

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)

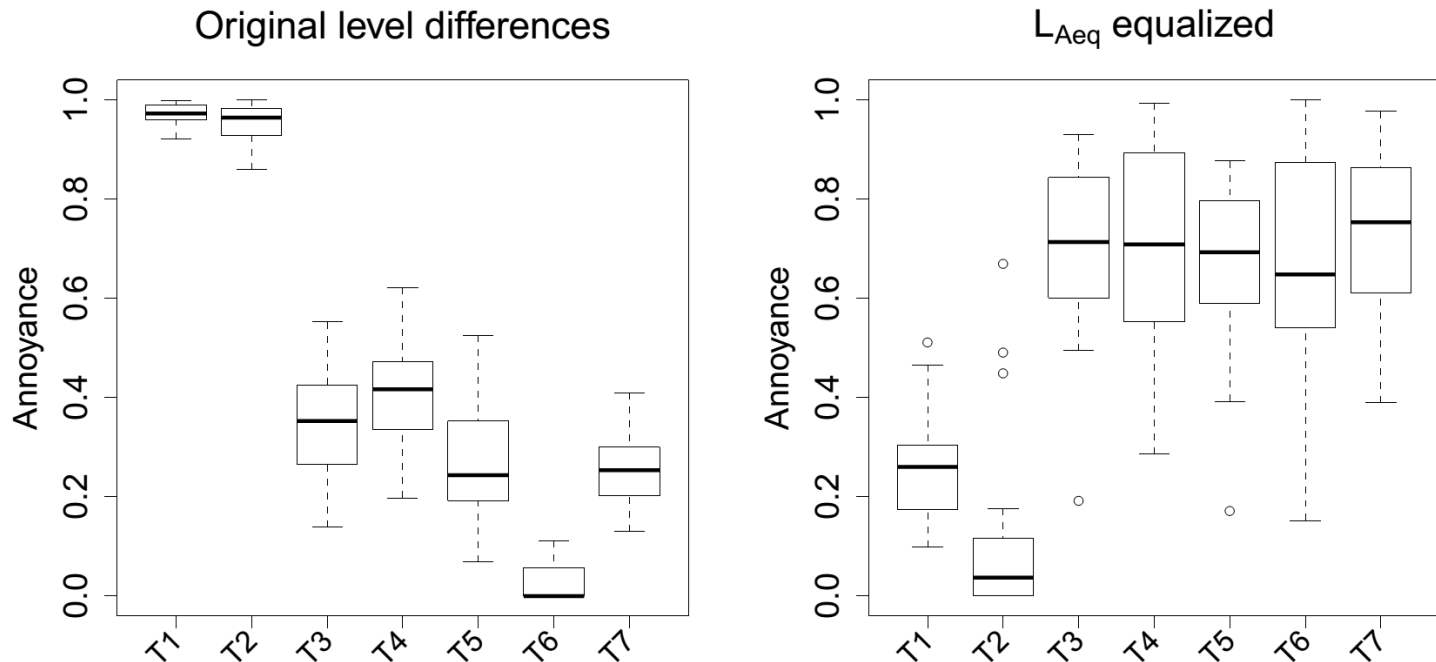
- Anteil der Belästigten als Funktion des A-bewerteten Pegels
- Immissionspegel z.B. Day-Evening-Night-Level
- Beziehung abhängig vom Verkehrsmittel

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

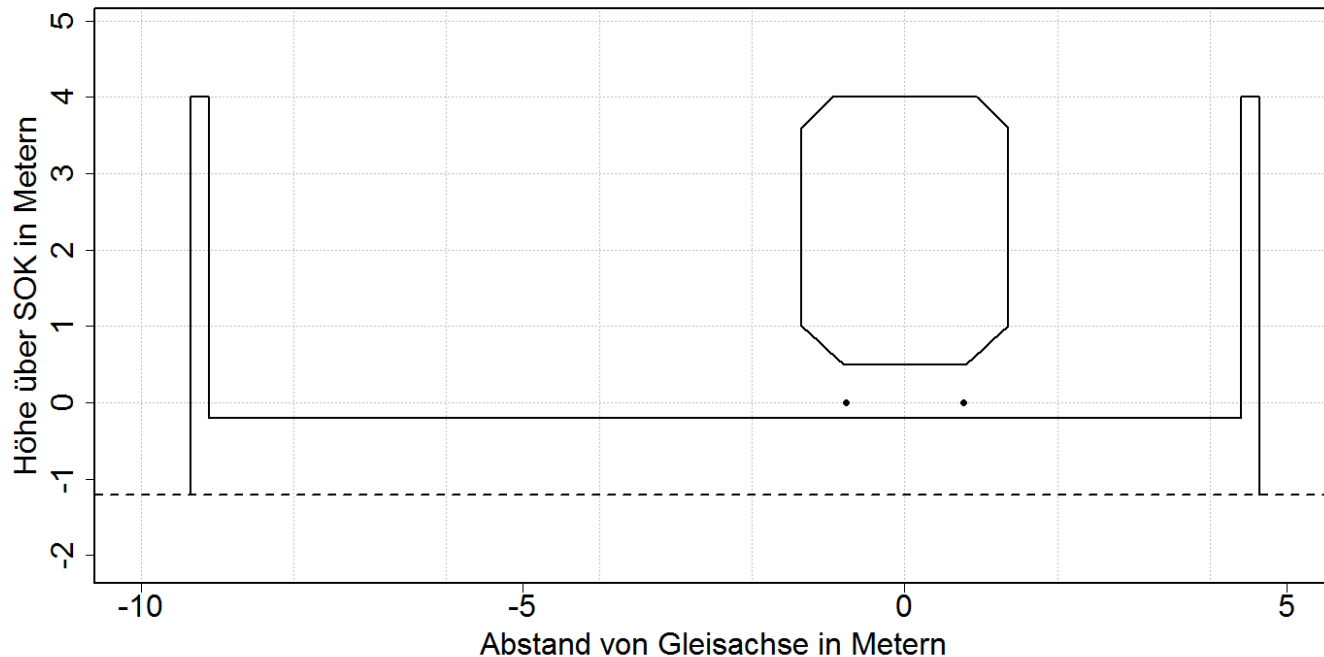
- Gute Übereinstimmung des spektralen Verlaufs des Einfügedämmmaßes

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

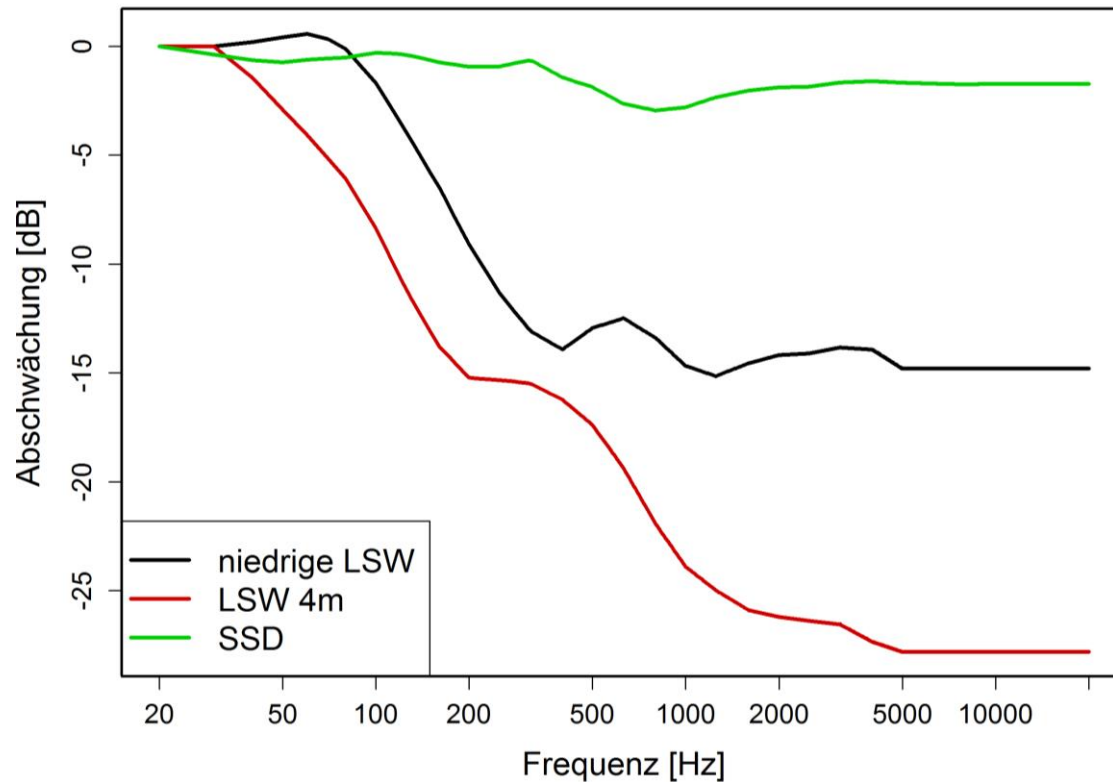
Ableitung der Wirkung aus bestehenden Messdaten

- 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

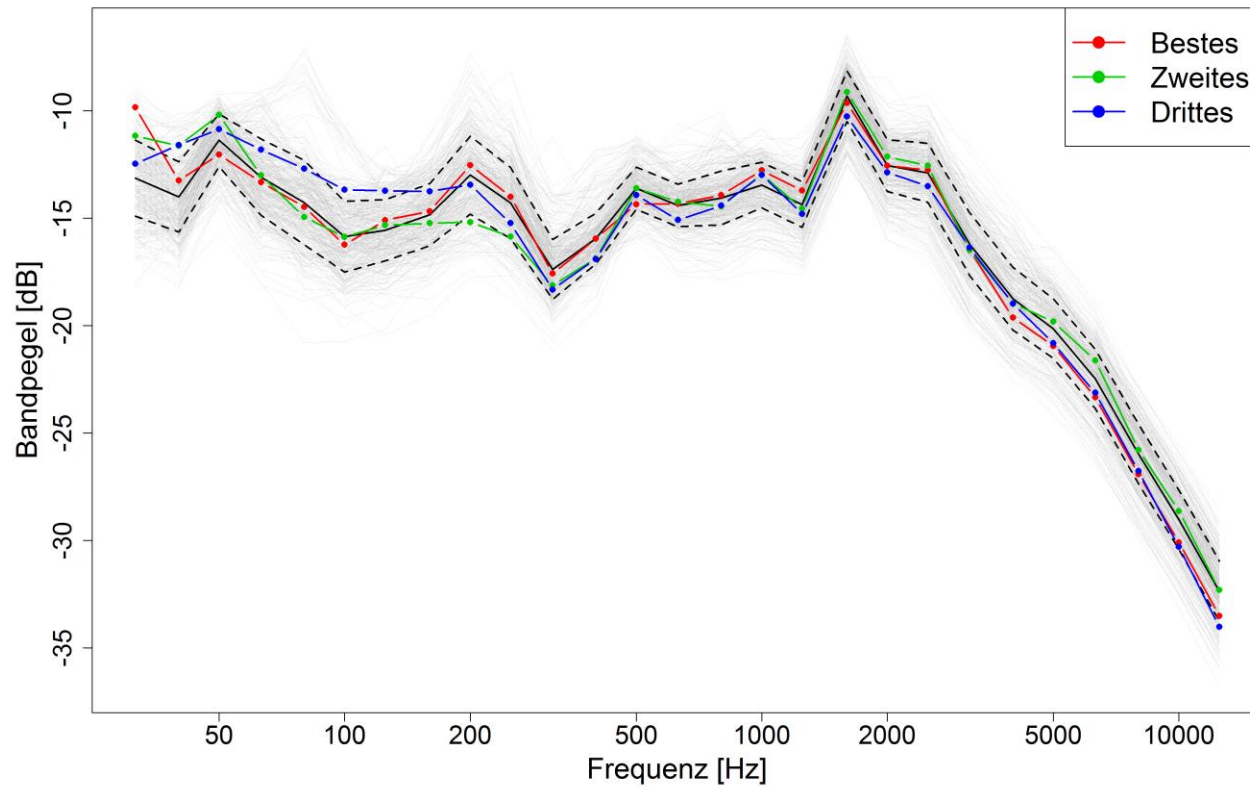


- Wirkung der Schienenstegdämpfer vergleichsweise gering
- Starke Tiefpass-Charakteristik der Maßnahmen

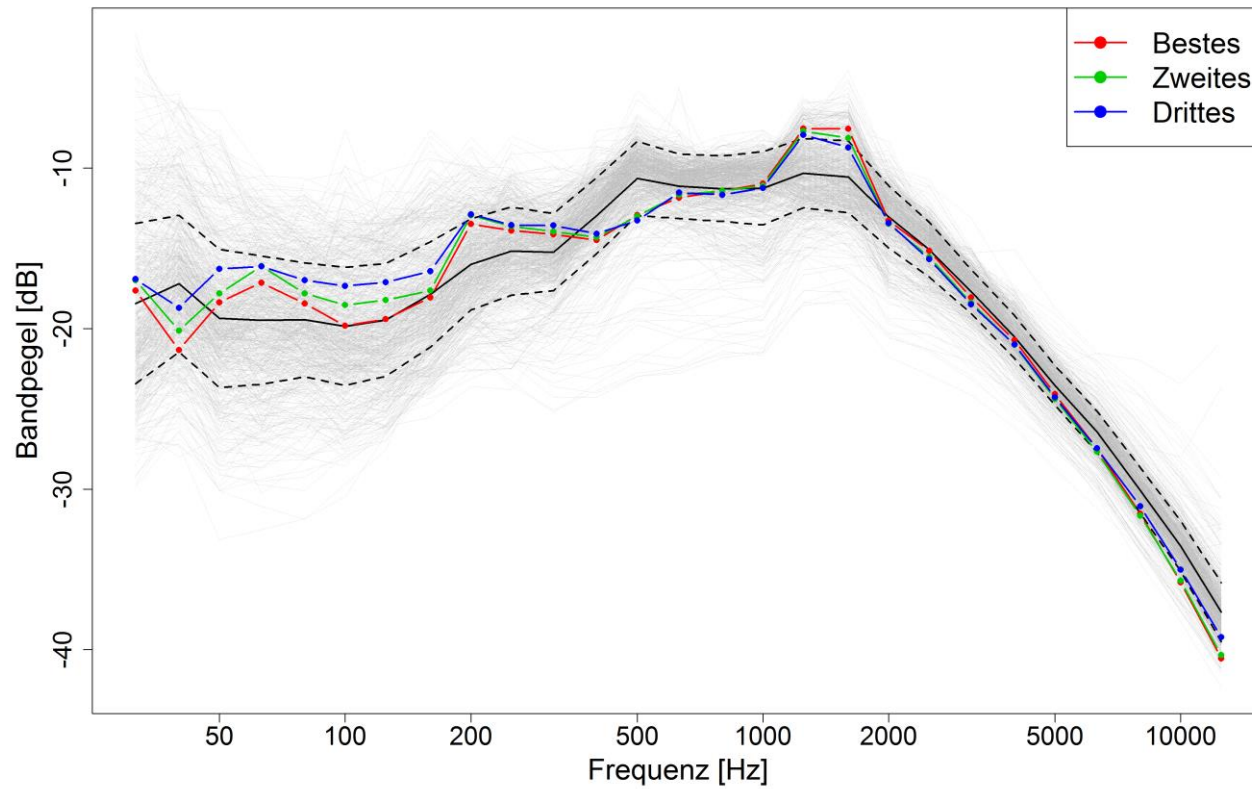
Auswahl repräsentativer Stimuli

- 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

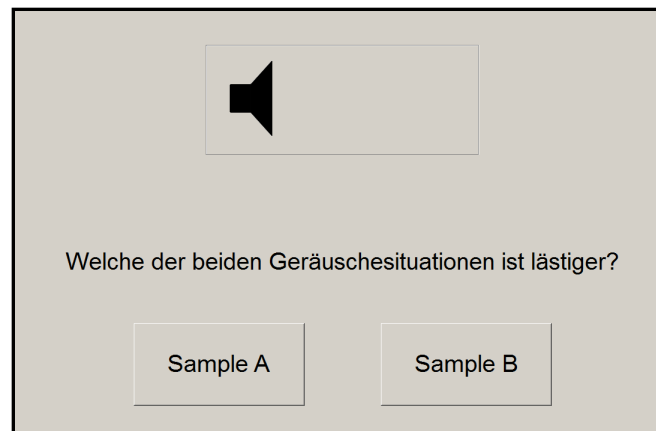
- Zusammenhang zwischen Lästigkeitsänderung und Änderung der akustischen Parameter

Verschiedene Bedingungen wurden abgedeckt

- Spektrale Modifikation entsprechend der Lärmschutzmaßnahmen
- Pegelvariation
- Zugtypen

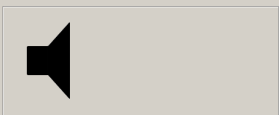
Adaptiver Paarvergleich

- 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

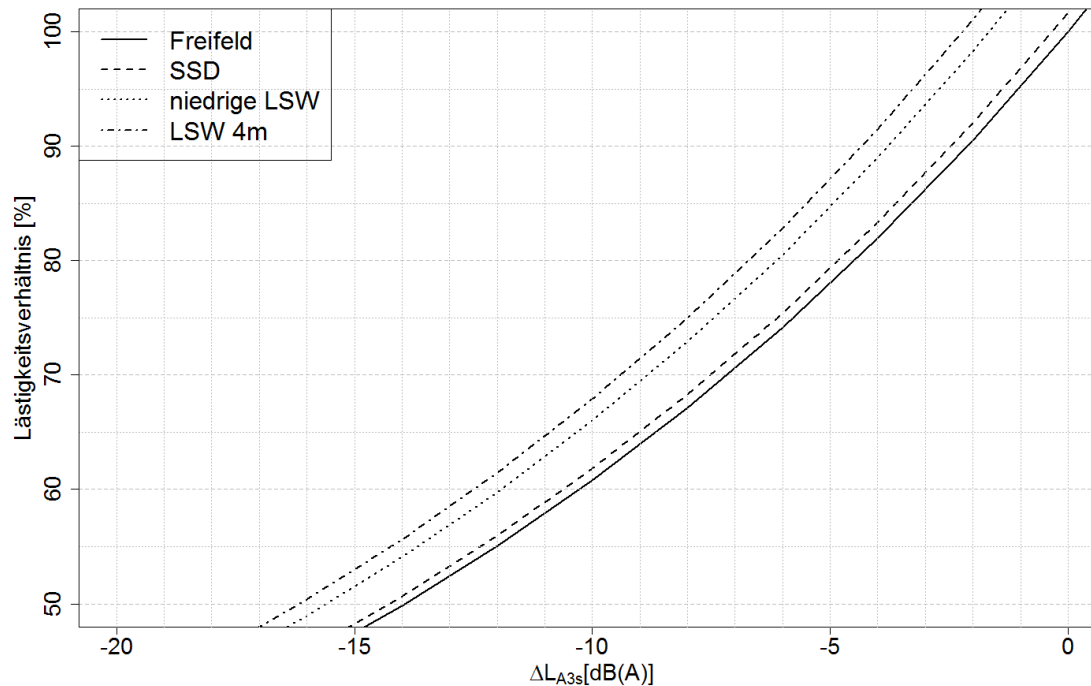
- Lästigkeitsurteile wurden logarithmiert (Basis 2)
- Erhöhung um 1 bedeutet Verdoppelung der Lästigkeit
- Mittelung über 4 Wiederholungen

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

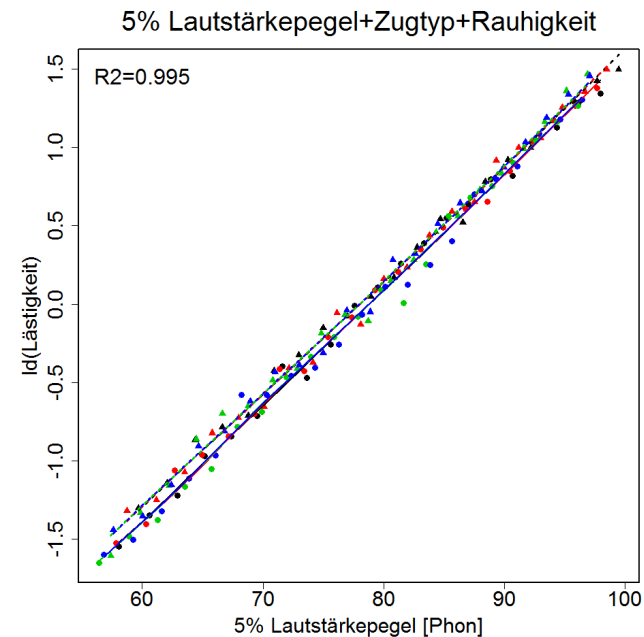
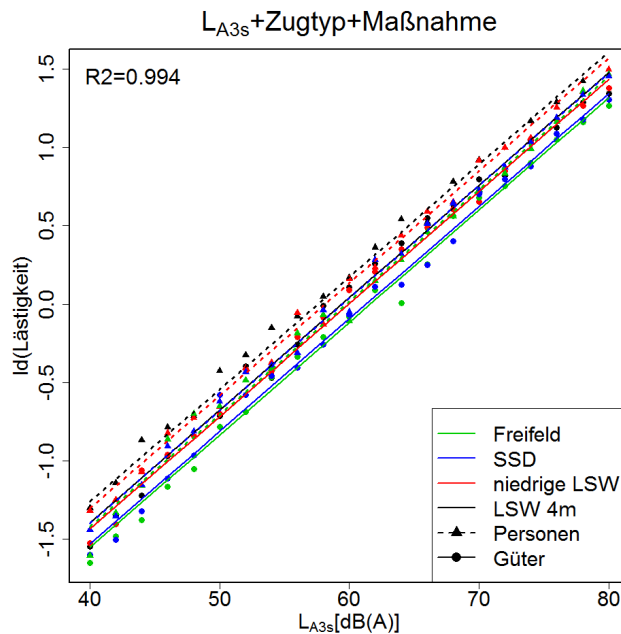


Additives Modell mit Maßnahme, L_{A3s} und Zugtyp: $R^2=0,994$ (0.983 für L_{A3s})

- 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 ~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)