

# PSYCHOAKUSTISCHE ANALYSE VON SCHIENEN- VERKEHRSINDUZIERTEN SCHALLIMMISSIONEN

Im Projekt PASS wurde der Frage nachgegangen, wie sowohl Änderungen im Schalldruckpegel von Schallimmissionen als auch spektrale Modifikationen durch Schienenstegdämpfer, durch lichtraumnahe und durch konventionelle Lärmschutzwände mit Veränderungen der empfundenen Lästigkeit zusammenhängen.

Mittels binauraler Messtechnik wurden akustische Aufzeichnungen von Zugvorbeifahrten angefertigt. Die durch die betrachteten Lärmschutzmaßnahmen verursachten spektralen Veränderungen gegenüber der Freifeldausbreitung wurden durch Simulation und aus bereits vorliegenden Messdaten abgeschätzt.

Mit Hilfe von Wahrnehmungstests mit 40 Probanden zeigte sich, dass bei hohem Ausgangspegel der Schallimmissionen eine Verringerung der Lästigkeit bei einem geringeren Unterschied des Pegels wahrgenommen wird als bei niedrigeren Ausgangspegeln. Bei stark spektral modifizierten Geräuschen (z.B. Lärmschutzwand) ist dieser Unterschied weniger ausgeprägt.

Weiters zeigte sich, dass bei gleichem A-bewerteten Pegel die betrachteten Lärmschutzmaßnahmen als geringfügig lästiger wahrgenommen werden als die freie Schallausbreitung. Diese prinzipielle Erhöhung der Lästigkeit ist jedoch vor allem bei den Lärmschutzwänden deutlich geringer als die Verringerung der Lästigkeit aufgrund der tatsächlichen Pegelreduktion. Deshalb gibt - in Bezug auf die empfundene Lästigkeit - der A-bewertete Schalldruckpegel eine maßnahmenabhängige, geringfügig zu hohe Wirkung wieder. Bei Verwendung der Lautheit als beschreibender Größe können Lästigkeitsunterschiede ohne explizite Berücksichtigung der Maßnahme modelliert werden. Daraus wurde im Rahmen des Projektes ein Bewertungsschema für die akustische Wahrnehmung von Bahnlärm unter üblichen Bedingungen (keine Flachstellen, keine Bremsgeräusche, etc.) vorgeschlagen.

#### Facts:

- Laufzeit: 08/2013-11/2014

- Forschungskonsortium:

TU-Wien, Institut für Verkehrswissenschaften

Österreichische Akademie der Wissenschaften, Institut für Schallforschung

psiaoustic Umweltforschung und Engineering GmbH



ABB 1. Binaurale Erfassung der Schallimmissionen mit Kunstkopfmesssystem

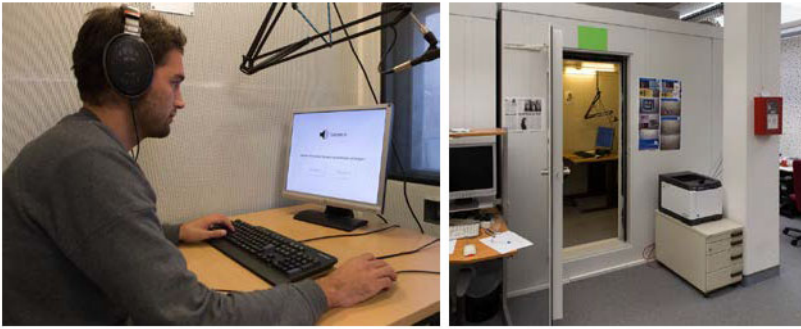


ABB 2. Proband bei akustischen Wahrnehmungstests in einer Schallkammer

## Kurzzusammenfassung

### Problem

Der A-bewertete Schalldruckpegel wird in der Regel als objektivierende Beurteilungsgröße für Geräuschsituationen herangezogen (Normen, Vorschriften, etc.). Dieser Pegel spiegelt jedoch die subjektive Wahrnehmung im Allgemeinen nur bedingt wider.

### Gewählte Methodik

Im vorliegenden Projekt wurde daher das Lärmempfinden von Menschen hinsichtlich verschiedener, eisenbahninduzierter Schallimmissionen (Personen- und Güterzug; freie Schallausbreitung, Lärmschutzwände und Schienenstegdämpfer) mit Hilfe von Wahrnehmungstests auf Basis repräsentativer Stimuli im Labor untersucht.

### Ergebnisse

Bei höheren Ausgangspegeln zeigt sich eine von der spektralen Modifikation abhängige Verringerung der für eine Reduktion der wahrgenommenen Lästigkeit notwendigen Pegelveränderung. Weiters zeigt sich, dass bei gleich hohem A-bewerteten Pegel die betrachteten Lärmschutzmaßnahmen geringfügig lästiger wahrgenommen werden als die freie Schallausbreitung. Die Verringerung der Lästigkeit aufgrund der tatsächlichen Pegelreduktion ist aber vor allem bei den Lärmschutzwänden deutlich höher. Bei Verwendung der Lautheit können Unterschiede in der Lästigkeit ohne explizite Berücksichtigung der Maßnahme modelliert werden.

### Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse legen nahe, dass die Verwendung eines Lautheitsmodells zur akustischen Beschreibung der Unterschiede in der wahrgenommenen Lästigkeit in verschiedenen Lärmsituationen besser geeignet ist als der A-bewertete Schalldruckpegel.

### English Abstract

Although the A-weighted sound pressure level reflects the subjective perception only to a limited degree, it is used in most cases as an assessment parameter for noise situations. Therefore, this project was aimed at investigating the subjective noise perception as a function of sound pressure level and changes in rail-vehicle-induced noise immissions: of particular interest were spectral modifications due to effects of low and conventional noise barriers and rail dampers. Based on the results an assessment scheme for acoustic perception of changes in railway noise under typical conditions is suggested.

### Impressum:

**Bundesministerium für Verkehr,  
Innovation und Technologie**

DI Dr. Johann Horvatits,  
Abt. IV/ST 2 Technik und  
Verkehrssicherheit  
johann.horvatits@bmvit.gv.at,

DI (FH) Andreas Blust,  
Abt. III/14 Mobilitäts- und  
Verkehrstechnologien  
andreas.blust@bmvit.gv.at,  
www.bmvit.gv.at

### ÖBB-Infrastruktur AG

Ing. Wolfgang Zottl, ISM;  
Leitung Forschung & Entwicklung  
wolfgang.zottl@oebb.at,  
www.oebb.at

### ASFINAG

DI Eva Hackl,  
Manager International Relations  
und Innovation  
eva.hackl@asfinag.at,

DI (FH) René Moser, Leiter Strategie,  
Internationales und Innovation  
rene.moser@asfinag.at,  
www.asfinag.at

### Österreichische Forschungs- förderungsgesellschaft mbH

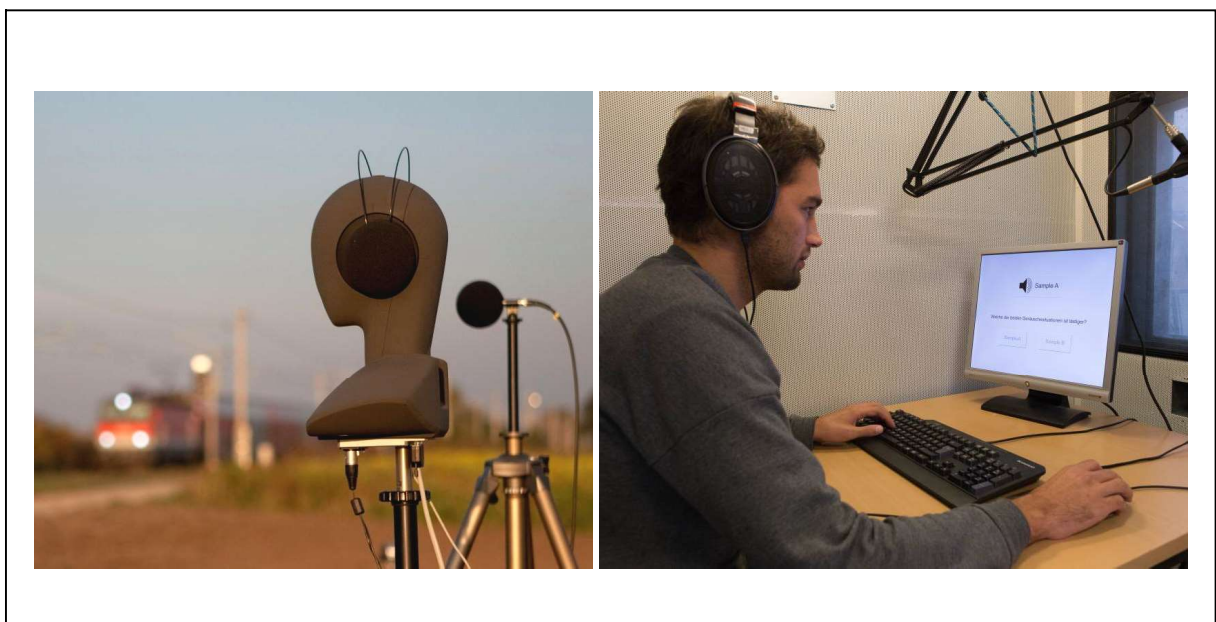
DI Dr. Christian Pecharda,  
Programmleitung Mobilität  
Sensengasse 1, 1090 Wien  
christian.pecharda@ffg.at,  
www.ffg.at

November, 2014

# Psychoakustische Analyse von schienenverkehrsinduzierten Schallimmissionen PASS

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2012  
(VIF2012)

November 2014





## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Renngasse 5  
A - 1010 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs  
Aktiengesellschaft  
Rotenturmstraße 5-9  
A - 1010 Wien



### Für den Inhalt verantwortlich:

Technische Universität Wien  
Institut für Verkehrswissenschaften  
Karlsplatz 13/230-2  
A-1040 Wien



Österreichische Akademie der Wissenschaften  
Institut für Schallforschung  
Wohllebengasse 12-14  
A-1040 Wien



psiacoustic Umweltforschung und Engineering GmbH  
Lastenstraße 38  
A-1230 Wien



### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Bereich Thematische Programme  
Sensengasse 1  
A – 1090 Wien





# **Psychoakustische Analyse von schienenverkehrsinduzierten Schallimmissionen PASS**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2012)

**AutorInnen:**

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann**

**Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Maly**

**apl. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Holger Waubke**

**Dipl.-Ing. Dr. Christian Kaseß**

**Dipl.-Ing. Martin Jaksch**

**Florian Biebl, BSc**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

Technische Universität Wien, Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich für  
Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>0. EXECUTIVE SUMMARY .....</b>	<b>5</b>
0.1. DEUTSCHE VERSION .....	5
0.2. ENGLISH VERSION.....	6
<b>1. PROBLEMSTELLUNG UND LÖSUNGSANSATZ.....</b>	<b>8</b>
<b>2. MESSUNG UND VORAUSWERTUNG DER SCHALLIMMISSIONEN.....</b>	<b>10</b>
2.1. MIKROFONAUFGNAHMEN MIT ACRAMOS® .....	10
2.2. KUNSTKOPFAUFGNAHMEN.....	16
<b>3. ÜBERTRAGUNGSFUNKTION VON LÄRMSCHUTZMAßNAHMEN .....</b>	<b>25</b>
3.1. SIMULATIONSANSATZ FÜR LÄRMSCHUTZWÄNDE.....	25
3.2. VALIDIERUNG DER BERECHNUNGSMETHODE FÜR LÄRMSCHUTZWÄNDE .....	27
3.3. SIMULATION DER LÄRMSCHUTZWÄNDE.....	30
3.4. SCHIENENSTEGDÄMPFER.....	33
3.5. ÜBERTRAGUNGSFUNKTIONEN.....	39
<b>4. WAHRNEHMUNGSTESTS.....</b>	<b>41</b>
4.1. SELEKTION REPRÄSENTATIVER STIMULI .....	41
4.2. ERSTELLEN DER HÖRBEISPIELE.....	46
4.3. PROBANDENAUSWAHL .....	50
4.4. TESTDESIGN .....	50
4.5. TESTDURCHFÜHRUNG .....	52
<b>5. STATISTISCHE AUSWERTUNG .....</b>	<b>56</b>
5.1. WAHRNEHMBARKEITSSCHWELLE DER LÄSTIGKEIT.....	56
5.2. BEURTEILUNG DER LÄSTIGKEIT .....	61
<b>6. BEWERTUNGSSYSTEM.....</b>	<b>70</b>
<b>7. ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>75</b>
<b>8. LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>79</b>
<b>ANHANG A.....</b>	<b>82</b>
<b>ANHANG B.....</b>	<b>88</b>
<b>ANHANG C.....</b>	<b>90</b>
<b>ANHANG D.....</b>	<b>91</b>

## 0. EXECUTIVE SUMMARY

### 0.1. Deutsche Version

Der A-bewertete Schalldruckpegel wird in der Regel als objektivierende Beurteilungsgröße für Geräuschsituationen herangezogen (Normen, Vorschriften, etc.). Dieser Pegel spiegelt jedoch die subjektive Wahrnehmung im Allgemeinen nur bedingt wieder. In vorliegendem Projekt wurde daher das Lärmempfinden von Menschen hinsichtlich verschiedener, eisenbahninduzierter Schallimmissionen genauer untersucht.

Im Kern der Betrachtungen wurde der Frage nachgegangen, wie Pegelvariationen, aber auch spektrale Änderungen verursacht durch konventionelle und lichtraumnahe Lärmschutzwände, sowie durch Schienenstegdämpfer und die empfundene Lästigkeit zusammenhängen. Zu diesem Zweck wurden mit binauraler Messtechnik (Kunstkopfmesssystem) akustische Aufzeichnungen von Zugs vorbeifahrten angefertigt. Um die Wirkung der betrachteten Lärmschutzmaßnahmen ohne weitere aufwändige Messungen realitätsnahe nachstellen zu können, wurde gegenüber einer Freifeldausbreitung die durch die Lärmschutzmaßnahmen verursachten spektralen Veränderungen durch Simulation und aus bereits vorliegenden Messdaten abgeschätzt.

Aus den erfassten Geräuschsituationen wurden für Güter- und für Personenzüge repräsentative Hörproben extrahiert, die spektrale Verteilung entsprechend der akustischen Wirkung der Lärmschutzmaßnahmen modifiziert und der Schalldruckpegel variiert. Diese Stimuli stellten die Basis für die vorgenommenen Wahrnehmungstests dar, in welchen durch 40 Probanden sowohl die Wahrnehmbarkeitsschwelle von Lästigkeitsunterschieden bei einer Pegeländerung bzw. Klangänderung ermittelt, als auch die empfundene relative Lästigkeit der verschiedenen, manipulierten Proben beurteilt wurden.

Die Untersuchungen zeigen, dass bei hohem Ausgangspegel eine Verringerung der Lästigkeit bei einem geringeren Unterschied des Pegels wahrgenommen wird als bei niedrigeren Ausgangspegeln. Bei stark spektral modifizierten Geräuschen (z.B. Lärmschutzwand) ist dieser Unterschied weniger ausgeprägt.

Die Beurteilung der Proben ergab weiters, dass bei gleichem A-bewerteten Pegel die betrachteten Lärmschutzmaßnahmen geringfügig lästiger wahrgenommen werden als die freie Schallausbreitung. Diese Erhöhung der Lästigkeit ist aber vor allem bei den Lärmschutzwänden deutlich geringer als die Verringerung der Lästigkeit aufgrund der Pegelreduktion. Dennoch gibt der A-bewertete Schalldruckpegel bei den betrachteten Schallschutzmaßnahmen eine maßnahmenabhängige, geringfügig zu hohe Wirkung in Bezug auf die empfundene Lästigkeit wieder. Im Gegensatz dazu kann bei Verwendung der



Lautheit die Lästigkeit ohne explizite Berücksichtigung der Maßnahme modelliert werden. Daraus wurde im Rahmen des Projektes ein Bewertungsschema für die akustische Wahrnehmung von Bahnlärm unter üblichen Bedingungen (keine Flachstellen, keine Bremsgeräusche, kein Kurvenkreischen, etc.) vorgeschlagen.

## **0.2. English Version**

Although the A-weighted sound pressure level reflects the subjective perception only to a certain degree, it is used in many cases as an assessment parameter for noise situations (standards, regulations, etc.). This project was therefore dedicated to investigate the subjective noise perception regarding changes in rail-vehicle-induced noise immissions in more detail.

The project investigated the relationship between perceived annoyance and variations of the sound pressure level as well as spectral modification in the immission due to the application of low and conventional noise barriers and rail dampers. To this end, acoustic recordings of train passbys were made with a head and torso simulator 25 meters away from the centre of the track. To represent the level reductions and spectral changes of the considered mitigation measures without the need for further extensive measurements, computer simulations and existing measurement data were used.

Based on the averaged frequency spectra of a large number of passbys representative train passbys for passenger and freight trains were selected. Afterwards, the sound pressure levels of both representative stimuli were varied and their spectra were modified according the acoustical properties of the mitigation measures. The resulting set of samples built the basis for subsequent perception tests with 40 subjects. Two perception tests were designed to determine the just-noticeable-difference in annoyance with respect to level changes for different noise reduction measures as well as the relation between perceived relative annoyance and sound pressure level and/or spectral distribution.

The investigations into the just-noticeable-difference in annoyance for pure level changes show that a reduction of the annoyance at high sound pressure levels is perceived for a lower difference in level than at low sound pressure levels. For strong modifications of the spectrum due to, for example, noise barriers this effect is less pronounced.

Considering the annoyance judgements from the second test, immissions with applied mitigation measures but equal A-weighted sound pressure are slightly more annoying than the noise arising due to unimpeded (free field) propagation. However, especially for noise barriers, this increase of annoyance is much smaller than the reduction of annoyance due to the decrease in sound pressure level caused by the mitigation measure. Still, the A-weighted

sound pressure level slightly overestimates the reduction of the perceived annoyance due to the mitigation measures considered with respect to the perceived annoyance. In contrast, using the loudness allows modelling the annoyance without regarding the applied mitigation measure. Based on these results an assessment scheme for acoustic perception of railway noise under typical conditions (no flat spots, no braking noise, no curve squealing, etc.) was suggested.

## 1. PROBLEMSTELLUNG UND LÖSUNGSANSATZ

Auf nationaler, wie auch auf internationaler Ebene wurden und werden intensive Anstrengungen unternommen, um die Lärmbelastung von Anrainern gering zu halten. Unter anderem werden zur Einhaltung von Immissionsgrenzwerten verschiedene Arten von Lärmschutzmaßnahmen, wie Lärmschutzwände oder Schienenstegdämpfer infrastrukturseitig appliziert. Sowohl für die Definition von Grenzwerten als auch für die Beurteilung der Wirkung von Lärmschutzmaßnahmen werden gegenwärtig A-bewertete Schalldruckpegel herangezogen.

Für die Effektivität einer Lärmschutzmaßnahme, das bedeutet in diesem Zusammenhang für die Verringerung der Lärmbelastung eines Anrainers, ist jedoch nicht die Senkung des Schalldruckpegels das entscheidende Kriterium. Vielmehr sollte die Senkung der Belästigung der betroffenen Menschen für eine Wirksamkeitsbeurteilung maßgeblich sein. Um Letzteres umsetzen zu können, bedarf es einer Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Minderung eines A-bewerteten Schalldruckpegels in einem Immissionspunkt bzw. einer durch Lärmschutzmaßnahmen hervorgerufenen Veränderung der spektralen Verteilung des Geräusches und der Veränderung der subjektiven Wahrnehmung des Menschen.

Zwar wurde bereits in vielen Feld- und Laborstudien der Zusammenhang zwischen A-bewertetem Pegel und Lästigkeit erhoben. Diese Ergebnisse sind aber nur bedingt anwendbar auf die Änderung der Lästigkeit in Folge einer Lärmschutzmaßnahme. Weiters sind bei Vorher-Nachher Studien viele nicht-akustische Faktoren zu berücksichtigen.

Im vorliegenden Projekt soll nun auf den Zusammenhang zwischen Lästigkeit und akustischen Faktoren durch verschiedene Lärmschutzmaßnahmen eingegangen werden. Hierzu soll erhoben werden, welche Pegelminderung für eine Änderung der wahrgenommenen Lästigkeit notwendig ist. Weiters soll untersucht werden, welche akustischen Faktoren entscheidend für die wahrgenommene Lästigkeit sind, hier vor allem im Bezug auf psychoakustisch besser argumentierbare Größen als dem A-bewerteten Pegel. Die Erfüllung der vorliegenden Forschungsaufgabe kann durch folgende (Teil-)Ziele und (Zwischen-)Ergebnisse sichergestellt werden:

- Akustische Aufzeichnung von Zugvorbeifahrten an der Nordbahn (Deutsch Wagram): Mittels Kunstkopfmesstechnik zur gehörgerechten Aufnahme der Geräuschsituation in einem 25 m von der Gleisachse entfernten Immissionspunkt, dem Monitoring System acramos® zur Identifizierung der Zugkategorien und zur Erfassung der



Vorbeifahrtsgeschwindigkeit, sowie mit zusätzlichen Schallpegelmessungen werden die Zugsvorbeifahrten akustisch erfasst.

- Mittlere Terzpegelspektren für die Zugskategorien Reisezug und Güterzug zur Auswahl geeigneter Stimuli für Wahrnehmungstests: Basierend auf einer größeren Menge von Schallaufzeichnungen von Zugsvorbeifahrten im Messquerschnitt<sup>1</sup> werden repräsentative Eigenschaften extrahiert, anhand welcher Stimuli für Wahrnehmungstests ausgewählt werden.
- Mittlere Übertragungsfunktion einer konventionellen Lärmschutzwand mit einer Höhe von 4 m, einer lichtraumnahen Lärmschutzwand mit einer Höhe von 1 m und von Schienenstegdämpfern: Um zusätzliche Varianz durch unterschiedliche Messstellen (z.B. Topographie, Schienerauheit usw.) zu vermeiden und um den Messaufwand gering zu halten, werden die Auswirkungen der Lärmschutzwände durch Simulation und der Schienenstegdämpfer anhand bereits vor dem Projekt vorhandener Messdaten abgeschätzt.
- Stimuli mit konstanter Länge aus binauralen Aufzeichnungen: Durch Extraktion aus den akustischen Aufzeichnungen und Manipulation (Veränderung des Schalldruckpegels, Anwendung von Übertragungsfunktionen der Lärmschutzmaßnahmen) wird ein Satz von Hörproben (Stimuli) für Wahrnehmungstests erstellt.
- Wahrnehmbarkeitsschwellen verschiedener Geräuschsituationen: Mit Hilfe von Wahrnehmungstests werden für verschiedene Lärmschutzmaßnahmen die Schwellen unterschiedlicher Lästigkeit in Abhängigkeit des A-bewerteten Ausgangspegels und verschiedener Lärmschutzmaßnahmen ermittelt.
- Wahrgenommene relative Lästigkeit verschiedener Geräuschsituationen: Mit Hilfe von Wahrnehmungstests werden für die betrachteten Lärmschutzmaßnahmen die empfundenen Lästigkeiten in Abhängigkeit des A-bewerteten Ausgangspegels erhoben.
- Einflussfaktoren auf empfundene Lästigkeit zur verbesserten Beurteilung der Wirksamkeit von Lärmschutzmaßnahmen: Die wahrgenommenen Lästigkeiten werden hinsichtlich vorhandener akustischer und psychoakustischer Parameter untersucht, die als eine verbesserte und zur A-Bewertung alternative Beschreibung der zu erwarteten Lästigkeit dienen können.

---

<sup>1</sup> Ursprünglich war vorgesehen, repräsentative Eigenschaften aus Schallaufzeichnungen von verschiedenen Messquerschnitten in Österreich zu erheben. Jedoch kann eine Mittelung von Eigenschaften verschiedener, möglicherweise nicht so gut geeigneter Messstandorte dazu führen, dass dadurch Schallaufzeichnungen des Messstandortes Deutsch Wagram als repräsentativ eingestuft werden, welche in der Praxis dort nur selten auftreten. Aus diesem Grund wurde die betrachtete Grundmenge an Schallemissionen auf Aufzeichnungen aus Deutsch Wagram beschränkt.

## 2. MESSUNG UND VORAUSWERTUNG DER SCHALLIMMISSIONEN

Zur akustischen Messung wird auf die bereits vorhandene Dauermessstelle des Monitoring System acramos® an der Nordbahn (Kilometer 14,6 nahe Deutsch Wagram) zurückgegriffen, da sich dieser Streckenabschnitt unter anderem durch einen ausgewogenen Anteil aus häufig verkehrenden Güter- und Personenzügen und ein ebenes Terrain für eine freie Schallausbreitung, sowie geringen Störgeräuscheinflüssen auszeichnet. Der Abschnitt besteht aus einer zweigleisigen Strecke mit Schotteroberbau, wobei nur Fahrten auf dem den Messpunkten näheren Gleis (Messgleis) für die Untersuchung relevant sind. Tab. 2-1 gibt die wichtigsten Oberbauparameter wieder.

Schienentyp	UIC 60
Zwischenlage	Vossloh ZW-K2a (700 kN/mm)
Schwellentyp	Betonschwelle L2 (291 kg)
Schwellenabstand	0,6 m

**Tab. 2-1: Oberbauparameter bei der acramos® Messstelle**

Die Fahrgeschwindigkeiten der Züge liegen im Allgemeinen bei etwa 100 km/h, sodass die Geräuschsituation für den Güterverkehr, sowie für einen großen Teil des in Österreich verkehrenden Personennah- und Regionalverkehrs auf Bestandstrecken repräsentativ sind. Höhere Fahrgeschwindigkeiten werden im Personenverkehr vorwiegend auf Neubaustrecken erzielt, welche meist abseits des Siedlungsgebietes liegen oder bereits mit entsprechenden Lärmschutzmaßnahmen ausgestattet sein müssen. Da sich die zu untersuchende Fragestellung auf Pegelminderungen von Anrainern bezieht, ist die Einschränkung auf Nah- und Regionalverkehr der Aussagekraft von Projektergebnissen nicht abträglich.

### 2.1. Mikrofonaufnahmen mit acramos®

Das seit dem Jahr 2005 im Einsatz befindliche, in Deutsch Wagram installierte acramos® System zeichnet vollautomatisch die Geräuschsituationen aller Zugsvorbeifahrt im Messquerschnitt auf. Darüber hinaus werden Gleisschwingungen, Fahrgeschwindigkeiten, Zugkategorien (Personenzug, Güterzug, etc.) und meteorologische Bedingungen erfasst. Im Zuge des Forschungsprojektes wurde das System einerseits vom 3. Sept. bis 30. Okt. 2014 um zusätzliche Messpositionen in 25 m Entfernung zur Achse des Messgleises erweitert (Messpunkt M3), um mittels eines konventionellen Messverfahrens für den Immissionsschalldruckpegel einen Referenzwert bestimmen zu können. Andererseits wurden auf Anregung des Auftraggebers vom 3. Sept. bis zum 26. Sept. 2014 zwei weitere

Mikrofone in einem Abstand von 50 m und 100 m zur Gleisachse (Messpunkt M4 und M5) installiert, um so Aufschluss über die entfernungsabhängigen Veränderungen der mittleren Frequenzspektren zu bekommen. Ein Überblick über den Messquerschnitt und den Messaufbau ist in Abb. 2-1 und Abb. 2-2 dargestellt, während die verwendeten Sensoren und deren Messpositionen in Tab. 2-2 zusammengefasst sind.

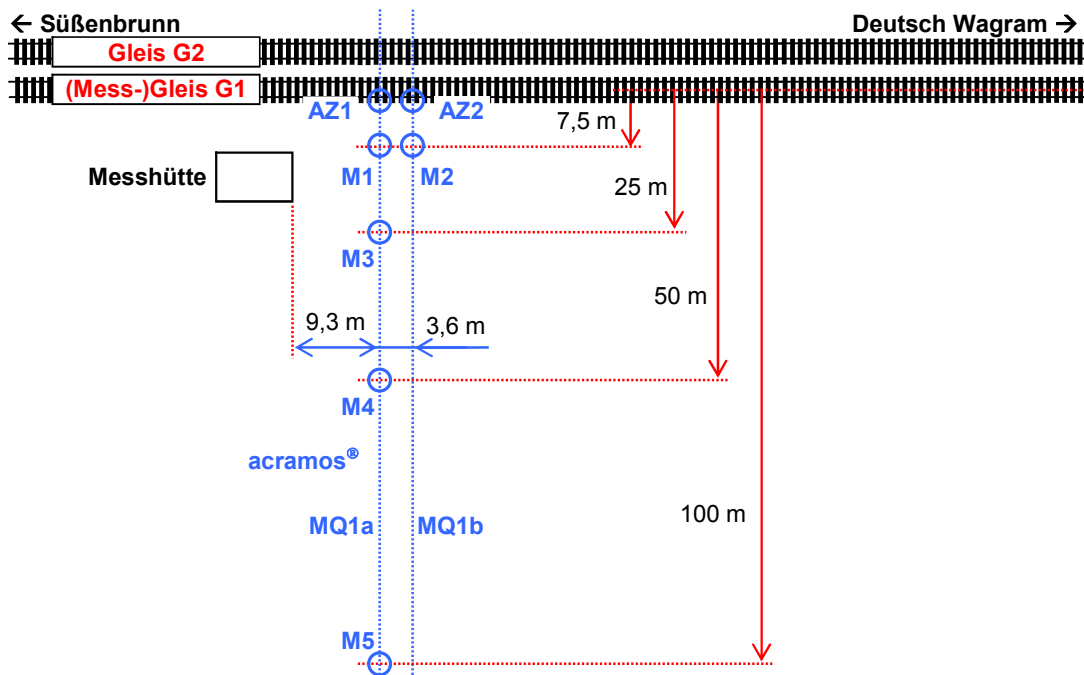


Abb. 2-1: Messquerschnitte MQ1a und M1Qb des erweiterten acramos<sup>®</sup> Systems in Deutsch Wagram

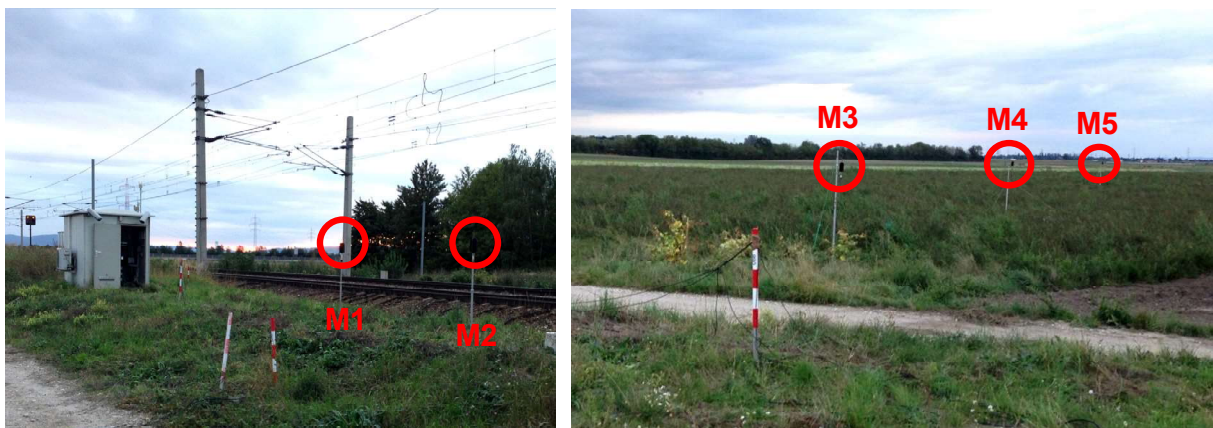


Abb. 2-2: acramos<sup>®</sup> Systems in Deutsch Wagram mit Mikrofonen M1 und M2 (links) und Erweiterung um Mikrofone M3, M4 und M5 (rechts)



Ch	Typ	Name	Position	Sensor
1	Mikrofon	M1	G1, MQ1a, 7,5 m von Gleisachse, 1,2 m über SOK, 1,7 m über Gelände	ICP G.R.A.S (46AE)
5	Mikrofon	M2	G1, MQ1b, 7,5 m von Gleisachse, 1,2 m über SOK, 1,7 m über Gelände	ICP G.R.A.S (46AE)
9	Mikrofon	M3	G1, MQ1a, 25 m von Gleisachse, 1,2 m über SOK, 2,5 m über Gelände	ICP G.R.A.S (46AE)
10	Mikrofon	M4	G1, MQ1a, 50 m von Gleisachse, 1,2 m über SOK, 2,5 m über Gelände	ICP G.R.A.S (46AE)
11	Mikrofon	M5	G1, MQ1a, 100 m von Gleisachse, 1,2 m über SOK, 2,5 m über Gelände	ICP G.R.A.S (46AE)
14	Radsensor	AZ2	G1, MQ1b, linke Schiene (bei Regelfahrtrichtung)	Frauscher Radsensor RSR122
15	Radsensor	AZ1	G1, MQ1a, linke Schiene (bei Regelfahrtrichtung)	Frauscher Radsensor RSR122

**Tab. 2-2: Übersicht der Sensoren des erweiterten acramos® Systems in Deutsch Wagram**

### Messablauf

Sobald ein Zug den am Gleis montierten induktiven Radsensoren passiert, wird ein Triggerimpuls erzeugt und die Aufnahme der Messdaten gestartet. Aus dem örtlichen Abstand der Radsensoren und dem zeitlichen Abstand der Triggerimpulse kann die genaue Geschwindigkeit jeder Achse und die mittlere Geschwindigkeit, sowie die Beschleunigung bzw. die Verzögerung des Zuges ermittelt werden. Durch Vergleich der erhalten Achsmuster mit einer internen Zugdatenbank wird zudem der Zugtyp festgestellt. Nach jeder Vorbeifahrt werden die Zeitverläufe der einzelnen Messkanäle mit einer Abtastfrequenz von 32 kHz abgespeichert, Verläufe der Schalldruckpegel berechnet und eine Datenbank-Input-Datei mit den wichtigsten akustischen Parametern sowie mit Informationen über Zugtyp und Meteorologie erzeugt.

### Analyse der Schallausbreitung

In einem ersten Schritt wurden die Zeitsignale aller Vorbeifahrten im Messzeitraum für die Berechnung der Terzpegelverläufe zur Selektion repräsentativer Stimuli (siehe Kap. 4.1) exportiert. Die Auswertungen der acramos® Analysesoftware wurden hingegen in eine Datenbank gespielt und für eine Gegenüberstellung der zusätzlichen Messpunkte (25 m, 50 m und 100 m) zu den Standardmesspunkten in 7,5 m Entfernung zum Gleis herangezogen. Dabei wurde der A-bewertete Vorbeifahrtpegel  $L_{pA,eq,Tp}$  vom Puffer des ersten Wagens bis zum Puffer des letzten Wagens durch das acramos® System wie folgt berechnet:

$$L_{pAeq,Tp} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} \cdot dt \right) dB$$

$L_{pAeq,Tp}$  ... A-bewerteter, energieäquivalenter Dauerschallpegel über die Dauer der Zugvorbeifahrt in dB(A)

$T$  ..... Messdauer der Zugvorbeifahrt (von Puffer zu Puffer) in Sekunden

$p(t)$  ..... Schalldruck in Pa

$p_0$  ..... Bezugsschalldruck (20  $\mu$ Pa)

Um die Schallimmissionen an den verschiedenen Messpositionen unabhängig von der jeweiligen Vorbeifahrtgeschwindigkeit mit einander vergleichen zu können wurden die Messwerte nachträglich auf 80 km/h umgerechnet:

$$L_{pAeq,Tp80} = L_{pAeq,Tp} - 30 \cdot \lg \left( \frac{V}{80} \right) dB(A)$$

$L_{pAeq,Tp80}$  ..... auf 80 km/h korrigierter, A-bewerteter, energieäquivalenter Dauerschallpegel über die Dauer der Zugvorbeifahrt in dB(A)

$L_{pAeq,Tp}$  ..... A-bewerteter, energieäquivalenter Dauerschallpegel über die Dauer der Zugvorbeifahrt in dB(A)

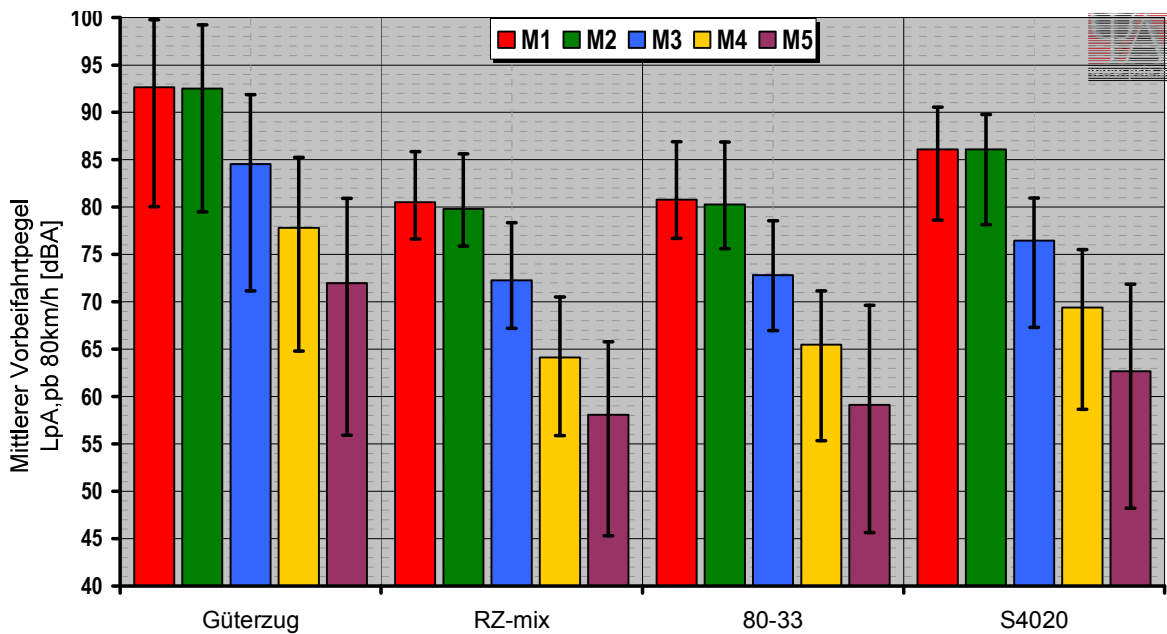
$T$  ..... Messdauer der Zugvorbeifahrt (von Puffer zu Puffer) in Sekunden

$V$  ..... Geschwindigkeit des Zuges im Messquerschnitt in km/h

Aus dem erfassten Zugkollektiv wurden folgende vier Zugkategorien selektiert:

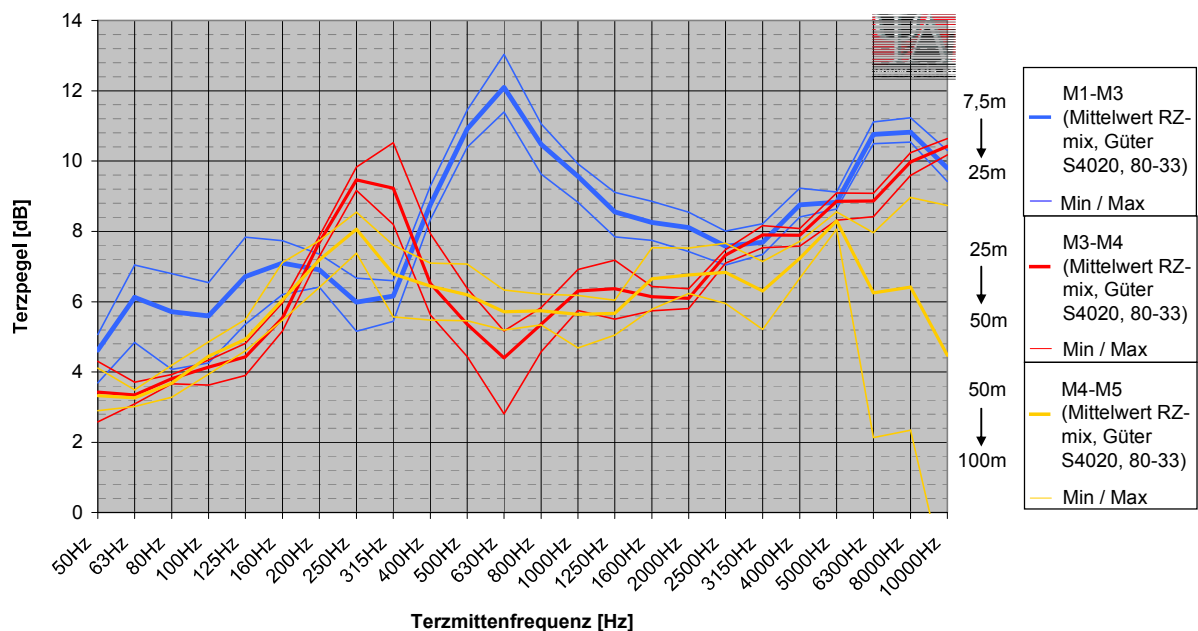
- RZ-mix: beinhaltet Reisezüge mit unterschiedlichen Bremssystemen (GG, K-Sohle), welche aus einem Triebfahrzeug und mehreren Reisewagen bestehen
- 80-33: umfasst Züge, welche aus modernen Doppelstockwagen mit Scheibenbremsen und einem Triebfahrzeug des Typs 1116, 1142 bzw. 1144 zusammengesetzt sind
- S4020: elektrische Triebwagen mit drei gekoppelten Wageneinheiten, welche entweder als Einfachgarnitur (12 Achsen) oder als Doppelgarnitur (24 Achsen) verkehren
- Güterzüge: alle Güterzüge ohne Unterscheidung der Bremssysteme und damit der Radrauheiten (der Anteil der auf K-/LL-Sohle umgerüsteten Wagen ist unbekannt)

In den Anhang A (Abb. A-1 bis Abb. A-4) sind die mittleren, geschwindigkeitsabhängigen Vorbeifahrtpegel, welche in unterschiedlichen Entfernung zum Messgleis gemessen wurden (M1-M5), für jede der vier Zugkategorien einander gegenübergestellt.



**Abb. 2-3: Mittlere, auf 80 km/h bezogene Vorbeifahrtpegel für alle Mikrofonpositionen und Zugkategorien**

Abb. 2-3 fasst hingegen die auf 80 km/h bezogenen Ergebnisse zusammen. Mit steigender Entfernung zum Emissionspunkt nimmt auch der Streubereich zu. Besonders der Messpunkt in 100 m Entfernung zeigt zum Teil deutliche Variationen von bis zu 25 dB. Diese können einerseits durch Absorption des Bodens als auch durch Unterschiede in den während der Vorbeifahrten vorherrschenden Wetterbedingungen entstehen.



**Abb. 2-4: Reduktion der Terzpegel (Mittelwert, Minimum und Maximum aus den Kategorien RZ-mix, Güterzug, 4020 und 80-33) zwischen den Messpunkten M3 in 25 m, M4 in 50 m und M5 in 100 m Entfernung und dem Messpunkt M1 in 7,5 m Entfernung zum Messgleis**

In Abb. 2-4 sind die mittleren Abschwächungen der Terzpegel in 25 m (M3), 50 m (M4) und 100 m (M5) bezogen auf die Terzpegel in einem Abstand von 7,5 m (M1) dargestellt. Für die Kategorie S4020 und RZ-mix wurden die linearen Terzpegel von Vorbeifahrten mit einer mittleren Geschwindigkeit von 95-105 km/h herangezogen. Für Güterzüge wurde hingegen ein geringerer Geschwindigkeitsbereich von 85-95 km/h und für die Kategorie 80-33 eine höherer Geschwindigkeitsbereich von 105-115 km/h gewählt.

Die Diagramme in Anhang A (Abb. A-5 bis Abb. A-8) zeigen eine Gegenüberstellung der linearen Terzverläufe für alle Mikrofonpositionen je Zugkategorie. Die Reduktionen der Terzpegel in den Entfernungen 25m, 50m und 100m können aufgeschlüsselt nach Zugkategorien ebenfalls im Anhang A (Abb. A-9 bis Abb. A-11) entnommen werden. Die in Abb. 2-4 dargestellte Zusammenfassung zeigt hingegen die mittleren Reduktionen über alle vier Kategorien sowie die jeweiligen Minimal- und Maximalwerte für die einzelnen Entfernungen. Bei den Differenzen von M3 auf M4 sowie von M4 auf M5 handelt es sich jeweils um eine Verdopplung des Abstandes zum Emissionsort. Für beide Differenzen ergibt sich hier annähernd ähnliches Bild. Die höchsten Differenzen sind im Frequenzbereich um 250 Hz sowie für hohe Frequenzen feststellbar. In Messposition M5 sind die erfassten Immissionen in den hohen Frequenzen zum Teil schon unter dem Umgebungsgeräusch und somit die Pegelreduktion im Vergleich zum Messpunkt M4 für diesen Frequenzbereich reduziert.

Die Entfernungsdifferenz von M1 (7,5 m) zu M3 (25 m) beträgt 17,5 m und liegt damit etwas über der doppelten Entfernung von M1. Die höchsten Pegelreduktionen liegen hier im Bereich um 630 Hz.

Im Schallausbreitungsweg spielen neben der Pegelminderung mit der Entfernung und der Abschirmung durch Hindernisse die atmosphärische Absorption sowie die Bodendämpfung eine entscheidende Rolle. Der atmosphärische Dämpfungskoeffizient  $\alpha$  ist stark frequenzabhängig und wird von der umgebenden Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit beeinflusst. Prinzipiell kann festgehalten werden, dass die Dämpfung mit steigender Frequenz zunimmt, d.h. höhere Frequenzen in der Atmosphäre stärker absorbiert werden als tiefe Frequenzen. In Abb. 2-4 ist diese Tendenz erkennbar. Der untypische Abfall der Terzpegeldifferenzen zwischen M4 und M5 bei Frequenzen  $>6300$  Hz kann darauf zurückgeführt werden, dass die hohen Frequenzen der Zugvorbeifahrt in einer Entfernung von 100 m zur Quelle bereits stark abgenommen haben und das vorherrschende Umgebungsgeräusch in diesem Frequenzbereich prägend wird.

Die Bodendämpfung ergibt sich durch die Überlagerung von Luftschall, der an der Bodenfläche reflektiert wird und dem direkten Schall zwischen Quelle und Immissionspunkt und ist damit stark von der Bodenbeschaffenheit abhängig. Prinzipiell unterscheidet man zwischen schallhartem Boden (z.B. Betonflächen, Wasserflächen aber auch Fahrwege) und porösem Boden wie etwa landwirtschaftliche Flächen. Die in Abb. 2-4 erkennbaren Spitzen bei 630 Hz (M1-M3) und 250 Hz / 315 Hz (M3-M4 und M4-M5) können auf Effekte der Bodenabsorption zurückgeführt werden. Da mit steigender Entfernung zur Quelle der Boden einen großen Teil der Ausbreitungsbedingungen prägt und der Nahbereich zum Gleis (Gleisschotter aber auch der parallel zur Strecke verlaufende Fahrweg) eine zunehmend untergeordnete Rolle spielt, ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Absorptionseigenschaften der Flächen eine Verschiebung zu tieferen Frequenzen.

## 2.2. Kunstkopfaufnahmen

Für die Schallmessungen kamen unter anderem folgenden Komponenten zum Einsatz:

- Kunstkopf HMS IV (Head Acoustics) zur binauralen Erfassung der Vorbeifahrtsgeräusche im 25 m Immissionspunkt
- 24-Kanal ICP<sup>®</sup>-Modul DIC24 (Head Acoustics) und zwei 1/2" CCP Freifeld-Mikrofon-Sets mit TEDS (G.R.A.S), jeweils bestehend aus Mikrofon 40AE und Vorverstärker 26CA zur Erfassung der Schallsituation im Messquerschnitt auf konventionelle Art (bei Probemessungen nicht eingesetzt)
- Laserlichtschranke inkl. Mikrokontrollersystem zur Achserfassung im Messquerschnitt und zur zeitlichen Synchronisation von Kunstkopf- und Mikrofonaufnahmen
- HD-Videokamera V727 (Panasonic) zur nachträglichen, visuellen Identifikation von Schallquellen bei Auffälligkeiten in den Schallaufzeichnungen

Alle akustischen Messungen wurden mit dem Programm HEAD Recorder V2.0.901 mit einer Abtastfrequenz von 48 kHz aufgezeichnet. Aufgrund der verteilten Schallquellen wurde das Kunstkopfmesssystem mit der Entzerrungsoption „ID“ (independent of direction) betrieben. Zur Unterdrückung von niederfrequenten Windgeräuschen wurde ein 22 Hz Hochpass bei den Messungen aktiviert. Als Messbereiche des Kunstkopfsystems wurden entsprechend der Erfahrungen aus den Probemessungen vorzugsweise 100 dB für Personenzüge und 110 dB für Güterzüge gewählt, um ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) zu erzielen und gleichzeitig Übersteuern zu vermeiden. Als Messbereiche für Mikrofonaufnahmen wurden 21 Pa für Mikrofon M6 in 7,5 m bzw. 4 Pa für Mikrofon M7 in 25 m Entfernung zur Gleisachse (vgl. Abb. 2-10) verwendet.



## Messkonfigurationen und Testmessungen

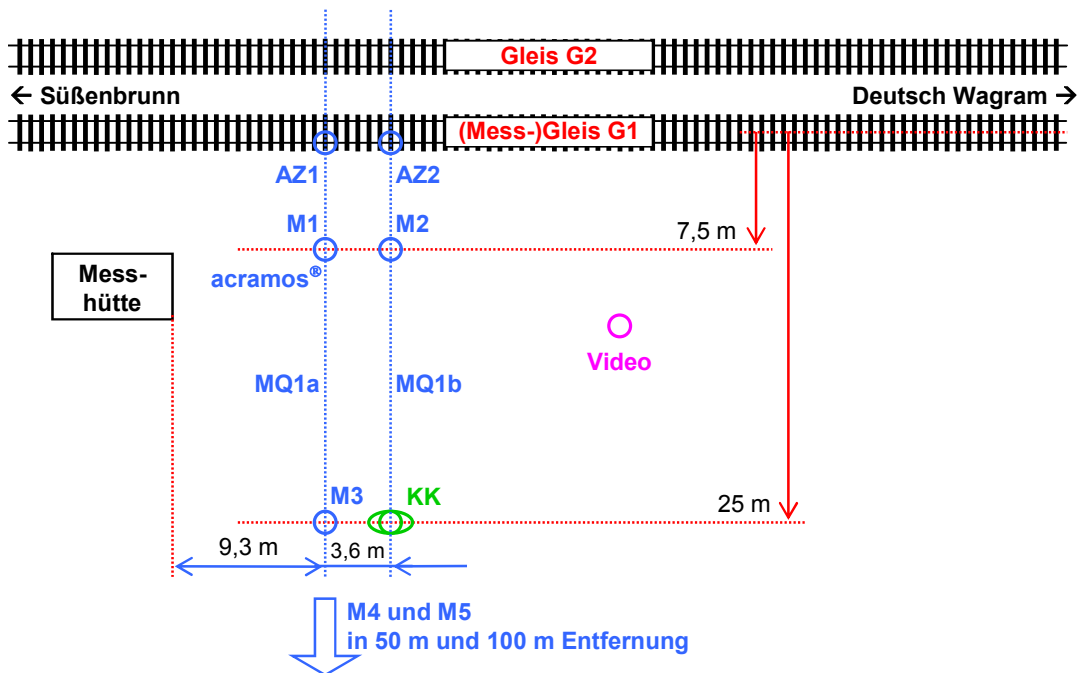


**Abb. 2-5: Probemessung mit Kunstkopfmesssystems am 23. Aug. 2013**

Nach einer ersten Besichtigung der Messstelle Deutsch Wagram am 13. Juli 2013 und einer manuellen Messung von 7 Zügen mit dem Kunstkopfmesssystem (siehe Abb. 2-5) wurde zunächst eine Messkonfiguration wie in Abb. 2-6 dargestellt, angedacht. Dabei wird der Kunstkopf in der Messquerschnittsebene MQ1b in einem Abstand von 25 m zur Gleisachse und 1,2 m über Schienenoberkante bzw. etwa 2,5 m über Gelände angeordnet (Immissionspunkt). Die erforderlichen konventionellen akustischen Aufzeichnungen in 7,5 m und in 25 m Entfernung und 1,2 m über Schienenoberkante können dabei durch die Mikrofone M2 und M3 des erweiterten acramos<sup>®</sup> Monitoring Systems (siehe Kap. 2.1) zur Gänze abgedeckt werden. Ein zeitlicher Bezug zwischen den Messungen des acramos<sup>®</sup>- und des Kunstkopfsystems wird dabei sichergestellt, indem das Signal des 2. Achszählers AZ2 (TTL-Torimpulse) abgezweigt, mittels Optokoppler galvanisch getrennt in das Kunstkopfsystem als Digitalkanal bzw. in das Aufzeichnungssystem DIC24 als Analogkanal zur synchronen Aufzeichnung eingespeist wird.

Die Messungen beider Systeme wurden nacheinander manuell über einen gemeinsamen Mess-PC gestartet, sobald sich Züge am Messgleis näherten und bereits geringfügig akustisch wahrnehmbar waren. Ebenso wurden die Aufzeichnungen manuell beendet, sobald sich die Züge nach Überfahrt der Messquerschnitte der Grenze der Hörweite näherten.





**Abb. 2-6: Messkonfiguration bei Testmessungen**

Mit dieser Grundkonfiguration wurden drei Probemessungen wie folgt durchgeführt:

- 30. Aug. 2013: Testaufbau mit Kopplung mit acramos<sup>®</sup> Monitoring System und Systemprüfung. Da zu diesem Zeitpunkt vor dem Messhäuschen und nach dem Messquerschnitt MQ1b am Bahndamm dichter Bewuchs vorhanden war, wurden aufgrund der sich dadurch ergebenden Schallabschattung und Verfälschung der Schallimmissionen gegenüber einer Freifeldausbreitung nur 2 Züge gemessen.



**Abb. 2-7: Testmessung am 30. Aug. 2013 (links: gesamter Messaufbau; rechts: Kunstkopf KK in Messquerschnitt MQ1b)**

- 6. Sept. 2013: Testmessung von 11 Zügen mit Erweiterung des Kunstkopfmesssystems um ein Mikrofon 1,25 m neben dem Kunstkopf (25 m Entfernung zur Gleisachse und 1,2 m über Schienenoberkante) und um einer Laserlichtschranke zum Testen einer

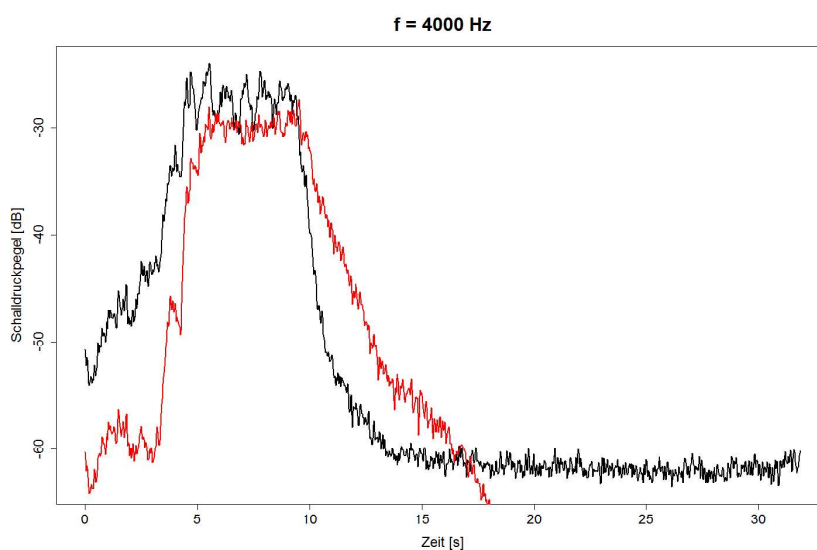
eigenständigen Achsdetektion. Der Bewuchs wurde bereits rund um den Messquerschnitt und die Messeinhausung von acramos<sup>®</sup> und dem ebenfalls an dieser Stelle installierten Argos<sup>®</sup> System entfernt. Die Bereiche vor der Messeinhausung und nach dem Messquerschnitt wiesen jedoch weiterhin starken Bewuchs auf, wodurch nicht von einer Freifeldausbreitung ausgegangen werden konnte.

- 11. Sept. 2013: Testmessungen von 4 Zügen, nachdem der Bewuchs vor der Messeinhausung entfernt worden war.



**Abb. 2-8: Testmessung am 11. Sept. 2013 (links: Lichtschranke LS; rechts: Kunstkopf KK etwa 2,5 m über Gelände, ergänzt um konventionelles Mikrofon)**

Die Ausrichtung des Kunstkopfs parallel zum Gleis erfolgte rein optisch (unter Zuhilfenahme der Positionen der Mikrofon M3 und M7), sodass geringfügige Abweichungen möglich sind. Diese können zwar Einfluss auf die Höhe der Pegel von linkem und rechtem Ohr haben, jedoch kann der Unterschied bei den Wahrnehmungstests durch zufälliges Vertauschen von linkem und rechtem Kanal ausgeglichen werden.



**Abb. 2-9: Exemplarische 4 kHz Terzpegelzeitverläufe einer Kunstkopfmessung der Zugskategorie 80-33 im Messquerschnitt M1Qb (linker Kanal: schwarz, rechter Kanal: rot)**

Bei exemplarischer Wiedergabe einiger Testaufnahmen zeigte sich, dass beim Kunstkopfsystem trotz Einsatz eines Windschutzes bereits bei mäßigen Windgeschwindigkeiten Windgeräusche in den Aufnahmen wahrzunehmen sind. Weiters hat sich herauskristallisiert, dass eine Schallabschattung durch die Messeinhausung geringfügig wahrnehmbar ist. Dieser Eindruck konnte auch durch eine Auswertung exemplarischer Zeitverläufe von Schalldruckterzpegel einzelner Vorbeifahrten bestätigt werden (vgl. Beispiel eines 4 kHz Terzpegelzeitverlaufs in Abb. 2-9). Diese Pegelanstiege zeigten vor allem bei höheren Frequenzen in jenem Zeitbereich, in welchem die herannahenden Züge die Abschattung der Messeinhausung verließen und in das direkte Hörfeld der Mikrofone bzw. des Kunstkopfs in 25 m Entfernung eintraten geringe, aber dennoch erkennbare Sprünge. Im Vergleich dazu sind die Pegelabfälle nach dem Passieren des Messquerschnitts deutlich glatter. Zwar kann durch diese Betrachtungen nicht abgeschätzt werden, in welchem Ausmaß die Schallimmission während der Zugsvorbeifahrt beeinflusst werden, jedoch muss davon ausgegangen werden, dass ein Effekt vorhanden sein kann.

Aus diesem Grund wurde entschieden, zur Verringerung des akustischen Einfluss der Messeinhausung und um annähernd Freifeldbedingungen sicherzustellen, den Messquerschnitt des Kunstkopfes um 20 m gegenüber den ursprünglichen Messquerschnitt MQ1b zu verschieben (siehe Abb. 2-10). Das Ausmaß der Verschiebung war durch die Grenze des Feldes, in welchem Mikrofone und der Kunstkopf aufgestellt waren, und durch die Kabellänge zum Messhaus begrenzt.

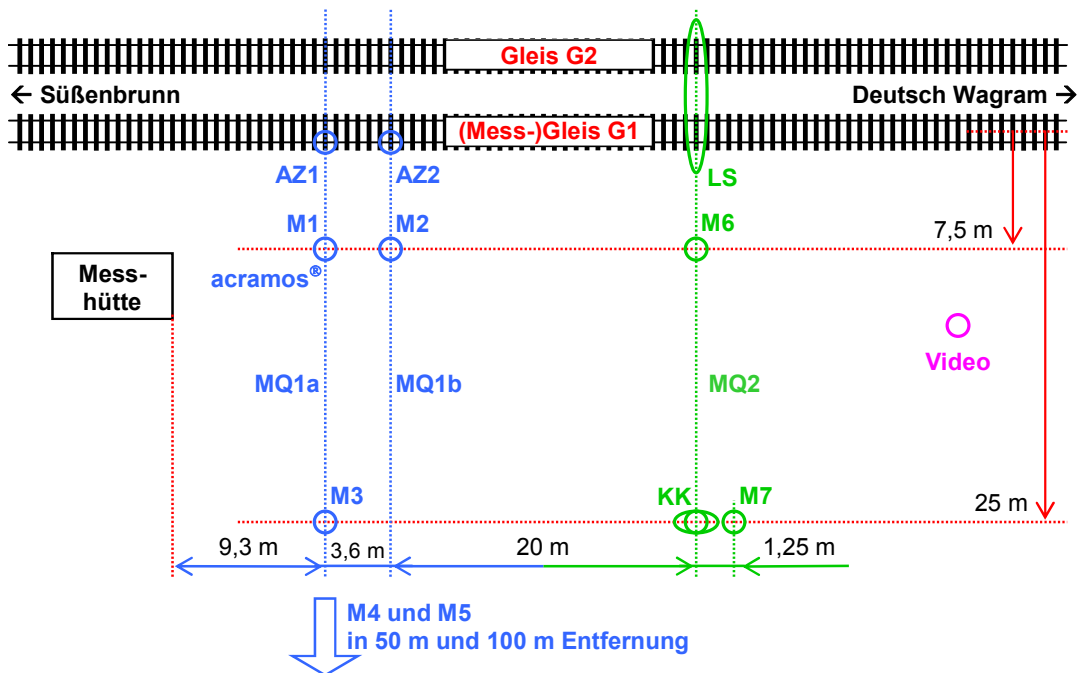


Abb. 2-10: Endgültige Messkonfiguration

Analog zu den Messmikrofonen M1 und M2 ist auch im neuen Messquerschnitt des Kunstkopfes MQ2 ein weiteres Mikrofon M6 in 7,5 m Entfernung und 1,2 m über Schienenoberkante vorgesehen. Zudem wird die Position der bereits getestete Lichtschranke LS um 20 m versetzt in MQ2 gelegt, wodurch die Zeitpunkte der Achsen im neuen Messquerschnitt zuverlässig detektiert werden können.

Nachteilig am Messquerschnitt MQ2 war, für die Messposition von Kunstkopf KK und Mikrofon M7 in 25 m Entfernung aufgrund einer vorhandenen, geringen Erhebung des Bahndamms keine direkte Schallausbreitung vom Rad-Schiene Kontakt bzw. von der Schiene gegeben war. Aus diesem Grund leitete der Auftraggeber ÖBB die Entfernung der Bahndammerhöhung Anfang Okt. 2013 in die Wege.



**Abb. 2-11: Erhöhter Bereich des Bahndamms verhindert im Messquerschnitt MQ2 eine direkte Schallausbreitung vom Rad-Schiene Kontakt bzw. der Schiene zum Immissionspunkt in 25 m Entfernung**

### Messungen

Nach Abschluss der Probemessungen und nach Entfernung des restlichen Bewuchses im Sept. 2013, wurden, sofern geeignete Witterungsverhältnissen (kein Niederschlag, geringe Windgeschwindigkeiten) vorherrschten an folgenden Tagen Messungen durchgeführt:

- 7. Okt. 2013
- 9. Okt. 2013
- 14. Okt. 2013
- 15. Okt. 2013
- 21. Okt. 2013
- 29. Okt. 2013
- 31. Okt. 2013



Die akustischen Messungen wurden mit 31. Okt. 2013 abgeschlossen, da die Wetterbedingungen im Nov. 2013 keine weiteren Kunstkopfmessungen zugelassen haben.

In Summe wurden an den 7 Messtagen

- 72 Schnellbahnen (4020),
- 46 Regional Express mit Waggons 80-33 (15 REX mit 1116 und 31 REX mit 1142/1144),
- 27 Reisezüge,
- 41 Güterzüge und
- 2 Lokzüge

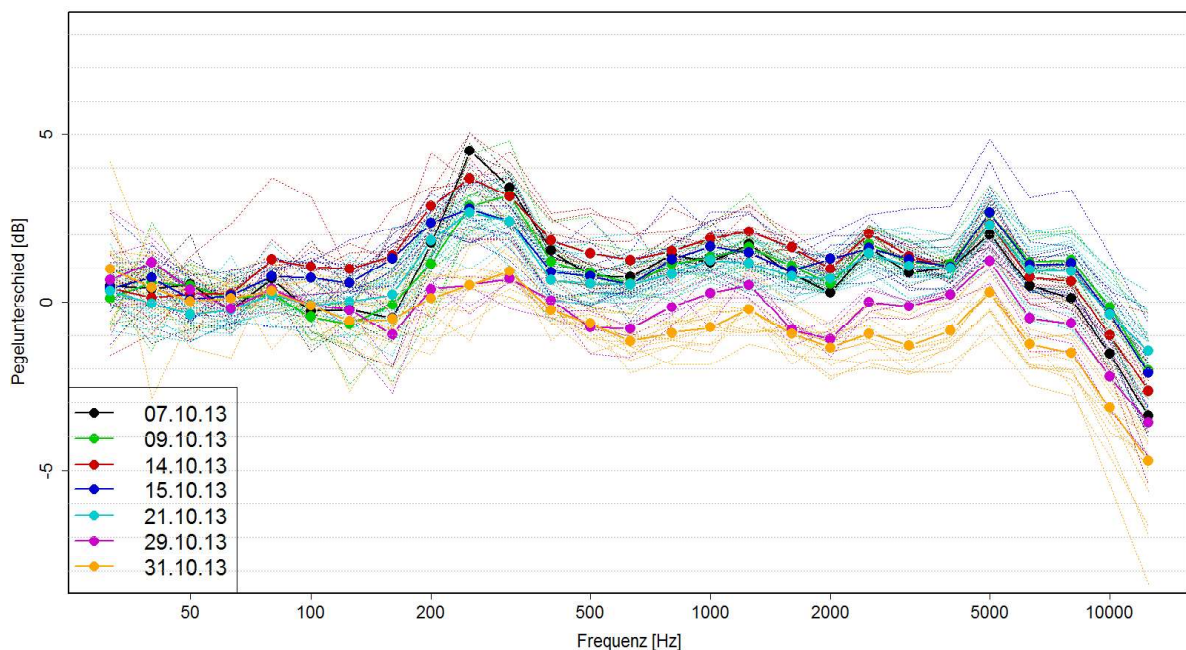
erfasst. Bei der Verwertbarkeit dieser 188 Züge für die Wahrnehmungstests bestehen jedoch Einschränkungen aufgrund von unterschiedlichen Zuggeschwindigkeiten, Beschleunigungen, Wind, Flachstellen und störenden Umgebungsgeräuschen (Traktoren, Flugzeuge, etc.).

Bezogen auf die Regelfahrtrichtung des Messgleises (Richtung Deutsch Wagram) befanden sich etwa 5 m vor dem Querschnitt MQ2 der Kunstkopfmessungen geschweißte Schienenstöße. Diese sind vorwiegend in den Vorbeifahrtsgeräuschen von Personenzügen wahrzunehmen, während sie bei Güterzügen in der Regel nicht mehr identifizierbar sind. Bei vergleichbaren Wahrnehmungstests aus dem Projekt „Systemische Bahnlärmbekämpfung“ [1] zeigte sich jedoch, dass nicht verschweißte und somit deutlich wahrnehmbare Stoßlücken bei gleichem A-bewerteten Pegel nicht signifikant unterschiedlich lästig wahrgenommen wurden. Im Vergleich zum geschweißten Gleis, wurden die Auswirkungen der geschweißten Schienenstöße daher im Rahmen des vorliegenden Projekts vernachlässigt.



**Abb. 2-12: freie Schallausbreitung in Messquerschnitt MQ2 nachdem der Bahndamm am 23. Okt. 2013 abgetragen wurde**

Der Erdwall im Querschnitt der Kunstkopfmessungen wurde am 23. Okt. 2013 abgetragen, wodurch erst für die letzten beiden Messtage eine optimale, freie Schallausbreitung gegeben war. Zur nachträglichen Abschätzung des Beeinflussungsausmaßes der Schallimmission durch den Erdwall während der ersten 5 Messtage wurden die mittleren Terzpegel der Mikrofone M3 (Messquerschnitt MQ1b) und M7 (Messquerschnitt MQ2) miteinander verglichen. Wie in Abb. 2-13 zu erkennen ist, werden die Bandpegel ab einer Frequenz von 200 Hz um etwa 1-2 dB abgeschwächt.



**Abb. 2-13: Differenz der mittleren Terzpegel (Mikrofon M3 in MQ1b minus Mikrofon M7 in MQ2) bei vorhandenem Erdwall (Messtage von 7. bis 21. Okt. 2013) und nach dessen Entfernung (Messtage 29. und 31. Okt. 2013)**

Zwar trat somit nur eine marginal eine akustische Beeinflussung durch den Erdwall auf. Da sich im Zuge der Auswertungen jedoch herausstellte, dass ausreichend repräsentative Daten von den letzten beiden Messtagen verfügbar waren, wurde bei der Auswahl von geeigneten Stimuli (siehe Kap. 4.1) auf die Einbeziehung der vor dem 23. Okt. erfassten Messdaten verzichtet.

### Aufbereitung der Ergebnisse

Nach Abschluss der Messungen wurden die Daten in nachfolgenden Schritten für die weitere Nutzung vorbereitet. Dabei kamen sowohl die Programmiersprache für technisch-wissenschaftliche Berechnungen MATLAB V7.11 von MathWorks, wie auch das



Analyseprogramm ArtemiS V11.0 (Advanced Research Technology for Measurement and Investigation of Sound and Vibration) von Head Acoustics zum Einsatz.

- Kalkulation der Zeitdifferenzen der Startzeitpunkte von Aufnahmen mit dem Kunstkopf und Mikrofonaufnahmen mittels DIC24 Aufzeichnungssystem
- Schneiden aller Aufnahmen (von erster bis letzter Achse)
- Berechnung von Schalldruckpegel (fast, A- und C-Bewertung), Lautheit (DIN45631), Rauigkeit, Schärfe (Aures und DIN45692), Tonalität, Schwankungsstärke und Terzpegelspektren (ohne und mit A- und C-Bewertung) als Zeitverlauf aller Messungen und aller geschnitten Messdaten, Mittelwerte, sowie 50- und 95-Perzentilwerte.

### 3. ÜBERTRAGUNGSFUNKTION VON LÄRMSCHUTZMAßNAHMEN

Ziel war es, die für die perzeptiven Tests ausgewählten Vorbeifahrten spektral zu modifizieren und verschiedene Lärmschutzmaßnahmen dadurch zu simulieren. Dafür wurden sowohl Berechnungen mittels der Rand-Elemente-Methode durchgeführt als auch auf bereits vorhandene Messdaten zurückgegriffen, einerseits um die Simulationen zu überprüfen, andererseits um den Effekt der Schienenstegabsorber berücksichtigen zu können.

#### 3.1. Simulationsansatz für Lärmschutzwände

Um die prinzipielle Wirkung von Lärmschutzwänden (LSW) mit der Randelemente-Methode (BEM) zu berechnen, reicht es meist aus, nur den Querschnitt der Lärmschutzwand zu diskretisieren.

Bei realistischen Simulationen für die Bahn müssen allerdings neben der Lärmschutzwand auch der Bahndamm und der Wagenkasten berücksichtigt werden. Dies ist einerseits wichtig aufgrund der absorbierenden Wirkung des Schotters, andererseits aufgrund der in einzelnen Frequenzbändern in geringem Umfang nachgewiesenen Effekte von Mehrfachreflektionen zwischen Wagenkasten und hochabsorbierender Lärmschutzwand (vgl. [6]). Dadurch ergeben sich einige wichtige Punkte, die zu beachten sind.

##### Bahndamm

Aufgrund der Höhe des Bahndamms können die Quellen (Rad-Schiene-Kontakt beiderseits) nicht in die Symmetrieebene gesetzt werden. Dadurch ergeben sich bei herkömmlicher 2D-BEM-Berechnung starke Interferenzen. Diese entstehen aufgrund der in 2D-Berechnungen inhärenten Annahme einer kohärenten Linienquelle und der kohärenten Überlagerung von Quelle und Spiegelquelle.

Auch durch eine inkohärente Mittelung über zwei Quellen (beide Schienen eines Gleises) kann, aufgrund der geringen Entfernung der Quellen, dieser Effekt nur bedingt herausgemittelt werden. Da Simulationen in 3D aufgrund der Größe der abzubildenden Geometrie nicht durchführbar sind, muss auf 2.5D-Methoden [2] zurückgegriffen werden. Diese ermöglicht die Simulation inkohärenter Linienquellen, die eine realistischere Darstellung der Schallquelle Zug ermöglichen. Die LSW wird auch hier als unendlich lang angenommen. Dadurch kann das 3D-Problem in eine große Zahl kleiner 2D-Probleme zerlegt werden. Bei Verwendung impedanzbehafteter Oberflächen, wie sie hier verwendet

werden, ist die Berechnung trotzdem noch sehr aufwändig da die Anzahl der zu lösenden 2D Probleme sehr hoch ist (mehrere tausend).

### Oberflächenimpedanzen

Aufgrund des Wagenkastens (hier als reflektierend angenommen) spielt die Absorption der LSW für eine hohe Dämmwirkung eine sehr wichtige Rolle. Weiters hat auch das Schotterbett schallabsorbierende Eigenschaften, die berücksichtigt werden müssen. Für die BEM ist es notwendig diese Eigenschaften in Form einer komplexen Impedanz anzugeben. Es wurden daher 2 verschiedene Impedanzmodelle für die beiden Oberflächen verwendet.

#### *Absorption der Lärmschutzwand*

Das bekannteste und am meisten verwendete Modell für absorbierende Materialien ist das Delany-Bazley-Modell [3]. Die frequenzabhängige Impedanz des Materials wird über einen Parameter bestimmt (flow resistivity  $\sigma$ ). Weiters wird meist eine reflektierende Schicht angenommen, die sich hinter dem Material befindet. Dies ergibt eine winkel- und frequenzabhängige Oberflächenimpedanz die auf den sogenannten Random-Incidence-Absorptionskoeffizienten umgerechnet werden kann. Die Dicke des Materials wurde so optimiert dass die Random-Incidence-Absorption möglichst gut mit den Hallraummessungen der Rieder Fasetonwand übereinstimmen. Dabei wurde  $\sigma$  mit  $5000 \text{ Nsm}^{-4}$  angenommen<sup>2</sup>. Die Optimierung ergab eine Dicke von 6,64 cm.

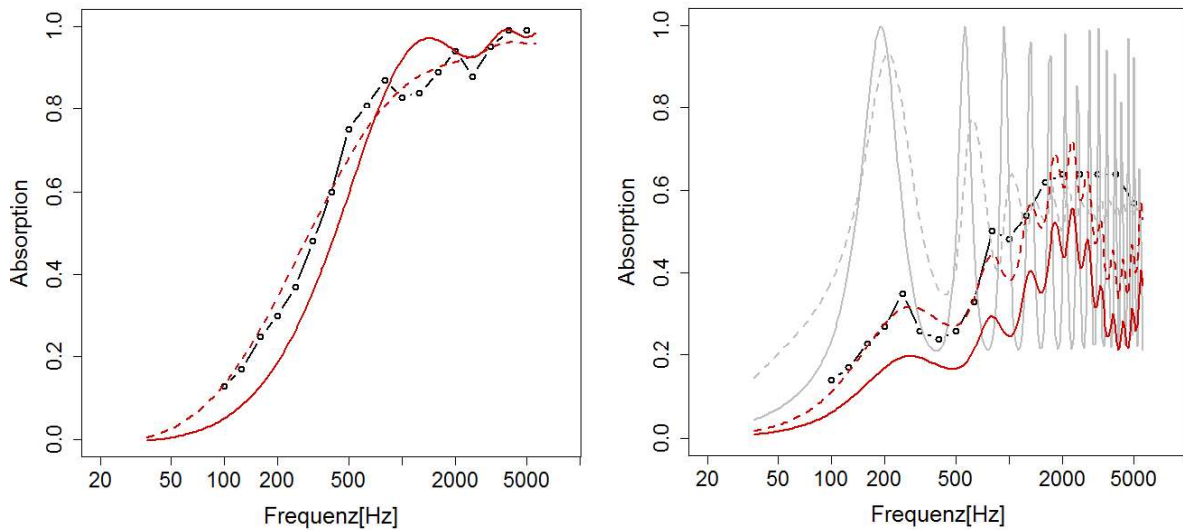
In Abb. 3-1 (links) sind sowohl die Oberflächenabsorption für Normaleinfall (rote durchgezogene Linie) als auch die Hallraummessung (schwarze Linie und Symbole) und die Random-Incidence-Absorption (rot strichliert) angegeben.

#### *Schottermodell*

Beim Schottermodell konnte auf bereits publizierte Modelle zurückgegriffen werden. In der Literatur finden sich verschiedene Modelle, prinzipiell basieren diese aber ebenfalls auf Schichtmodellen mit entweder einer [4] oder drei [5] absorbierenden Schichten, wiederum mit einer reflektierenden Schicht als Abschluss. Beide Modelle die hier betrachtet wurden, wurden aus Messungen hergeleitet. Allerdings zeigen sich bei 1-Schichtmodellen mit einem reflektierenden Abschluss starke Schwankungen in der Absorption als Funktion der Frequenz aufgrund von Interferenzeffekten mit der am Abschluss reflektierten Schallwelle. Die grau dargestellten Kurven (Abb. 3-1 rechts) zeigen die Oberflächenabsorption (durchgezogen) und die Random-Incidence-Absorption (strichliert) des 1-Schichtmodells.

---

<sup>2</sup> Um auf die Hallraumwerte zu kommen müssten die Größe des getesteten Materials und die Eigenschaften des Hallraums berücksichtigt werden. Diese waren nicht bekannt, daher wurde auf die Korrektur verzichtet.



**Abb. 3-1: Hallraummessung der Absorption (schwarz), Oberflächenabsorption (rot durchgezogen) und Random-Incidence-Absorption (rot strichliert) für die verwendeten Impedanzmodelle der LSW (links) und des Schotterbettes (rechts). Graue Linien zeigen die Absorption des 1-Schicht-Schottermodells.**

Bei Verwendung einer inkohärenten Quelle wies das verwendete 1-Schichtmodell daher starke Schwankungen des Schalldrucks auf.

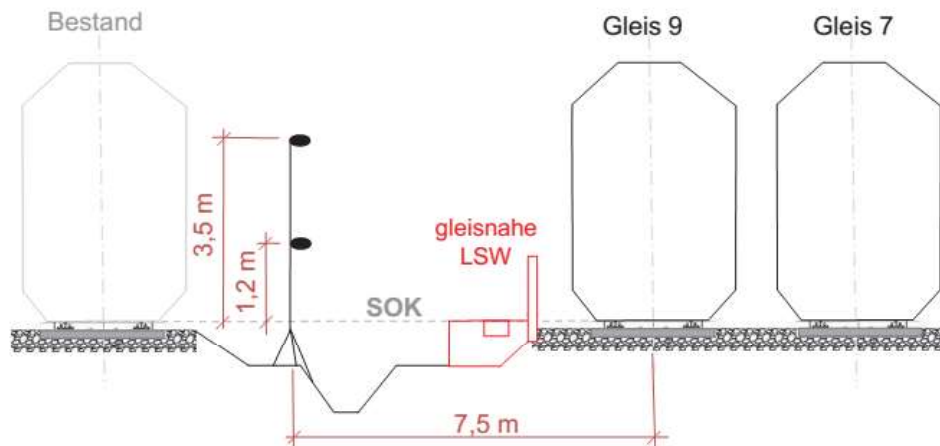
Das 3-Schichtmodell wurde auf Hallraummessungen basierend abgeleitet. Durch die Verwendung einer dünnen oberen und unteren Grenzschicht werden durch mehrfache Reflexionen die Interferenzen abgeschwächt (rote Linien in Abb. 3-1 rechts) und es zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit der Hallraummessung (schwarze Kurve). Es wurde daher das 3-Schichtmodell verwendet.

### Bodenmodell

Für die Simulationen wurde ein reflektierender Boden angenommen. Der Hauptgrund dafür ist, dass die Umgebung um die Bahnstrecke und auch die Ergebnisse für verschiedene Bodenmodelle deutlich variieren können. Die Annahme eines bestimmten Impedanzmodells ist daher mit einer großen Unsicherheit behaftet. Zum Vergleich wurde auch eine Berechnung mit einem Impedanzmodell durchgeführt (siehe Abschnitt 0)

## **3.2. Validierung der Berechnungsmethode für Lärmschutzwände**

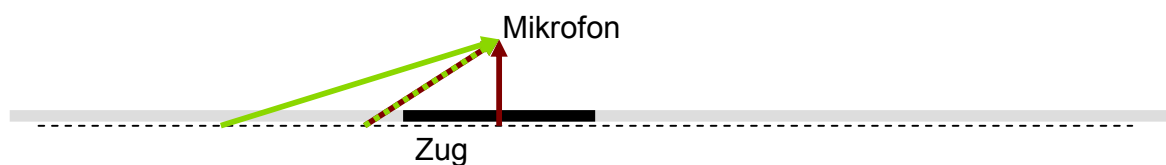
Im Zuge der Innovationsmessfahrten an der Neubaustrecke Tullnerfeld wurde eine niedrige LSW von der Firma Fritsch Chiari & Partner (FCP) gemessen. Das Wandsegment war 60 m lang und in einem Abstand von 2,2 m zu Gleisachse installiert. Mikrofone wurde sowohl in der Mitte der LSW als auch in einem Querschnitt ohne LSW aufgestellt. Abb. 3-2 zeigt den Messquerschnitt.



**Abb. 3-2: Messquerschnitt der lichtertraumnahen LSW an der Neubaustrecke**

Aus den Daten für den Mustergüterzug auf Gleis 9 (insgesamt 3 Vorbeifahrten) wurde das Einfügedämmmaß der LSW bestimmt. Hierfür wurden die Messungen bestmöglich synchronisiert. Da die Ausgabe der Messwerte im 1-Sekundentakt erfolgte, ergibt sich eine relativ hohe Streuung der Messergebnisse (Abb. 3-4 und Abb. 3-5, graue Linien).

Der Querschnitt der Messung wurde nachgebildet (inklusive der Bestandsstrecke und Impedanzmodellen) und eine Simulation in 2.5D durchgeführt. Die Quelle wurde auf Höhe des Rad-Schiene-Kontaktes angenommen. Aufgrund der geringen Länge der Wand gegenüber dem Güterzug ist eine korrekte Modellierung nur in 3D möglich, da auch 2.5D eine unendlich lange Wand voraussetzt. Es wurde daher im Weiteren noch eine Abschätzung des Einfügedämmmaßes durch Berechnung mehrerer Punktquellen entlang des Gleises mit und ohne LSW durchgeführt. Für den Schalldruck mit Wand wurden bis zu einem Abstand von 35 Metern vom Messquerschnitt die Berechnungen mit LSW verwendet, ab 45 Metern die Berechnungen ohne LSW. Dazwischen erfolgte eine gleitende Gewichtung der beiden Lösungen. Abb. 3-3 zeigt die LSW (schwarzer Balken). Der Übergangsbereich ist rot-grün gekennzeichnet. Die Punktquellen wurden energetisch aufintegriert und daraus das Einfügedämmmaß berechnet.

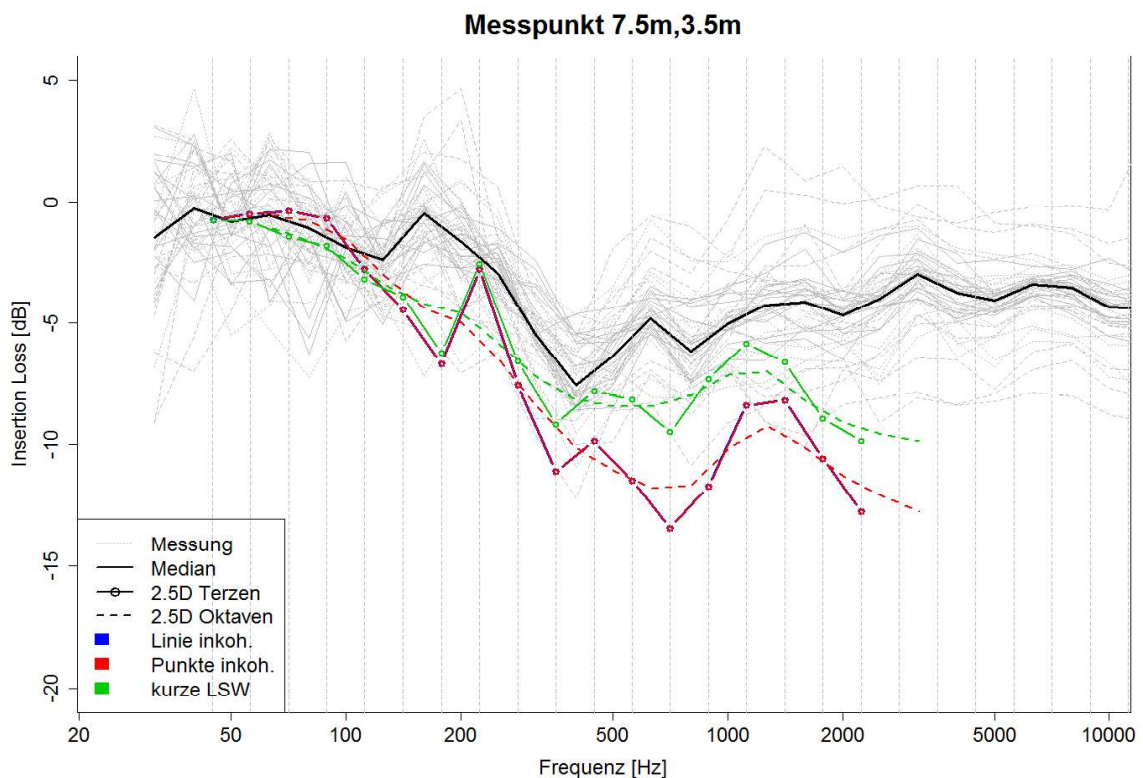


**Abb. 3-3: Berücksichtigung der Länge der LSW in der Berechnung des Einfügedämmmaßes**

Abb. 3-4 und Abb. 3-5 stellen die Simulationsergebnisse im Vergleich zur Messung in 7,5 m und 25 m, 3,5 m über SOK, dar. Die grauen punktierten Linien zeigen die spektrale Abschwächung der niedrigen LSW wobei jede Linie einen 1s-Messpunkt darstellt. Die

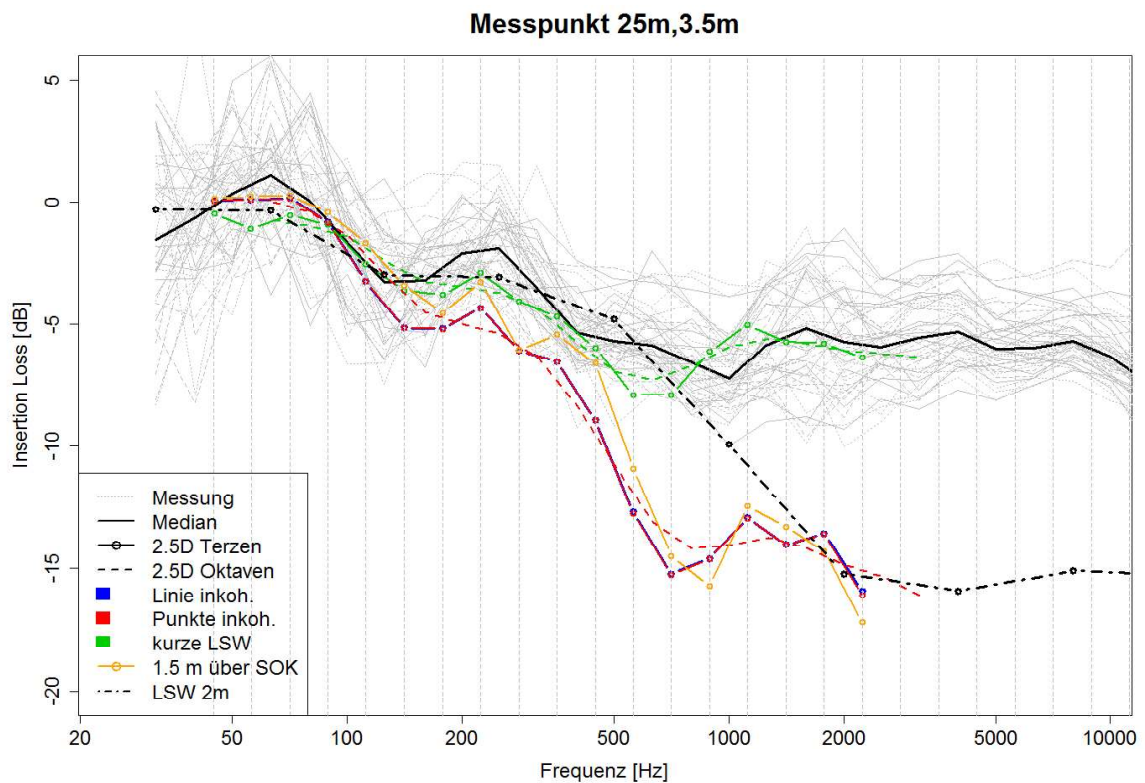
schwarze Linie ist der Median aus den Messwerten pro Frequenzband. Die roten Linien stellen die inkohärente Summation der Punktquellen dar ohne Berücksichtigung der Länge (durchgezogen in Drittel-Oktav-, strichliert in Oktav-Bändern). Die fast deckungsgleiche blaue Linie ist mittels 2.5D mit inkohärenter Linienquelle berechnet worden. Die grünen Linien stellen die abschnittsweise Berechnung der LSW dar. Vor allem bei 25 m Entfernung ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Der Vollständigkeit halber ist das Messergebnis der konventionellen 2 m hohen LSW für Railjetvorbeifahrten dargestellt (schwarz strichliert, in 35 m Entfernung, 2 m über SOK). Die orange Linie stellt die Abschwächung der unendlich langen niedrigen LSW 1,5 m über SOK dar, was ungefähr der Messposition entspricht.

Aufgrund der speziellen Messbedingungen wurde auf die niedrige Lärmschutzwand im Detail eingegangen. Ein weiterer Vergleich mit Messungen einer 2 m hohen konventionellen Wand [6] erfolgt in Abschnitt 0 im Zuge der Berechnungen der Übertragungsfunktionen der beiden Lärmschutzwände, da bei dieser Messung die Bedingungen ähnlich zu den Mess- und Simulationsbedingungen in PASS waren.



**Abb. 3-4: Vergleich Messung und Berechnung der lichtraumnahen LSW in 7,5 m Entfernung, 3,5 m über SOK**





**Abb. 3-5: Vergleich Messung und Berechnung der lichtraumnahen LSW in 25 m Entfernung, 3,5 m über SOK**

### 3.3. Simulation der Lärmschutzwände

Sowohl für die niedrige als auch die hohe LSW wurde der gleiche Referenzquerschnitt verwendet (Abb. 3-6, oben). Dieser besteht aus einem Bahndamm mit Schotterbett. Der Wagenkasten wurde als voll reflektierend angenommen und 2 Schallquellen simuliert die den Rad-Schiene-Kontakt modellieren (20 cm über dem Schotterbett, eine Quelle ist als roter Punkt dargestellt). Der Auswertepunkt der für die Tests verwendet wurde befindet sich 25 m von der Gleisachse entfernt, 1,2 m über SOK.

Für die beiden LSW wurden die Querschnitte entsprechend angepasst (Abb. 3-6 mittlere und untere Grafik). Die Innenseite der Lärmschutzwände wurde absorbierend angenommen, es wurde aber auch zum Vergleich reflektierend gerechnet. Weiters wurde auch eine Berechnung mit Bodenimpedanzmodell durchgeführt, um die entstehenden Interferenzeffekte zu illustrieren. Zusätzlich wurde auch eine 2 m hohe LSW simuliert, um die Berechnung mit den vorhandenen Messergebnissen zu vergleichen.

Abb. 3-7 zeigt einen Vergleich der Berechnungen für reflektierende und absorbierende Lärmschutzwände. Der Effekt der Absorption beginnt schon bei relativ niedrigen Frequenzen (100-200 Hz) und ist, wie zu erwarten, bei höheren Lärmschutzwänden stärker.

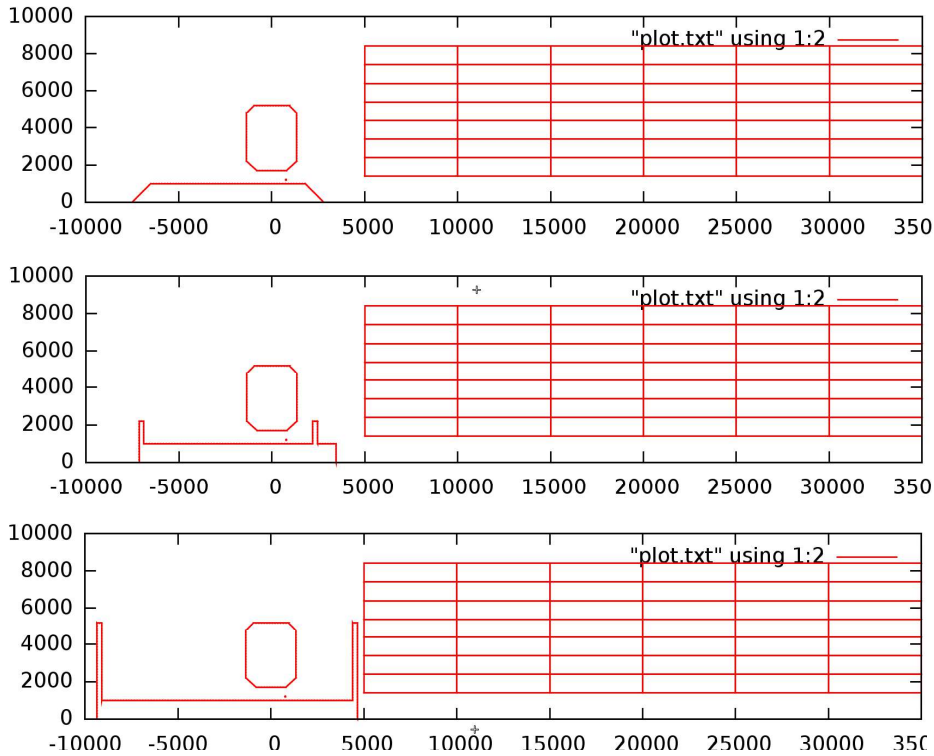


Abb. 3-6: Simulierte Querschnitte für die Herleitung der Übertragungsfunktionen: Freifeld, niedrige LSW und konventionelle LSW (von oben nach unten)

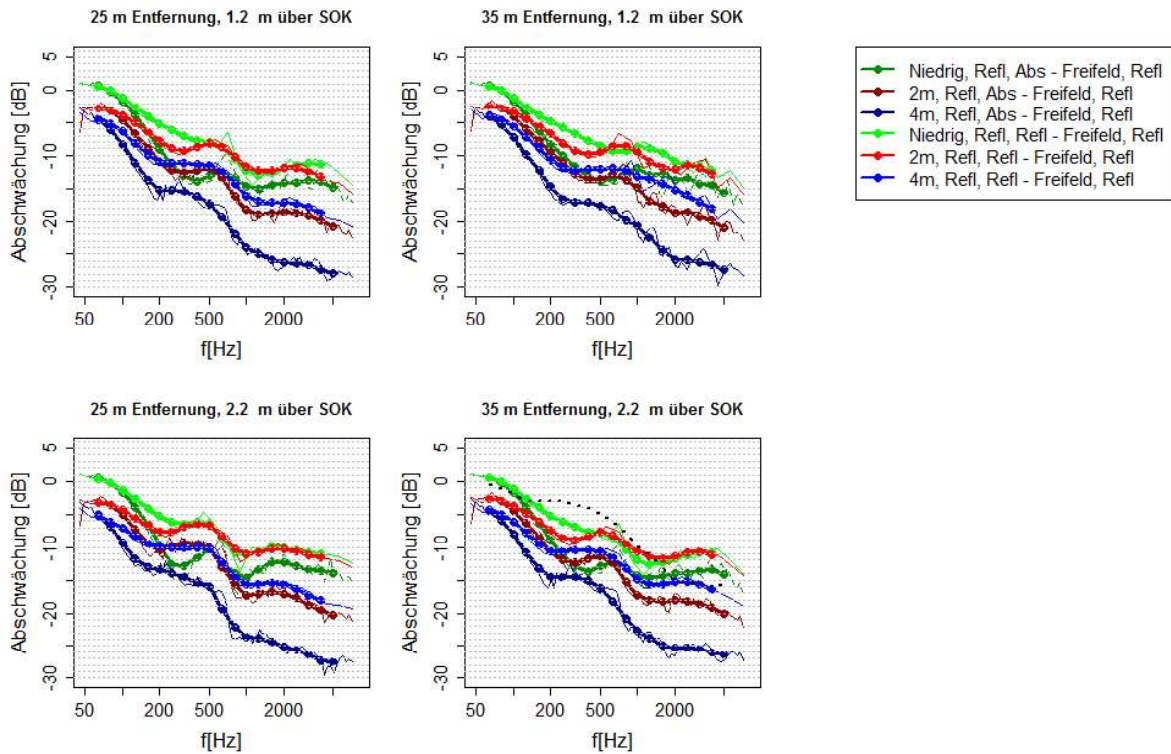
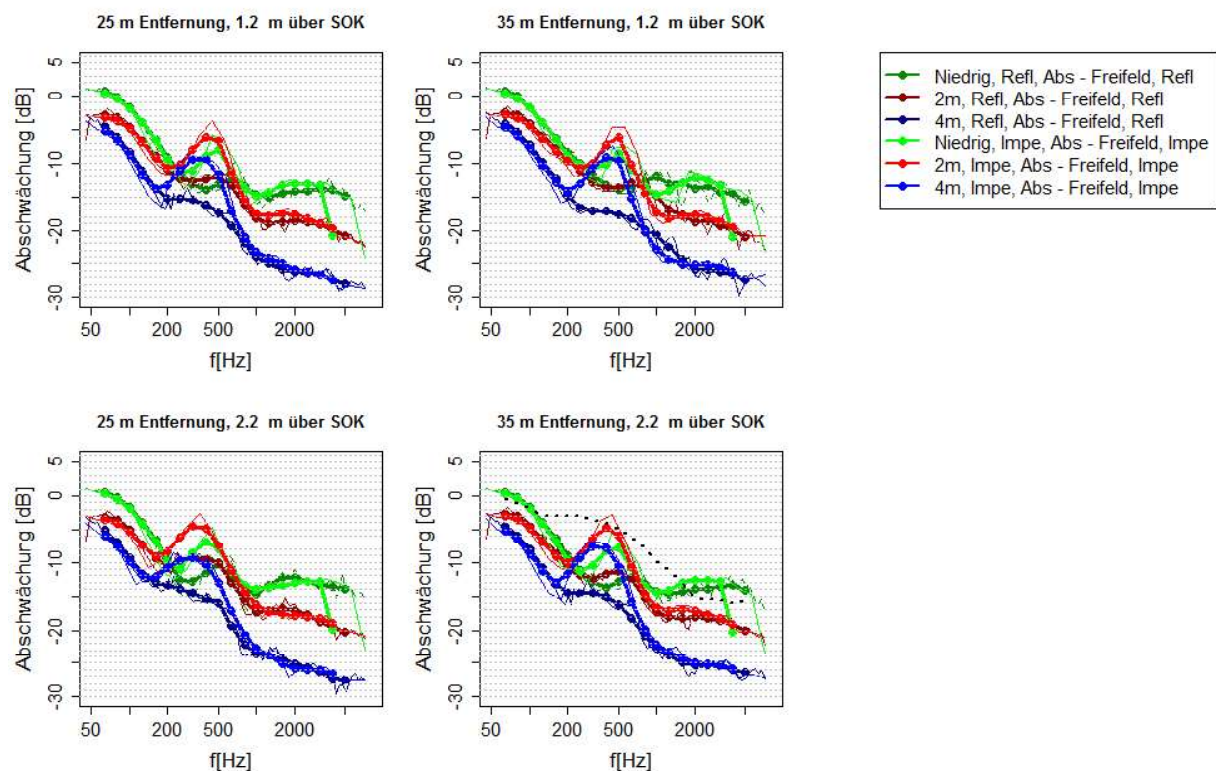


Abb. 3-7: Reflektierende vs. absorbierende Lärmschutzwände (schwarze Punkte stellen das Messergebnis für eine 2 m hohe LSW dar)

Im Vergleich zur Messung (Abb. 3-7 rechts unten, rote Linien vs. schwarze Punkte) überschätzen beide Berechnungen mit 2 m Höhe die Wirkung bei tiefen Frequenzen, bei hohen Frequenzen ist die Wirkung bei reflektierender Wand zu gering.

Abb. 3-8 zeigt den Vergleich der Berechnungen mit und ohne Bodenmodell (Grasland). Speziell bei den höheren Wänden zeigt sich ein Interferenzeffekt im Einfügedämmmaß. Dieser entsteht durch die Reflexionen am teilweise absorbierenden Boden [7], die sich deutlich anders verhalten als bei vollreflektierendem Boden und wurde auch bei Messungen beobachtet. Da bei höheren Wänden die effektive Quelle deutlich höher liegt als ohne LSW, liegen die Interferenzen bei unterschiedlichen Frequenzen und daher ergibt sich vermutlich dieser Effekt in der Differenz [7]. Da dieser Effekt vom Bodenmodell abhängig ist und in der vorliegenden Messung ein solcher Einbruch nicht beobachtet wurde, wird im Weiteren die Berechnung mit reflektierendem Boden verwendet.

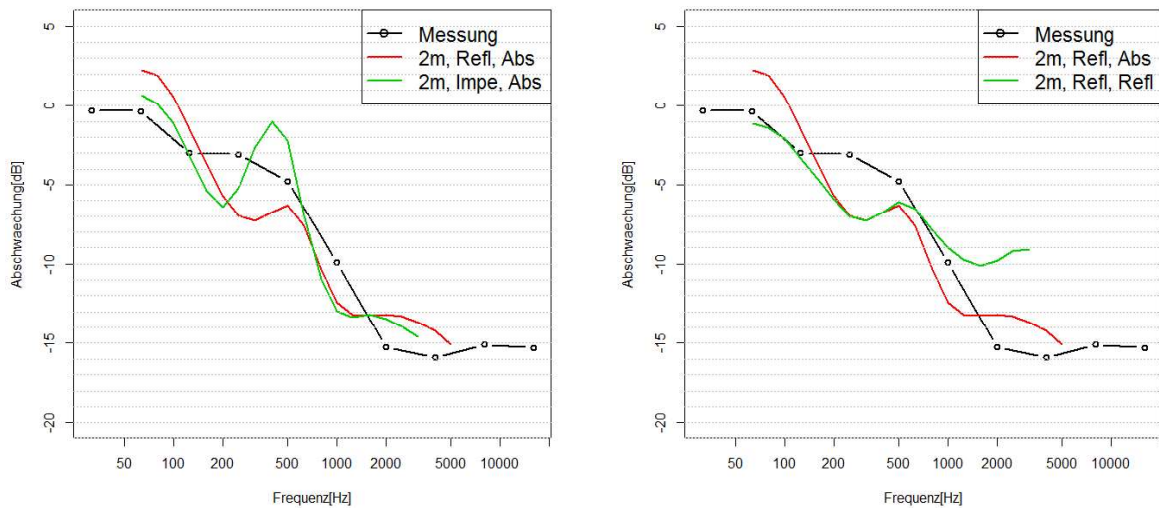


**Abb. 3-8: Reflektierender vs. absorbierender Boden (schwarze Punkte stellen das Messergebnis für eine 2 m hohe LSW dar)**

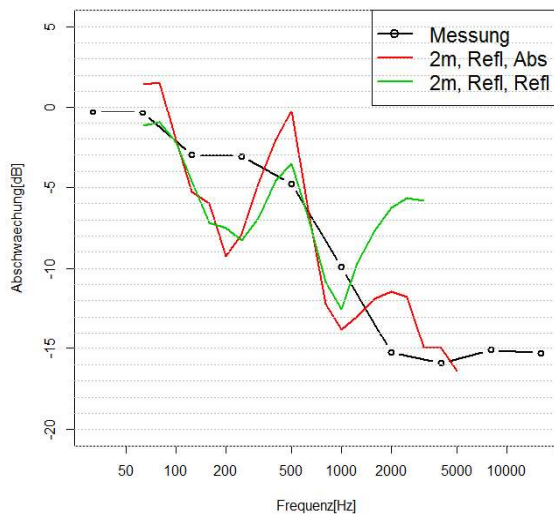
Abb. 3-9 stellt nochmals den Vergleich Berechnung-Messung für eine 2 m hohe Wand bei 35 m Abstand und 2,2 m über SOK dar. Um den spektralen Effekt zu analysieren wurden die Kurven hier so angepasst, dass die mittlere Abweichung zwischen Messung und Rechnung Null ergibt. Die Berechnung mit Bodenmodell passt sehr gut, zeigt aber die erwähnte

Schwankung. Bei reflektierender Wand ist der Verlauf deutlich zu flach, bei absorbierender Wand und reflektierendem Boden ergibt sich hingegen eine gute Übereinstimmung, weshalb die Ergebnisse dieser Simulationen verwendet werden.

Zum Vergleich zeigt Abb. 3-10 die Simulationsergebnisse in 2D. Es zeigen sich deutliche Interferenzen aufgrund der Annahmen über die Form und Lage der Quelle.



**Abb. 3-9: Expliziter Vergleich der Messung mit der Berechnung für absorbierende und reflektierende Wand und mit oder ohne Bodenmodell**



**Abb. 3-10: Ergebnisse in 2D**

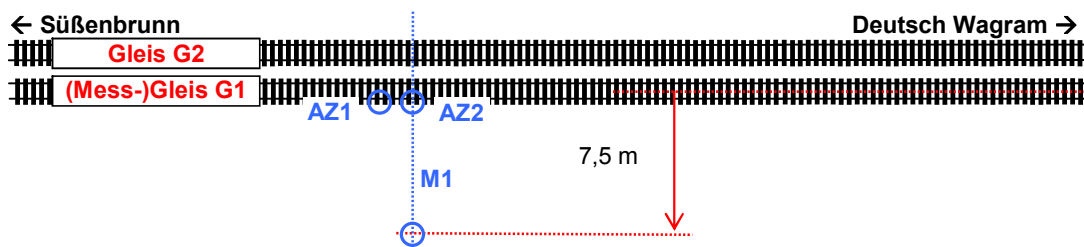
### 3.4. Schienenstegdämpfer

Für die Bewertung der Maßnahme Schienenstegdämpfer wurde auf vorhandene Messdaten zurückgegriffen. Diese Daten wurden unweit des Messabschnittes Deutsch Wagram mit

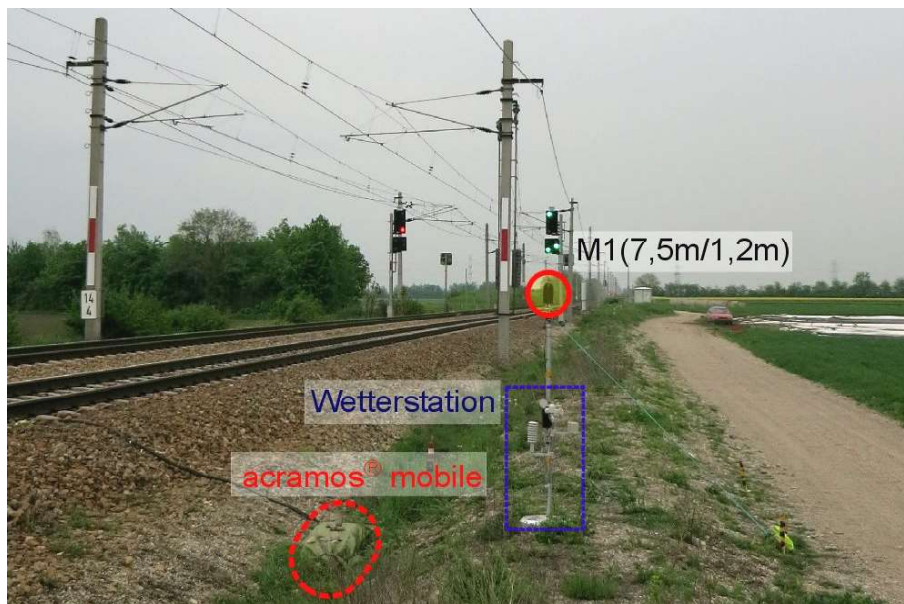


einer mobilen Variante des acramos<sup>®</sup> Messsystems erhoben<sup>3</sup>. Aufgrund der zeitlichen und örtlichen Nähe zu den akustischen Messungen im Rahmen des vorliegenden Projekts, können die maßgeblichen Oberbauparameter als vergleichbar angesehen werden.

Im Detail wurde in den ersten zwei Wochen der Verkehr ohne Maßnahme und in den darauffolgenden Wochen der Verkehr mit eingebauten Schienenstegdämpfern akustisch erfasst. Insgesamt wurden 100 m Gleis, jeweils 50 m vor und 50 m nach dem Messquerschnitt mit den Absorberelementen ausgestattet. Die Emissionsmessung erfolgte mit einem Mikrophon des Typs 46 AE von G.R.A.S, welches in 7,5 m Entfernung zur Gleisachse und in 1,2 m über SOK (1,7 m über Boden) angeordnet wurde. Der Messquerschnitt und der Messaufbau sind in Abb. 3-11 und Abb. 3-12 dargestellt.



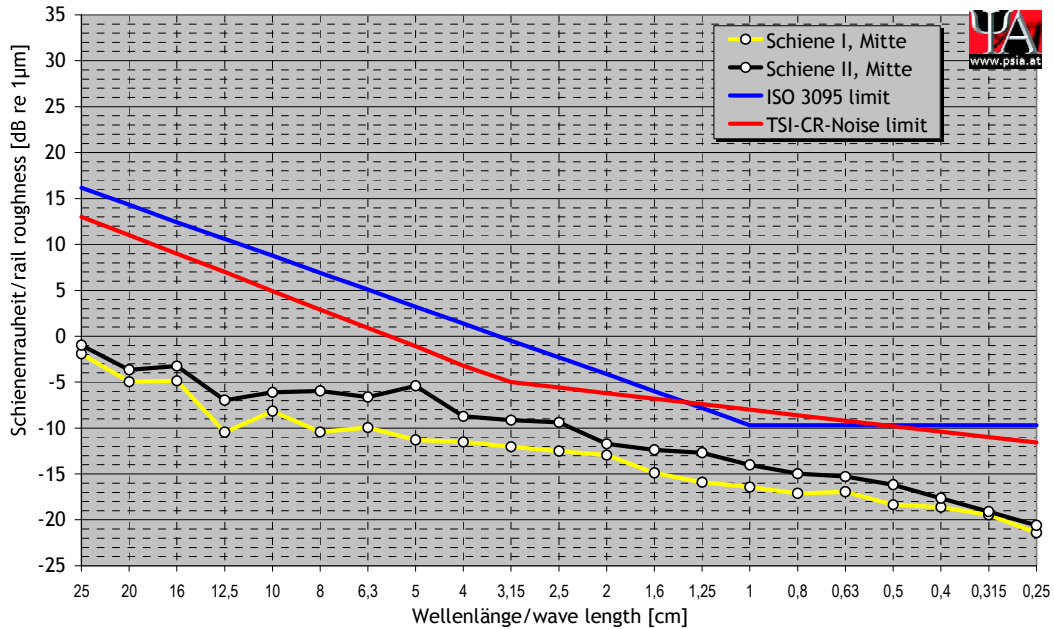
**Abb. 3-11: Messquerschnitt der Schienenstegdämpfermessungen**



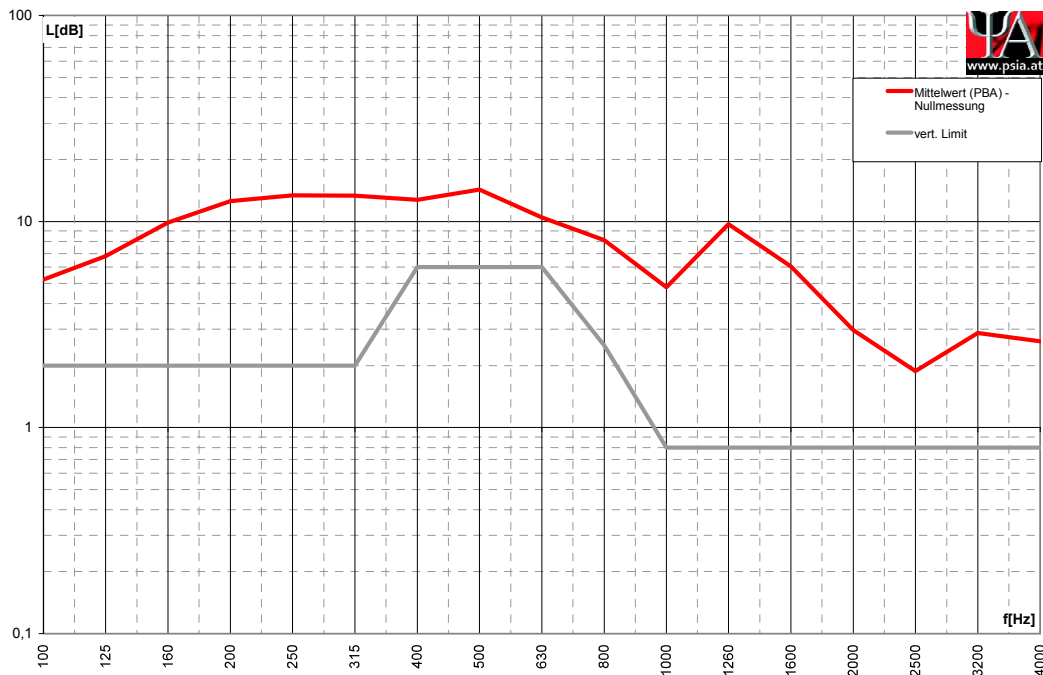
**Abb. 3-12: Messaufbau der Schienenstegdämpfermessungen**

<sup>3</sup> Die Messungen wurden außerhalb des vorliegenden Projekts von dem Hersteller der Schienenstegdämpfer in Auftrag gegeben. Dieser hat einer Verwendung der Messergebnisse in diesem Projekt unter der Bedingung einer Anonymisierung zugestimmt. Aus diesem Grund werden im Ergebnisbericht weder Produkttyp oder Hersteller, noch Datum der Messung oder konkreter Einbauort genannt.

Im Zuge der Messkampagne wurden sowohl die akustische Schienenrauheit als auch die Abklingrate des Gleises (TDR) mittels der Software PBA erhoben und die Qualität des Gleises als TSI-konform bestimmt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abb. 3-13 bis Abb. 3-15 dargestellt.

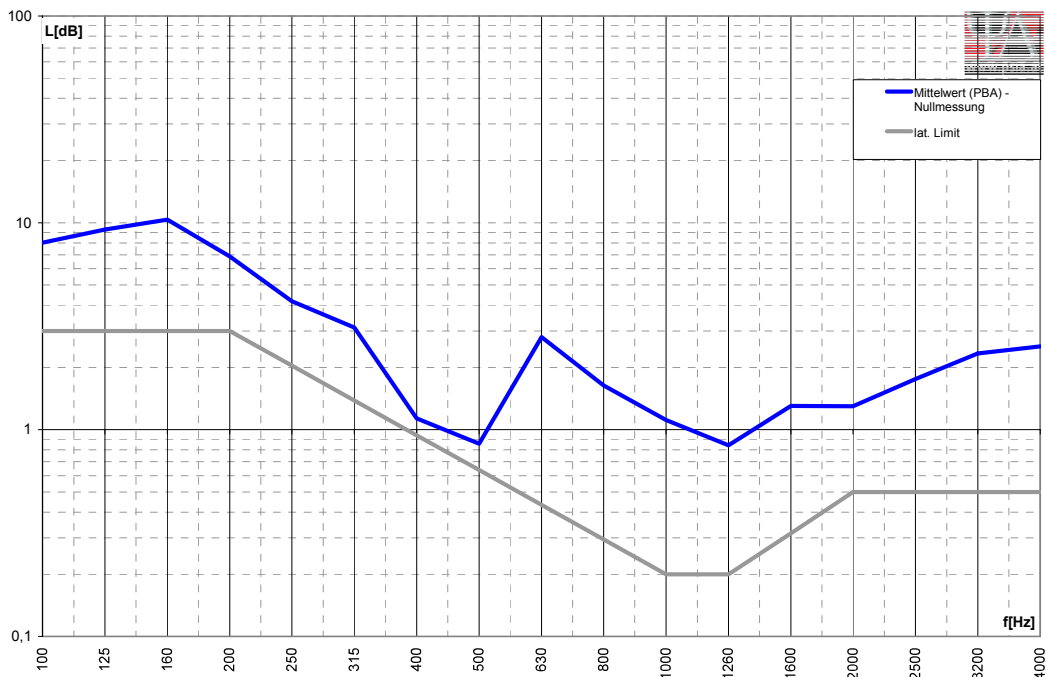


**Abb. 3-13: Akustische Schienenrauheit Deutsch Wagram km 14,4 Gleis 1, 25. Juli 2013 (Center Line)**



**Abb. 3-14: Vertikale Schienenabklingrate (PBA), Deutsch Wagram km 14,4 Gleis 1**





**Abb. 3-15: Laterale TDR (PBA), Deutsch Wagram km 14,4 Gleis 1**

Da der Messabschnitt der SSDs nahe an der Dauermessstelle lag, können die Messungen der Vorbeifahrten an beiden Messstellen gepaart betrachtet werden. Daher kann die Differenz für jede Vorbeifahrt und auch für Zugabschnitte berechnet werden, um z.B. das Triebfahrzeug auszuschließen. Aus dem Unterschied zwischen der Referenzperiode, die den Unterschied zwischen den beiden Messstellen liefert, und der Periode mit SSD ergibt sich dann die Wirkung des SSD.

Außerdem kann die Schwankungsbreite des Effekts besser berechnet werden als bei einer ungepaarten Analyse, da dort aufgrund der Mittelung über alle Vorbeifahrten auch die Schwankungen der Vorbeifahrten selbst im Ergebnis aufscheinen.

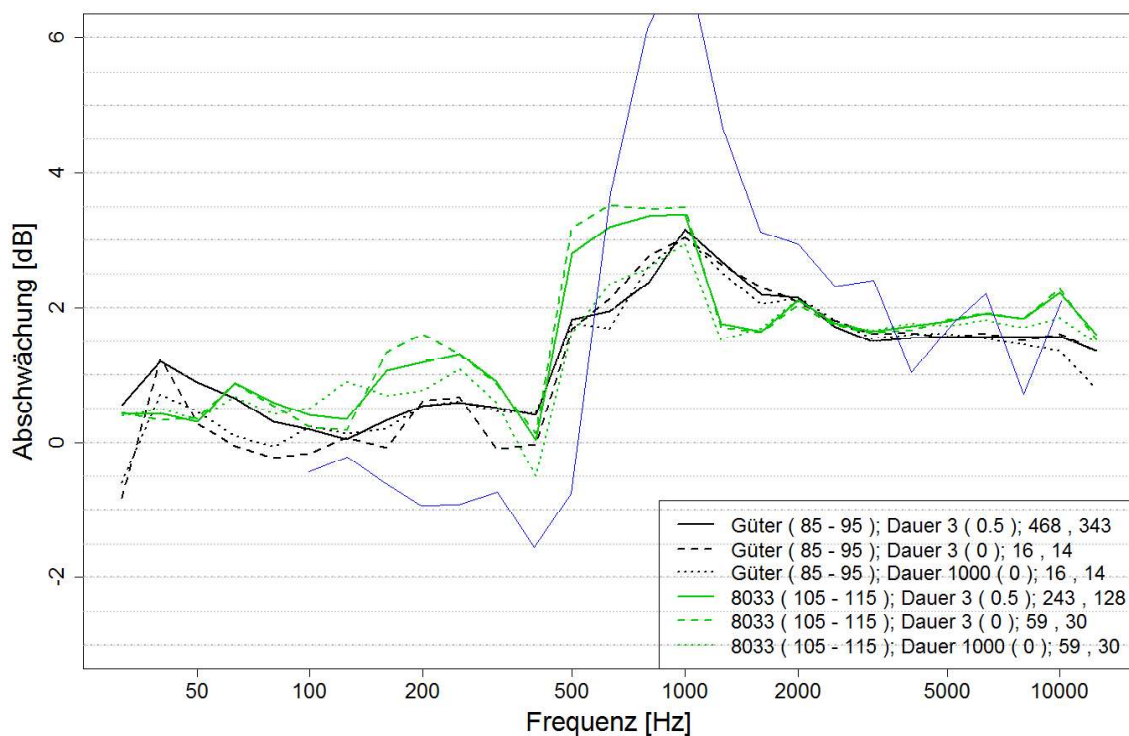
Für die Bestimmung der Abschwächung wurden verschiedene Berechnungen durchgeführt. Einerseits wurde die Abschwächung für ganze Züge nach Zugtypen getrennt berechnet. Des weiteren wurden 3 Sekunden lange Segmente verwendet, da diese Länge für die Selektion der repräsentativen Vorbeifahrten gewählt wurde (siehe Kapitel 0). Die Berechnungen wurden sowohl gleitend über die Vorbeifahrt (0,5 Sekunden Sprungweite) als auch für das mittlere Segment der Vorbeifahrt durchgeführt.

Da die Vorbeifahrtsgeschwindigkeit im Allgemeinen nicht an beiden Messstellen exakt gleich ist sondern leicht variieren kann, wurden die Fenster (Segmentmitte oder gleitend) an der Schienestegdämpfermessstelle ausgewählt und der Start des Segments für die beiden Aufnahmen der Dauermessstelle aufgrund des Verhältnisses der beiden Geschwindigkeiten

angepasst. Der Geschwindigkeitsbereich wurde aufgrund der Ergebnisse der Stimulusselektion (siehe Abschnitt 4.1) eingeschränkt (85-95 km/h für Güterzüge (GZ) und 105-115 km/h für Personenzüge (PZ) des Typs 80-33).

In Abb. 3-16 ist die Wirkung der Schienenstegdämpfer für die in der Stimulusselektion ausgewählten Geschwindigkeitsbereiche und Zugtypen in Terzbändern dargestellt. Die blaue Kurve ist aus der Literatur entnommen und zeigt um 1 kHz eine deutlich andere Wirkung [8]. Dies legt nahe, dass ein einheitlicher Effekt des SSD nicht gegeben ist und die Wirkung vom jeweiligen Typ, vom Gleis aber auch von der Temperatur, Zugtyp und Zwischenlagen abhängen kann. Trotzdem ist ein klarer Effekt bei beiden Typen nur bei höheren Frequenzen über 500 Hz vorhanden mit einer Überhöhung im oberen Mittenbereich um 1 kHz. In Oktaven gemittelt (Abb. 3-17) ergibt sich ein ähnliches Bild.

Eindeutig sichtbar ist der Effekt der Segmentauswahl beim Personenzug (Typ 80-33). Bei ganzen Segmenten ist die Wirkung reduziert, da hier das Triebfahrzeug einen größeren Einfluss hat. Die höheren Emissionspegel des Triebfahrzeugs (hauptsächlich 1144) dominieren die Berechnung des Gesamtpegels und reduzieren daher die Wirkung der Schienenstegdämpfer, da diese nur auf das Rollgeräusch wirken wohingegen Maschinenlärm nicht beeinflusst wird. Beim Güterzug ist aufgrund der größeren Länge und des im Schnitt höheren Rollgeräusches kein Unterschied festzustellen.



**Abb. 3-16: Mittlere Übertragungsfunktion der Schienenstegdämpfer in Terzen für die relevanten Geschwindigkeitsbereiche (die blaue Kurve zeigt eine Messung aus Thompson 2009)**

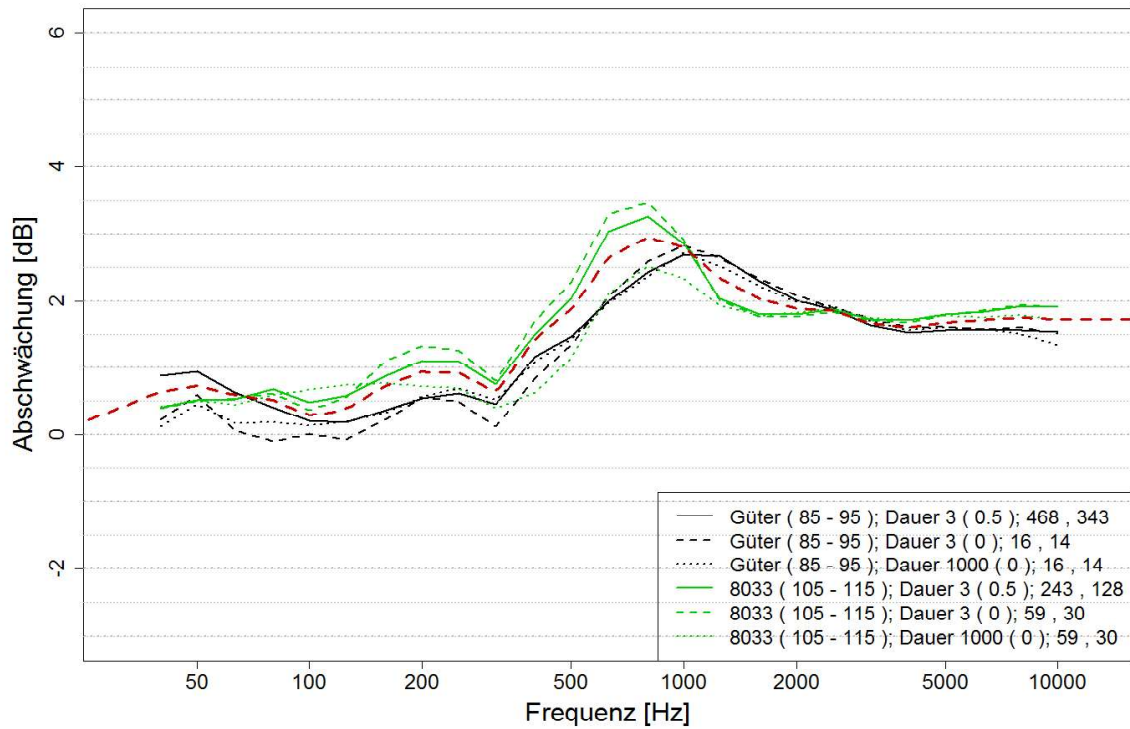


Abb. 3-17: Mittlere Übertragungsfunktion der Schienenstegdämpfer in Oktaven

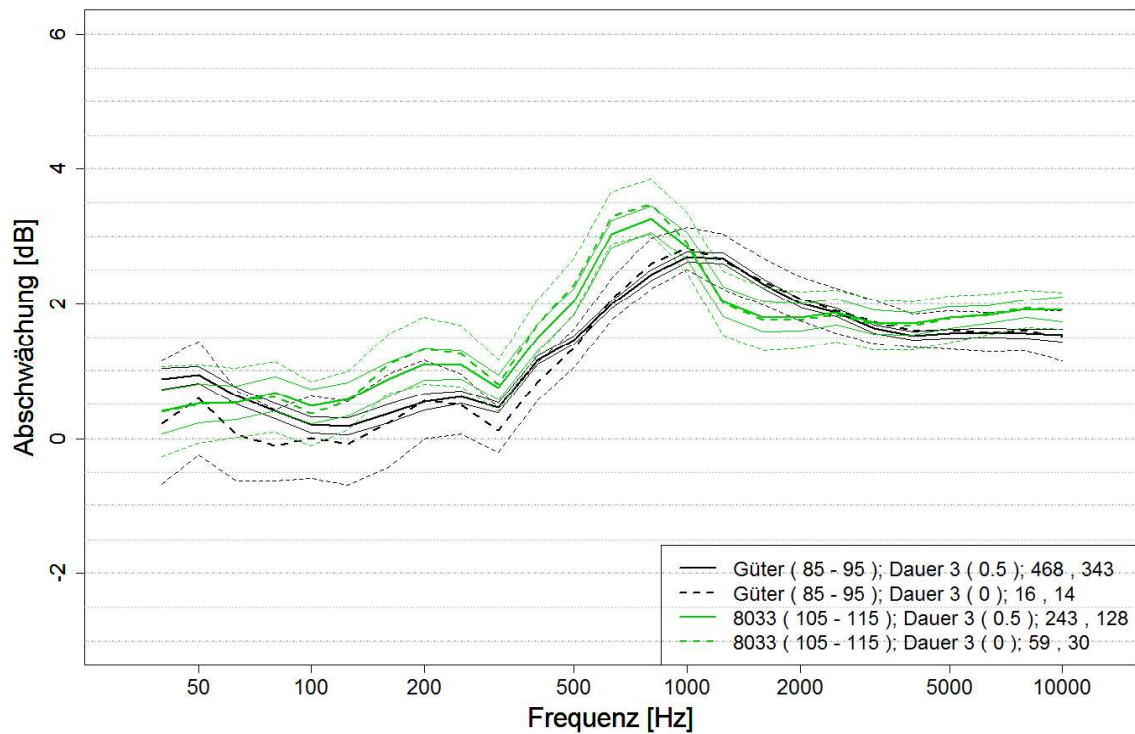


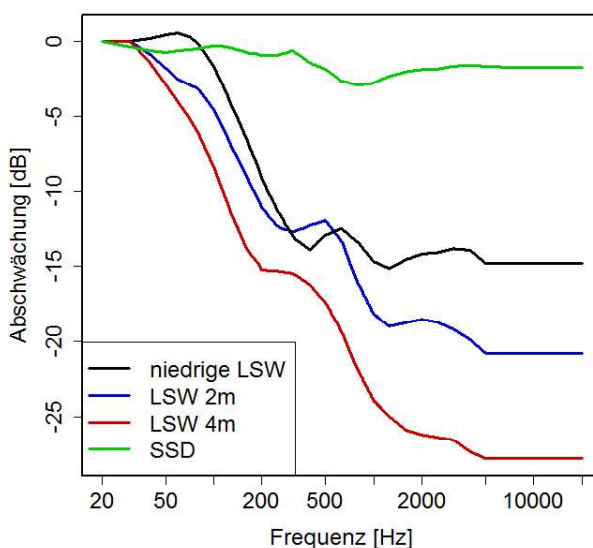
Abb. 3-18: Schwankungsbreite des Effekts der Schienenstegdämpfer

Insgesamt zeigen sich in den ausgewählten Geschwindigkeitsbereichen nur geringfügige Unterschiede zwischen Personenzug und Güterzug. Um eine bessere Vergleichbarkeit der spektralen Modifikation bei den perceptiven Tests zu haben, wird daher eine gemittelte Abschwächungskurve verwendet die beim Güterzug auf der gleitenden Berechnung und beim Personenzug auf dem mittleren Segment basiert (rote Kurve). Der maximale Fehler durch die Mittelung beträgt ca. 0,5 dB im Bereich zwischen 500 und 1000 Hz.

Abb. 3-18 zeigt die 95%-Konfidenzintervalle der Abschwächungskurven der Schienenstegdämpfer für 3 Sekunden lange Segmente auf der Basis von 1000 Bootstrap-Samples. Dabei werden aus den Vorbeifahrten zufällig Fahrten ausgewählt, wobei die gleiche Vorbeifahrt mehrmals vorkommen kann. Dies erfolgt für die Referenzperiode und die Periode mit Schienenstegdämpfern. Die Anzahl der gezogenen Vorbeifahrten entspricht der Anzahl der tatsächlichen Vorbeifahrten. Aus den beiden Bootstrap-Samples wird der mittlere Effekt berechnet. Dieser Vorgang wird 1000 mal wiederholt. Aus der Verteilung des mittleren Effektes der Schienenstegdämpfer werden die Konfidenzintervalle bestimmt. Diese sind größtenteils kleiner als  $\pm 0,5$  dB.

### 3.5. Übertragungsfunktionen

Aus den Simulationen mit absorbierender Wand und reflektierendem Boden und den Messungen der Schienenstegdämpfer ergeben sich die, für die perceptiven Tests verwendeten Übertragungsfunktionen. Da diese nicht den gesamten Frequenzbereich abdecken, wurde bei sehr tiefen Frequenzen (1 Hz bei den SSD und 32 Hz bei den LSW) angenommen, dass die Maßnahmen keine Wirkung haben. Die Wirkung wurde dann



**Abb. 3-19: Übertragungsfunktionen für die verschiedene Lärmschutzmaßnahmen**

vom letzten vorhandenen Datenpunkt (32 Hz bei SSD, 64 Hz bei LSW) interpoliert. Bei den hohen Frequenzen wurde der letzte vorhandene Datenpunkt (10 kHz bei SSD und 5 kHz bei LSW) einfach fortgesetzt. Daraus ergeben sich die in Abb. 3-19 dargestellten Kurven, die zur Modifikation der Hörbeispiele verwendet wurden (siehe Kap. 4.2).



## 4. WAHRNEHMUNGSTESTS

### 4.1. Selektion repräsentativer Stimuli

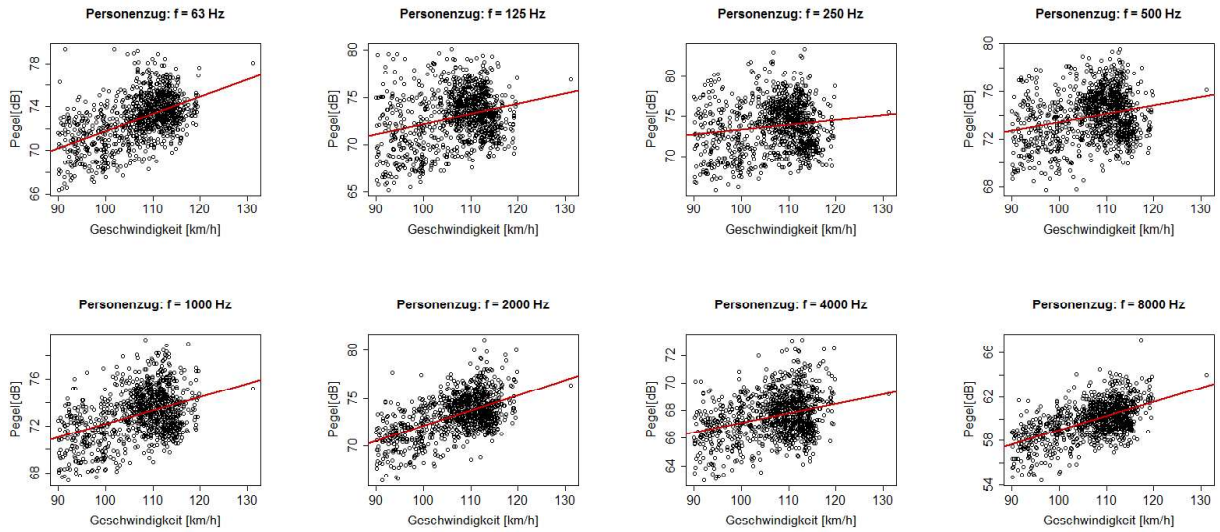
Um eine Selektion repräsentativer Stimuli durchzuführen, wurden die Aufnahmen der Dauermessstelle im Zeitraum der gesamten Messkampagne für PASS (3. Sept. bis 1. Nov. 2013) als Basis genommen, da dies eine angemessene Analyse der spektralen Verteilung der verschiedenen Zugtypen erlaubt. Auf Basis der mittleren Geschwindigkeit und der mittleren Beschleunigung erfolgte eine Vorauswahl der Zugskategorien:

- Die Mindestgeschwindigkeit wurde bei Personenzügen mit 90 km/h festgelegt.
- Der Geschwindigkeitsbereich bei Güterzügen wurde zwischen 75 und 100 km/h eingeschränkt.
- Die maximale mittlere Beschleunigung des Zuges wurde mit  $0,21 \text{ m/s}^2$  festgelegt (0,75 km/h/s). Dies ergibt bei einer Dauer von 3 Sekunden eine Änderung der Geschwindigkeit von etwa 2,25 km/h was bei typischen Berechnungen des Pegels des Rollgeräusches einer Änderung von weniger als 0,5 dB entspricht (Abschätzung auf Basis der Geschwindigkeitsnormalisierung in Abschnitt 2.1).
- Personenzüge wurden auf die allgemeine Klasse (RZ-mix bei acramos®) und die Doppelstockzüge (80-33) eingeschränkt, da bei den Schnellbahngarnituren das Antriebsgeräusch in 25 m nicht mehr separierbar ist.

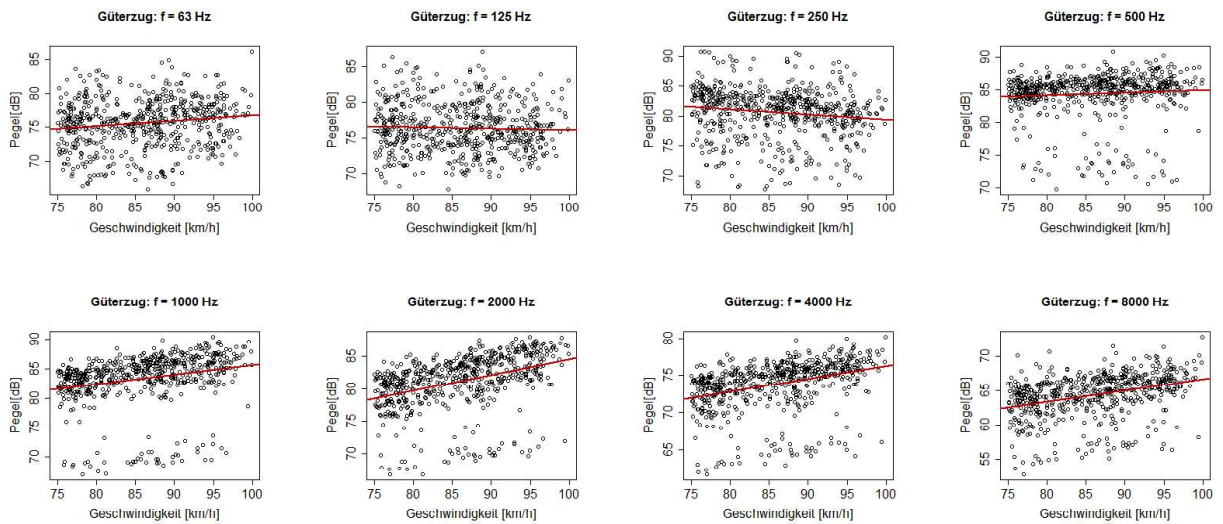
Nach dieser ersten Einschränkung verblieben in der Messperiode 596 Güterzüge und 1044 Personenzüge (811 80-33) der Dauermessstellung als Grundmenge zur Selektion repräsentativer Stimuli.

#### Effekt der Geschwindigkeit

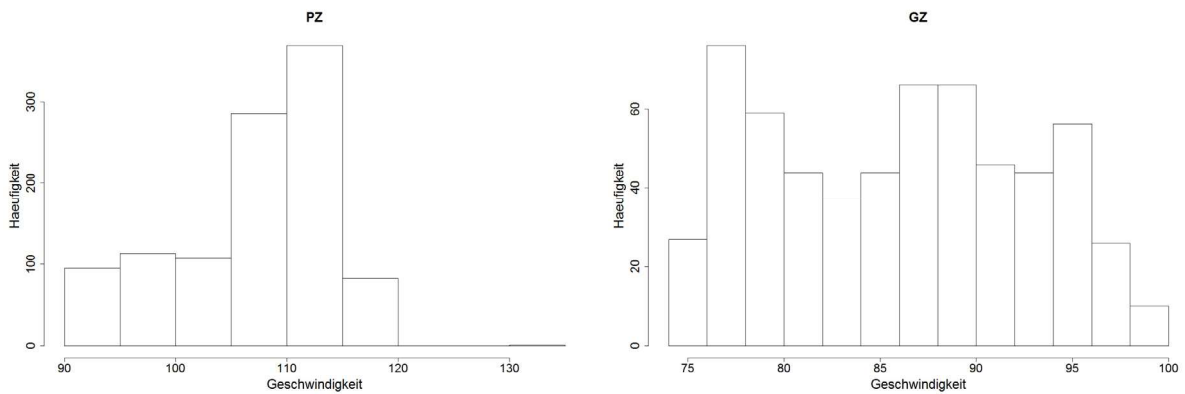
Es ist bekannt, dass die Geschwindigkeit einen Effekt auf den Gesamtpegel hat. Weiters ist zu erwarten, dass sich spektrale Veränderungen ergeben, da bei einer Veränderung der Geschwindigkeit die Wellenlänge der Rad- und Schienenrauhigkeit in eine andere akustische Frequenz umgesetzt wird. Abb. 4-1 und Abb. 4-2 illustrieren diese spektrale Änderung bei den im Messquerschnitt durchgeführten Messungen. Wie aus den Ergebnissen zu sehen ist, ist der Trend über die Terzbänder nicht einheitlich. Um daher repräsentative Stimuli auszuwählen wurde aufgrund der Verteilung der Geschwindigkeiten von Personen- und Güterzügen ein Geschwindigkeitsbereich ausgewählt der möglichst hoch ist und möglichst viele Züge beinhaltet.



**Abb. 4-1: Terzbandpegel der Personenzüge als Funktion der Geschwindigkeit**



**Abb. 4-2: Terzbandpegel der Güterzüge als Funktion der Geschwindigkeit**



**Abb. 4-3: Verteilung der Geschwindigkeiten der Personenzüge (links) und der Güterzüge (rechts)**

Abb. 4-3 zeigt, dass zwischen 85 und 95 km/h bei Güterzügen und zwischen 105 und 115 km/h bei Personenzügen an der Messstelle eine hohe Anzahl von Vorbeifahrten stattfindet. Daher wurde dieser Geschwindigkeitsbereich ausgewählt.

### Datenmaterial der Kunstkopfmessung

Aufgrund des in Kapitel 2 beschriebenen Ablaufs der Messung wurden nur die beiden letzten Messtage (29. und 31. Okt. 2013) für eine Auswahl repräsentativer Vorbeifahrten für die Wahrnehmungstests betrachtet. Aus den Daten dieses Messzeitraums ergeben sich folgende Häufigkeiten (siehe Tab. 4-1).

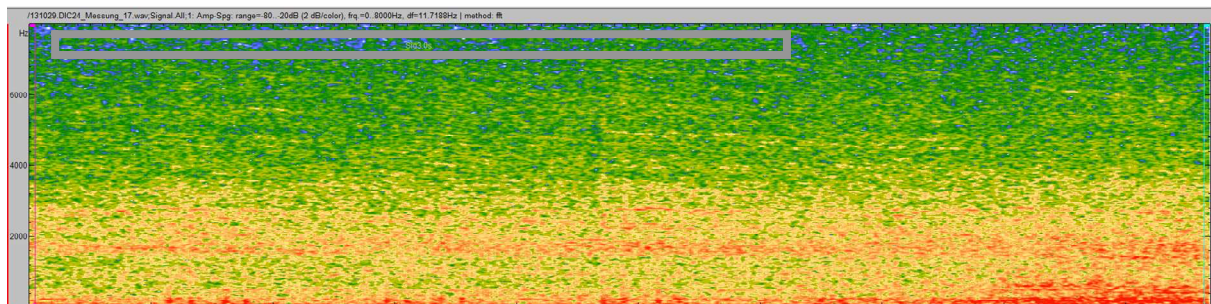
Zugtyp	Untertyp	Gesamt	Metadaten passen	Keine Geräusche	3 Sekunden Segmente	Referenz-Segmente
Güter	k. A.	14	5	5	85 (8-23 pro Zug)	6245 (2-47 pro Zug)
Personen	80-33	10	9	8	8	577
	andere	7	2	1	1	68

**Tab. 4-1: Übersicht der Anzahl der Züge, Ausschlusskriterien und der erstellten 3 Sekunden Segmente der Messtage 29. und 31. Okt. 2013**

Ein Güterzug fiel aufgrund zu großer Beschleunigung ( $0,29 \text{ m/s}^2$ ) heraus, der Rest aufgrund der zu geringen Geschwindigkeit ( $< 85 \text{ km/h}$ ) oder weil der Zug zu kurz war (1 Güterzug).

Bei den Personenzügen blieben 9 Züge übrig, einer davon in der allgemeinen Klasse (RZ-mix bei acramos<sup>®</sup>), der Rest sind 80-33. Der Rest war entweder zu langsam oder es fehlten die Metadaten (1 Zug).

Aus dem vorhandenen Material für die Personenzüge ergibt sich eine Einschränkung der Stimulusdauer aufgrund der geringen Länge der 80-33 Garnituren und auch des einen RZ-mix Zuges (Dauer 6,2 Sekunden). Eine manuelle Prüfung ergab eine maximale Dauer der brauchbaren Segmente von etwa 3 Sekunden. Dadurch soll der Einfluss des Triebfahrzeugs vermindert werden. Abb. 4-4 zeigt Spektrogramm der Messung einer Vorbeifahrt eines 80-33 in 25 Metern. Am Ende ist deutlich der Einfluss der Lok sichtbar.



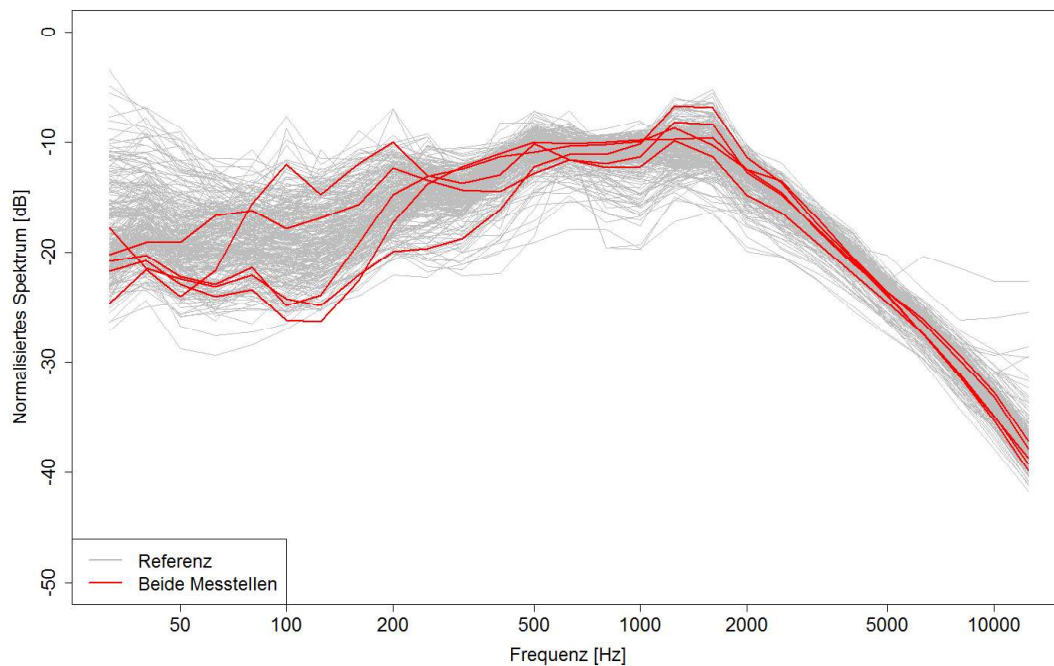
**Abb. 4-4: Spektrogramm einer Vorbeifahrt eines Doppelstockzuges. Das graue Rechteck zeigt das gewählte Segment**

Daher erfolgte bei den Personenzugdaten eine manuelle Segmentierung. Für die Grundgesamtheit wurde eine automatische Segmentierung verwendet. Das Segment wurde zentriert um möglichst gut das Triebfahrzeuggeräusch zu eliminieren. Außerdem wurden die Daten in 7,5 Metern Entfernung verwendet, da es bei 25 Metern einige Messausreißer gab (Grund unbekannt).

Bei den Güterzügen wurde eine automatische Segmentierung verwendet mit gleitendem Fenster (3 Sekunden lang, 0,5 Sekunden Schritte).

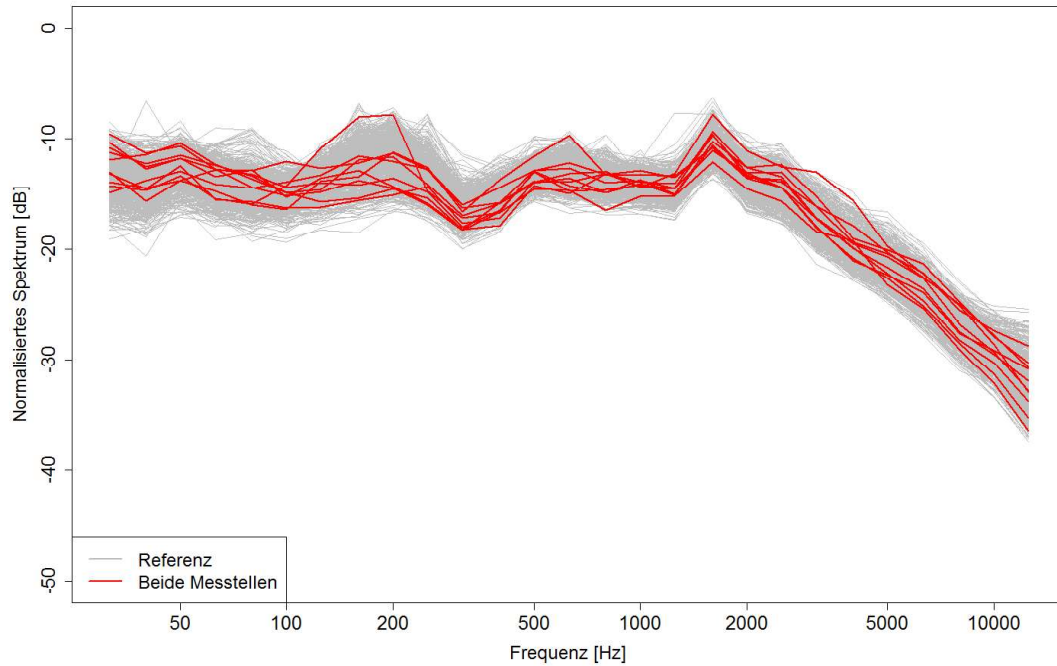
Die beiden Abb. 4-5 und Abb. 4-6 zeigen die Verteilung der Spektren über die gesamten Vorbeifahrten. Hierzu wurden die Spektren auf gleiche Energie normiert, um nur den spektralen Verlauf zu beurteilen. Grau dargestellt sind die die Daten auf deren Basis die Segmente für den Test ausgewählt wurden (rot dargestellt).

Die Auswahl der Stimuli erfolgte aufgrund des mittleren normalisierten Spektrums der 3 Sekunden langen Segmente der Referenzdaten (31-12500 Hz). Es wurde die mittlere quadratische Abweichung über die Bänder berechnet und aufsteigend gereiht (siehe auch z.B. SysBahnLärm [9]). Die Abb. 4-7 und Abb. 4-8 zeigen die besten 3 Segmente für Güter- und Personenzug. Aufgrund der guten Übereinstimmung wurden die jeweils besten Segmente gewählt und die Daten der ersten fünf Messtage aufgrund der möglichen, geringfügigen Beeinflussungen der Schallaufzeichnungen durch Abschattungseffekte des erhöhten Bahndamms nicht weiter verwendet.

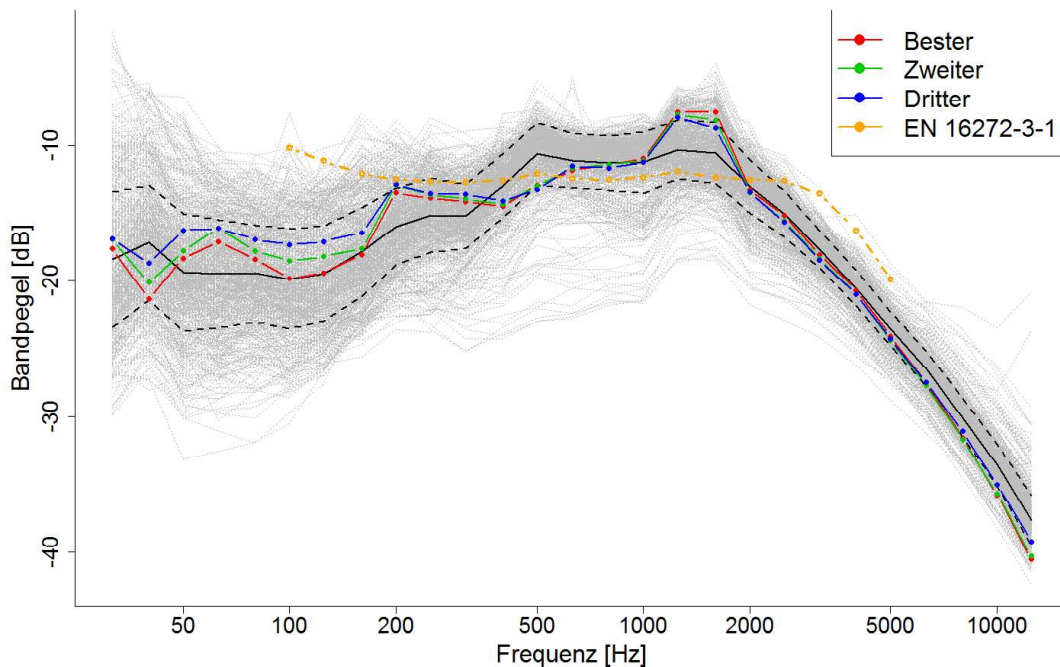


**Abb. 4-5: Verteilung der normierten Spektren der Güterzüge in 7,5 m Entfernung: Grundgesamtheit (grau) und bei paralleler Kunstkopfmessung (rot)**



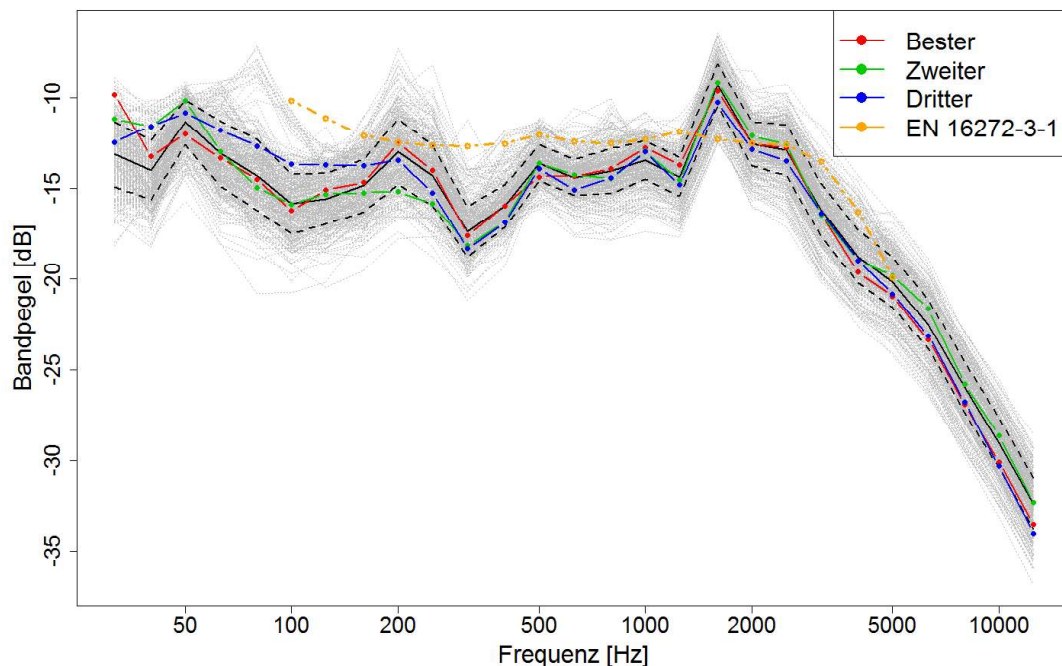


**Abb. 4-6: Verteilung der normierten Spektren der Personenzüge in 7,5 m Entfernung: Grundgesamtheit (grau) und bei paralleler Kunstkopfmessung (rot)**



**Abb. 4-7: Verteilung der normierten Spektren der Güterzüge (3s Segmente): Grundgesamtheit (grau), Mittelwert und Standardabweichung (schwarz) und die besten 3 Segmente (aus der Kurve für den Standard (orange) wurde die A-Gewichtung herausgerechnet [10])**





**Abb. 4-8: Verteilung der normierten Spektren der Personenzugkategorien RZ-mix und 80-33 (3 s Segmente): Grundgesamtheit (grau), Mittelwert und Standardabweichung (schwarz) und die besten 3 Segmente (aus der Kurve für den Standard (orange) wurde die A-Gewichtung herausgerechnet [10])**

## 4.2. Erstellen der Hörbeispiele

Entsprechend der anhand der Mikrofonaufnahmen ausgewählten, repräsentativen Segmente für Personen- und für Güterzüge, wurden die Stimuli für die Wahrnehmungstests aus den Kunstkopfaufzeichnungen mit der Software ArtemiS manuell geschnitten. Darauf aufbauend wurden diese Stimuli mit den Differenzen der Übertragungsfunktionen von Freifeldausbreitung zum Schallimmissionspunkt und den Übertragungsfunktionen der betrachteten Lärmschutzmaßnahmen (siehe Kap. 3) beaufschlagt. Hinsichtlich der spektralen Modifikation beschreiben die sich ergebenden 8 Stimuli daher für Personen- und Güterzüge repräsentative Schallimmissionen in 25 m Entfernung zur Gleisachse bei Freifeldausbreitungsbedingungen und bei Einsatz der drei betrachteten Lärmschutzmaßnahmen.

Als Basis wurde der A-bewertete, energieäquivalente Dauerschalldruckpegel für das 3s Segment verwendet ( $L_{A3s}$ ). Da eine Anpassung des A-bewerteten Schalldruckpegels während des Ablaufs der Wahrnehmungstests nicht möglich ist, wurde bereits im Vorfeld für die 8 Grundstimuli eine Pegelvariation durchgeführt. Dabei wurden die arithmetischen Mittel der Pegel von linkem und rechtem Kanal zwischen 0 und 80 dB(A) in 0,5 dB Schritten geändert und gespeichert. Zudem wurde für jeden Stimulus eine weitere Version mit

vertauschtem linken und rechten Kanal angefertigt. Die resultierenden 2576 Stimuli (8 Grundstimuli, 161 verschiedene Pegel, Kanalvariation LR und RL) stellen die akustischen Eingangsdaten für die Benutzerschnittstelle der perzeptiven Tests (siehe Kap. 4.5) dar.

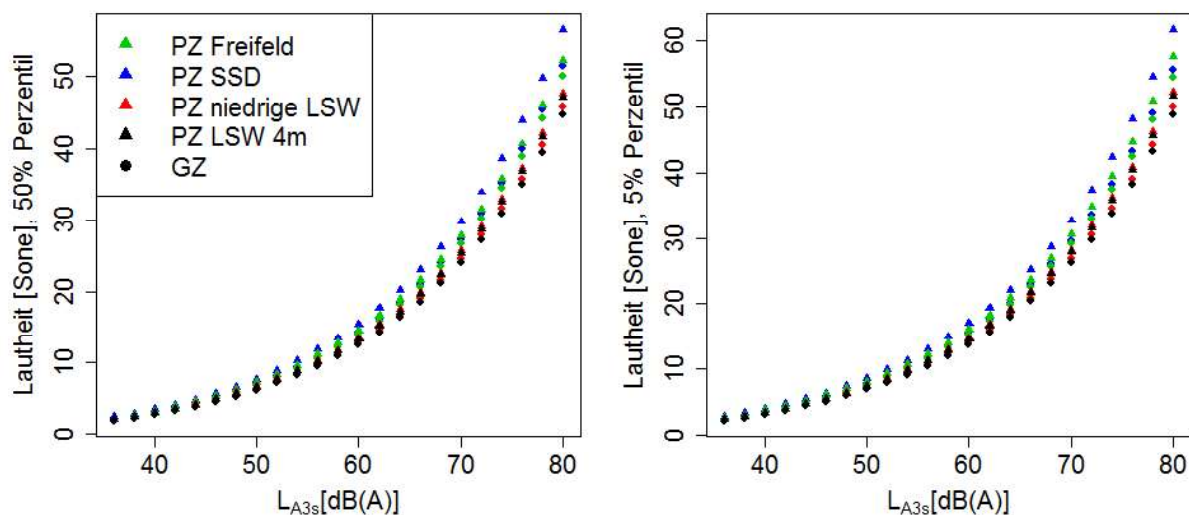
Des Weiteren wurden für die ausgewählten und modifizierten Stimuli eine Reihe von psychoakustischen Parametern berechnet und als Basis für die Interpretation der Ergebnisse der perzeptiven Tests analysiert. Im Folgenden werden Erkenntnisse für Lautheit, Rauigkeit und C-bewerteten Pegel dargestellt. Zwar wurden auch Schwankungsstärke, Schärfe und Tonhaltigkeit bestimmt. Da diese jedoch in den späteren Analysen keinen signifikanten Effekt zeigen, wird im Folgenden darauf nicht näher eingegangen (eine genauere Beschreibung findet sich beispielsweise in [11]).

### Lautheit

Die Lautheit  $N$  bildet das Lautstärkeempfinden ab und wird in Sone angegeben. Eine Verdoppelung der empfundenen Lautstärke entspricht einer Verdoppelung der Lautheit in Sone. Weiters gibt es noch den Lautstärkepegel  $L_N$  in Phon. 1 Sone entspricht 40 Phon. Werte größer als 40 Phon hängen mit Sone folgendermaßen zusammen:

$$L_N = 40 + 10 \cdot \log_{10}(N) - \log_{10}(2)$$

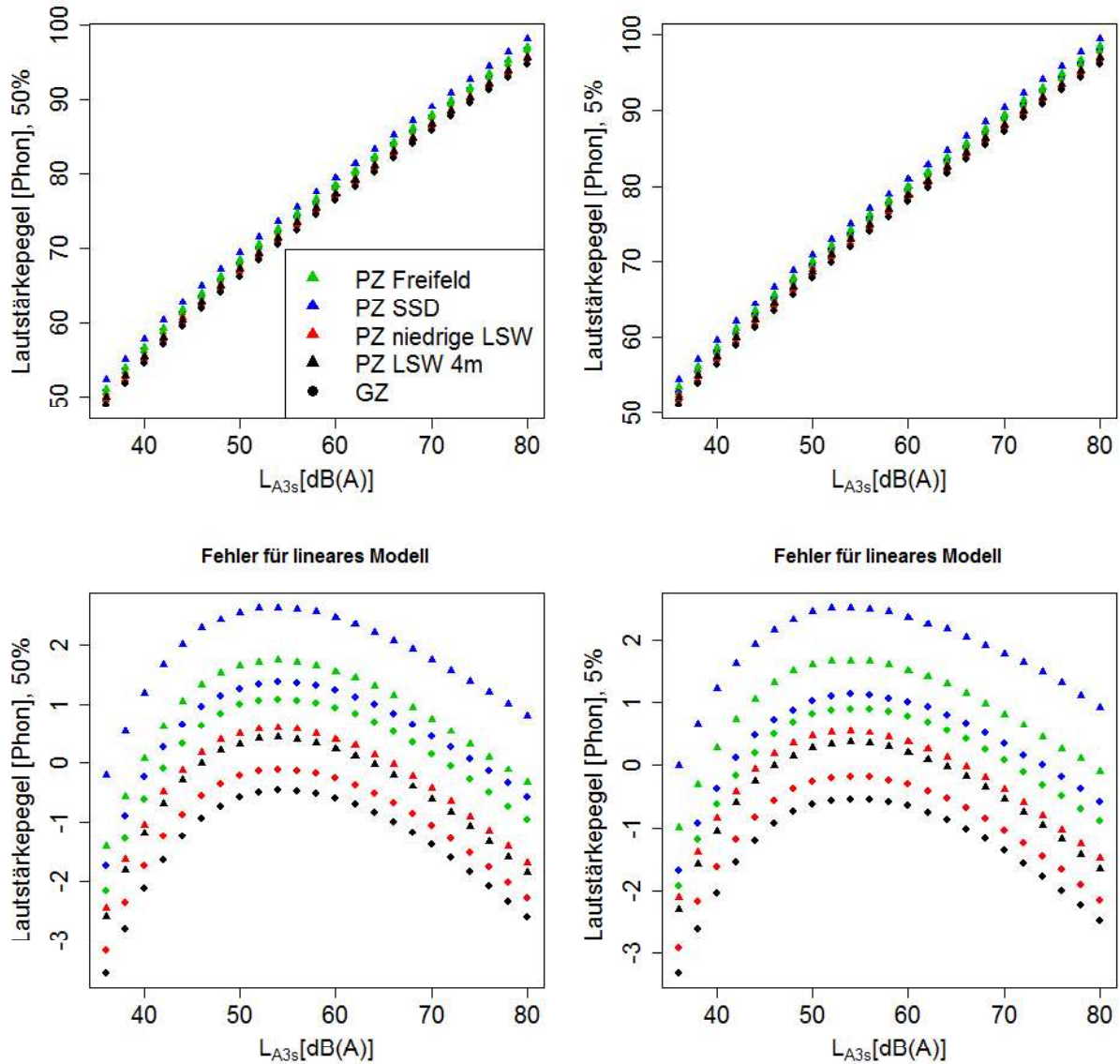
Das heißt eine Erhöhung des Lautstärkepegels von 10 Phon bedeutet eine Verdoppelung der Lautheit. Unter 40 Phon nimmt die Lautheit schneller ab.



**Abb. 4-9: Median (links) und 5%-Schwelle (rechts) der Lautheit der Hörbeispiele als Funktion des Pegels  $L_{A3s}$**

Abb. 4-9 und Abb. 4-10 zeigen den Zusammenhang zwischen Lautheit, Lautstärkepegel und Pegel  $L_{A3s}$  für die beiden Referenzgeräusche. In Abb. 4-10 ist außerdem die Abweichung von

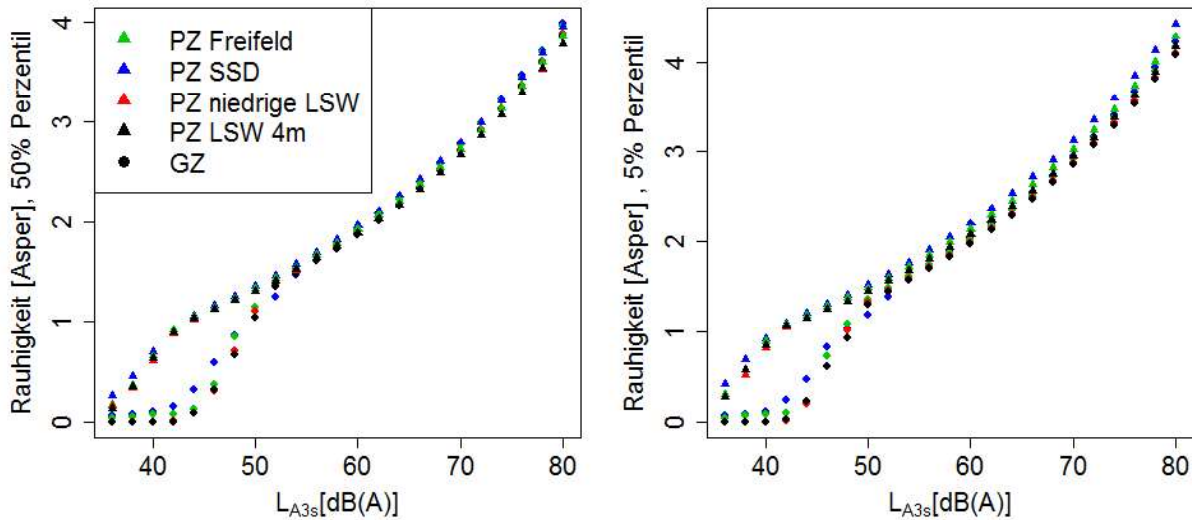
einer linearen Regression  $L_{A3s}$  vs. Lautstärkepegel zu sehen. Daraus ist ersichtlich dass der Anstieg des Lautstärkepegels bei niedrigerem  $L_{A3s}$  höher ist.



**Abb. 4-10: Median (links) und 5%-Schwelle (rechts) des Lautstärkepegel als Funktion des  $L_{A3s}$  (oben) und Abweichung von einer Geraden Lautstärkepegel vs.  $L_{A3s}$  (unten)**

### Rauhigkeit

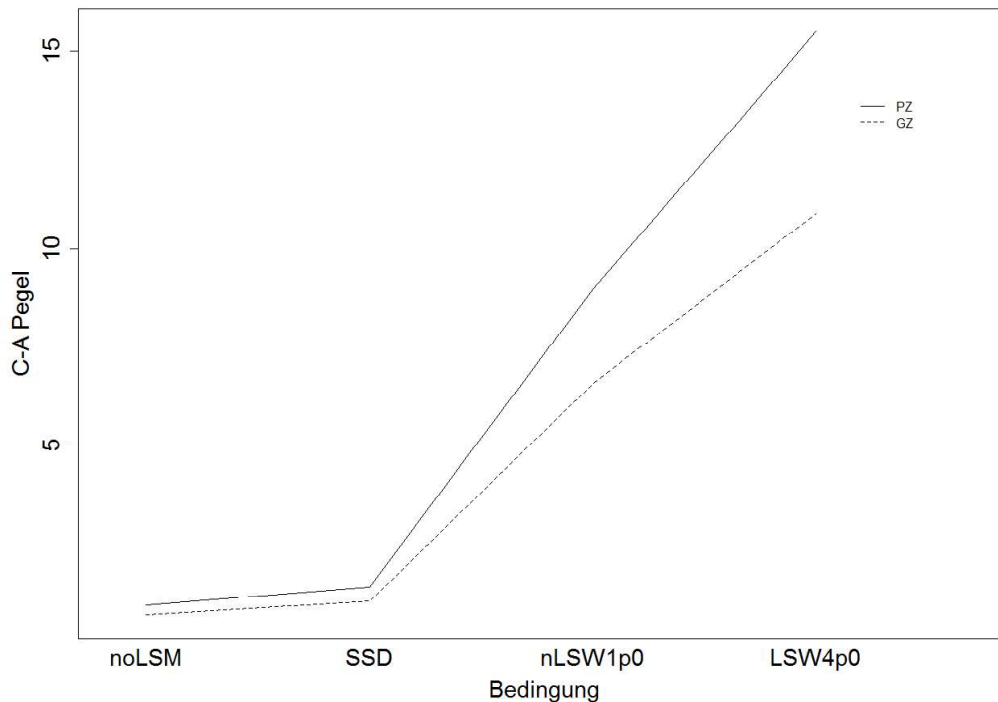
Rauhigkeit ist eine Größe, welche die Wahrnehmung von schnellen Modulationen (Frequenz- und Amplitudenmodulation) abbildet. Wie in Abb. 4-11 ersichtlich, hängt die Rauhigkeit stark von der Lautheit ab. Bei tiefen Pegeln unterschieden sich Güter- und Personenzug deutlich, der Personenzug weist hier eine höhere Rauhigkeit auf.



**Abb. 4-11: Rauigkeit als Funktion des  $L_{A3s}$  und der Bedingung**

### C-bewertete Pegel

Der C-gewichtete Pegel ist ein häufig verwendetes Maß bei höheren Pegeln, da er aus der Hörkurve bei 80-90 Phon abgeleitet wurde. Die tieffrequenten Anteile werden beim C-Pegel höher gewichtet als beim A-Pegel. Abb. 4-12 zeigt die Unterschiede zum A-Pegel. Bei starker Abschwächung der hohen Frequenzen bei den Lärmschutzwänden steigt der C-bewertete Pegel stark an. Der Personenzug hat einen höheren C-Pegel als der Güterzug.



**Abb. 4-12: Differenz C-bewerteter Pegel vs. A-bewerteter Pegel als Funktion der Bedingung**

### 4.3. Probandenauswahl

Für die Wahrnehmungstests wurden Personen aus dem Fundus bisheriger Probanden des Projektpartners ISF (Probandenpool) kontaktiert. Zudem wurden mittels Informationsaushängen beim Partner IEW, bei der Fachschaft für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien und an der Fachhochschule St. Pölten aktiv nach weiteren Testpersonen gesucht.

Bei der Auswahl von Probanden wurde darauf geachtet, annähernd eine Gleichverteilung zwischen weiblichen und männlichen Personen sicherzustellen. Das zulässige Alter der Probanden wurde zudem auf 20 bis 45 Jahre begrenzt, um Effekte aufgrund der altersabhängigen Verringerung der Hörschwelle ausschließen zu können. Außerdem wurde vorausgesetzt, dass den Probanden keine Beeinträchtigung der Hörfähigkeit bekannt ist.

Für die Wahrnehmungstests standen in Summe 40 normalhörende Probanden zur Verfügung, wobei 24 weiblich und 16 männlich waren. Das durchschnittliche Alter betrug  $27,6 \pm 5$  Jahre. Die Hörschwelle wurde mittels eines Hörtests im Frequenzbereich zwischen 125 und 8000 Hz ermittelt. Normalhörend wurde definiert als eine maximale Erhöhung der Hörschwelle von 25 dB gegenüber einer altersadäquaten Referenzhörschwelle. Ein einzelner Proband hatte bei 8000 Hz auf einem Ohr eine leicht erhöhte Schwelle (27 dB). Aufgrund der hohen Frequenz, des knappen Unterschieds und des nur einseitigen Effekts wurde der Proband trotzdem in die Studie aufgenommen.

### 4.4. Testdesign

#### Lästigkeitsbeurteilung

Für die Lästigkeitsbeurteilung wurde eine freie Größenschätzung durchgeführt [12], [13]. Diese unterscheidet sich von anderen Größenschätzungen dadurch, dass keine Referenzskala vorgegeben ist (z.B. von gar nicht bis sehr lästig). Dadurch lässt sich keine absolute Lästigkeit ableiten sondern nur die Änderung der Lästigkeit als Funktion experimenteller Parameter. Dies ist keine Einschränkung, da das Hauptinteresse der Studie der Veränderung der Empfindung bei Veränderung der akustischen Parameter gilt. Weiters ist die Angabe einer absoluten Lästigkeit im Labor an sich problematisch, da diese vom vorgegebenen Bereich des verwendeten Stimulusmaterials abhängen kann.

Bei der freien Größenschätzung können die Probanden den Zahlenbereich frei wählen, einzige Vorgabe ist, dass eine doppelt empfundene Lästigkeit als doppelt so hoher Zahlenwert abgebildet werden soll und dass Zahlen kleiner gleich 0 nicht zulässig sind. Es ist



daher immer möglich, eine größere Lästigkeit anzugeben, falls ein Stimulus lästiger ist als alle bisherigen.

Im Testdesign wurden alle 4 Ausbreitungsbedingungen (Freifeld, SSD, nLSW und LSW) und beide Zugtypen verwendet. Der Pegel  $L_{A3s}$  wurde in 2 dB Schritten zwischen 40 und 80 dB(A) variiert. Die in Summe 168 Stimuli werden dabei so in zufälliger Reihenfolge präsentiert, dass der maximale Pegelsprung 20 dB(A) beträgt. Jeder Proband sollte die Prozedur viermal wiederholen.

### Schwellwertbestimmung

In diesem Experiment ging es darum, die Frage zu beantworten, ab welcher Pegeländerung ( $L_{A3s}$ ) in Abhängigkeit des Ausgangspegels eine Veränderung der subjektiven Wahrnehmung eintritt. Als hierfür relevante Größe wurde ebenfalls die Lästigkeit herangezogen. Eine wahrgenommene Verringerung der Lästigkeit wird hierbei als Verbesserung gewertet, was letztendlich das entscheidende Kriterium für die Wirksamkeit einer Maßnahme ist.

Aufgrund des bekannt engen Zusammenhangs der Lästigkeit und der Lautheit [12], ist anzunehmen, dass bei reinen Pegeländerungen die Frage nach verringerter Lästigkeit und Lautheit sehr ähnliche Ergebnisse innerhalb der Schwankungsbreite liefern, weswegen diese Frage nicht explizit gestellt wurde. Da die Lärmschutzmaßnahmen starke spektrale Veränderungen verursachen können, wurde weiters der Einfluss dieser Modifikationen auf die Schwellwerte untersucht.

Zur Schwellwertbestimmung gibt es verschiedene Methoden z.B. zufällige Paarvergleiche [14] oder die Grenzmethode [15] bei welcher der Pegel des einen Stimulus systematisch durchvariiert wird. Im Prinzip bauen diese Verfahren auf einem direkten Vergleich zweier Stimuli auf. In dieser Studie wurde ein adaptives Verfahren verwendet, bei dem der Pegel des Vergleichsstimulus abhängig von den Antworten angepasst wird [16], [17].

Im Detail wurde ein 2Up-1Down Verfahren verwendet. Das heißt, wenn der Vergleichsstimulus zweimal hintereinander als weniger lästig empfunden wird, wird der Pegel erhöht. Sobald er als lästiger wahrgenommen wird, wird der Pegel gesenkt. Eine Änderung der Richtung wird als Umkehrpunkt oder Turnaround bezeichnet. Die Schrittweite wird in jedem Umkehrpunkt verkleinert. Nach einer Einschwingphase (4 Umkehrpunkte) wird der Mittelwert über 8 Umkehrpunkte berechnet, welcher den Schwellwert ergibt. Bei 2Up-1Down ist dies die 71%-Schwelle, d.h. wenn 100 Paare mit diesem Pegelunterschied vorgespielt werden, sollte in 71 Fällen der Vergleichsstimulus als weniger lästig wahrgenommen werden als der Referenzstimulus. Der Schwellwert ist natürlich mit einer Schwankung behaftet.

Im Test wurde als Referenz immer die Freifeldausbreitung ohne Lärmschutzmaßnahme (LSM) verwendet, als Bezug die verschiedenen Bedingungen des gleichen Zugtyps. Weiters wurden 3 Referenzpegel (50, 60 und 70 dB(A) verwendet) und beide Zugtypen getestet. Daraus ergeben sich  $3 \cdot 4 \cdot 2 = 24$  verschiedene Bedingungen. Die Freifeld-Freifeld-Bedingung kann als JND (just noticeable difference) der Lästigkeit bei Pegeländerungen interpretiert werden. Die Schwellenbestimmungen wurden zu 8 Blöcken à 3 Bedingungen zusammengefasst. Die Bedingungen wurden zufällig zugeteilt, allerdings unter der Einschränkung, dass mindestens 2 verschiedene Referenzpegel, 2 verschiedene Ausbreitungsbedingungen und Zugtypen und maximal eine Freifeldbedingung pro Block vorhanden sind. Da eine hohe Probandenanzahl angestrebt wurde, um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wurden aufgrund der großen Dauer des Schwellenexperiments (etwa 4 Stunden) und der eingeschränkten Dauer des Projekts keine Wiederholungen durchgeführt.

#### 4.5. Testdurchführung

Die Lästigkeitsbewertung und die Schwellwertbestimmung wurden von den 40 Probanden im Zeitraum von 31. Juli bis 24. Okt. 2014 absolviert. Für die Durchführung der Tests wurde ein reflexionsarmer Raum des Partners ISF mit einem Hintergrundpegel von 17 dB(A) genutzt (siehe Abb. 4-13), um sicherstellen zu können, dass die Testpersonen bei der Wiedergabe und Bewertung der Stimuli nicht durch Störgeräusche beeinflusst werden.



**Abb. 4-13: Wahrnehmungstests - Schallkammer des Projektpartners ISF (links) und Proband während eines Wahrnehmungstests (rechts)**

Das verwendete Testsystem besteht aus einem Windows 7 basierten PC, welcher für die Darstellung des Testprotokolls auf dem Bildschirm, für die Dateneingabe per Maus und per Tastatur und die Ansteuerung der akustischen, gehörrichtigen Wiedergabe dient. Letzteres erfolgt über einen programmierbaren, digitalen Equalizer (PEQ V von Head Acoustics),

welcher über eine USB-Schnittstelle mit dem PC verbunden ist und einem offenen, dynamischen Kopfhörer (HD 650 von Sennheiser). Um eine pegeltreue Wiedergabe sicherzustellen, sind die Kopfhörer gemeinsam mit dem Equalizer kalibriert.

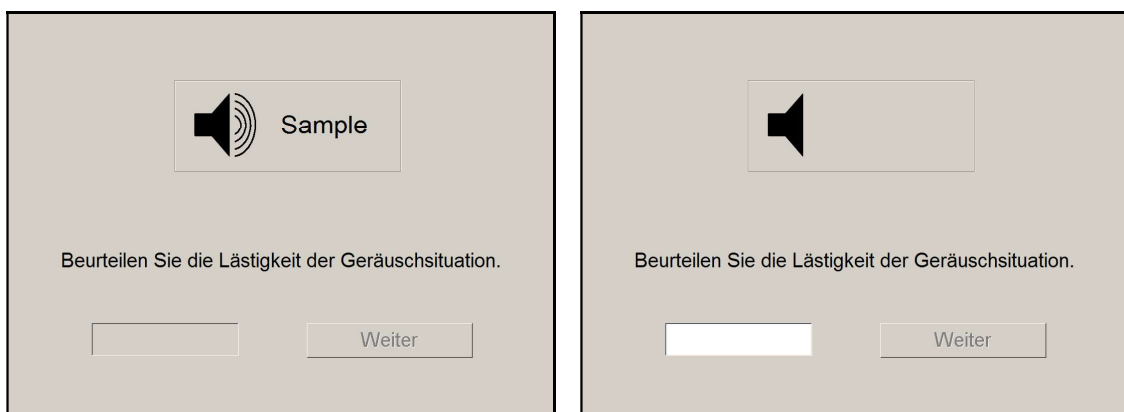
### Benutzerschnittstelle

Für möglichst automatisiert ablaufende Wahrnehmungstests wurde eigens eine Benutzerschnittstelle in Microsoft Visual C++ 2012 entsprechend der funktionalen Anforderung aus dem Testdesign (siehe Kap. 4.4) implementiert. Die Schnittstelle übernimmt die selbstständige Wiedergabe der jeweiligen Stimuli (durch Aufruf des externen Programms HEAD Audio Recorder V7.00.300 zur Ansteuerung des digitalen Equalizers), erlaubt die Eingabe für die Bewertung der von dem Probanden empfundenen Lästigkeit und speichert die subjektiven Bewertungen strukturiert ab.

Im Detail wurden entsprechend des Testdesigns folgende zwei Arten von Einzeltests implementiert:

- Numerische Bewertung der Lästigkeit eines Stimulus für Größenskalierung

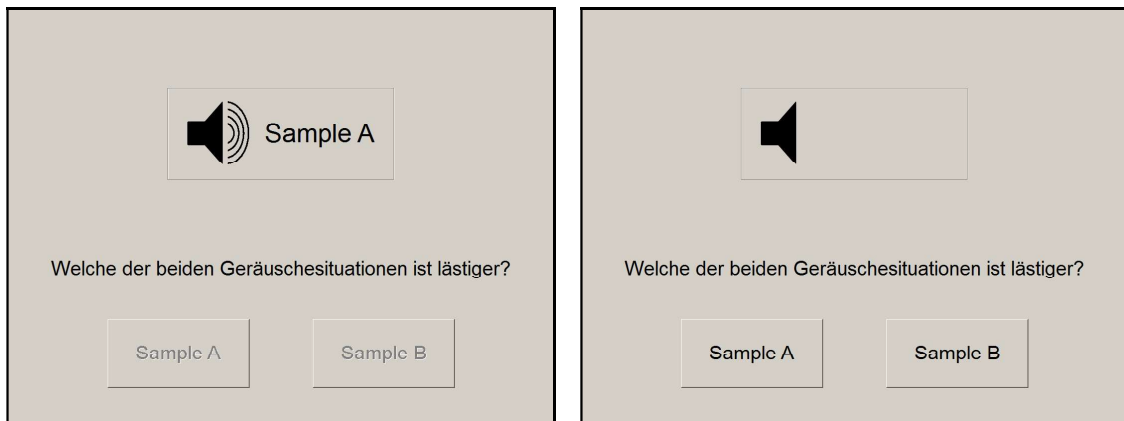
Der zu bewertende 3 Sekunden Stimulus wird zu Beginn des Einzeltests automatisch wiedergegeben (siehe Abb. 4-14, links). Um Richtungseffekte der Zugsvorbeifahrt ausschließen zu können, werden linker unter rechter Kanal zufällig vertauscht. Erst nachdem der Stimulus vollständig abgespielt wurde, kann der Proband die Lästigkeit durch Eingabe einer frei wählbaren, nicht negativen Dezimalzahl mit maximal 8 Stellen bewerten (siehe Abb. 4-14, rechts). Durch Anklicken des Knopfs „Weiter“ oder durch Drücken der „Enter“-Taste kann - nachdem eine gültige Bewertung eingegeben wurde - der Einzeltest abgeschlossen werden, sodass entsprechend dem konfigurierten Testskript der nächste Einzeltest gestartet, eine Pause eingeleitet oder das Programmende erreicht wird.



**Abb. 4-14: Bildschirmmasken der Größenschätzung während der Wiedergabe des Stimulus (links) und bei Möglichkeit zur Bewertung (rechts)**

- Vergleich zweier Stimuli für Paarvergleiche

Zu Beginn dieses Einzeltests werden die zu vergleichenden 3 Sekunden Stimuli mit einer Pause von etwa 0,75 s nacheinander wiedergeben (siehe Abb. 4-15, links). Um Effekte durch die Reihenfolge des Abspielens zu vermeiden, wird die Reihenfolge zufällig gewählt. Auch wird der linke und rechte Kanal zufällig vertauscht, um Effekte durch die Vorbeifahrtsrichtung des Zuges ausschließen zu können. Nachdem der Proband beide Stimuli vollständig angehört hat, kann er durch Anklicken der Knöpfe „Sample A“ oder „Sample B“ den lästigeren Stimuli wählen (siehe Abb. 4-15, rechts). Um im Gesamttest fortfahren zu können, hat der Proband im Anschluss die Leertaste zu drücken. Dies bietet den Vorteil, dass der Proband den Zeitpunkt selber wählen kann, ab welchen er für den nächsten Test bereit ist.



**Abb. 4-15: Bildschirmmasken eines Paarvergleichs während der Wiedergabe des 1. Stimulus (links) und bei Möglichkeit zur Bewertung (rechts)**

### Testablauf

Der Wahrnehmungstest gliedert sich in die zwei Blöcke Lästigkeitsbeurteilung und Schwellwertbestimmung, welche von den Probanden gesondert, mit einem Mindestabstand von 2 Wochen zu absolvieren waren. Durch diese Sperrfrist sollte sichergestellt werden, dass die Probanden bei der Durchführung des zweiten Testblocks unbeeinflusst von ersten Block waren.

Für eine einheitliche Instruierung der Probanden wurde für jeden der Blöcke zunächst eine schriftliche Anleitung vorgelegt (siehe Anhang B). Diese umfassten jeweils eine kurze Beschreibung, dass der Proband die Stimuli entsprechend der empfundenen Lästigkeit mit Zahlen bei der Lästigkeitsbeurteilung bzw. durch Angabe des lästigeren Stimulus bei den Paarvergleichen der Schwellwertbestimmung zu beurteilen hatte und eine Erläuterung der

Benutzerschnittstelle bzw. der Eingabemöglichkeiten. Zudem wurde der Begriff Lästigkeit wie folgt allgemein definiert, um das gleiche Verständnis bei allen Probanden hervorzurufen:

*Lästigkeit ist hier definiert als ein Gefühl von Unbehagen verursacht durch Lärm oder ein Gefühl von Abneigung, Unbehagen oder Verärgerung, wenn der Lärm momentane Tätigkeiten stört oder beeinflusst. Dabei sollen Sie sich vorstellen, wie lästig oder störend Sie das jeweilige Geräusch erachten, wenn Sie diesem regelmäßig ausgesetzt wären. Versuchen Sie dabei das Geräusch als Gesamtes zu beurteilen.*

Nach Durchsicht der Instruktionen wurden nochmals der Inhalt, sowie offene Fragen mit dem Testbetreuer besprochen. Vor Testbeginn eines Blocks war zudem ein kurzer Trainingslauf vorgesehen, um sicherzustellen, dass die Testaufgabe auch korrekt verstanden wurde.

Die Lästigkeitsbeurteilung bestand aus 4 Unterblöcken, welche im Allgemeinen in 15 bis 20 Minuten von den Probanden absolviert werden konnten. Die Schwellwertbestimmung war hingegen in 8 Unterblöcke gegliedert, deren Durchlauf in der Regel zwischen 20 und 30 Minuten dauerte. Um die Konzentration der Probanden zu fördern, waren zwischen den Unterblöcken Pausen mit einer Länge von mindestens 5 Minuten vorgesehen bzw. die Pause zur Hälfte des jeweiligen Experiments auf 10 Minuten verlängert.

Weiters mussten die Testpersonen einen Fragebogen bzgl. deren Wohnsituation im Hinblick auf Einwirkung von Bahnlärm oder anderen Lärmquellen und deren allgemeine Lärmempfindlichkeit ausfüllen (Fragebogen siehe Anhang C).



## 5. STATISTISCHE AUSWERTUNG

### 5.1. Wahrnehmbarkeitsschwelle der Lästigkeit

#### Vorverarbeitung

Bei der Bestimmung von Schwellwerten mittels adaptiver Verfahren kommt es vor, dass manche Läufe nicht konvergieren, d.h. dass die Versuchsperson inkonsistent urteilt. Es ist schwierig, solche Läufe automatisiert zu erkennen. Daher wurden alle 24-40 Läufe von einem Experten beurteilt. Dabei waren die Bedingungen für den Experten nicht bekannt, um eine Beeinflussung zu verhindern. Es wurden dabei 3 Kategorien definiert:

- Kategorie 0: Lauf ist in Ordnung (886 von 960)
- Kategorie 1: Es gab Probleme beim Durchgang (48 von 960)
- Kategorie 2: Lauf ist unbrauchbar (26 von 960)

Abb. 5-1 zeigt jeweils ein Beispiel der verschiedenen Kategorien (von oben nach unten).

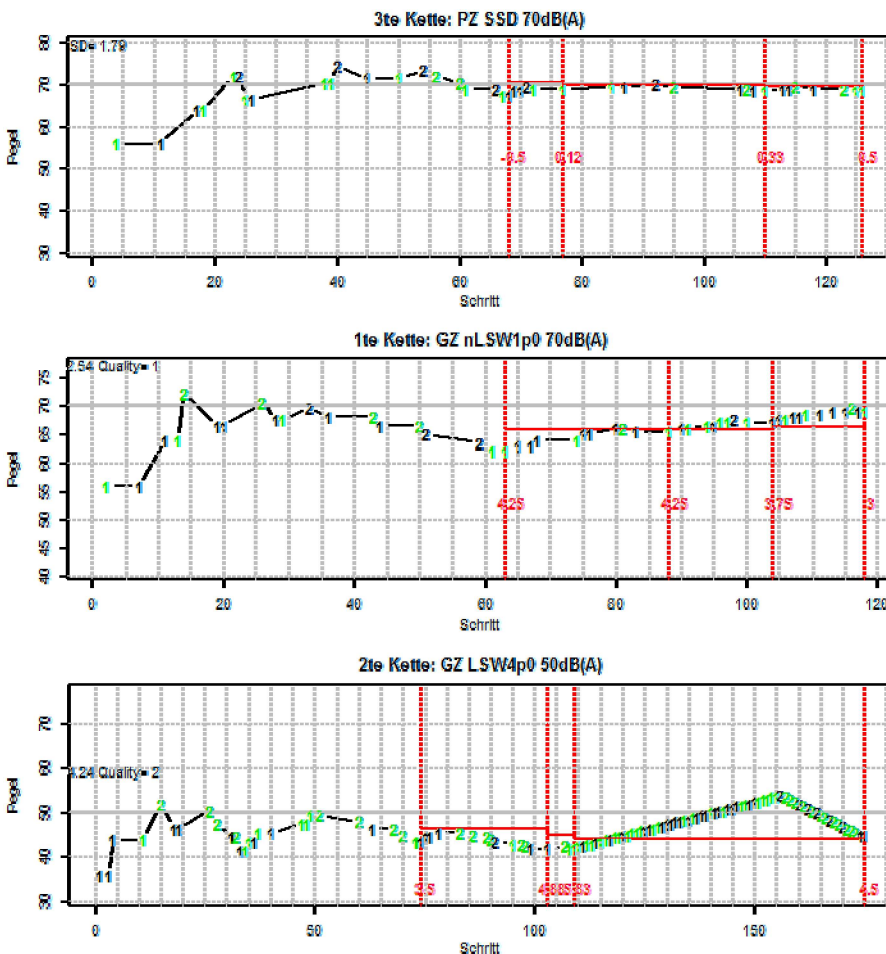
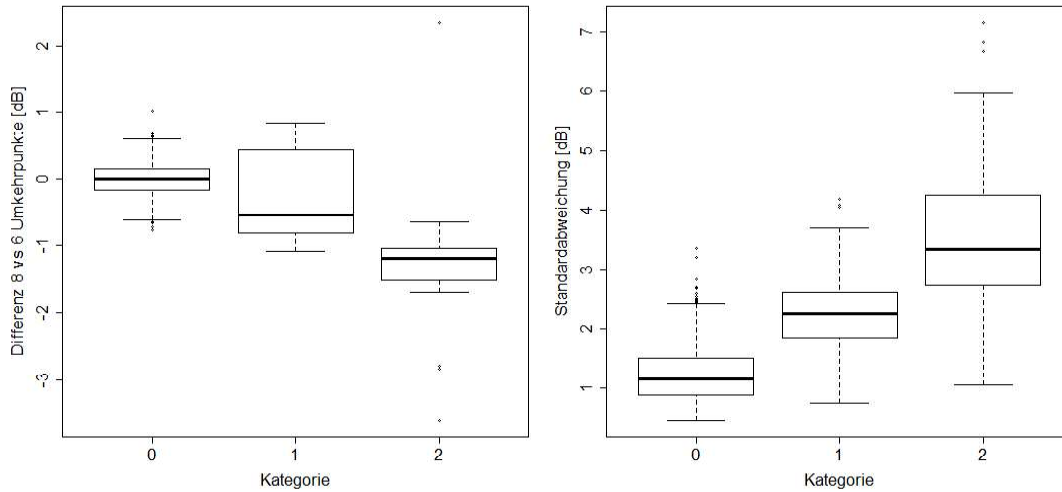


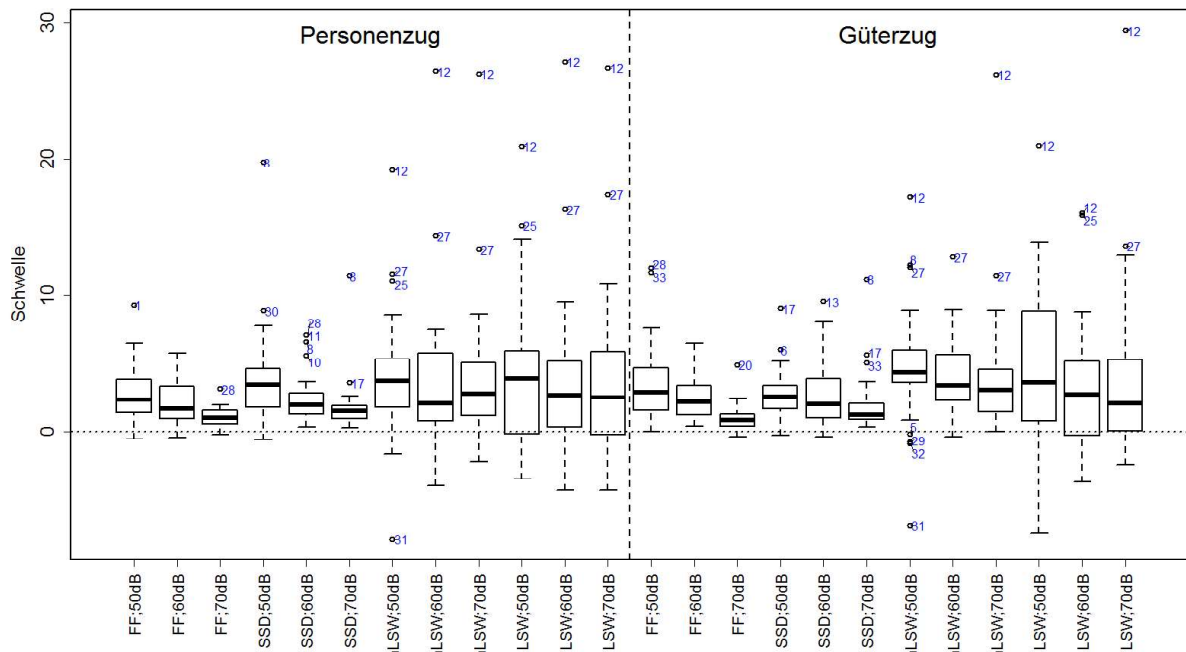
Abb. 5-1: Beispiele für die verschiedenen Kategorien (Kategorie 0: oben, Kategorie 1: Mitte, Kategorie 2: unten)

Durchgänge der Kategorie 2 sind unbrauchbar, da der Wert nicht zuverlässig ist. Abb. 5-2 zeigt einerseits den Unterschied zwischen dem Mittelwert über 6 und über 8 Umkehrpunkte und die Streuung über die Umkehrpunkte.



**Abb. 5-2: Inkonsistenz aufgrund der letzten beiden Umkehrpunkte (links) und Standardabweichung (rechts) der Schwellen als Funktion der Qualität**

Die linke Abbildung illustriert eine eindeutige Verschiebung des Mittelwerts zu niedrigeren Werten für die Läufe aus Kategorie 2. Rechts sieht man, dass die Streuung der Werte für die schlechteren Läufe zunimmt. Es werden daher nur die Daten der Kategorie 0 analysiert.



**Abb. 5-3: Verteilung der Schwellenwerte pro Zugtyp, Bedingung (FF: Freifeld) und Referenzpegel (Ausreißer sind durch die Probandennummer gekennzeichnet)**

Die Daten wurden weiters auf statistische Ausreißer untersucht. Abb. 5-3 zeigt die Verteilung der Schwellwerte als Funktion der Bedingung. Bei den stark modifizierten Bedingungen (LSWs) fällt Proband 12 mit extrem hohen Werten auf, die bis zu 25 dB(A) von den mittleren Schwellen abweichen.

Bei einer Probandenanzahl von 40 kann dies zu Abweichungen von mehr als 0,5 dB(A) nur aufgrund dieses einen Probanden führen. Dieser Proband wurde daher von der Analyse ausgeschlossen. Einige andere Probanden haben in einigen Bedingungen immer wieder extreme Werte, diese sind aber nicht so konsistent und stark abweichend. Daher wurden keine weiteren Läufe oder Probanden ausgeschlossen. In Tab. 5-1 sind zusammenfassend die Häufigkeiten nach Bedingung aufgeschlüsselt.

Referenzpegel $L_{A3s}$	Zugtyp	Freifeld	SSD	niedrige LSW	LSW 4m
50 dB(A)	PZ	38	39	37	32
	GZ	35	39	38	35
60 dB(A)	PZ	35	38	34	33
	GZ	36	34	36	29
70 dB(A)	PZ	37	39	37	37
	GZ	37	38	37	33

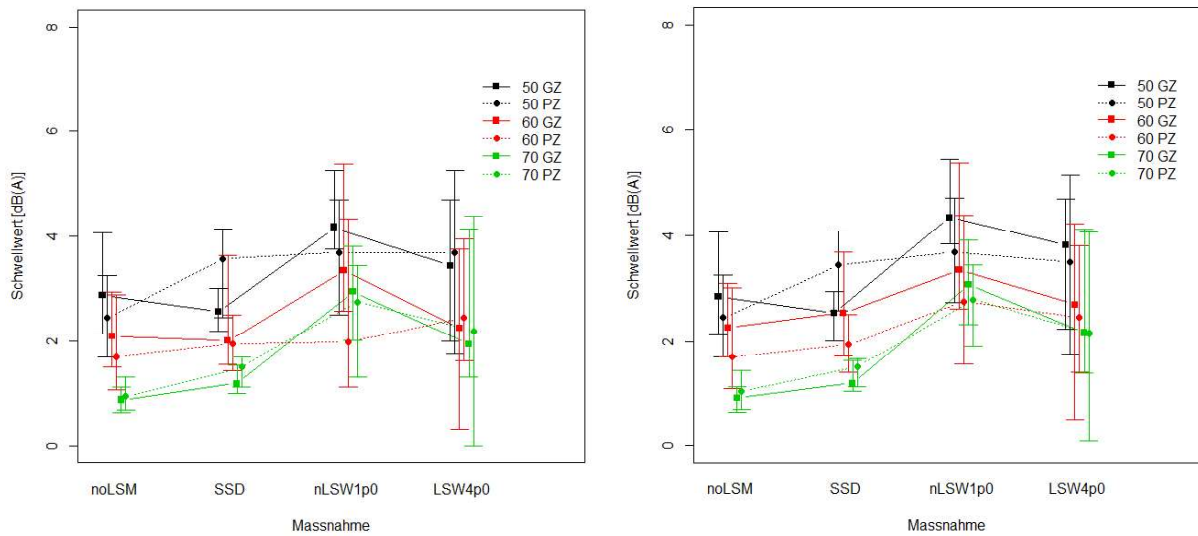
**Tab. 5-1: Anzahl der verwendeten Schwellwerte pro Bedingung**

### Ergebnisse

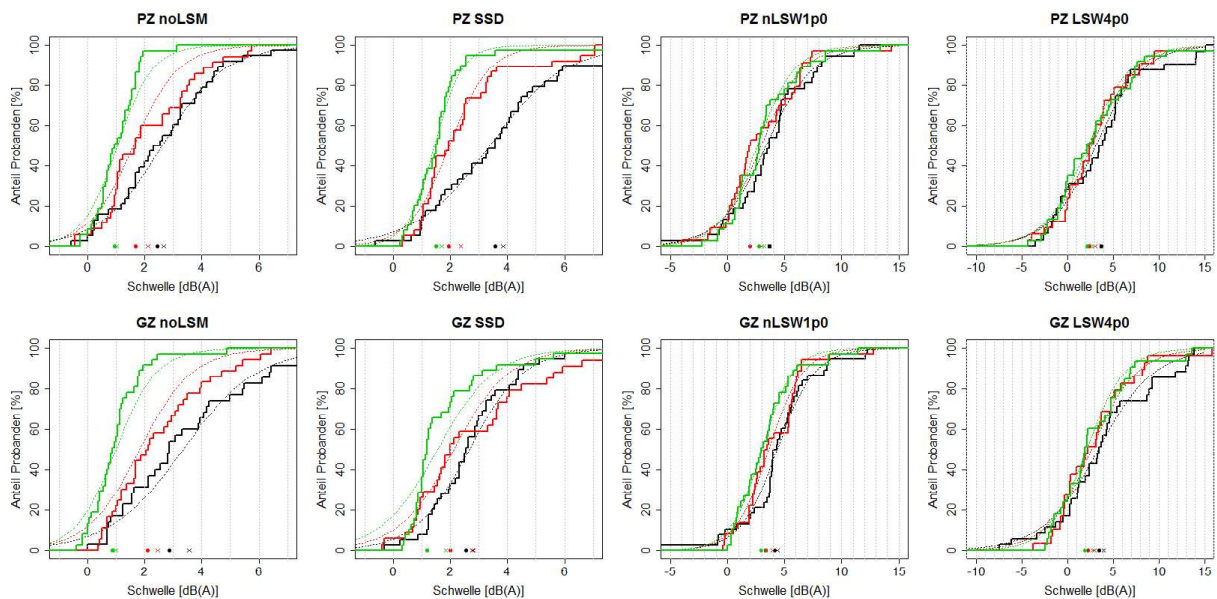
Abb. 5-4 stellt Median und Mittelwert der Schwellwerte pro Bedingung dar. Wie schon in Abb. 5-3 ersichtlich, ist die Streuung der Werte bei den Lärmschutzwänden deutlich höher. Ein systematischer Effekt des Zugtyps ist nicht erkennbar. Die Konfidenzintervalle wurden durch ein Bootstrapping-Verfahren berechnet (siehe auch Abschnitt 4.1). Durch einige hohe Werte bei den Schwellen ist der Mittelwert im Allgemeinen etwas höher als der Median.

Abb. 5-5 stellt die gleichen Daten als kumulative Verteilung dar, d.h. bei einem bestimmten Schwellwert liegt eine bestimmte Prozentzahl von Probanden unter diesem Wert. Die dünnen Linien sind angepasste logistische Kurven die einen geglätteten Verlauf darstellen.

Die bisherigen Darstellungen zeigen die Daten als unabhängige Beobachtungen. Da es sich aber um abhängige Daten handelt (pro Proband), muss dies in der statistischen Analyse berücksichtigt werden.



**Abb. 5-4: Median (links) und Mittelwert (rechts) und Bootstrap-Konfidenzintervalle der Schwellwerte pro Bedingung**



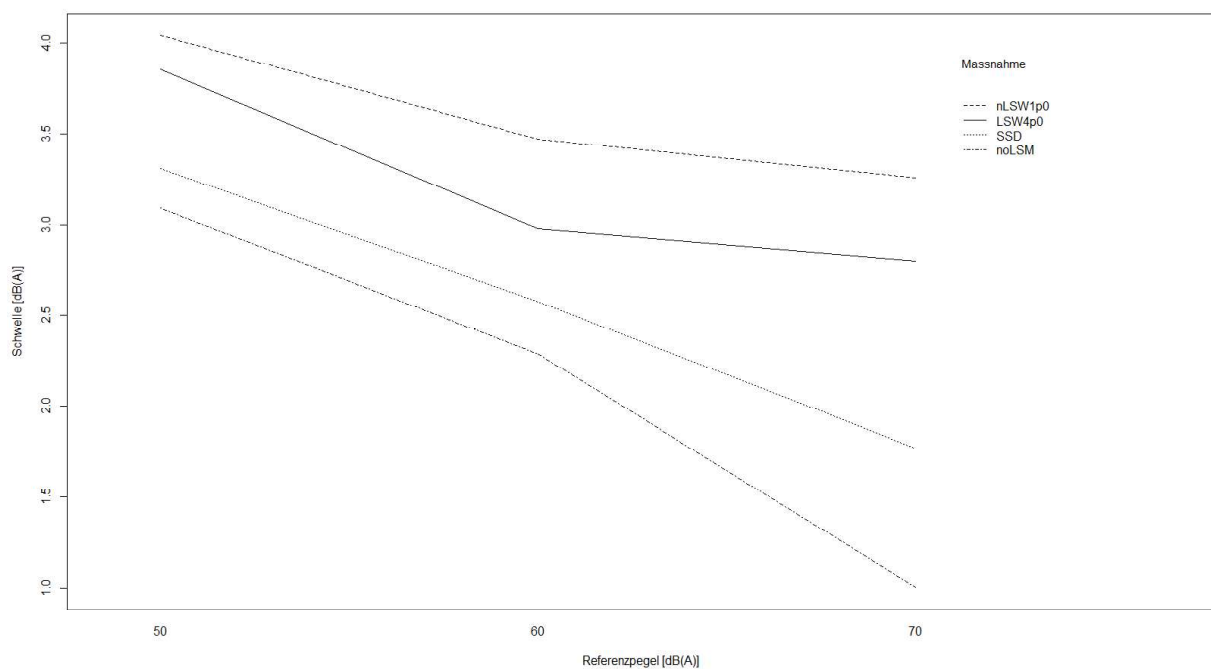
**Abb. 5-5: Verteilung der Schwellwerte (50 dB(A) schwarz, 60 dB(A) rot, 70 dB(A) grün). Median (Punkt) und Mittelwert (x) sind dargestellt sowie eine angepasste logistische Kurve (dünne Linie).**

Es wurde ein linear gemischtes Modell (linear-mixed-effects-model oder LME) verwendet. Hier werden Zugtyp, Maßnahme und Referenzpegel als fixe Effekte (konstant über die Population) modelliert. Um die Abhängigkeit pro Proband einzuführen, wird ein probandenspezifischer Offset modelliert, d.h. jeder Proband kann einen anderen mittleren Schwellwert haben. Weiters ergab eine Modellselektion, dass eine Interaktion zwischen Effekt der Maßnahme und Proband mitmodelliert werden muss. Die stark unterschiedlichen

Varianzen pro Maßnahme und Referenzpegel wurden durch Gewichtungen modelliert, die mit dem Modell mitgeschätzt werden. Es wurde die Funktion lme in R [18] verwendet.

Marginale F-Tests ergaben einen schwach signifikanten Effekt des Zugtyps ( $p=0,049$ ), der Maßnahme ( $p=0,012$ ), des Referenzpegels ( $p<0,001$ ) und eine signifikante Interaktion zwischen Zugtyp und Maßnahme ( $p<0,01$ ).

Der Unterschied zwischen den Zugtypen ist sehr gering und beträgt 0,26 dB(A). Da eine signifikante Interaktion auftrat, wurde mittels post-hoc-Tests getestet, welche Bedingungen interagieren. Diese wurden mit der Funktion glht aus dem multcomp-Package in R [19] durchgeführt. Die Korrektur für multiple Vergleiche erfolgte mittels der Bonferroni-Methode.



**Abb. 5-6: Interaktion zwischen Maßnahme und Referenzpegel**

In Abb. 5-6 sieht man, dass der Unterschied im Referenzpegel bei Freifeld (noLSM) und Schienenstegdämpfern (SSD) größer ist als bei den Lärmschutzwänden (nLSW1p0 und LSW4p0). Aus den post-hoc-Tests ergibt sich, dass der Effekt zwischen Freifeld (keine Maßnahme) und niedriger LSW bei 70 vs. 50 und 70 vs. 60 dB(A) signifikant ist. Eine Untersuchung der Pegelabhängigkeit bei Freifeld und Schienenstegdämpfern ergab einen signifikanten Unterschied zwischen allen Referenzpegeln ( $p<0,05$ ), wogegen bei gemeinsamer Betrachtung von niedriger und hoher Lärmschutzwand nur der Unterschied zwischen 50 und 70 dB(A) signifikant ist ( $p=0.019$ ). Weiters ist der Unterschied in den Wahrnehmbarkeitsschwellen zwischen stark modifizierten (beide LSWs) und schwach modifizierten (SSD- und Freifeld) Bedingungen nur bei 70 dB(A) signifikant ( $p<0,001$ ).



Ein durchgeführter post-hoc Test bezüglich der Maßnahmenunterschiede ergab, dass nur der Unterschied zwischen niedriger Lärmschutzwand und Freifeld signifikant ist ( $p < 0,01$ ). Aufgrund der signifikanten Interaktion zwischen diesen beiden Bedingungen ist die Interpretation dieses Haupteffekts aber problematisch.

Aufgrund des geringen Unterschieds zwischen den Zugtypen werden hier die einzelnen Mittelwerte aus dem linearen Modell gemittelt über den Zugtyp angegeben (siehe Tab. 5-2).

Referenzpegel $L_{A3s}$	Freifeld	SSD	niedrige LSW	LSW 4m
50 dB(A)	3,1	3,3	4,1	3,6
60 dB(A)	2,3	2,7	3,4	3,0
70 dB(A)	1,1	1,8	3,2	2,7

**Tab. 5-2: Schwelle in dB(A) über Zugtyp gemittelt und nach Bedingung und Referenzpegel  $L_{A3s}$  aufgeteilt**

## 5.2. Beurteilung der Lästigkeit

### Vorverarbeitung

Um mögliche Tippfehler und Probleme durch Ausreißer zu vermeiden wurden verschiedene Verarbeitungsschritte durchgeführt:

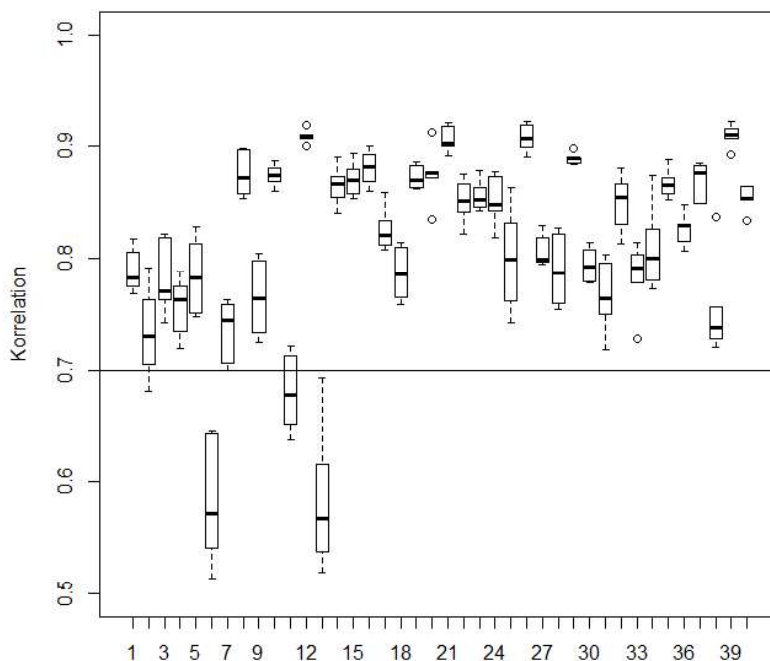
- Von Probanden gemeldete Tippfehler wurden, soweit eindeutig identifizierbar, korrigiert und die Veränderungen protokolliert.
- Null als Eingabe wurde, sofern nicht gemeldet, als nicht verfügbar gekennzeichnet (10 Eingaben mit 0 insgesamt, davon 5 nicht gemeldet)
- Datenpunkte wurden als potentielle statistische Ausreißer markiert, wenn sie über alle Urteile bei gleichem A-bewerteten Pegel außerhalb der 4-fachen Standardabweichung lagen (29 Werte, 36 bei unmodifizierten Daten). Die übliche 3-fache Standardabweichung erwies sich als zu freizügige Schwelle die zu viele nicht eindeutige Ausreißer markierte.

Die Urteile wurden mit der Basis 2 logarithmiert, da aus Studien bekannt ist, dass die Lästigkeit von der Lautheit abhängt die wiederum näherungsweise einer Potenzfunktion des Pegels folgt. Als Lästigkeit wird daher von nun an, falls nicht anders erwähnt, der Logarithmus zur Basis 2 des Lästigkeitsurteils bezeichnet.

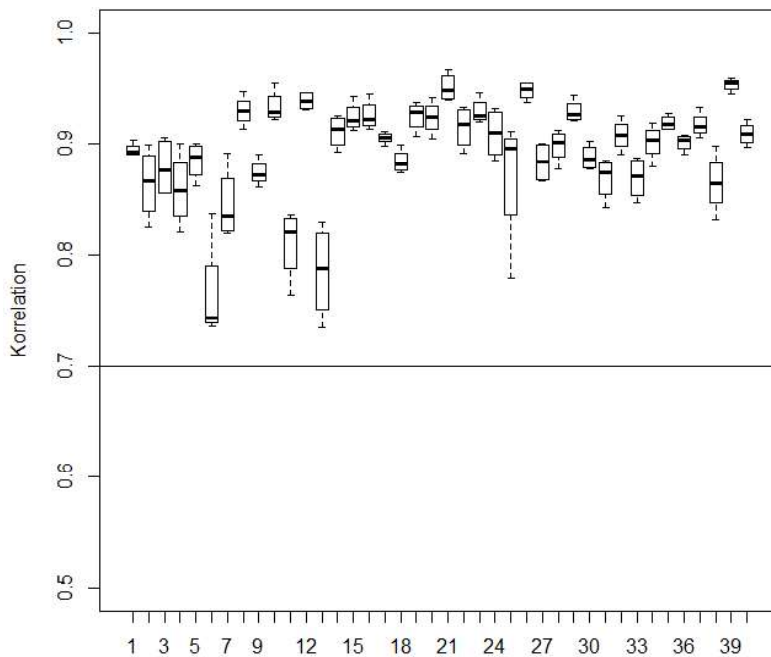
Es erfolgte eine Mittelung (Median) pro Proband, Bedingung (Zugtyp und Maßnahme) und des Pegels  $L_{A3s}$ . Dadurch wird jeder Proband gleich gewichtet, auch wenn einige Datenpunkte aus oben genannten Gründen fehlen. Von den Urteilen wurde der Gesamtmittelwert über alle Werte pro Proband abgezogen. Für einen Teil der Analysen erfolgte noch eine Mittelung (Mittelwert) über alle Probanden. Dadurch ergeben sich 168 Datenpunkte (21 Pegel x 4 Maßnahmen x 2 Zugtypen).

### Konsistenz der Daten

Jede Lästigkeitsbeurteilung wurde viermal in unterschiedlicher Reihenfolge durchgeführt. Um die Reproduzierbarkeit der einzelnen Probanden zu untersuchen, wurde die Korrelation zwischen den Wiederholungen berechnet. Von 40 Probanden zeigten 4 eine Korrelation kleiner 0,7 zwischen zumindest 2 Wiederholungen. Davon haben 2 Probanden alle Korrelation kleiner 0,7 (siehe Abb. 5-7). Wenn die Berechnung der Korrelation über alle Wiederholungen und Probanden gemittelten Daten erfolgt, zeigt sich aber, dass alle Probanden hohe Korrelationswerte aufweisen (siehe Abb. 5-8). Es liegt daher kein Grund vor, Probanden auszuschließen.



**Abb. 5-7: Korrelation der 4 Wiederholungen untereinander nach Proband aufgeschlüsselt**



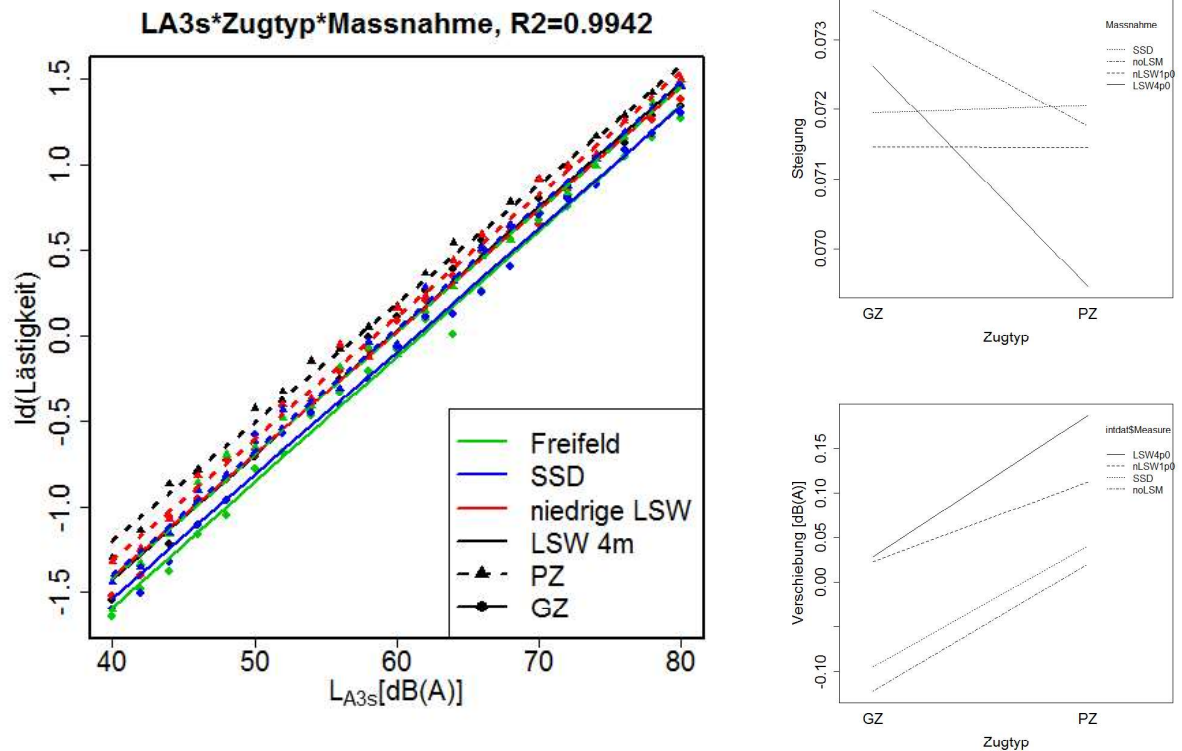
**Abb. 5-8: Korrelation der 4 Wiederholungen mit dem mittleren Gesamturteil nach Proband aufgeschlüsselt**

### Grundmodell mit A-bewerteten, energieäquivalenten Schalldruckpegel $L_{A3s}$

Das Grundmodell, welches untersucht wird, besteht aus dem systematisch variierten  $L_{A3s}$ , dem Zugtyp und der Maßnahme. Es soll zeigen, ob der Pegel ein guter Prädiktor für die Lästigkeit ist und ob und wie stark das Urteil von den anderen Bedingungen abhängt.

Hierfür wurde für jeden Probanden ein lineares Modell mit dem  $L_{A3s}$  als kontinuierliche Variable, der Maßnahme als 4-stufige faktorielle Variable und dem Zugtyp als 2-stufiger Faktor geschätzt. Es wurden alle möglichen Interaktionen zwischen den 3 Variablen modelliert.

Dadurch wird sowohl eine mögliche Verschiebung des Schnittpunktes (d.h. Pegel bei dem die logarithmische Lästigkeit 0 ist) des linearen Zusammenhangs für verschiedene Bedingungen, als auch eine unterschiedliche Steigung der Gerade  $L_{A3s}$  vs. Lästigkeit für jede Bedingung modelliert. Aus diesen Modellen wurde für jede der 8 Bedingungen sowohl die Steigung als auch der Schnittpunkt der Geraden Lästigkeit vs.  $L_{A3s}$  pro Bedingung extrahiert. Abb. 5-9 illustriert hierzu den linearen Zusammenhang zwischen den über die Probanden gemittelten Daten und dem  $L_{A3s}$ . Weiters zeigt die Abbildung die Mittelwerte für die Geradensteigungen und die Schnittpunkte als Funktion der Maßnahme und des Zugtyps. Wichtig zu erwähnen ist, dass für den Schnittpunkt der absolute Wert keine Bedeutung hat, da es sich um eine relative Skalierung handelt, sondern nur die Verschiebungen zwischen den verschiedenen Bedingungen wesentlich sind.



**Abb. 5-9: Lästigkeit vs Pegel  $L_{A3s}$  für alle Bedingungen: Steigungen (rechts oben) und Schnittpunkte der Geraden (rechts unten) als Funktion der Bedingung sind ebenfalls dargestellt**

Beides, Steigung und Schnittpunkt wurden mittels einer Varianzanalyse abhängiger Daten (repeated measures ANOVA oder RM-ANOVA) analysiert. Diese enthält Zugtyp und Maßnahme als Faktoren inklusive der Interaktion beider Faktoren. Für die Steigung der Lästigkeit mit dem Pegel  $L_{A3s}$  zeigt sich kein signifikanter Effekt. Die in Abb. 5-9 (rechts oben) dargestellten Steigungen unterschieden sich nicht statistisch signifikant und können daher konstant über die Bedingungen angenommen werden.

Bei den Schnittpunkten sind sowohl der Effekt der Maßnahme ( $p < 0,001$ ), des Zugtyps ( $p < 0,001$ ) als auch deren Interaktion ( $p < 0,01$ ) signifikant. Maßnahme als auch die Interaktion verletzen beide die Annahme der Sphärizität. Die Ergebnisse sind auch nach der Korrektur für Nicht-Sphärizität [20] signifikant. Die signifikante Interaktion bedeutet, dass der Schnittpunkt der Geraden Lästigkeit vs. Pegel  $L_{A3s}$  für verschiedene Lärmschutzbedingungen abhängig vom Zugtyp ist. Aus Abb. 5-9 (rechts unten) ist ersichtlich, dass dieser Unterschied vermutlich die niedrige LSW betrifft da die Gerade zwischen Personen- und Güterzug nicht parallel zu den anderen Geraden ist.

Es wurden post-hoc-Tests mittels gepaarter t-Tests [21] durchgeführt, um die Interaktion genauer zu untersuchen. Die p-Werte wurden mittels der Bonferroni-Korrektur für multiple

Vergleiche korrigiert. Die Tests wurden so durchgeführt, dass jede 2x2 Interaktion untersucht wurde, d.h. z.B. ob der Unterschied zwischen niedriger und hoher LSW beim Personenzug anders als beim Güterzug ist. Daraus ergeben sich 6 verschiedene Tests. Es zeigt sich, dass der Unterschied zwischen konventioneller und niedriger LSW vom Zugtyp abhängt ( $p < 0,001$ ).

Prinzipiell ist, bei einer signifikanten Interaktion zwischen zwei Faktoren die Interpretation der Haupteffekte problematisch. Aufgrund der gleichen Steigung über alle Bedingungen und aus Abb. 5-9 (rechts unten) ist aber ersichtlich, dass alle Haupteffekte qualitativ gleich sind, d.h. der Personenzug ist bei gleichem Pegel  $L_{A3s}$  immer lästiger als der Güterzug und die Reihung der Maßnahmen ist gleich (4m LSW > niedrige LSW > SSD > Freifeld). Daher wurden auch der Haupteffekt der Maßnahme in einer post-hoc-Analyse genauer betrachtet und alle Unterschiede zwischen den Maßnahmen (6 verschiedene) untersucht. Die Analyse zeigt, dass außer dem Vergleich Freifeld-Schienenstegdämpfer alle Unterschiede signifikant sind ( $p < 0,001$  für alle Unterschiede außer dem, wegen der signifikanten Iteration schwerer interpretierbaren Kontrast niedriger LSW vs. hoher LSW mit  $p = 0,022$ ). Auf das Freifeld bezogen bedeutet dies, dass sowohl die niedrige als auch die hohe Lärmschutzwand bei gleichem  $L_{A3s}$  signifikant lästiger sind.

Da die Steigung über alle Bedingungen gleich ist, können die Lästigkeitsverschiebungen der Schnittpunkte der verschiedenen Geraden in Pegelaufschläge umgerechnet werden. Dazu wird der Unterschied einfach durch die Steigung dividiert. In Tab. 5-3 und Tab. 5-4 sind sowohl die gemittelten als auch die nach Zugtyp oder Maßnahme aufgeteilten Aufschläge dargestellt.

	SSD	nLSW 1m	LSW 4m
GZ	0,38	2,0	2,1
PZ	0,29	1,3	2,3
Mittelwert	0,33	1,65	2,2

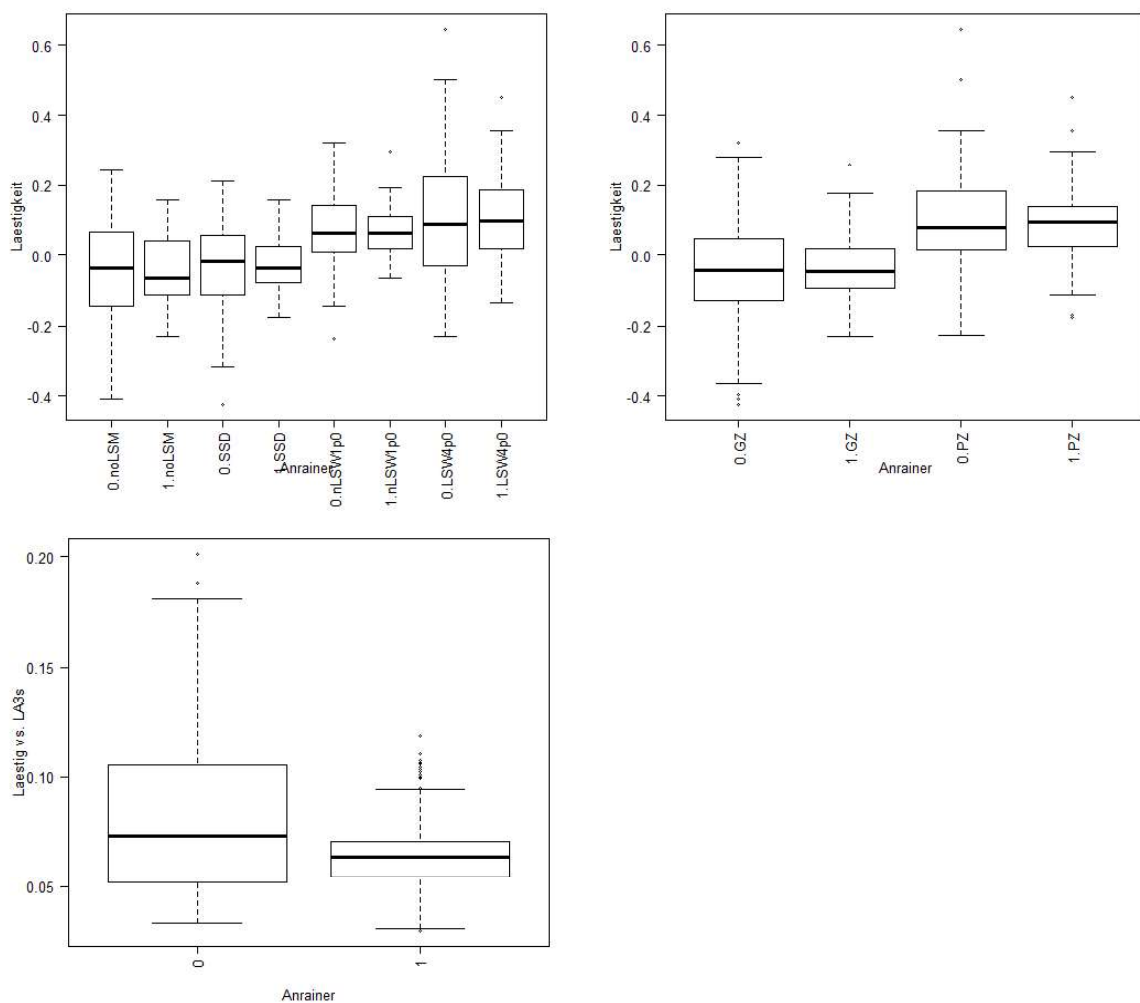
**Tab. 5-3: Pegelverschiebung in dB(A) der Maßnahmen bezogen auf Freifeld- $L_{A3s}$ , sowohl gemittelt als auch aufgeteilt nach Zugtyp**

	Freifeld	SSD	nLSW 1m	LSW 4m	Mittelwert
PZ	2,0	1,9	1,24	2,2	1,83

**Tab. 5-4: Pegelverschiebung des Zugtyps Personenzug in dB(A), bezogen auf Güterzug- $L_{A3s}$ , sowohl gemittelt als auch aufgeteilt nach Maßnahmen**



Auf Basis der probandenspezifischen Daten wurde weiters ein möglicher Effekt des Anrainerstatus untersucht. Wie erwähnt bedeutet Anrainer hier, dass die Person mindestens ein Jahr lang in Hörweite einer Bahnstrecke gewohnt hat. In Abb. 5-10 ist der Effekt der Anrainervariable auf den Schnittpunkt als Funktion der Maßnahme und des Zugtyps dargestellt (links und Mitte). Es ist hier kein systematischer Effekt erkennbar. Rechts ist der Effekt auf die Steigung dargestellt. Hier scheint die Steigung bei Anrainern etwas geringer, allerdings ist die Variabilität in den beiden Bedingungen sehr unterschiedlich. Ein Vergleich der mittleren Steigung pro Proband mittels eines Welch-T-Tests war nicht signifikant ( $p=0,082$ ).



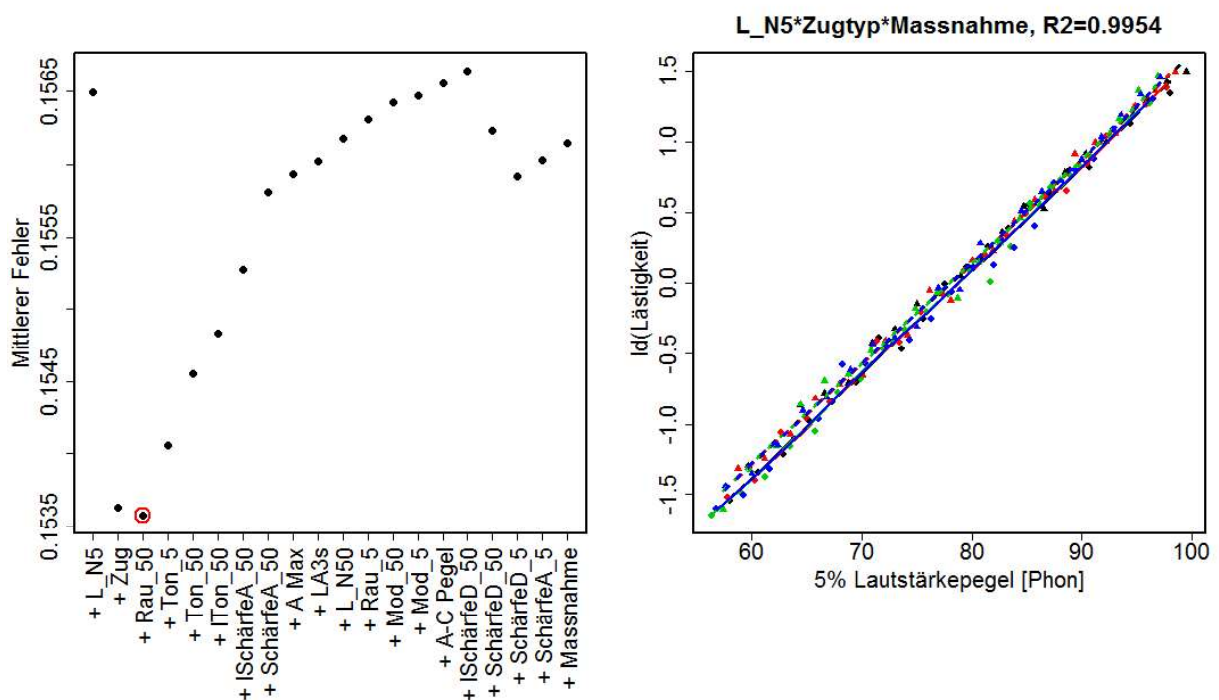
**Abb. 5-10: Verteilung der Schnittpunkte nach Zugtyp und Maßnahme aufgeteilt und der Steigung über die Probanden**

### Modellselektion mittels Kreuzvalidierung

Aus einer Vielzahl von Studien ist bekannt, dass bestimmte psychoakustische Parameter und hier vor allem die Lautheit einen engeren Zusammenhang zur wahrgenommenen

Lästigkeit haben als rein akustische Parameter wie z.B. der A-bewertete Pegel. Es wurde daher eine stufenweise Modellselektion durchgeführt. Es gibt mehrere Möglichkeiten und Kriterien eine solche Selektion durchzuführen. Das Grundproblem ist, dass der Modellfehler eines linearen Modells immer geringer wird, je mehr unabhängige Variablen verwendet werden. Dies schränkt allerdings die Verallgemeinerbarkeit des Modells ein, da es sehr stark an die verwendeten Daten angepasst ist. Es gibt verschiedene Methoden, die Komplexität des Modells zu berücksichtigen, z.B. mittels eines Modellselektionskriteriums oder mittels der hier durchgeführten Kreuzvalidierung. Bei dieser wird ein Teil der Daten zur Modellbildung und ein anderer Teil zur Validierung verwendet. Als Auswahlkriterium dient z.B. der mittlere Vorhersagefehler.

Hier wurde eine 4-fach-Kreuzvalidierung verwendet bei der die Probanden in 4 gleich große Gruppen aufgeteilt werden (10 Probanden pro Gruppe) und jeweils eine Gruppe zur Validierung und der Rest zur Modellbildung verwendet wird (4 verschiedene Kombinationen). Dies wird für viele zufällige Gruppenzuordnungen wiederholt (hier 1000 Wiederholungen) und die gemittelte Standardabweichung des Fehlers ermittelt. Es wurde hier die Standardabweichung verwendet, da es aufgrund der freien Größenschätzung pro Proband zu absoluten Verschiebungen der Lästigkeitskurven kommen kann, die aber für die Vorhersagbarkeit irrelevant sind, da keine absolute Lästigkeit betrachtet wurde.



**Abb. 5-11: Ergebnis der Modellselektion mittels Kreuzvalidierung (links) und das endgültige Ergebnis**

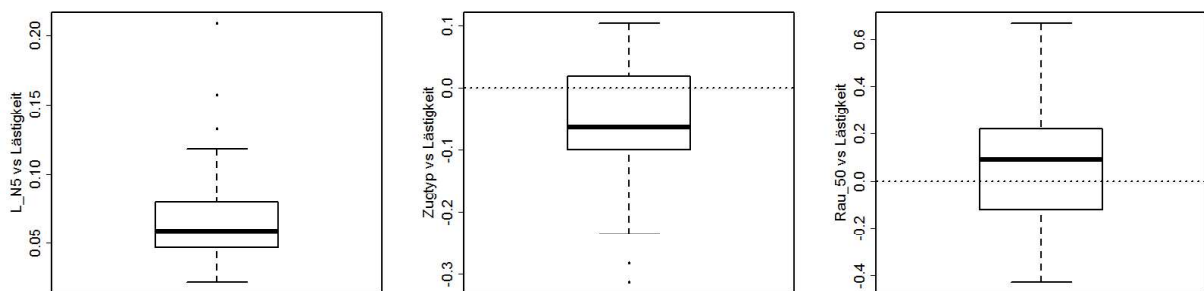
Der schrittweise Prozess startet mit einer der unabhängigen Variablen und die Variable mit dem geringsten Fehler wird im Modell beibehalten. Danach kommt die Variable dazu, die den kleinsten Vorhersagefehler liefert und so weiter. Abb. 5-11 zeigt das Ergebnis für die erhobenen Daten.

Es zeigt sich, wie zu erwarten, zuerst eine Verbesserung des Vorhersagefehlers durch das Hinzufügen unabhängiger Variablen. Der Spitzenlautstärkepegel in Phon ( $L_{N5}$ ) erreicht hier die größte Verbesserung einer einzelnen Variable, d.h.  $L_{N5}$  ist der beste einzelne Deskriptor für die Lästigkeitsdaten. Es wurde hier der Lautstärkepegel in Phon verwendet, da dieser im untersuchten Bereich (alle Lautheiten waren größer als 1 Sone) logarithmisch mit der Lautheit in Sone zusammenhängt und daher die logarithmische Lästigkeit besser erklärt.

Eine weitere Verbesserung wird durch Hinzufügen des Zugtyps und der mittleren Rauigkeit (Median) erreicht. Durch Hinzufügen weiterer Variablen wird der Vorhersagefehler wieder größer was für eine schlechtere Verallgemeinerbarkeit spricht. Es ist also die Art der Maßnahme nicht mehr relevant, da diese durch die unterschiedliche Lautheit (und Rauigkeit) bei gleichem  $L_{A3s}$  berücksichtigt wird.

Die rechte Grafik in Abb. 5-11 zeigt das Modell für alle Daten. Der Unterschied zwischen den Zugtypen (durchgezogen vs. strichliert) scheint bei geringerer Lautheit etwas größer, dies kann nur durch die Rauigkeit erklärt werden. Insgesamt erklärt das Modell 99,5% der Varianz.

Wird dieses Modell probandenweise gefittet, ist es möglich sich die Streuung der einzelnen Parameter über die Studienpopulation anzusehen (siehe Abb. 5-12). Hier wurden Lautstärkepegel und Rauigkeit orthogonalisiert um die Effekte getrennt betrachten zu können.



**Abb. 5-12: Verteilung des Effekts des Lautstärkepegels, des Zugtyps und der Rauigkeit über die Population**

Der Anstieg bei der Lautheit (Lautstärkepegel) ist wie zu erwarten immer positiv und liegt für den Großteil der Daten unter 0,1/Phon (entspricht einer Verdoppelung der Lästigkeit bei einem Anstieg von 10 Phon). Bei Zugtyp und Rauigkeit geht der Effekt nicht immer in die

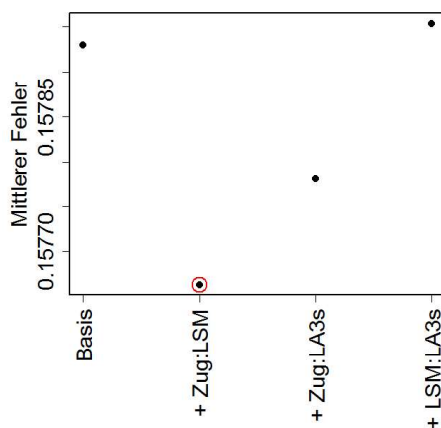
gleiche Richtung, über die Gruppe ist allerdings der Güterzug weniger lästig als der Personenzug und rauere Geräusch sind lästiger als weniger raue.

Das endgültige Modell lautet daher

$$\text{Lästigkeit} = 0,06829 \cdot L_{N5} + 0,05706 \cdot \text{Zugtyp} + 0,05811 \cdot \text{Rau}_{50}$$

wobei Zugtyp für den Güterzug gleich 0 und für den Personenzug gleich 1 ist. Ein Effekt der Anrainervariable auf den Einfluss der Lautheit ist nicht erkennbar ( $p=0,43$  für Welch-t-Test).

Da beim Basismodell die Interaktion zwischen Zugtyp und Maßnahme signifikant war, wurde die Kreuzvalidierung auch durchgeführt um diese Interaktion in diesem Zusammenhang zu untersuchen. Es wurde vom Modell ohne Interaktionen ausgegangen ( $L_{A3s}$ , Maßnahme und Zugtyp) und die verschiedenen Interaktionen wurden getestet. Abb. 5-13 zeigt die Kreuzvalidierung. Das Ergebnis bestätigt, dass auch für die Vorhersage diese Interaktion nicht zu vernachlässigen ist. Aus dieser Graphik ist auch ersichtlich, dass die Lautheit alleine einen geringeren Vorhersagefehler hat als das Modell mit  $L_{A3s}$ , Maßnahme, Zugtyp und Interaktion der beiden Faktoren. Es wurden die gleichen Analysen auch für die nicht korrigierten und ausreißerbereinigten Daten durchgeführt. Der Unterschied war vernachlässigbar.



**Abb. 5-13: Modellselektion bei  $L_{A3s}$ -Modell**

## 6. BEWERTUNGSSYSTEM

Aus den Analysen ergeben sich verschiedene Schlussfolgerungen bezüglich eines perceptiven Bewertungssystems von Bahnlärm auf Basis verschiedener akustischer Faktoren. Grundsätzlich können zwei Bewertungssysteme abgeleitet werden, die entweder auf dem A-bewerteten, energieäquivalenten Schalldruckpegel der 3 Sekunden langen Vorbeifahrtsgeräusche ( $L_{A3s}$ ) oder auf der Lautheit aufbauen.

### Bewertungssystem mittels Schalldruckpegel $L_{A3s}$

Der Vorteil eines Systems auf Basis des Schalldruckpegels  $L_{A3s}$  ist die einfache messtechnische Bestimmung des A-bewerteten Pegels, die häufige Verwendung und das Vorhandensein standardisierter Grenzwerte. Das Bewertungssystem ist bezogen auf den Güterzug im Freifeld. Auf dieser Grundlage wird für andere Bedingungen (Zugtyp, Maßnahme) eine Bewertungsbasis  $\Lambda_p$  berechnet, welche die veränderte Lästigkeit bei gleichem  $L_{A3s}$  widerspiegelt<sup>4</sup>:

$$\Lambda_p = L_{A3s} + 1,8 \cdot \text{Zugtyp} + \begin{cases} 0 & \text{keine Maßnahme} \\ 0,3 & \text{SSD} \\ 1,7 & \text{niedrige LSW} \\ 2,2 & \text{LSW4m} \end{cases}$$

$\Lambda_p$  ..... Bewertungsbasis für das Lästigkeitsverhältnis, bezogen auf Güterzug und freie Schallausbreitung

$L_{A3s}$  ..... A-bewerteter, energieäquivalenter Schalldruckpegel der 3 Sekunden langen Vorbeifahrtsgeräusche in dB(A)

Zugtyp .... Güterzug (0) oder Personenzug (1)

Der Zugtyp ist entweder 0 (Güterzug) oder 1 (Personenzug), d.h. der Personenzug erhöht die Bewertungsbasis  $\Lambda_p$  um 1,8. Aus der Differenz der Bewertungsbasen im Ausgangszustand ( $\Lambda_{p1}$ ) und Endzustand ( $\Lambda_{p2}$ ) kann das Verhältnis der wahrgenommenen Lästigkeiten berechnet werden:

$$R_{Lästigkeit} = 2^{\frac{\Lambda_{p2} - \Lambda_{p1}}{13,9}}$$

$R_{Lästigkeit}$  .... Verhältnis der Lästigkeiten zweier Lärmsituationen

$\Lambda_{p1}$  ..... Bewertungsbasis der ersten Lärmsituation (Ausgangszustand) auf Basis des  $L_{A3s}$

$\Lambda_{p2}$  ..... Bewertungsbasis der zweiten Lärmsituation (Endzustand) auf Basis des  $L_{A3s}$

<sup>4</sup> Die im folgenden angeführten Gleichungen sind als Zahlenwertgleichungen zu verstehen, bei welchen die Größen ohne Dimension eingesetzt werden. Aus den erklärenden Texten geht jeweils hervor, in welcher Dimension die Zahlen der Größen zu verwenden sind.



Bei einer Verringerung des  $\Delta_p$  um den Wert 13,9 wird folgerichtig die Lästigkeit halbiert. Wird beispielsweise Freifeldausbreitung und die Ausbreitung bei einer 4 m hohen Lärmschutzwand verglichen, muss bei Berücksichtigung der Mittelung über die beiden Zugtypen (Personen- und Güterzug) eine Verringerung im  $L_{A3s}$  13,9+2,2 dB(A) betragen, um eine Halbierung der wahrgenommenen Lästigkeiten zu erzielen. Dieser Vorgang ist auch, wie im Anhang D erklärt, grafisch durchführbar (Abb. D-1).

Ein wichtiger Punkt ist, dass der Maßnahmentyp eine Veränderung der Lästigkeit hervorruft, die wiederum durch eine Pegelverschiebung korrigiert werden muss (siehe Tab. 5-3 und Tab. 5-4), die im Rahmen des vorliegenden Projekts bereits für 3 Typen von Lärmschutzmaßnahmen bestimmt wurde. Bei Verwendung einer anderen Maßnahme kann diese Verschiebung nur grob abgeschätzt werden.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor besteht in der Abhängigkeit der Unterschiede zwischen den Maßnahmen vom Zugtyp (und umgekehrt). Aus den Daten (Tab. 5-3 und Tab. 5-4) kann hierfür ebenfalls ein etwas komplexeres Modell hergeleitet werden, das in Anhang D (Abb. D-2 und Abb. D-3) grafisch dargestellt ist. Bei Verwendung der mittleren Verschiebung für beide Zugtypen liegt der maximale Fehler allerdings im Bereich von 0,5 dB(A) und kann daher vermutlich vernachlässigt werden.

### Bewertungssystem mittels Lautheit

Lautheit ist in der Lärmmessung ein ungebräuchlicher Parameter und findet daher selten Anwendung. Hier wurde die Spitzenlautheit (Schwelle über welcher 5% der Lautheitswerte liegen) als bestgeeignetes einzelnes Maß bestimmt. Die Spitzenlautheit  $N_5$  wurde hier auf den Spitzenlautstärkepegel  $L_{N5}$  in Phon umgerechnet (gültig für  $N > 1$  sone)

$$L_{N5} = 40 + \frac{10}{\lg(2)} \lg(N_5)$$

$L_{N5}$  ..... Lautstärkepegel der Spitzenlautheit (Schwelle über welcher 5% der Lautheitswerte des 3 Sekunden langen Vorbeifahrtsgeräusches liegen) in Phon

$N_5$  ..... Spitzenlautheit (Schwelle über welcher 5% der Lautheitswerte liegen) in Sone

Ebenso wie im ersten Bewertungssystem wird auch in diesem System eine Bewertungsbasis  $\Delta_N$  definiert. Aus den Analysen geht hervor, dass ein Modell nur mit dem Lautstärkepegel die Daten besser beschreibt als das Modell mit  $L_{A3s}$ . Im einfachsten Modell ist daher die Bewertungsbasis gleich dem Spitzenlautstärkepegel:

$$\Lambda_N = L_{N5}$$

$\Lambda_N$  ..... Bewertungsbasis für das Lästigkeitsverhältnis auf Basis des Spitzenlautstärkepegels

$L_{N5}$  ..... Lautstärkepegel der Spitzenlautheit (Schwelle über welcher 5% der Lautheitswerte des 3 Sekunden langen Vorbeifahrtsgeräusches liegen) in Phon

Das Verhältnis der wahrgenommenen Lästigkeiten kann nun berechnet werden:

$$R_{Lästigkeit} = 2^{\frac{\Lambda_{N1} - \Lambda_{N2}}{13,6}}$$

$R_{Lästigkeit}$  .... Verhältnis der Lästigkeiten zweier Lärmsituationen

$\Lambda_{N1}$  ..... Bewertungsbasis der ersten Lärmsituation (Ausgangszustand) auf Basis des  $\Lambda_N$

$\Lambda_{N2}$  ..... Bewertungsbasis der zweiten Lärmsituation (Endzustand) auf Basis des  $\Lambda_N$

Dies bedeutet, dass eine Verringerung der Bewertungsbasis  $\Lambda_N$  um 13,6 die Lästigkeit auf die Hälfte verringert. Wird der Zugtyp mit eingerechnet (0 für Güterzug und 1 für Personenzug), ergibt sich

$$\Lambda_N = L_{N5} + 0,9 \cdot \text{Zugtyp}$$

$\Lambda_N$  ..... Bewertungsbasis für das Lästigkeitsverhältnis auf Basis des Spitzenlautstärkepegels

$L_{N5}$  ..... Lautstärkepegel der Spitzenlautheit (Schwelle über welcher 5% der Lautheitswerte des 3 Sekunden langen Vorbeifahrtsgeräusches liegen) in Phon

Zugtyp ..... Güterzug (0) oder Personenzug (1)

Wiederum ist das System auf den Güterzug bezogen. Der Personenzug erhöht daher die Bewertungsbasis um 0,9. Der Einfluss des Zugtyps ist hier geringer als beim Schalldruckpegelmodell.

Wird die psychoakustischen Rauigkeit, die ebenfalls eine Verbesserung der Beschreibung der Daten ergab, hinzugenommen, ergibt sich

$$\Lambda_N = 0,93 \cdot L_{N5} + 0,8 \cdot \text{Zugtyp} + 0,8 \cdot \text{Rauigkeit}$$

$\Lambda_N$  ..... Bewertungsbasis für das Lästigkeitsverhältnis auf Basis des Spitzenlautstärkepegels

$L_{N5}$  ..... Lautstärkepegel der Spitzenlautheit (Schwelle über welcher 5% der Lautheitswerte des 3 Sekunden langen Vorbeifahrtsgeräusches liegen) in Phon

Zugtyp ..... Güterzug (0) oder Personenzug (1)

Rauigkeit ..... Median der Rauigkeit in Asper

Die Änderung der Gewichtung des Spitzenlautstärkepegels ergibt sich vor allem aufgrund des starken Zusammenhangs zwischen Rauigkeit und dem Lautstärkepegel. Es ist daher nicht möglich, diese unabhängig voneinander zu betrachten.

Im Anhang D sind die ersten beiden Modelle graphisch abgebildet (Abb. D-4). Das Modell mit der Rauigkeit lässt sich aufgrund der Korrelation zwischen Lautheit bzw. Lautstärkepegel und Rauigkeit grafisch nicht sinnvoll darstellen.

### Lästigkeitsschwellen

Eine Lästigkeitsschwelle ist jene Pegeldifferenz, bei welcher eine Person bei Vergleich zweier Stimuli der Vergleichsstimulus mit einer Wahrscheinlichkeit von 71% als weniger lästig empfunden wurde. Die erhobenen mittleren Schwellen aus Tab. 5-2 lassen sich nicht direkt in ein Bewertungssystem einbauen. Allerdings kann aus den Ergebnissen geschlossen werden, dass die Schwelle bei reinen Pegeländerungen oder bei schwachen spektralen Modifikationen bei höheren Referenzpegeln deutlich geringer sind (bis zu 2 dB bei 70 vs. 50 dB(A) Referenzpegel). Das bedeutet dass bei höherem Referenzpegel hier geringere Unterschiede im Pegel bereits als weniger lästig empfunden werden. Dieser Effekt ist auch aus der Literatur bekannt [22], [23]. Wird die Reduktion von einer starken spektralen Modifikation begleitet, scheint diese Pegelabhängigkeit geringer zu sein, allerdings ist die Streuung der Schwellen über die Studienpopulation sehr groß.

Bei niedrigen Bezugspegeln ist die Freifeld-Schwelle höher als in anderen Studien zu im Alltag auftretenden Geräuschen [15], [14]. Mögliche Gründe hierfür sind, dass die Stimuli lange und nicht gänzlich konstant (Variation der Pegelhöhe von etwa 2-3 dB bei Frequenzbewertung A und bei Zeitbewertung fast) sind. Ein möglicher Kontrasteffekt (d.h. eine Abhängigkeit der Schwelle von anderen im selben Dreierblock vorhandenen Bedingungen) konnte nicht genauer untersucht werden. Hierzu wäre eine mehrfache Wiederholung der Schwellenbestimmung notwendig was eine Reduktion der Probandenzahl bedeutet hätte. Die Verwendung des unschärferen Begriffs der Lästigkeit ist vermutlich kein Grund für die höheren Schwellwerte, da ein Effekt für alle Bezugspegel zu erwarten wäre.

### Einschränkungen

Das vorliegende Bewertungssystem unterliegt bestimmten Einschränkungen. Da die Herleitung mit Pegeln zwischen 40 und 80 dB(A) erfolgte, ist es auch für diesen Pegelbereich (Immissionen) gedacht. Die untere Schwelle für die Lautheit beträgt 1 Sone oder 40 Phon für den Lautstärkepegel, da erst ab diesem Bereich die Beziehung zwischen

Phon und der logarithmischen Lautheit linear ist. Aufgrund der üblicherweise betrachteten Pegel ist dies jedoch keine problematische Einschränkung.

Der Zugtyp spielt in den Bewertungssystemen eine Rolle. Grundsätzlich passt die erhöhte Lästigkeit des Personenzugs bei gleichem A-bewerteten Pegel aber sehr gut mit den Ergebnissen der Studie SysBahnLärm zusammen [24]. Die beiden Züge wurden so gewählt, dass die Vorbeifahrtsgeräusche möglichst repräsentativ für ihre jeweilige Kategorie sind, allerdings bei bestimmten Bedingungen. Bei starken Abweichungen von diesen Bedingungen, z.B. K-Sohlen-Wagen, unterschiedliche Geschwindigkeit<sup>5</sup> und variierende Zuglängen ist bei der Interpretation der Zugtypen Vorsicht geboten.

Grundsätzlich handelt es sich hier um eine rein akustische Bewertung, d.h. der Kontext in dem Lärm auftritt, zum Beispiel konzentriertes Arbeiten, Entspannung usw. ist nicht berücksichtigt und kann in Laboruntersuchungen auch nur sehr bedingt simuliert werden. Besonders auf Schlaf bezogene Aussagen sind problematisch, da hier Aufweckreaktionen eine bedeutende Rolle spielen, die hier nicht nachgebildet werden können.

Weiters ist auch die langfristige Betrachtung von Lärmbelästigung aus vorliegenden Daten nicht zu extrapolieren. Es ist zwar naheliegend, dass eine Reduktion z.B. der Lautheit eine Verringerung der Belästigung nach sich zieht, quantitative Aussagen zu Langzeiteffekten sind aus vorliegendem System aber nicht möglich.

Die Bewertungen in dieser Studie basieren auf dem Rollgeräusch mit möglichst wenigen Störeinflüssen. Daher ist die Bewertung von stark abweichenden Geräuschcharakteristika (z.B. Flachstellen oder Kurvenquietschen) unzulässig, da hier die Lautheit alleine für die Bewertung wahrscheinlich nicht ausreicht.

---

<sup>5</sup> Die Referenzgeräusche sind repräsentativ für Personenzüge in einem Geschwindigkeitsbereich von 105-115 km/h und für Güterzüge mit überwiegend Graugussbremssohlen in einem Bereich von 85-95 km/h. Aus diesem Grund sind Aussagen über diese Eigenschaften hinausgehend nicht möglich.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Projekt wurde der Frage nachgegangen, wie der Schalldruckpegel von Schallimmissionen und wie spektrale Änderungen durch Schienenstegdämpfer, durch lichtraumnahe und durch konventionelle Lärmschutzwände mit der empfundenen Lästigkeit zusammenhängen.

### Referenzgeräusche

Als Basis der Untersuchung diente jeweils ein für Regional- oder Nahverkehr repräsentatives Referenzgeräusch für Personen- und für Güterzüge. Bei ersterem wurden ausschließlich Reisezüge und Doppelstockgarnituren der Reihe 80-33 betrachtet, da sowohl Schnellbahngarnituren der Reihe 4020 bzw. 4024 (Talentgarnituren) ein charakteristisches, für moderne Personenzüge untypisches Vorbeifahrtsgeräusch aufweisen.

Zur Erstellung der Referenzgeräusche wurden zunächst mit binauraler Messtechnik (Kunstkopfmesssystem) akustische Aufzeichnungen der Schallimmissionen von Zugvorbeifahrten bei Freifeldbedingungen angefertigt. Die Wahl des Immissionspunkts in 25 m Entfernung von der Gleisachse stellt dabei die Geräuschsituation von Anrainern von Regional- und Nahverkehrsbahnstrecken nach. Darüber hinaus wurden mit dem akustischen Monitoring System acramos<sup>®</sup> über den Zeitraum von 2 Monaten Vorbeifahrten in 7,5 m und 25 m Entfernung erfasst.

Die Wirkung der betrachteten Lärmschutzmaßnahmen wurde durch spektrale Modifikation modelliert. Die entsprechenden Differenzspektren für die Lärmschutzwände konnten mittels der 2.5D-Randelementemethode abgeleitet werden. Der Vergleich mit Messwerten für eine niedrige und eine konventionelle Lärmschutzwand ergaben eine gute Übereinstimmung der simulierten spektralen Veränderung. Für Schienenstegdämpfer lagen dem Projektkonsortium hingegen Messergebnisse vor, aus welchen die erforderliche, spektrale Modifikation direkt nachgebildet werden konnte.

Anhand der mittleren Terzpegelspektren der mit dem System acramos<sup>®</sup> erfassten Vorbeifahrten wurden aus den binauralen Aufzeichnungen im Immissionspunkt für Güter- und für Personenzüge repräsentative Hörproben extrahiert. Diese wurden entsprechend der Lärmschutzmaßnahmen spektral verändert und die Pegel zwischen 0 und 80 dB(A) in 0,5 dB Schritten variiert. Der resultierende Satz an Stimuli stellte die Basis für die nachfolgend abgehaltenen Wahrnehmungstests dar.



### Wahrnehmungstests

Im Detail wurden verschiedene Wahrnehmungstests mit Hilfe von 40 Probanden durchgeführt,

- um Schwellwerte zu finden, ab denen ein reiner Schalldruckpegelunterschied als weniger lästig empfunden und somit aufgrund des engen Zusammenhangs zur Lautheit als leiser wahrgenommen wird,
- um Schwellwerte zu finden, ab denen ein Schalldruckpegelunterschied bei spektraler Veränderung als weniger lästig erkannt wird, sowie
- um den Zusammenhang zwischen Lästigkeitsänderungen und Änderungen der akustischen Parameter zu untersuchen.

### Wahrnehmbarkeitsschwellen der Lästigkeit

Die im ersten Experiment ermittelten Schwellen wiesen eine generelle Abhängigkeit vom Ausgangspegel auf, wobei geringere Pegel zu höheren Schwellwerten (d. h. erst höhere Pegeldifferenzen werden wahrgenommen) führen, ein Effekt der für Töne und tiefpassgefiltertes Rauschen in der Literatur bekannt ist. Diese Abhängigkeit ist jedoch bei Lärmschutzmaßnahmen mit starker spektraler Modifizierung (beide Arten der betrachteten Lärmschutzwände) schwächer ausgeprägt als bei Maßnahmen mit schwacher oder mit keiner Modifizierung (Schienenstegdämpfer, Freifeld). Allerdings streuen die Schwellen der stark modifizierten Stimuli sehr stark. Die mittlere Schwelle beim Personenzug ist schwach signifikant niedriger ( $\sim 0,25$  dB) als beim Güterzug. Schwellen auf Basis von Vergleichen zwischen den beiden Zugtypen wurden nicht untersucht.

Bei reinen Pegeländerungen ohne maßnahmenbedingte spektrale Modifikation liegen die über die beiden Zugtypen gemittelten Schwellen zwischen  $\sim 1$  dB für einen Ausgangspegel von 70 dB(A) und  $\sim 3$  dB für einen Ausgangspegel von 50 dB(A). Während erster Schwellenwert im zu erwarteten Bereich liegt, nimmt die Schwelle mit 3 dB einen relativ hohen Wert an. Mögliche Gründe hierfür sind, dass die Stimuli lange sind und nicht gänzlich konstante Pegelhöhe aufweisen. Ein möglicher Trend zu höheren Schwellen bei niedrigem Bezugspegel durch einen Kontrasteffekt d.h. eine Abhängigkeit der Schwelle von anderen im selben Testblock vorhandenen Bedingungen ist nicht auszuschließen, kann aber auch nicht bestätigt werden. Eine Erhöhung der Schwellen aufgrund der, im Vergleich zur Lautheit, unschärferen Definition der Lästigkeit ist möglich, es wäre aber zu erwarten, dass sich dieser Effekt auf alle Bezugspegel auswirkt.

Im Vergleich zu Freifeldausbreitung sind die Schwellen bei Schienenstegdämpfern nur geringfügig und statistisch nicht signifikant höher, sodass sich diese in vergleichbaren Größenordnungen wie die erzielbare Pegelminderung von ~2-3 dB befinden. Die spektralen Modifikationen der niedrigen Lärmschutzwand mit 1 m Höhe bewirkt eine Anhebung der Lästigkeitsschwelle auf rund ~3-4 dB. Demgegenüber fallen die Schwellen bei einer konventionellen Lärmschutzwand mit 4 m Höhe trotz einer ebenfalls starken spektralen Modifikation zwar um etwa ~0,5 dB geringer aus, aufgrund der hohen Schwankungen in dieser Bedingung ist diese geringfügige Abnahme aber statistisch nicht signifikant. Gerade bei Situationen mit geringeren Ausgangspegeln der Schallimmissionen bestärken die ermittelten Schwellen der Lärmschutzwände die allgemeine Forderung, dass Lärmschutzwände Schalldruckpegelabsenkungen von mehreren Dezibel erzielen müssen, um für Anrainer einen merkbaren Effekt hervorzurufen.

#### Bewertungsmodelle für die Lästigkeit

Auf Basis der Ergebnisse des zweiten Wahrnehmungstests - dem Skalierungsexperiment - konnten alternative Beschreibungsgrößen für empfundene Lästigkeitsunterschiede näher beleuchtet werden. So ergab sich, dass der Lautheitswert, beschrieben durch den Lautstärkepegel, der in 5% der Zeit der Vorbeifahrt überschritten wird, ein besserer Deskriptor der Lästigkeit ist, als der A-bewertete, energieäquivalente Schalldruckpegel. Denn im Gegensatz zum Schalldruckpegel müssen bei der Lautheit die einzelnen Maßnahmen nicht mehr explizit im Bewertungsschema berücksichtigt werden. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit Untersuchungen von Straßenverkehrslärm, wodurch die Zuverlässigkeit des vorliegenden Untersuchungsergebnisses untermauert wird.

Der Einfluss des Zugtyps war in beiden Modellen (Lautheit und Schalldruckpegel) vorhanden, allerdings ist der Einfluss beim Lautheitsmodell geringer. Einen geringen Einfluss hat auch die psychoakustische Rauigkeit. Einschränkungen der Anwendbarkeit des akustischen Bewertungsschemas betreffen hauptsächlich die Langzeitwirkung, spezielle Geräuschsituationen (z.B. Kurvenkreischen, Flachstellen), Effekte der je individuellen Situation (z.B. konzentriertes Arbeiten) und des Pegelbereichs beim Anrainer (40-80dB(A)).

Generell zeigen die spektralen Modifikationen durch Lärmschutzmaßnahmen im Hinblick auf eine Senkung der Lästigkeit eine Minderung des Effekts der Pegelreduktion. So bedarf es für eine Halbierung der Lästigkeit der Schallimmission bei Freifeldausbreitung einer Pegelreduktion von knapp 14 dB. Zusätzlich sind bei Mittelung über beide Zugtypen für eine gleiche Lästigkeitsverminderung bei der Anwendung von Schienenstegdämpfern rund 0,3 dB(A), bei niedrigen Lärmschutzwänden (1 m Höhe) etwa 1,6 dB(A) und bei

konventionellen Lärmschutzwänden (4 m Höhe) etwa 2,2 dB(A) höhere Pegelreduktionen erforderlich. Es sei jedoch erwähnt, dass vor allem bei den zuletzt genannten Lärmschutzwänden die meist hohe Schalldruckpegelabschwächung zu einer deutlich größeren Reduktion der Lästigkeit führt als die durch die spektrale Modifikation verursachte leichte Erhöhung der Lästigkeit. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass die angewendeten spektralen Veränderungen eine Abschwächung hauptsächlich im mittleren und hohen Frequenzbereich bewirken. Eine über die Frequenzbänder gleichmäßige Abschwächung würde die Erhöhung der Lästigkeit vermeiden - allerdings ist die Abschwächung tiefer Frequenzen in der Praxis sehr schwierig.

Neben der formelbasierten Auswertemethode wurden die Ergebnisse auch grafisch visualisiert. Dies erlaubt es auf einfache Weise Lästigkeitsverhältnisse zweier Lärmsituationen abzuleiten.

Abschließend ist darauf hinzuweisen, dass die dargestellten Ergebnisse auf wiederholten Bewertungen von exemplarischen Hörproben und bei direkten Vergleichsmöglichkeiten unter Laborbedingungen ermittelt wurden. Das bedeutet, dass die in der Realität vorkommenden Variation der Schallemissionen zufolge von Zugtyp und -länge, Geschwindigkeit, Oberbau, etc. wie auch zusätzliche, sowohl auf das Umfeld (Witterung) als auch auf die wahrnehmenden Personen einwirkende Einflüsse (Einstellung zu Bahn, Umgebung, etc.) dazu beitragen können, dass die tatsächlich empfundenen Lästigkeitsunterschiede gegenüber den Ergebnissen deutliche Abweichungen aufweisen. Dennoch leisten die Erkenntnisse einen wesentlichen Beitrag für ein besseres Verständnis des grundlegenden Zusammenhangs zwischen (psycho)akustischen Parametern und der wahrgenommenen Lästigkeit von Bahnlärm.

## 8. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Kasess, C.H., Noll, A., Waubke, H.: *Psychoacoustic evaluation of different noise mitigation measures for steel bridges*; in: Proceedings of Internoise, Innsbruck 2013; CD-ROM (proceedings)
- [2] Duhamel, D.: *Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier*; in: Journal of Sound and Vibration, 197(5), 1996, S. 547-571
- [3] Delany, M. E. and Bazley, E. N.: *Acoustical properties of fibrous absorbent materials*; in: Appl. Acoust. 3, 1970, S. 309-322
- [4] Heutschi, K.: *Sound propagation over ballast surfaces*; in: Acta Acustica United with Acustica: 95, 2009, S. 1006–1012
- [5] Broadbent, R. A., Thompson, D. J., & Jones, C. J. C.: *The acoustic properties of railway ballast*; in: Euronoise 2009
- [6] Kirisits, C., Meidl, H., Dinhobl, G., Gutschelhofer, H., Punk, J., & Kirisits, H.: *Comparison of measurements and calculations to investigate the effect of multiple-reflections between absorptive noise barriers and trains*; in: Proceedings of Internoise 2013, Innsbruck 2013; CD-ROM (proceedings)
- [7] Chessell, C.: *Propagation of noise along a finite impedance boundary*; in: The Journal of the Acoustical Society of America, 62(4), 1977, S. 825–834
- [8] Thompson, D.: *Railway Noise and Vibration - Mechanisms, Modelling and Means of Control*; Elsevier Ltd., Oxford 2009; ISBN: 978-0-08-045147-3
- [9] Ostermann N. (Hrg.): *Anwenderhandbuch Systemische Bahnlärmbekämpfung*; DVV Media Group GmbH | Eurailpress, Hamburg 2013; ISBN: 978-3-7771-0464-5; 42 S.
- [10] European Committee for Standardization: EN 16272-3-1: *Normalized railway noise spectrum and single number ratings for diffuse field applications*; 2012

- [11] Fastl, H.: *Psychoacoustic basis of sound quality evaluation and sound engineering*; in: Proceedings ICSV13, Wien 2006
- [12] Nilsson, M. E., Andéhn, M., & Leśna, P.: *Evaluating roadside noise barriers using an annoyance-reduction criterion*; in: The Journal of the Acoustical Society of America, 124(6), 2008, 3561–7; doi:10.1121/1.2997433
- [13] Lane, H., Catania, A., & Stevens, S.: *Voice level: Autophonic scale, perceived loudness, and effects of sidetone*; in: Journal of the Acoustical Society of America, 33(2), 1961, S. 160–167
- [14] You, J., & Jeon, J.: *Just noticeable differences in sound quality metrics for refrigerator noise*; in: Noise Control Engineering Journal, 56(6), 2008, S. 414–424
- [15] Pedrielli, F., Carletti, E., & Casazza, C.: *Just noticeable differences of loudness and sharpness for earth moving machines*; in: Proceedings of International Conference Acoustics'08, 2008, S. 1231–1236; doi:10.1121/1.2933219
- [16] Leviti, H.: *Transformed up-down methods in psychoacoustics*; in: Journal of the Acoustical Society of America, 1971, 49, S. 467-477
- [17] Jesteadt, W.: *An adaptive procedure for subjective judgments*; in: Perception & Psychophysics, 28(1), 1980, 85–8
- [18] Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D. and the R Development Core Team: *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models*; R package version 3.1-104, 2012
- [19] Hothorn, T., Bretz, F. and Westfall, P.: *Simultaneous Inference in General Parametric Models*; in: Biometrical Journal 50(3), 2008, S. 346-363
- [20] Greenhouse, S. W., & Geisser, S.: *On methods in the analysis of profile data*; in: Psychometrika, 24, 1959, S. 95-112
- [21] Keselman, H. J., Keselman, J. C., & Shaffer, J. P.: *Multiple pairwise comparisons of repeated measures means under violation of multisample sphericity*; in: Psychological Bulletin, 110(1), 1991, S. 162-170



[22] Viemeister, N., & Bacon, S.: *Intensity discrimination, increment detection, and magnitude estimation for 1-kHz tones*; in: The Journal of the Acoustical Society of America, 84(1), 1988, S. 172-178

[23] Zwicker, E. und Fastl, H.: *Psychoacoustics. Facts and Models*; 2<sup>nd</sup> edition, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1999; ISBN 3-540-65063-6

[24] Kasess, C.H., Noll, A., Majdak, P., Waubke, H.: *Effect of train type on annoyance and acoustic features of the rolling noise*; in: Journal of the Acoustical Society of America 134 (2), 2013, S. 1071-1081

## ANHANG A

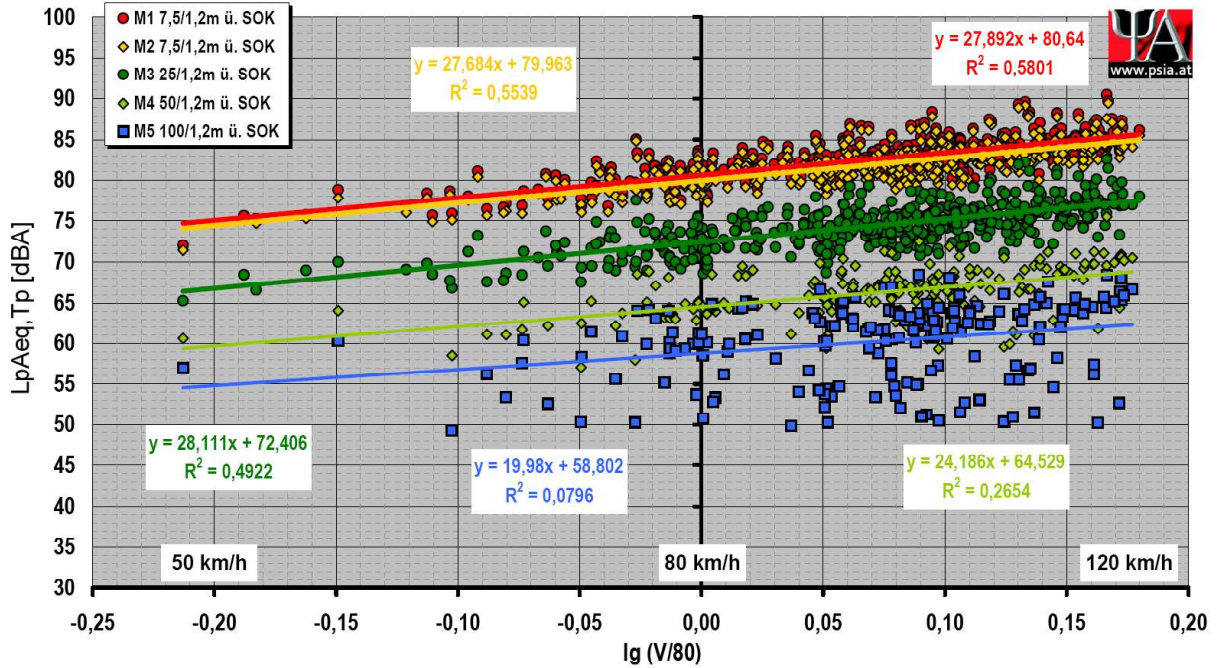


Abb. A-1: A-bewerteter Vorbeifahrtpegel  $L_{pA,eq,Tp}$  der Kategorie RZ-mix an den Mikrofonpositionen M1 (7,5/1,2 m), M2 (7,5/1,2 m), M3 (25/1,2 m), M4 (50/1,2 m) und M5 (100/1,2 m)

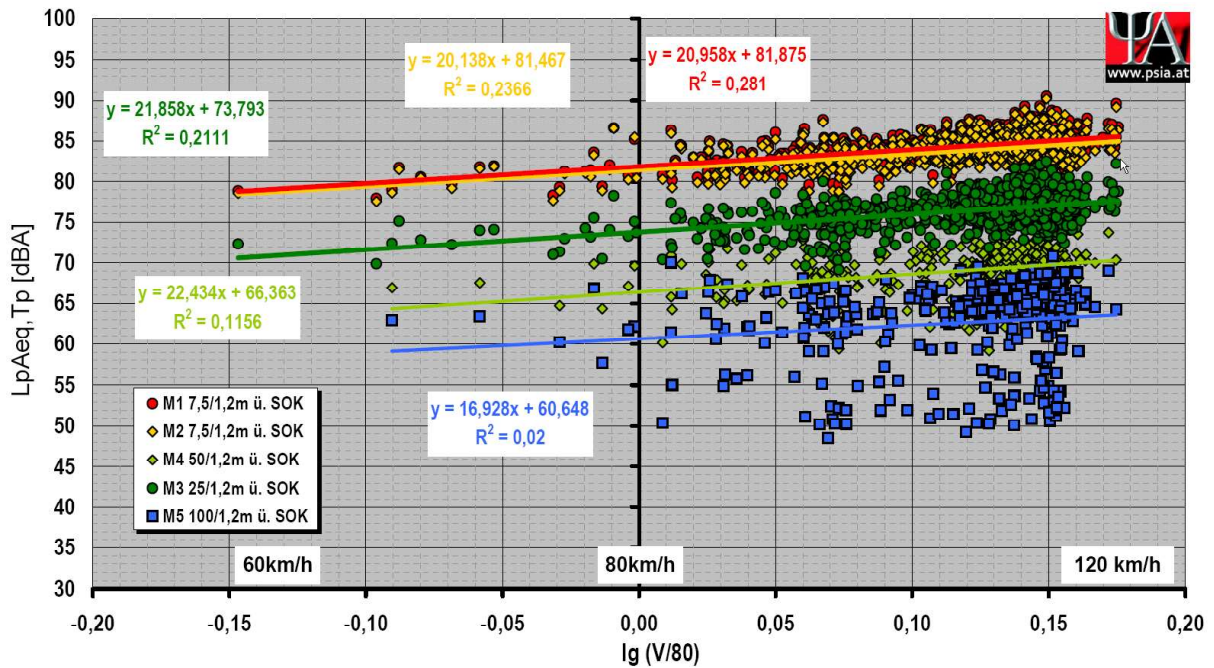


Abb. A-2: A-bewerteter Vorbeifahrtpegel  $L_{pA,eq,Tp}$  der Kategorie 80-33 an den Mikrofonpositionen M1 (7,5/1,2 m), M2 (7,5/1,2 m), M3 (25/1,2 m), M4 (50/1,2 m) und M5 (100/1,2 m)



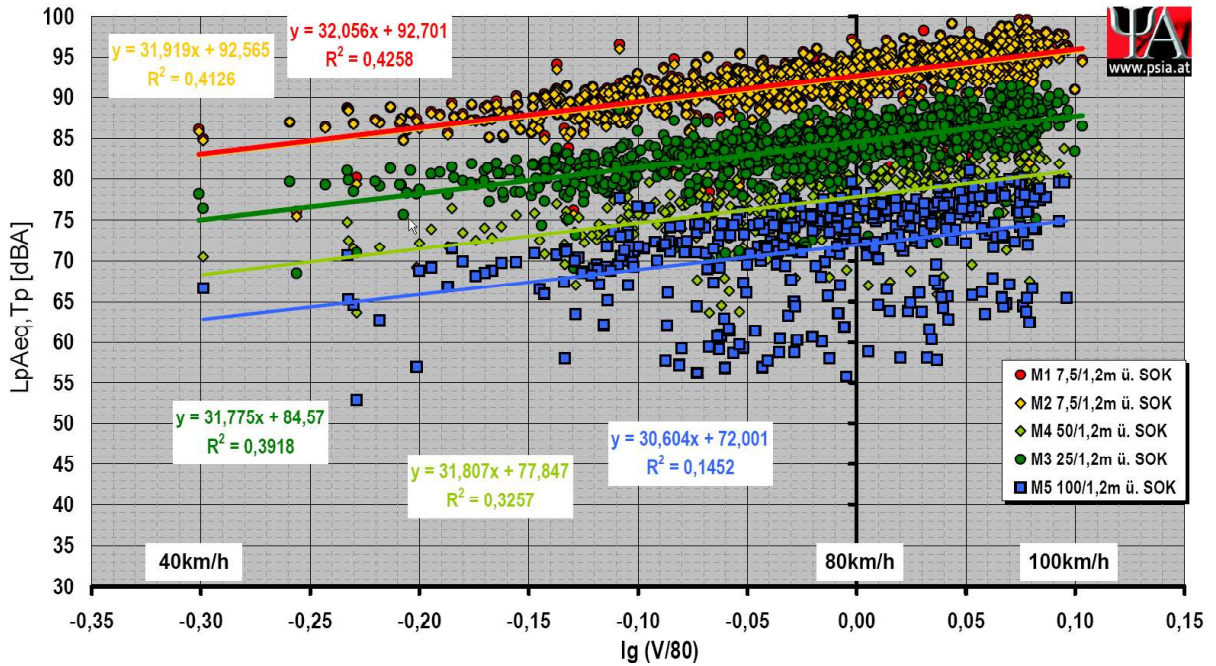


Abb. A-3: A-bewerteter Vorbeifahrtpegel  $L_{pA,eq,Tp}$  der Kategorie Güter an den Mikrofonpositionen M1 (7,5/1,2 m), M2 (7,5/1,2 m), M3 (25/1,2 m), M4 (50/1,2 m) und M5 (100/1,2 m)

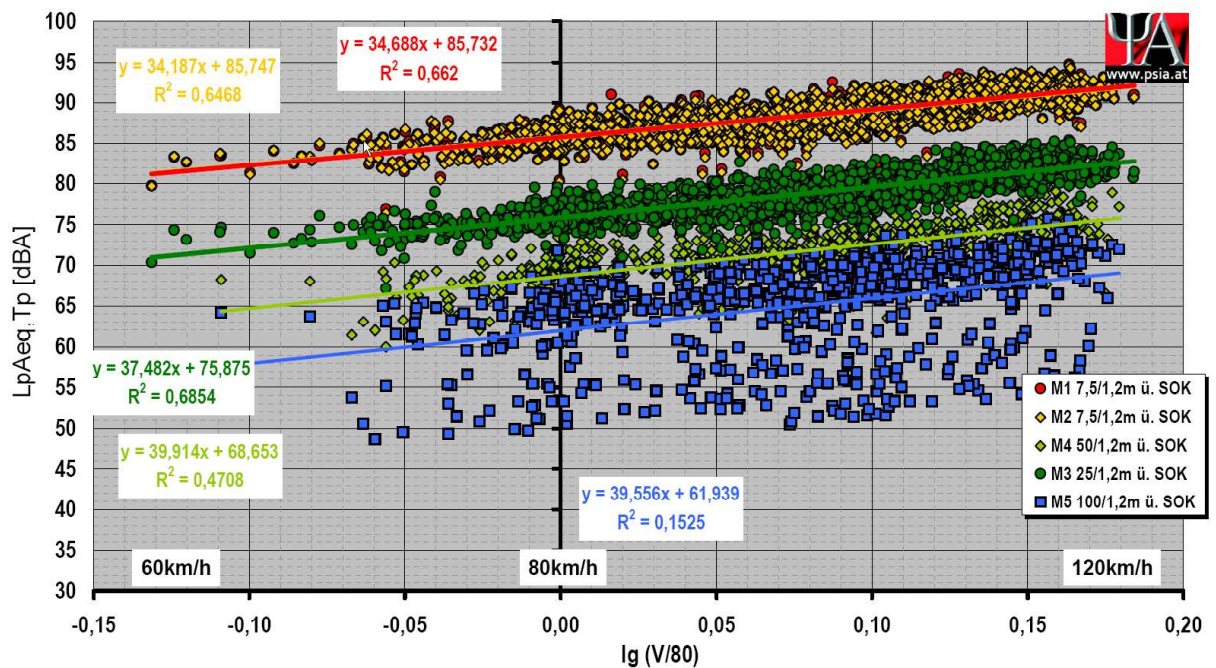


Abb. A-4: A-bewerteter Vorbeifahrtpegel  $L_{pA,eq,Tp}$  der Kategorie S4020 an den Mikrofonpositionen M1 (7,5/1,2 m), M2 (7,5/1,2 m), M3 (25/1,2 m), M4 (50/1,2 m) und M5 (100/1,2 m)

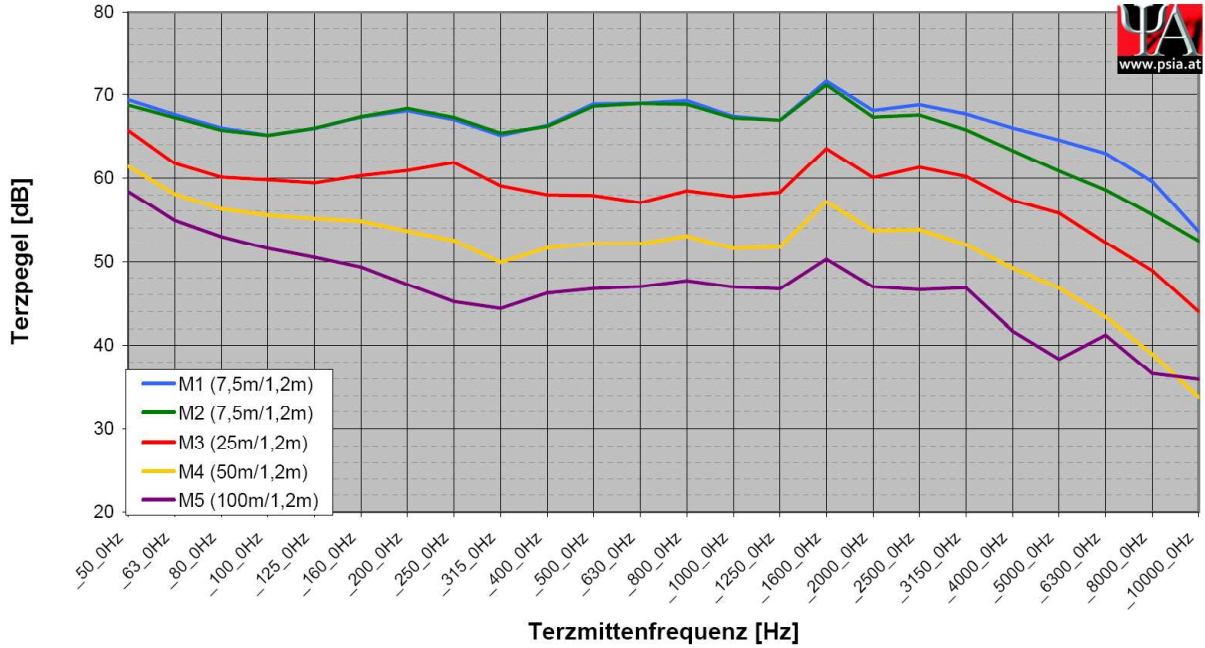


Abb. A-5: mittlere lineare Terzpegelspektren der Kategorie RZ-mix für den Geschwindigkeitsbereich 95-105 km/h

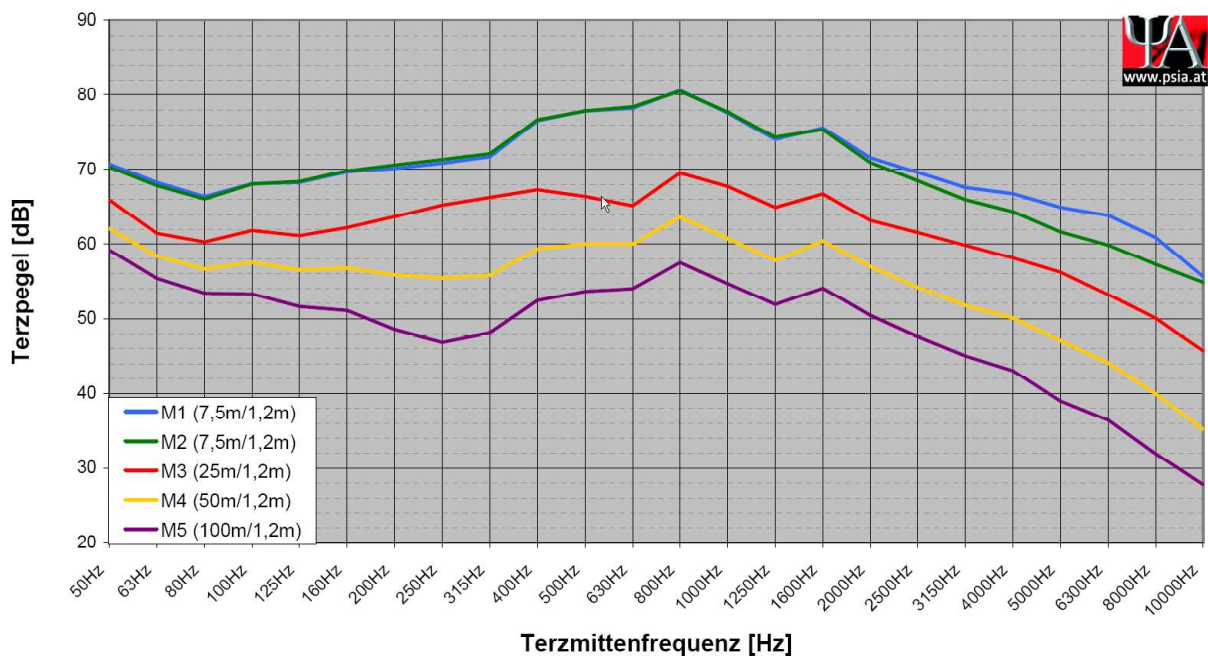


Abb. A-6: mittlere lineare Terzpegelspektren der Kategorie S4020 für den Geschwindigkeitsbereich 95-105 km/h



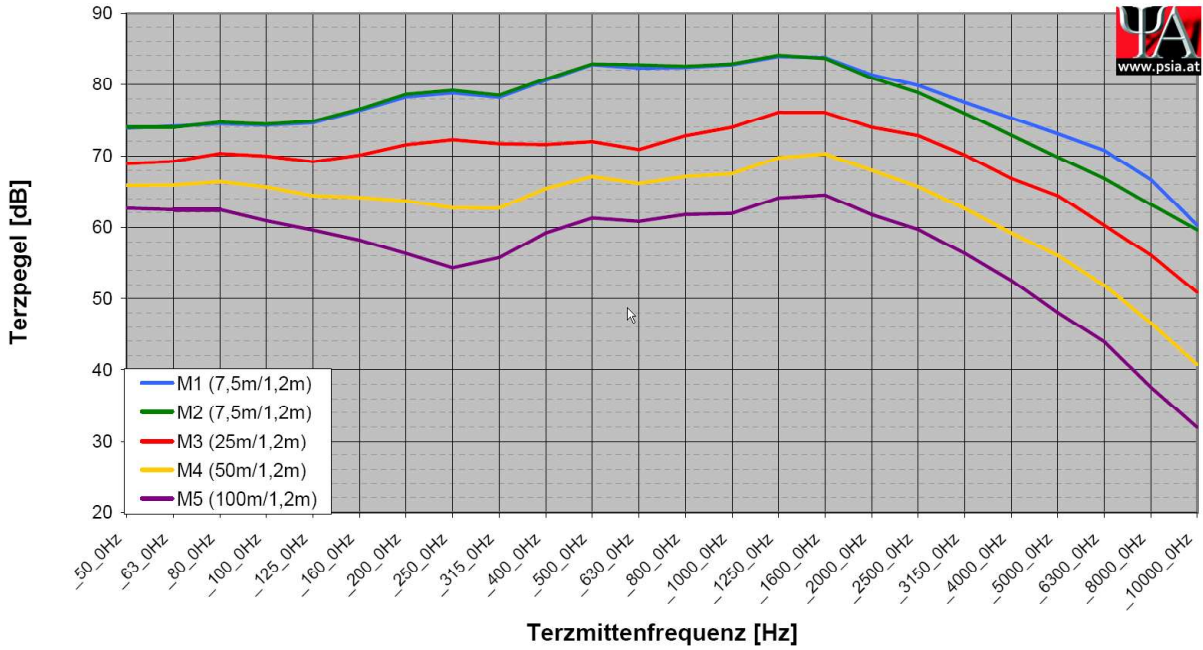


Abb. A-7: mittlere lineare Terzpegelspektren der Kategorie Güter für den Geschwindigkeitsbereich 85-95 km/h

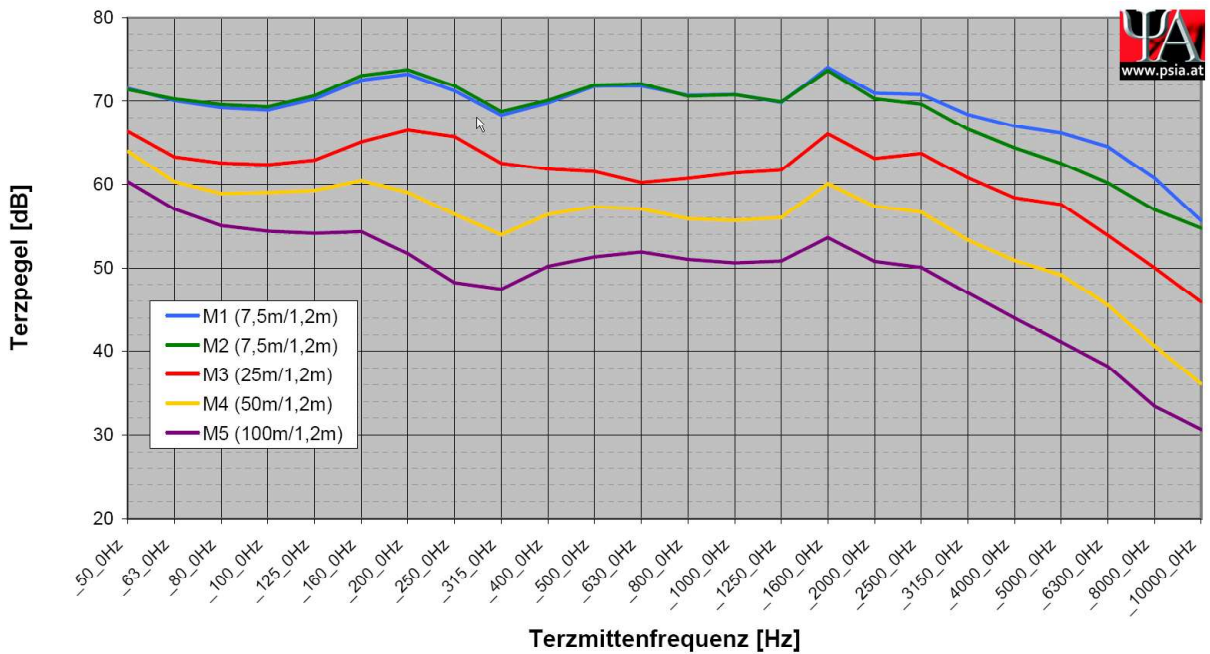


Abb. A-8: mittlere lineare Terzpegelspektren der Kategorie 80-33 für den Geschwindigkeitsbereich 105-115 km/h



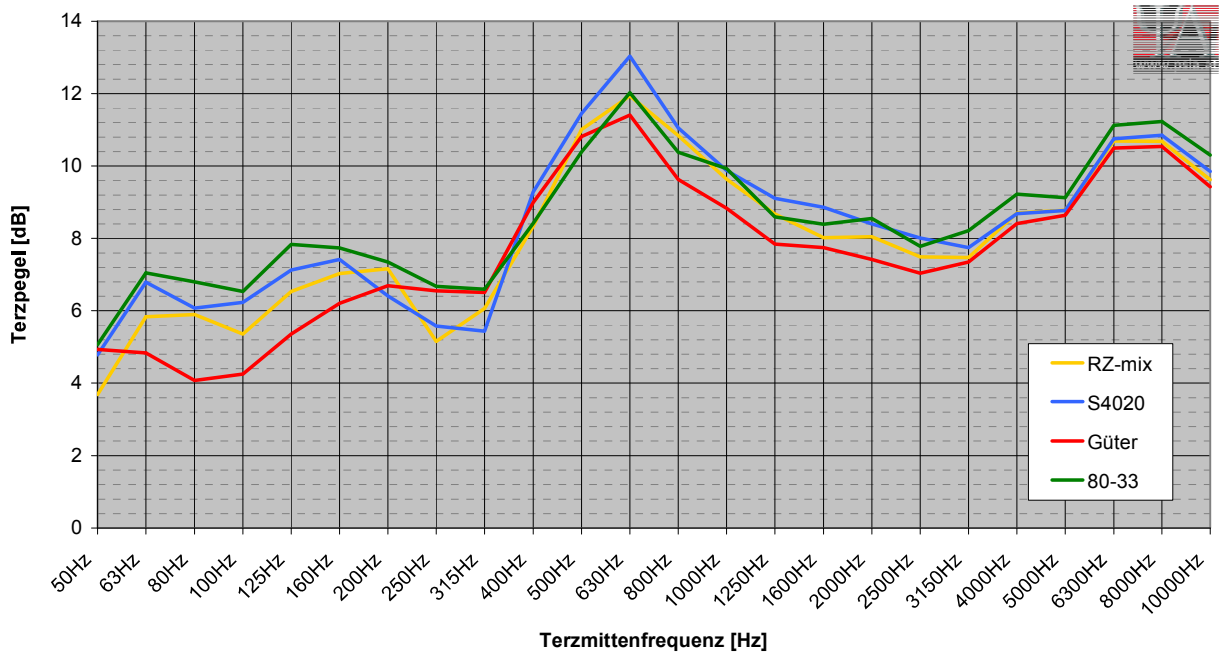


Abb. A-9: Reduktion der Terzpegel für die Kategorien RZ mix, Güterzug, 4020 und 80-33) zwischen dem Messpunkt M3 in 25 m Entfernung und dem Messpunkt M1 in 7,5 m Entfernung zum Messgleis

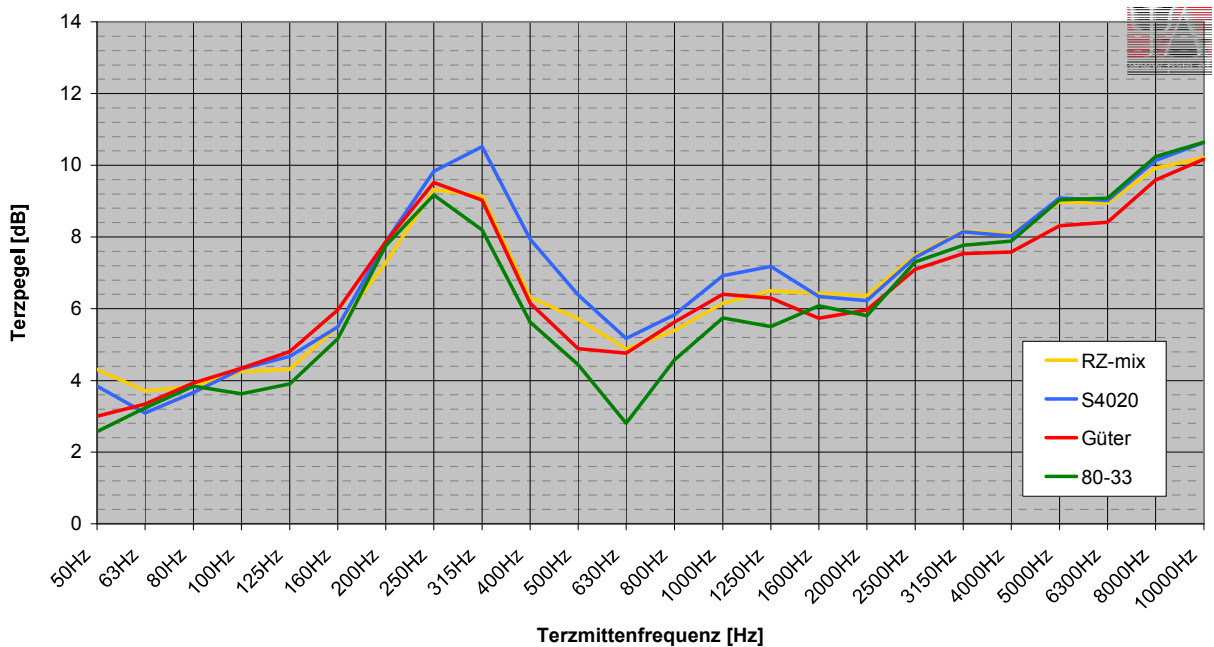
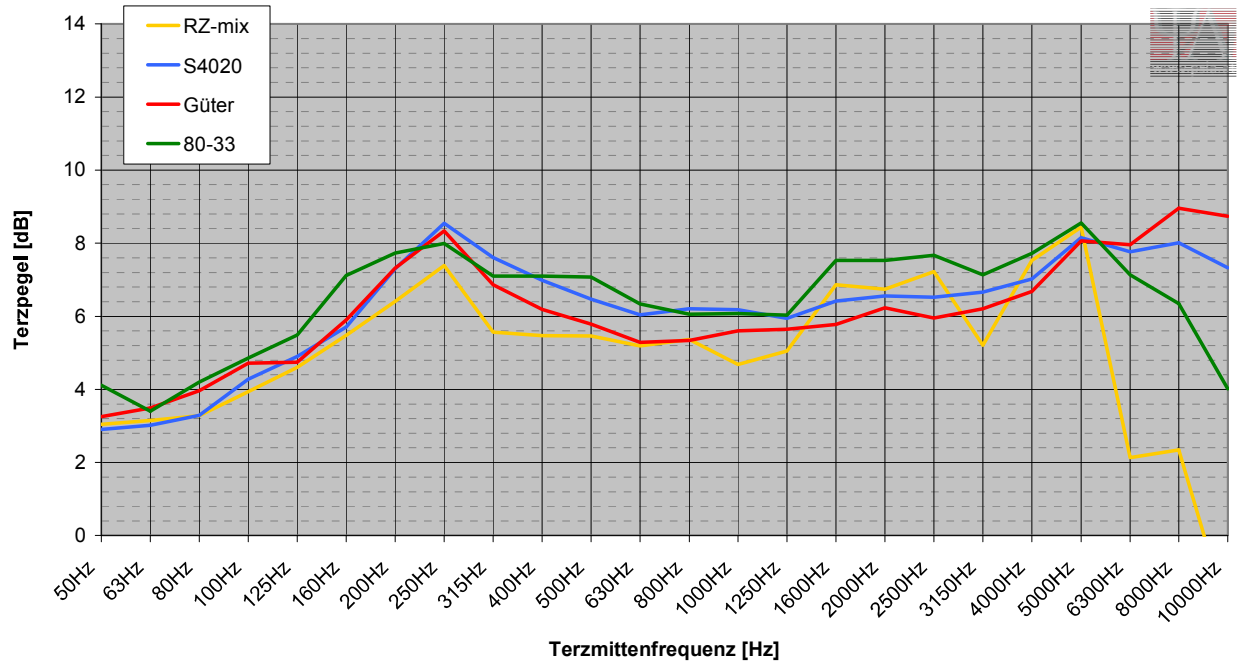


Abb. A-10: Reduktion der Terzpegel für die Kategorien RZ mix, Güterzug, 4020 und 80-33) zwischen dem Messpunkt M4 in 50 m Entfernung und dem Messpunkt M3 in 25 m Entfernung zum Messgleis



**Abb. A-11: Reduktion der Terzpegel für die Kategorien RZ mix, Güterzug, 4020 und 80-33) zwischen dem Messpunkt M5 in 100 m Entfernung und dem Messpunkt M4 in 50 m Entfernung zum Messgleis**

## ANHANG B

### Test zur Wahrnehmung von Störschall (Teil 1)

#### Anleitung

Der Test wird am Computer mit Hilfe der Tastatur durchgeführt. In der Abbildung sehen Sie die Testoberfläche. Der Aufbau ist sehr einfach, es gibt ein Feld das anzeigt wann der Stimulus gespielt wird und ein Feld in dem Sie danach eine Zahl eingeben können (rechte Abbildung). Diese Zahl entspricht der empfundenen Lästigkeit des Beispiels.

*Lästigkeit ist hier definiert als ein Gefühl von Unbehagen verursacht durch Lärm oder ein Gefühl von Abneigung, Unbehagen oder Verärgerung, wenn der Lärm momentane Tätigkeiten stört oder beeinflusst. Dabei sollen Sie sich vorstellen, wie lästig oder störend Sie das jeweilige Geräusch erachten, wenn Sie diesem regelmäßig ausgesetzt wären. Versuchen Sie dabei das Geräusch als Gesamtes zu beurteilen.*

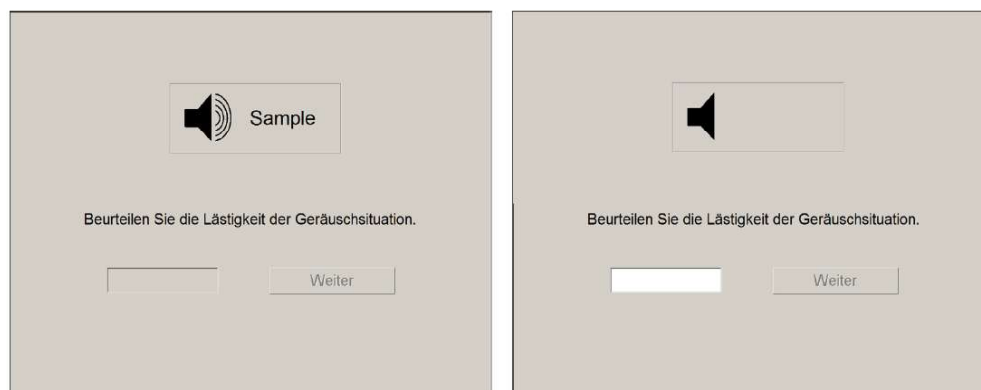
Eine Fortsetzung des Experiments ist erst möglich nach Eingabe einer gültigen Zahl (die Schaltfläche mit der Aufschrift „Weiter“ wird aktiv)

Sie sind grundsätzlich frei in der Wahl des Zahlenbereichs. Es gibt nur zwei Bedingungen

- 1) Die abgegebene Beurteilung soll proportional zur Lästigkeitsempfindung sein, d.h. eine doppelt so hohe Lästigkeit soll auch einen doppelt so hohen Zahlenwert ergeben
- 2) Es gibt keine negativen Beurteilungen, d.h. der Wert 0 bedeutet überhaupt nicht lästig

Es können auch Zahlen mit Nachkommastellen eingegeben werden. Ein Tipp: starten sie mit einer für Sie angenehmen Zahl die weder zu klein noch zu groß ist, damit Sie im Laufe des Experiments in einem für Sie passenden Zahlenbereich bleiben.

Bevor der Test beginnt haben Sie noch Gelegenheit, die Aufgabe zu üben. Nach diesem Training können Sie im Falle von Unklarheiten nochmals Fragen stellen und gegebenenfalls den Zahlenbereich anpassen. Dieser muss dann für den Rest des Experiments gleich bleiben.



**Vielen Dank für Ihre Mitarbeit**

## Test zur Wahrnehmung von Störschall (Teil 2)

### Anleitung

Der Test wird am Computer mit Hilfe der Tastatur durchgeführt. In der Abbildung sehen Sie die Testoberfläche. Es werden zwei, durch eine kurze Pause getrennte, akustische Beispiele vorgespielt, die als Sample A und Sample B gekennzeichnet werden. Nach abspielen beider Beispiele besteht ihre Aufgabe darin zu beurteilen, welches der beiden Geräusche lästiger ist. Die Auswahl erfolgt durch drücken der entsprechenden Taste. Dies ist erst nach dem Vorspielen beider Beispiele möglich.

*Lästigkeit ist definiert als ein Gefühl von Unbehagen verursacht durch Lärm oder ein Gefühl von Abneigung, Unbehagen oder Verärgerung, wenn der Lärm momentane Tätigkeiten stört oder beeinflusst. Dabei sollen Sie sich vorstellen, wie lästig oder störend Sie das jeweilige Geräusch erachten, wenn Sie diesem regelmäßig ausgesetzt wären. Versuchen Sie dabei das Geräusch als Gesamtes zu beurteilen.*

Bevor der Test beginnt haben Sie noch Gelegenheit, die Aufgabe zu üben. Nach diesem Training können Sie im Falle von Unklarheiten nochmals Fragen stellen. Der Test wird in mehrere Blöcke unterteilt, nach dem Ende jedes Blockes gibt es eine Pause.



**Vielen Dank für Ihre Mitarbeit**

## ANHANG C

### Fragebogen

**1. Wohnen Sie oder haben Sie jemals längere Zeit in der Nähe (Hörweite) einer Bahnstrecke gewohnt (länger als 1 Jahr)?**

**Wenn ja wie lange?**

**a. Wie lästig haben Sie den Lärm empfunden (1...gar nicht, 5 sehr )?**

**b. Wann war der Lärm am störendsten?**

- untertags**
- abends**
- in der Nacht**

**c. Wie weit entfernt ist oder war die Bahnstrecke von Ihrem Wohnort entfernt**

- <100 m**
- 100-200 m**
- 200-500 m**
- 500 1000 m**
- >1000 m**

**d. Wie hoch war das Verkehrsaufkommen (Züge pro Stunde)?**

**e. Um welche Strecke handelte es sich?**

**f. Wie hoch war der Anteil an Güterzügen?**

**2. Wie lärmempfindlich würden Sie sich auf einer Skala von 1 bis 5 einschätzen (1...gar nicht, 5 sehr lärmempfindlich)**

**3. Sind Sie regelmäßig anderen Lärmquellen ausgesetzt und wenn ja welcher Art von Lärm (Straße, Industrie ...)? Wenn ja welche?**

**a. Wie lästig haben Sie den Lärm empfunden (1...gar nicht, 5 sehr )?**



ANHANG D

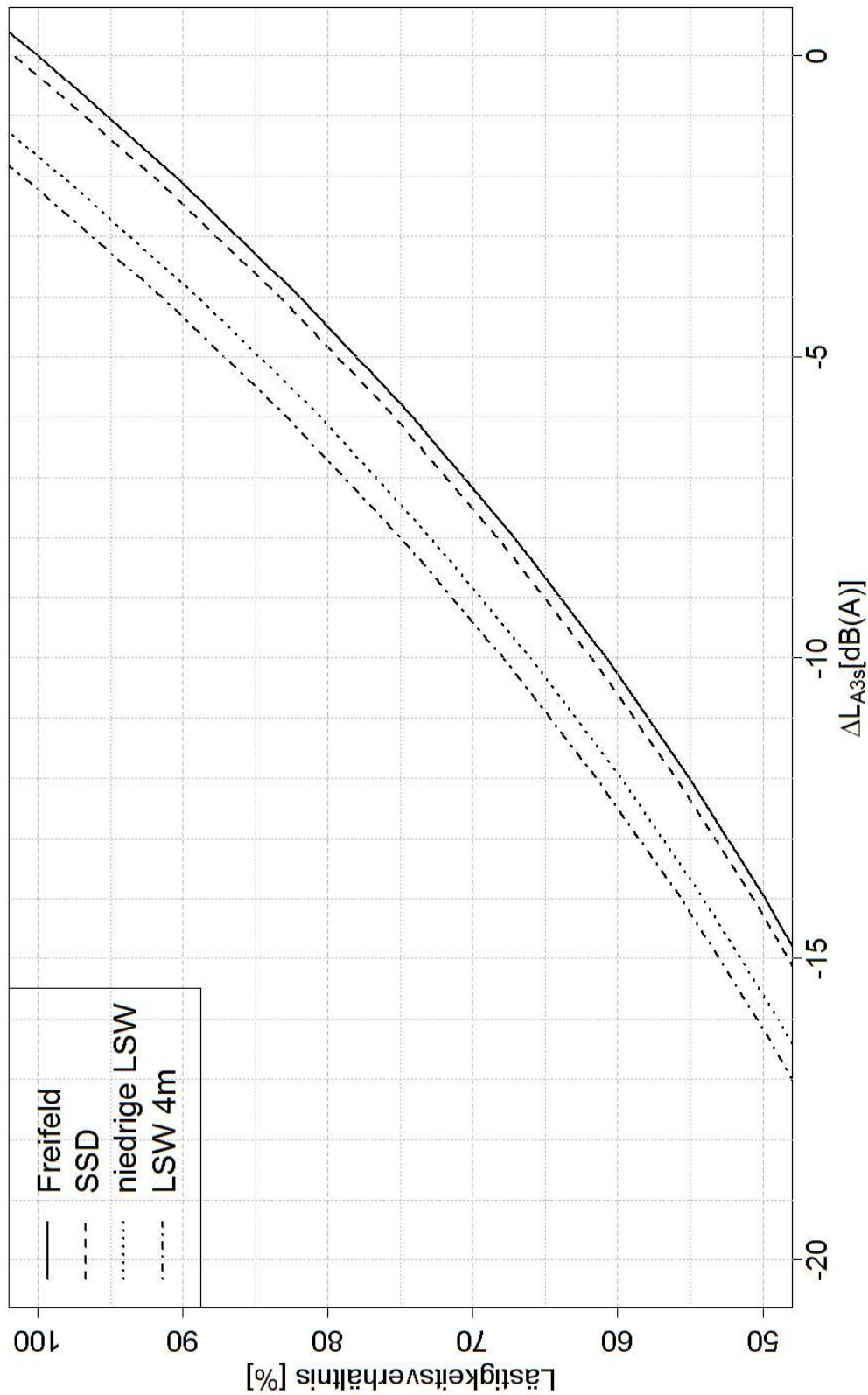


Abb. D-1: Bewertungsschema des Verhältnisses der empfundenen Lästigkeit basierend auf  $L_{Aeq}$  über Zugkategorie Personen- und Güterzug gemittelt

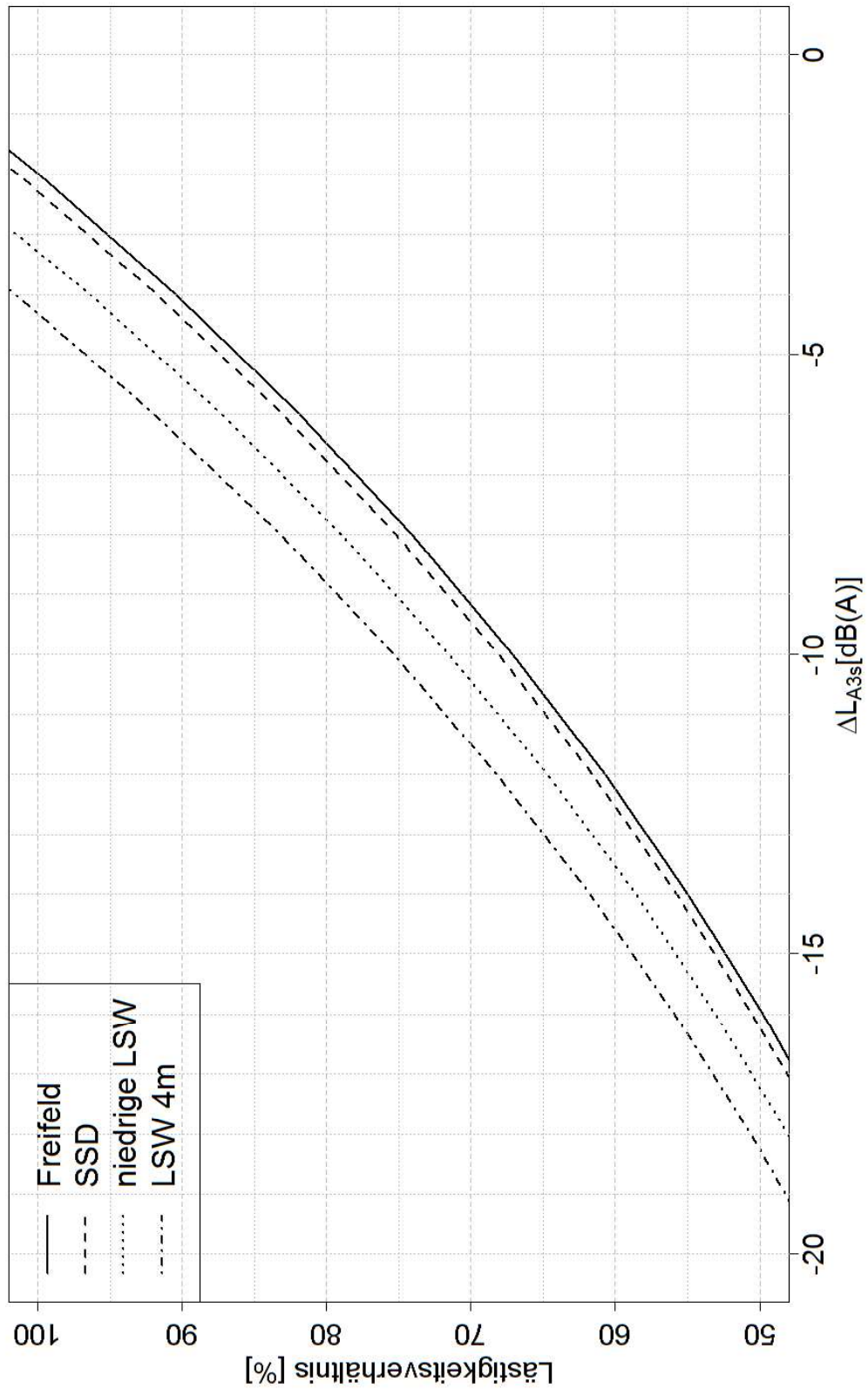


Abb. D-2: Bewertungsschema Personenzug basierend auf  $L_{A3s}$  bezogen auf Güterzug im Freifeld, welche als durchgezogene Linie in Abb. D-3 dargestellt ist

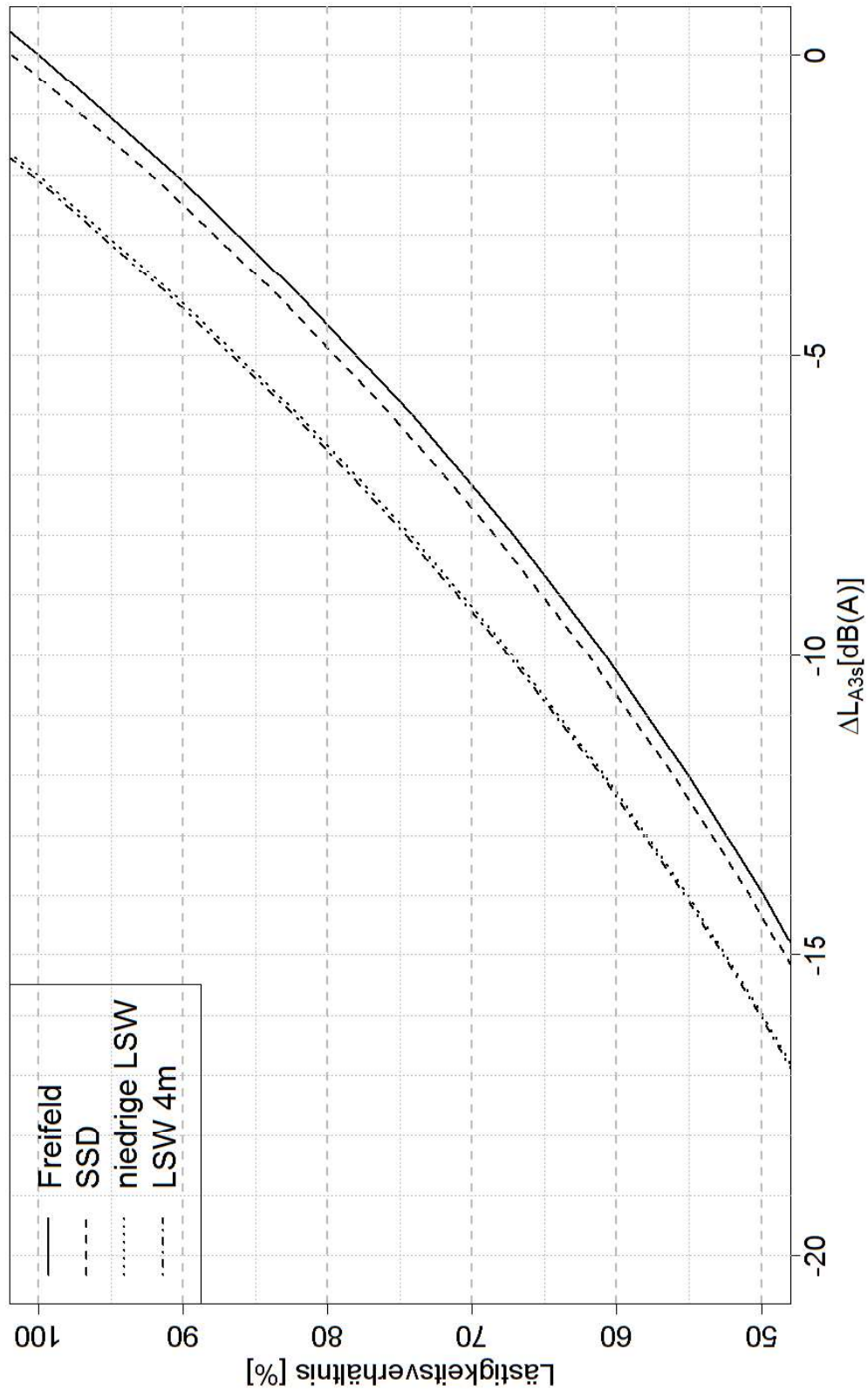
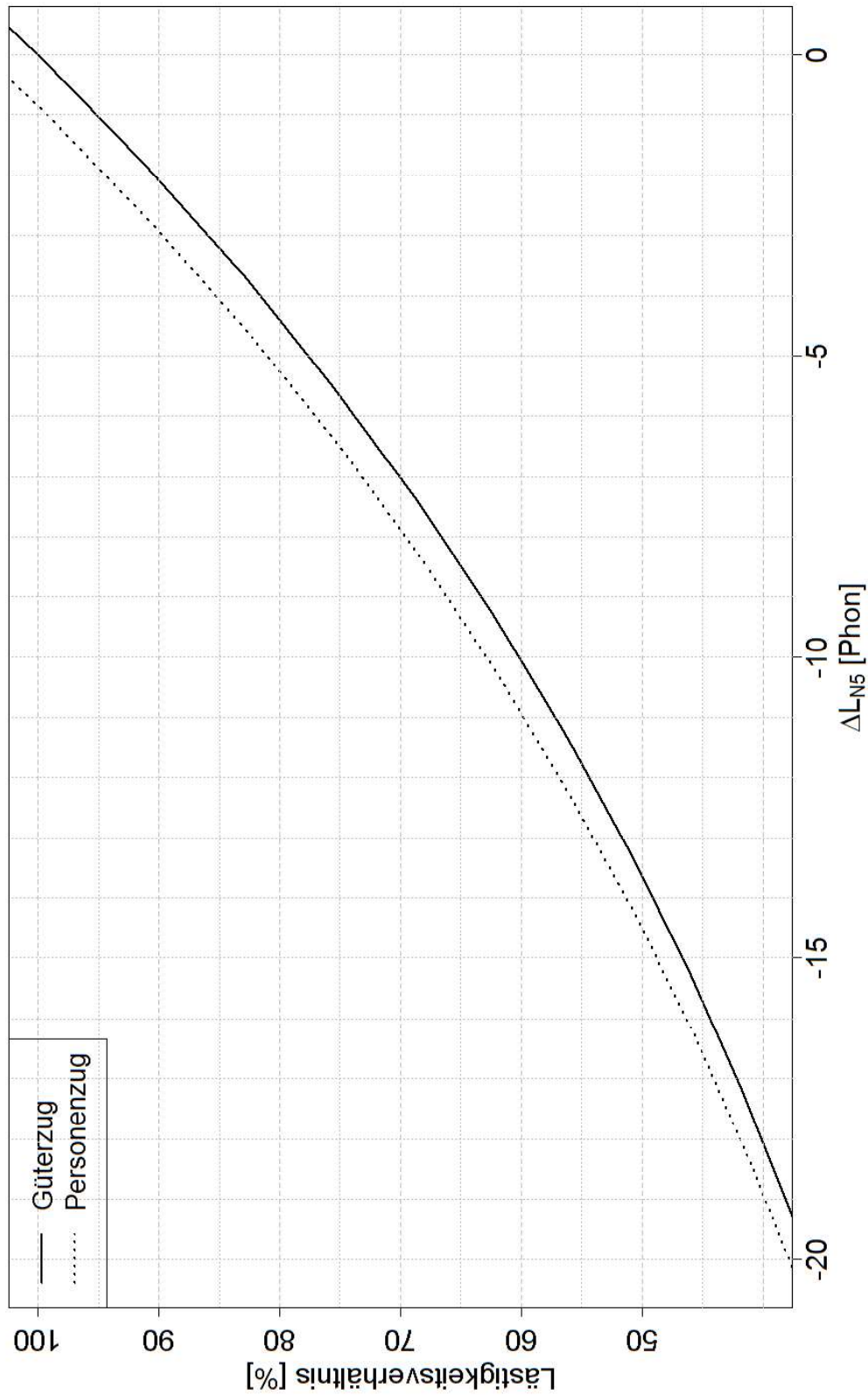


Abb. D-3: Bewertungsschema Güterzug basierend auf  $L_{A3s}$  bezogen auf Güterzug im Freifeld



**Abb. D-4: Bewertungsschema Lautheit (wird der Einfluss des Zugtyps nicht betrachtet, so ist die durchgezogene Linie zu verwenden, da der Lautstärkepegel in beiden Modellen gleich berücksichtigt wird)**

### Anwendungsbeispiele

Folgende zwei Beispiele sollen die Anwendung der Kurven verdeutlichen. Ausgangspunkt ist dabei immer die relative Lästigkeit von 1 (entspricht 100%). Es wird zunächst die Kurve für den Istzustand benötigt (z.B. Güterzugverkehr, Freifeld) und mittels dieser Kurve der relative A-Pegel oder der Spitzenlautstärkepegel des Ausgangszustands ermittelt. Soll auch eine Erhöhung der Lästigkeit zugelassen werden, so kann auch von 50% (entspricht 0,5) Lästigkeit ausgegangen werden. Eine Verdopplung der Lästigkeit führt dann zu 100%.

- Beispiel 1: es ist bekannt, um wie viel sich der A-Pegel oder der Lautstärkepegel verändert. In diesem Fall wird die Pegeländerung zum Istzustand hinzuaddiert (bzw. abgezogen bei einer Verbesserung) und somit der relative A-Pegel (Lautstärkepegel) des Sollzustandes bestimmt. Von hier aus kann nun mittels der Kurve für den Sollzustand (z.B. Güterzugverkehr, hohe Lärmschutzwand) die erreichte Änderung der Lästigkeit bestimmt werden.
- Beispiel 2: es ist bekannt, um wie viel sich die Lästigkeit verändern soll. In diesem Fall wird zusätzlich von der relativen Lästigkeit des Sollzustandes (z.B. 75%) ausgegangen und wie zuvor mittels der Kurve für den Sollzustand (z.B. Güterzugverkehr, hohe Lärmschutzwand) der relative A-Pegel für den Sollzustand ermittelt. Die Differenz der A-Pegel (Lautstärkepegel) für den Istzustand und den Sollzustand gibt das notwendige Verbesserungsmaß, das erreicht werden muss, wieder.