pegelminderung von  $\sim 14$  dB(A) erforderlich
- Spektrale Modifikation durch Lärmschutzmaßnahmen erfordert höhere Pegelreduktionen (je nach Maßnahme zwischen 0,3 und 2,2 dB(A))

## Lautstärkepegel besserer Deskriptor für Wahrnehmung als Schalldruckpegel

## Nutzung der Ergebnisse

- Beitrag für Verständnis des Zusammenhangs von wahrgenommener Lästigkeit und akustischen sowie psychoakustischen Parametern

- H.M. Miedema, and C.G. Oudshoorn, “Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals”. *Environmental Health Perspectives*, **109**(4), 409–416, (2001)
- M.E. Nilsson, M. Andéhn, P. Lešna, “Evaluating roadside noise barriers using an annoyance-reduction criterion”, *J. Acoust. Soc. of Am.*, **124**(6), 3561–3567 (2008)
- C. Kasess, A. Noll, P. Majdak, H. Waubke, “Effect of train type on annoyance and acoustic features of the rolling noise”, *J. Acoust. Soc. of Am.*, **134** (2), 1071-1081, (2013)
- R.B. Raggam, M. Cik, R.R. Höldrich, K. Fallast, E. Gallasch, M. Fend, M., A. Lackner, E. Marth, “Personal noise ranking of road traffic: subjective estimation versus physiological parameters under laboratory conditions”, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, **210**(2), 97-105, (2007)
- J. Vos, “Annoyance caused by the sounds of a magnetic levitation train. The Journal of the Acoustical Society of America”, *J. Acoust. Soc. of Am.*, **115**(4), 1597-1608 (2004)
- D. Duhamel, “Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier”, *J. of Sound and Vibration*, **197**(5), 547–571, (1996)
- R.A. Broadbent, D.J. Thompson, D. J., C.J.C. Jones, “The acoustic properties of railway ballast”, *Proceedings of Euronoise*, (2009)
- M. Delany and E.N. Bazley, “Acoustical properties of fibrous absorbent materials”, *Appl. Acoust.* **3**, 105–116, (1970)
- H. Levitt, “Transformed up–down procedures in psychoacoustics” *J. Acoust. Soc. Am.* **49**, 467–477, (1971)
- W. Jesteadt, “An adaptive procedure for subjective judgments”, *Perception & Psychophysics*, **28**(1), 85–88, (1980)
- Deutsches Institut für Normung, “DIN 45631: Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum – Verfahren nach E. Zwicker”, (1991)