



**DIPLOMARBEIT**  
Master Thesis

**PSYCHOAKUSTISCHE ANALYSE VON FAHRGERÄUSCHEN  
IM EISENBAHNWESEN  
ZUR BEWERTUNG DES FAHRKOMFORTS**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

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

und

**Univ. Ass. Dipl.-Ing. Peter Tauschitz**

am Institut für Verkehrswissenschaften E230

Forschungsbereich für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Bernhard Raffel, BSc**

Mat.Nr.: 0626053

Schmiedgasse 45  
2020 Sonnberg

Wien, im April 2013

## Danksagung

---

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die mich bei der Durchführung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Besonderer Dank gilt meinen Diplomarbeitbetreuern Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Peter Tauschitz** und Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Thomas Maly**, sowie Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Norbert Ostermann** für die Ermöglichung dieser Forschungsarbeit am Institut für Verkehrswissenschaften.

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Heinz Stadler** sei für seine Unterstützung und Ratschläge zur Durchführung von Signifikanztests gedankt.

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Michael Mach**, Geschäftsfeld ITC der ÖBB Infrastruktur AG, sei großer Dank für die Beauftragung der Untersuchungen und für die Durchführung der Geräuschmessungen auf der Neubaustrecke Wien - St. Pölten ausgesprochen.

Ich möchte mich weiters bei allen **Probanden** recht herzlich bedanken, die bei den Hörversuchen im Rahmen dieser Diplomarbeit teilgenommen haben.

Meine Studienkollegen **Hanno Töll**, BSc, **Alexander Trimmel**, BSc und **Martin Zachs**, BSc, die mich auch während meines Auslandssemesters in Lissabon besuchten, sorgten regelmäßig für eine Aufheiterung des Studienalltags. Durch eine intensive Zusammenarbeit konnten einige Projektarbeiten sehr erfolgreich gemeinsam abgeschlossen werden.

Ich danke meinen Eltern, **Maria Raffel** und Ing. **Jakob Raffel**, für ihre großzügige Unterstützung während meines Studiums. Sie ermöglichten mir zu jeder Zeit eine absolut freie Wahl meiner Ausbildungsmöglichkeiten. Durch sie wurde ich auch stets an die wirklich wichtigen Dinge im Leben erinnert.

Nicht zuletzt danke ich meiner Freundin, **Katrin Zeller**, BA für ihre wertvolle Unterstützung während meines Studiums und im Rahmen dieser Arbeit. Sie ist in jeder Hinsicht eine Bereicherung für mein Leben.

*Bernhard Raffel*

## Kurzfassung

---

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird die subjektive Wahrnehmung von Fahrgeräuschen im Inneren eines Reisezugwagens durch die Fahrgäste untersucht. Dabei wird analysiert, ob Reisende während der Fahrt Streckenabschnitte mit unterschiedlicher Infrastruktur (wie verschiedenen Oberbauformen und Lärmschutzmaßnahmen) akustisch unterscheiden können und wie sie den Höreindruck eines Streckenabschnittes in Bezug auf die Lästigkeit bewerten. Damit wird der Frage nachgegangen, ob und in welchem Ausmaß der akustische Fahrkomfort durch verschiedene Elemente der Infrastruktur beeinflusst wird.

Im Rahmen der Inbetriebnahmefahrten (Innovationsmessfahrten) wurden entlang der Neubaustrecke Wien – St. Pölten mit einem Kunstkopfmesssystem im Fahrzeuginneren einer Railjet-Garnitur binaurale Tonaufnahmen der Geräuschkulissen erstellt. In psychoakustischen Hörversuchen wurden Hörsamples von definierten Streckenabschnitten gehörrichtig wiedergegeben und von Probanden bewertet. Die Versuchspersonen hatten dabei die Aufgabe in Paarvergleichen das angenehmere Geräusch zu identifizieren, sowie in Relationstests die Hörsamples nach deren Lästigkeit relativ zueinander zu beurteilen. Mit Hilfe einer statistischen Auswertung der Paarvergleichsurteile und der Lästigkeitsbewertungen aus den Relationstests konnten allgemeingültige Aussagen über akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen verschiedenen Streckenabschnitten abgeleitet werden.

So zeigen Lärmschutzmaßnahmen, wie Lärmschutzwände und -wälle, generell nur geringe Auswirkungen auf die subjektive Wahrnehmung. Im Gegensatz dazu kann der Schotteroberbau im Vergleich zur Festen Fahrbahn bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h als akustisch angenehmere Oberbauform für den Fahrgast identifiziert werden, wobei diese Unterscheidbarkeit bei höheren Geschwindigkeiten nicht mehr auftritt. Werden bei einer Festen Fahrbahn im Tunnel Gleisabsorber installiert, so hat dies einen positiven Effekt auf die akustische Wahrnehmung. Im direkten Vergleich von Lainzer Tunnel und Wienerwaldtunnel kann jedoch gezeigt werden, dass das Innengeräusch im Lainzer Tunnel aufgrund der geringeren Regelgeschwindigkeit und des Tunnelquerschnittes, trotz des Fehlens von Gleisabsorber, als angenehmer empfunden wird.

Des Weiteren wurde die Eignung von verschiedenen Größen zur Bewertung der Lästigkeit untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Korrelationseigenschaften von Schalldruckpegel, sowie von weiteren psychoakustischen Parametern (Lautheit, Schärfe, Rauigkeit und Tonalität) mit den Lästigkeitsbewertungen der Probanden verglichen. Es zeigt sich, dass einige psychoakustische Parameter die Empfindung der Lästigkeit häufig gleich gut oder sogar besser abbilden.

## Abstract

---

This research explores the subjective identification of operating noise within the interior of railway passenger cars by its occupants. It analyzes whether or not passengers can make audible distinctions between sections of different railway infrastructure (such as various forms of superstructure and noise reduction measures) during their journey and how they regard the aural impression in changes to sections of track in relation to the level of annoyance. Thus the question, if and in which proportion is auditory comfort influenced by various elements of the infrastructure, is studied.

As part of the commissioning runs along the newly constructed route of Vienna to St. Pölten, binaural recordings of the soundscapes were obtained with an artificial head measurement system in the interior of a Railjet-car. In psychoacoustic listening tests sound samples of defined sections were reproduced aurally and rated by subjects. The subjects had the task of ascertaining the more pleasant noise level in paired comparisons, as well as evaluating sounds according to their annoyance, proportional to each other in the relation tests. General statements of acoustic perception variations between different track sections could be derived from statistical analysis of the paired comparison judgments and the annoyance assessments of the relation tests.

Therefore noise reducing measures, such as noise barriers and embankments, generally demonstrate only a low impact on the subjective perception. In contrast the ballasted substructure, compared to slab track, is identified as a more acoustically comfortable track system for passengers at a speed of 200 km/h, this discernment does not occur at higher speeds. The installation of rail track absorbers on a slab track has a positive influence on the acoustic perception. In the direct comparison of Lainzer Tunnel and Wienerwaldtunnel can be shown, that the interior noise within Lainzer Tunnel is perceived, due to the lower regular speed and the tunnel cross section, as more audibly agreeable, despite the lack of track absorbers.

Furthermore the suitability of different sizes to assess the annoyance has been studied. For this purpose the correlation properties of sound pressure level, as well as other psychoacoustic parameters (loudness, sharpness, roughness and tonality), were compared with the annoyance assessments. It can be seen that some psychoacoustic parameters represent the sensation of annoyance often equally or even better.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Aufgaben und Ziel der Arbeit .....	2
2	Status quo der Schallbewertung in Schienenfahrzeugen.....	3
2.1	Vorschriften für die Lärmzulässigkeit.....	3
2.2	Psychoakustik im Eisenbahnwesen .....	5
3	Akustische Grundlagen.....	6
3.1	Definition von Schall, Ton, Geräusch und Rauschen .....	6
3.2	Die logarithmische Darstellung des Schalldruckpegels und Wahrnehmungsgrenzen .....	6
3.3	Frequenzbewertete Schalldruckpegel.....	8
3.4	Dauerschallpegel .....	9
3.5	Psychoakustische Parameter.....	10
3.5.1	Lautheit.....	10
3.5.2	Schärfe.....	12
3.5.3	Rauhigkeit.....	13
3.5.4	Tonalität.....	14
3.6	Wohlklang und psychoakustische Lästigkeit .....	15
3.7	Binaurales Gehör des Menschen.....	15
3.8	Kunstkopftechnologie .....	17
3.8.1	Aufnahmen mit dem Kunstkopf .....	17
3.8.2	Wiedergabe der Kunstkopf-Aufnahmen .....	18
4	Messung der Geräuschkulissen .....	20
4.1	Messstrecke.....	20
4.2	Messgeschwindigkeiten .....	22
4.3	Messfahrzeug und Messposition.....	23
4.4	Kunstkopfmesssystem.....	25
5	Erstellung der Hörproben.....	26
5.1	Zu untersuchende Streckenabschnitte und Infrastrukturelemente .....	26
5.2	Definition der Parameter-Sets.....	26
5.3	Überblick aller Messfahrten .....	27
5.4	Auswahl charakteristischer Streckenabschnitte .....	28
5.4.1	Analyse der Pegelverläufe .....	28
5.4.2	Übersicht der charakteristischen Streckenabschnitte .....	31

5.5	Vorgangsweise für die Erstellung der Hörsample-Dateien .....	33
6	Hörversuche .....	35
6.1	Objektivität der Beurteilungen durch Versuchspersonen.....	35
6.2	Steuerung der Geräuschwiedergabe.....	35
6.3	Arten der Vergleichstests .....	36
6.3.1	Paarvergleich .....	36
6.3.2	Relation.....	38
6.4	Aufbau und Fragestellungen der Hörversuche .....	39
6.5	Testläufe .....	40
6.6	Durchführung der Hörversuche .....	41
6.6.1	Durchführungsort .....	41
6.6.2	Versuchspersonen .....	41
6.6.3	Durchführungsablauf.....	43
7	Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche.....	44
7.1	Ergebnisse der Paarvergleiche .....	45
7.1.1	Statistische Auswertung der Paarvergleiche.....	46
7.1.2	Paarvergleich freie Strecke mit einseitigem/beidseitigem Wall .....	48
7.1.3	Paarvergleich Feste Fahrbahn/Schotteroberbau .....	52
7.1.4	Paarvergleich mit/ohne 4m Lärmschutzwand .....	55
7.1.5	Paarvergleich 2-gleisiger Tunnel mit/ohne Gleisabsorber bei gleicher Geschwindigkeit .....	59
7.1.6	Paarvergleich 1-gleisiger Tunnel mit/ohne Gleisabsorber bei unterschiedlicher Geschwindigkeit .....	62
7.2	Ergebnisse der Relationen.....	66
7.2.1	Statistische Auswertung der Relationen .....	67
7.2.2	Unterschiede zwischen freier Strecke und Tunnel.....	69
7.2.3	Unterschiede auf freier Strecke bei unterschiedlichen Streckenparametern .....	71
7.2.4	Unterschiede von Streckenabschnitten mit und ohne 4m Lärmschutzwand .....	77
7.2.5	Unterschiede von Streckenabschnitten auf freier Strecke mit hoher Geschwindigkeit und im Tunnel mit geringerer Geschwindigkeit .....	79
7.2.6	Unterschiede verschiedener Tunnelabschnitte mit und ohne Gleisabsorber .....	82
7.2.7	Unterschiede zwischen Fester Fahrbahn und Schotteroberbau auf freier Strecke bei hohen Fahrgeschwindigkeiten .....	91
8	Vergleich der psychoakustischen Parameter und des Schalldruckpegels mit der subjektiven Wahrnehmung.....	97

8.1	Korrelationen der psychoakustischen Parameter und des Schalldruckpegels mit den Lästigkeitsbewertungen .....	97
8.2	Vergleich der Korrelationseigenschaften von Pegel und Lautheit .....	98
8.3	Vergleich der Korrelationseigenschaften von Rauigkeit, Schärfe, Tonalität und Lautheit .....	100
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	103
10	Quellenverzeichnis .....	106
Anhang A.	Tabelle mit Anfangs- und Endzeiten der Hörsamples .....	108
Anhang B.	Instruktionen für den Hörversuch .....	109
Anhang C.	Feedback-Formular nach dem Hörversuch .....	110
Anhang D.	Übersicht des Hörversuchprogramms und der verwendeten Hörsamples.....	111
Anhang E.	Bewertungsdaten und –differenzen der Relationen.....	114
Anhang F.	Korrelationen aller Parameter mit der Lästigkeit in den 6er- und 4er-Relationen ....	127
Anhang G.	Parameter und Lästigkeitsbewertungen der Hörsamples in den 6er-Relationen.....	128

## 1 Einleitung

Ein Reisender nimmt während einer Zugfahrt verschiedenste Geräusche wahr. Darunter fallen Geräusche, die von anderen Fahrgästen hervorgerufen werden, spezifische Wagengeräusche und auch Fahrgeräusche, die abhängig von der jeweiligen Infrastrukturausstattung der Eisenbahnstrecke sind. Der Einfluss dieser infrastruktureitigen Fahrgeräusche auf den Fahrkomfort der Reisenden soll in dieser Arbeit genauer untersucht werden.

Ein hoher Fahrkomfort fördert generell die Reisequalität und die Akzeptanz des Verkehrsmittels. Durch eine psychoakustische Analyse der Fahrgeräusche im Wageninneren können die akustischen Wahrnehmungen der Fahrgäste, die durch das Befahren der Eisenbahninfrastruktur entstehen, untersucht und deren Auswirkungen auf den Fahrkomfort ermittelt werden. Die Empfindung von hörbaren Schwingungen (Geräuschen) durch die Reisenden steht unter dem Begriff Fahrkomfort im Vordergrund. Andere Aspekte, die ebenfalls zum Wohlbefinden eines Reisenden während einer Zugfahrt werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

Meist wird versucht das Fahrgeräusch im Wageninneren, so weit als wirtschaftlich vertretbar, zu reduzieren. Dies ist abhängig vom Schalldämmmaß des Wagens und vom Zustand der befahrenen Infrastruktur. Derzeit gibt es für die Schallbewertung in einem Reisezugwagen definierte Grenzwerte, die in Form eines A-bewerteten Schalldruckpegels angegeben werden. Abhängig von der jeweiligen Fahrgeschwindigkeit dürfen verschiedene Pegel nicht überschritten werden. Geräusche mit ähnlichem Schalldruckpegel können jedoch als unterschiedlich lästig empfunden werden. Man vergleiche beispielsweise Baustellenlärm mit Opernmusik bei gleichem Schalldruckpegel. Für die Beurteilung des Fahrkomforts während einer Zugfahrt ist somit die subjektive Wahrnehmung der auftretenden Geräuschkulissen durch die Fahrgäste entscheidend.

Für die Aussagekraft von gemessenen physikalischen Pegeln in Bezug auf die Lästigkeit von Geräuschen, muss untersucht werden, wie diese mit der subjektiven Wahrnehmung von Geräuschen während einer Eisenbahnfahrt korrelieren. Diese Korrelationen sind vermutlich auch von weiteren bereits bekannten psychoakustischen Parametern der Geräusche abhängig, wie beispielsweise der Lautheit, Rauigkeit und Schärfe. Wenn durch Zuhilfenahme von psychoakustischen Bewertungsmethoden die Lästigkeit der Fahrgeräusche besser abgebildet werden kann, wäre dies eine Bestätigung, dass zur Bewertung des Fahrkomforts eine psychoakustische Analyse der Geräusche durchgeführt werden sollte. Es wäre jedoch auch möglich, dass der Schalldruckpegel eines Geräusches der beste Indikator für dessen Lästigkeit ist. In diesem Fall wäre es ausreichend den A-bewerteten Schalldruckpegel im Inneren eines Wagens für die Bewertung des Fahrkomforts heranzuziehen.

### 1.1 Aufgaben und Ziel der Arbeit

Für die psychoakustische Analyse der Fahrgeräusche auf einer Eisenbahnstrecke soll untersucht werden, ob es Korrelationen zwischen bestimmten Streckenabschnitten und der subjektiven Geräuschempfindung im Inneren eines Reisezugwagens gibt. Die Untersuchungen sollen auch Auskunft darüber geben, in wie weit verschiedene Oberbauformen und Infrastrukturelemente für den Fahrgast überhaupt akustisch wahrnehmbar sind und wie das Befahren bestimmter Streckenabschnitte während der Fahrt empfunden wird. Da weite Teile von Eisenbahnstrecken heutzutage mit Lärmschutzmaßnahmen ausgestattet werden, ist es auch wichtig deren Einfluss auf die Geräuschwahrnehmung im Wageninneren zu erforschen. Beispielsweise ist zu klären, ob Lärmschutzwände vom Fahrgast wahrgenommen werden und ob sie als störend einstuftbar sind. Ein weiterer wichtiger Effekt, der untersucht werden soll ist, ob Absorberplatten zwischen den Gleisen im Tunnel einen wesentlichen Beitrag für den Fahrkomfort leisten.

Zu diesem Zweck sollen auf einer Teststrecke binaurale Aufnahmen der Geräuschkulissen während der Fahrt in einem Reisezugwagen aufgezeichnet werden (siehe Kapitel 4).

Es sollen anschließend Hörsamples erstellt werden, die bestimmten Streckenabschnitten entlang der Messstrecke zuzuordnen sind. Die Abschnitte sollen definierte Streckeneigenschaften aufweisen. Die Hörproben sollen repräsentativ für den jeweilig zu untersuchenden Querschnitt der Strecke sein. Daher müssen Streckenabschnitte gefunden werden in denen die Geräuschsituation für die Länge der Hörprobe konstant ist. Der gewählte Abschnitt darf keine kurzfristigen Störgeräusche, wie beispielsweise eine Weichenüberfahrt, beinhalten (siehe Kapitel 5).

Aussagen über die subjektive Empfindung der Geräusche während der Fahrt sollen durch Hörversuche mit Probanden erlangt werden (siehe Kapitel 6). In diesen Hörversuchen sollen die Geräuschsituationen möglichst realistisch wiedergeben werden. Während des Hörversuches sollen die Probanden die Möglichkeit haben, die Hörsamples zu vergleichen und zu bewerten. Dies soll idealerweise in Form einer eigenen Programmoberfläche verwirklicht werden, die eine beliebige Abfolge und Wiedergabe der Geräuschstimuli möglich macht.

Die Ergebnisse der Hörversuche sollen anschließend statistisch ausgewertet werden, um Rückschlüsse auf die allgemeine Wahrnehmung von Geräuschen zu erlauben (siehe Kapitel 7).

Weiters soll analysiert werden welche psychoakustischen Parameter der Hörsamples sich für die Bewertung der Lästigkeit und somit für die Beurteilung des akustischen Fahrkomforts am besten eignen. Dies soll Auskunft darüber geben, ob die psychoakustischen Parameter mehr Aussagekraft über die Lästigkeit der Schallereignisse liefern, als der A-bewertete Schalldruckpegel.

## 2 Status quo der Schallbewertung in Schienenfahrzeugen

Eisenbahnstrecken in Österreich bestehen aus unterschiedlichen Infrastrukturelementen und Streckenabschnitten. Neben Tunnel und Brücken in verschiedenen Ausführungsvarianten gibt es unterschiedliche Oberbauformen (Schotterbett mit Holz- oder Betonschwellen, Feste Fahrbahnen, etc.). Einzelne Streckenabschnitte können daher sehr unterschiedliche Charakteristika in Bezug auf das Fahrgeräusch aufweisen. Die zunehmende Ausstattung von Streckenabschnitten mit infrastrukturseitigen Lärmschutzmaßnahmen, wie Lärmschutzwänden und -wällen (mit unterschiedlicher Bauart, Höhe und Entfernung) sowie Absorberplatten zwischen den Gleisen, kann ebenfalls die Geräuschkulisse im Zuginneren beeinflussen.

### 2.1 Vorschriften für die Lärmzulässigkeit

Laut UIC Merkblatt 660 VE „Bestimmung zur Sicherung der technischen Verträglichkeit der Hochgeschwindigkeitszüge“ [1] dürfen in den Fahrgasträumen, unabhängig von der Fahrzeugbauart (Abteilwagen oder Großraumwagen), die Schallpegel in Tabelle 1 nicht überschritten werden. Die Messungen müssen bei geschlossenen Türen und auf gut unterhaltenen Gleisen durchgeführt werden.

Maximale Fahr- geschwindigkeit	FAHRT AUF FREIER STRETCKE Lärmpegel in dB(A) <sup>a</sup>			TUNNELFAHRT <sup>b</sup> Lärmpegel in dB(A) <sup>a</sup>		
	Inmitten der Fahrgasträume 1. und 2. Kl.	Vorräume	Wagenüber- gänge	Inmitten der Fahrgasträume 1. und 2. Kl.	Vorräume	Wagenüber- gänge
300	68 Zielwert 65	80 Zielwert 75	82 Zielwert 80	75 Zielwert 72	85 Zielwert 82	87 Zielwert 85
250	65	75	80	73 Zielwert 70	82 Zielwert 80	85 Zielwert 82
Beim Stand und Betrieb der Klimaanlage und Aggregate	55	60	60	-	-	-

a. Messungen bei einer Höhe von 1,60 m über dem Fußboden.

b. Es handelt sich um Tunnel: eingleisige Tunnel: Querschnitt 55 m<sup>2</sup>; doppelgleisige Tunnel; Querschnitt 90 m<sup>2</sup>.

Tab. 1. Zulässige Schallpegel in Fahrgasträumen lt. UIC 660 VE [1]

Es ist zu beachten, dass das UIC Merkblatt 660 VE eine europäische Vereinbarung für Hochgeschwindigkeitszüge ist. Als Hochgeschwindigkeitszüge werden jene Züge bezeichnet, die für Fahrgeschwindigkeiten von mindestens 250 km/h geeignet sind. In Österreich werden aktuell Railjet - Reisezüge eingesetzt, welche für Höchstgeschwindigkeiten von 230 km/h ausgelegt sind. Für Österreich ist daher die Rechtsvorschrift über die Lärmzulässigkeit von Schienenfahrzeugen (Schienenfahrzeug-Lärmzulässigkeitsverordnung – SchLV [2]) heranzuziehen. Darin werden 1. Klasse - und 2. Klasse - Wagen in verschiedene Kategorien unterteilt, für welche unterschiedliche Außen- und Innenschalldruckpegel zulässig sind.

## Kapitel 2 - Status quo der Schallbewertung in Schienenfahrzeugen

Für einen Reisezugwagen der Kat. 1 (**1. Klasse**) sind lt. SchLV ein Grenzwert von **63 dB(A)** und für einen Wagen der Kat. 2 (**2. Klasse**) ein Grenzwert von **66 dB(A)** einzuhalten. Diese Grenzwerte dürfen für Geschwindigkeiten über 120 km/h um einen geschwindigkeitsabhängigen Korrekturwert erhöht werden, der in der letzten Spalte der Tabelle 2 dargestellt ist.

PEGELZUSCHLÄGE GEMÄSS § 7			
Geschwindigkeit (km/h)	Pegelzuschläge		
	nach Formel dB (A)	gerundet (Versuch (2)) dB (A)	Korrekturwert (Versuch (4)) dB (A)
80	0,0	0	0
90	1,5	2	0
100	2,9	3	0
110	4,1	4	0
120	5,3	5	0
130	6,3	6	3
140	7,3	7	4
150	8,2	8	4
160	9,0	9	5
170	9,8	10	5
180	10,6	11	6
190	11,3	11	6
200	11,9	12	6

Formel  $Z = 30 \lg(V(\text{km/h})/80) \text{ dB (A)}$

Tab. 2. Pegelzuschläge für den zulässigen Innenschalldruckpegel lt. SchLV [2]

Bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h darf der zulässige Grenzwert beispielsweise um 5 dB(A) erhöht werden. Für Geschwindigkeiten zwischen 220 und 250 km/h ist bei Verwendung der in Tabelle 2 angegebenen Formel, ein Zuschlag von 7 dB(A) zulässig.

Die resultierenden zulässigen Innenschalldruckpegel, laut Schienenfahrzeug-Lärmzulässigkeitsverordnung (SchLV) für Reisezugwagen der 1. und 2. Klasse, sind für einige Geschwindigkeiten in Tabelle 3 zusammengefasst. Diese Grenzwerte gelten jedoch nur für Abschnitte auf freier Strecke. Für zulässige Innenschalldruckpegel im Tunnel gibt es laut SchLV keine Vorgaben.

Geschwindigkeit km/h	1. Klasse dB(A)	2. Klasse dB(A)
100	63	66
160	68	71
200	69	72
230	70	73
250	70	73

Tab. 3. Zulässige Schalldruckpegel bei Anwendung der Formel gem. SchLV [2]

## 2.2 Psychoakustik im Eisenbahnwesen

Psychoakustische Untersuchungen werden seit längerem im Automobilbau zur Optimierung der Geräuschqualität im Fahrzeug eingesetzt. Hier wird mit zeit- und kostenintensiven Hörversuchen gearbeitet und es wird versucht mit daraus abgeleiteten objektiven Metriken<sup>1</sup> die subjektive Wahrnehmung zu modellieren. Wenn diese Metriken die subjektive Beurteilung ausreichend genau abbilden, stellen sie eine preiswerte und schnelle Alternative zu Hörversuchen dar.

Im Eisenbahnwesen sind bislang keine nennenswerten Forschungsarbeiten mit psychoakustischen Analysen zur Bewertung des Fahrkomforts für Reisende durchgeführt worden. Eine aktuelle Studie **sysBahnLärm**, unter Mitwirkung der TU Wien, beschäftigte sich mit der Bekämpfung von Bahnlärm [3]. Weiters wurden bei der **schalltechnischen Untersuchung der ÖBB-Eisenbahnbrücke Seebach-Villach** psychoakustische Methoden zur gehörbezogenen Bewertung des Lärms verwendet [7]. Der Fokus beider Untersuchungen liegt jedoch auf Emissionen bzw. Immissionen, welche die Anrainer von Eisenbahnstrecken betreffen. Der akustische Fahrkomfort der Reisenden wird neben dem Instandhaltungszustand der Strecke auch wesentlich durch vom Schalldämmmaß des Fahrzeuges beeinflusst. Durch eine möglichst hohe Schallisolation wird dem Problem der Schallentwicklung jedoch nicht an der Quelle entgegengewirkt.

---

<sup>1</sup> „Da komplexe Bewertungskriterien, wie Geräuschqualität oder Lästigkeit, oft nicht hinreichend mit einer physikalischen Größe erfasst werden können, werden häufig Metriken entwickelt, in denen mehrere physikalische Größen kombiniert sind. Eine Metrik ist ein Messwert für ein komplexes Merkmal, der aus den Messwerten mehrerer Indikatorvariablen zusammengesetzt wird.“ [9]

## 3 Akustische Grundlagen

### 3.1 Definition von Schall, Ton, Geräusch und Rauschen

**Schall** sind mechanische Schwingungen oder Wellen in einem elastischen Medium (z.B. Luft, Flüssigkeit, Festkörper). Befinden sich diese im Hörbereich des Menschen spricht man vom physikalischen Phänomen Hörschall. Ein gesunder, normal hörender Mensch kann Schwingungen mit einem Schalldruckpegel von 0 bis 140 dB, in einem Frequenzbereich von 16 bis 20 000 Hz, wahrnehmen. Schwingungen mit niedrigeren Frequenzen werden als Infraschall und mit höheren Frequenzen als Ultraschall bezeichnet.

Von einem **Ton** spricht man, wenn die Schallschwingungen einen sinusförmigen und monofrequenten Verlauf besitzen.

Ein **Geräusch** besteht aus einer Vielzahl von Schwingungen (Tönen) mit unterschiedlicher Frequenz. Die Intensität und die Frequenzzusammensetzung können zeitlich konstant oder veränderlich sein, je nach dem spricht man von gleichbleibenden oder schwankenden Geräuschen.

Befinden sich eine Vielzahl von Einzelschwingungen in einem bestimmten Frequenzbereich ohne Phasenbeziehung und mit statistisch wechselnder Intensität, so bezeichnet man dies als **Rauschen**. Je nachdem wie weit sich der umfasste Frequenzbereich der Schwingungen erstreckt, spricht man von Schmalband-, oder Breitbandrauschen. [6]

### 3.2 Die logarithmische Darstellung des Schalldruckpegels und Wahrnehmungsgrenzen

Die untere Hörschwelle des menschlichen Gehörs liegt bei einem Schalldruck von etwa 0,0002  $\mu\text{bar}$  (entspricht 20  $\mu\text{Pa}$ ). Der höchste zu ertragende Schalldruck (Schmerzgrenze) befindet sich bei 2000  $\mu\text{bar}$  (entspricht 200 Pa). Der Schalldruck der Schmerzgrenze ist somit um das zehnmillionenfache größer als jener der unteren Hörschwelle. Um diesen großen Wertebereich der Schallintensitäten abbilden zu können, verwendet man eine logarithmische Skala [4]. Dazu wird der Schalldruck  $p$  in ein Verhältnis zu der konstanten Bezugsgröße  $p_0$ , der unteren Hörgrenze (20  $\mu\text{Pa} = 10^{-5}$  Pa), gesetzt. Folgende Gleichung gibt den logarithmischen Zusammenhang zwischen dem Schalldruck  $p$  (in Pa) und dem Schalldruckpegel  $L$  (in dB) an. [5]

$$L = 20 \log(p/p_0) \text{ dB}$$

Durch die Benutzung der logarithmischen Dezibel-Skala besitzt beispielsweise ein Schallereignis mit 1000-fachem Schalldruck lediglich einen um 60 dB höheren Schalldruckpegel.

## Kapitel 3 - Akustische Grundlagen

Um die Zuordnung von Pegelwerten zu alltäglichen Geräuschen zu ermöglichen, zeigt Abbildung 1 einige Beispiele. Die Werte werden dabei als A-bewerteter Schalldruckpegel angegeben (siehe Kapitel 3.3).

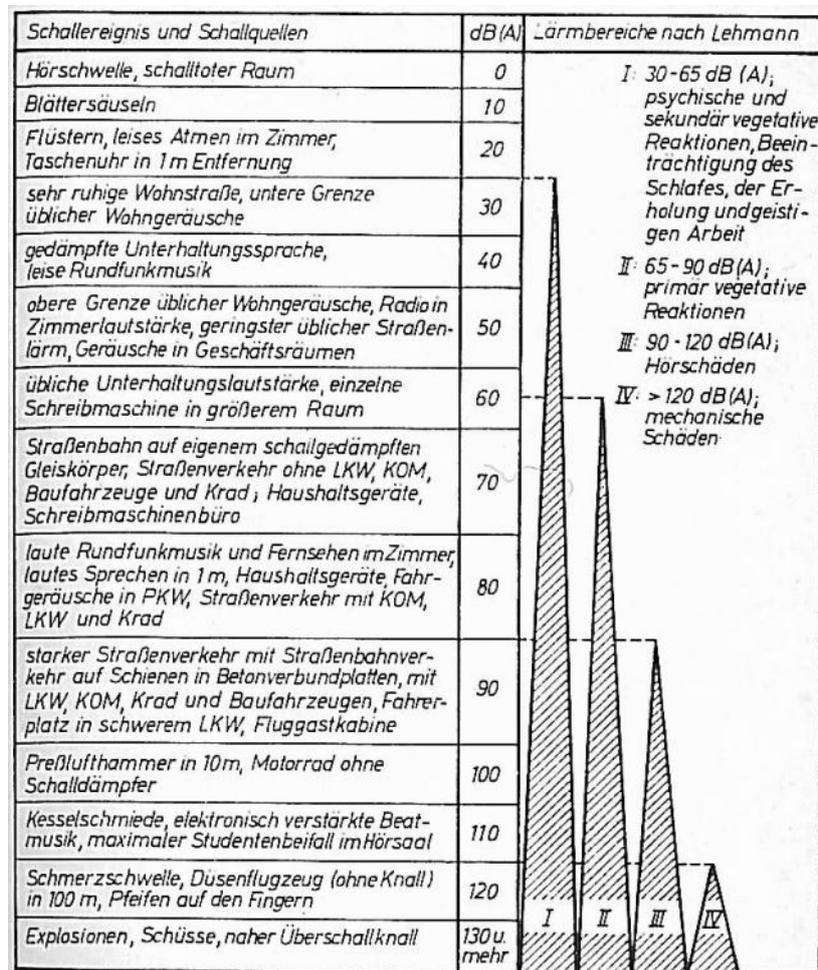


Abb. 1. A-bewertete Schalldruckpegel verschiedener Schallquellen [4]

Bei einem Experiment zur Ermittlung der Wahrnehmungsgrenzen von Geräuschen wurde Versuchspersonen schmalbandiges Rauschen mit unterschiedlichen Schalldruckpegeln vorgespielt. In einem Pegelbereich von 40 dB und einer Mittenfrequenz von 1 kHz konnte ein Pegelunterschied von:

- 1 dB gerade noch wahrgenommen werden
- 3 dB wahrgenommen werden und
- 10 dB führten zu einer Verdopplung des Lautheitseindruckes.

Diese Ergebnisse sind nur gültig beim direkten Vergleich (Paarvergleich) von zwei gleichartigen Geräuschen (gleiche Zeit- und Frequenzstruktur), bei welchen nur die Intensitäten (Pegel) unterschiedlich sind. [6]

### 3.3 Frequenzbewertete Schalldruckpegel

Mit gebräuchlichen Schallpegelmessgeräten können im Allgemeinen eine Vielzahl an akustischen Messgrößen ermittelt werden. Jedoch findet überwiegend der Schalldruckpegel mit der A-Bewertung zur Beschreibung eines Schallereignisses mit einem Einzahlwert Anwendung, weshalb im Folgenden näher auf die Frequenzbewertung eingegangen wird.

Ein Ton mit gleichem Schalldruckpegel  $L_T$  kann in Abhängigkeit der Frequenz unterschiedlich laut empfunden werden. Dies ist durch die Physiologie des menschlichen Gehörs bedingt und aus den „Kurven gleicher Lautstärke“ (Abbildung 2) ersichtlich. Die dargestellten Kurven besitzen jeweils einen konstanten Lautstärkepegel  $L_N$ , welcher in der Einheit „phon“ angegeben wird. Der Lautstärkepegel  $L_N$  entspricht definitionsgemäß bei einem 1 kHz-Ton dem Schalldruckpegel  $L_T$ .

Die Kurven gleicher Lautstärke (oder auch Phon-Kurven genannt) zeigen, dass das menschliche Gehör Geräusche mit Frequenzen um 4 kHz wesentlich lauter wahrnimmt, als jene mit sehr hohen oder tiefen Frequenzen. Die gestrichelte Kurve repräsentiert die A-Bewertung, welche bei sehr leisen Tönen (20 phon) eine gute Übereinstimmung mit den Kurven gleicher Lautstärke aufweist. Bereits bei mittlerer Lautstärke (60 phon) werden durch die A-Bewertung tieffrequente Töne hinsichtlich ihrer Lautstärke wesentlich unterschätzt. [8]

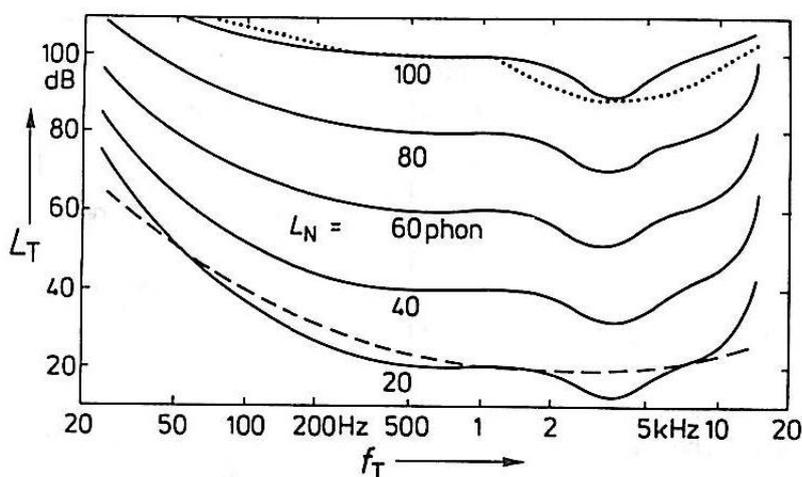


Abb. 2. Kurven gleicher Lautstärke und A-Bewertung [6]

Um dem Effekt Rechnung zu tragen, dass die Frequenzempfindlichkeit von der Geräuschstärke (Pegel) abhängig ist, hat man für drei Pegelbereiche jeweils eine Korrekturfunktion festgelegt. Diese Korrekturkurven werden mit Großbuchstaben A bis C bezeichnet. Die D-Bewertung wurde hauptsächlich zur Beurteilung von Fluglärm eingeführt und ist in Abbildung 2 punktiert dargestellt.

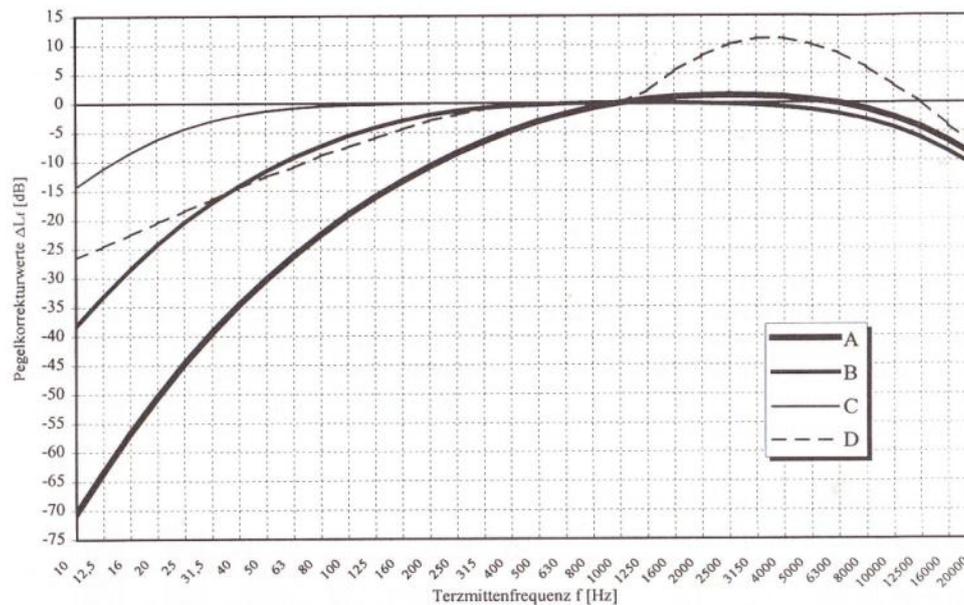


Abb. 3. Frequenzbewertungskurven A bis D [6]

In Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz werden für die gewählte Bewertungskurve international genormte Korrekturwerte zum gemessenen Terzpegel addiert bzw. subtrahiert. Die Korrekturwerte der A-Bewertung sind von der 40 phon - Kurve abgeleitet, jene der B-Bewertung von der 70 phon - Kurve und jene der C-Bewertung von der 100 phon - Kurve.

In der Praxis hat sich aus Gründen der Vergleichbarkeit die A-Bewertung für alle Geräuscharten und Pegelbereiche durchgesetzt. A-bewertete Schalldruckpegel gelten aufgrund der angenommenen Vereinfachungen jedoch nur bei schmalbandigen Geräuschen (Einzeltöne), deren Lautstärke unter 40 phon liegt. Im Alltag treten durchaus auch Geräusche mit großen Frequenzbereichen auf, wodurch man auf andere Verfahren zur Bestimmung der empfundenen Lautstärke angewiesen ist, wie beispielsweise der Lautheit nach Zwicker (siehe Kapitel 3.5.1). [6]

### 3.4 Dauerschallpegel

Die Bestimmung des energieäquivalenten Dauerschallpegels beruht auf der Mittelung der Geräuschenergie über einen vorher definierten Zeitraum. Dementsprechend kann sich für Geräusche der gleiche energieäquivalente Dauerschallpegel ergeben, obwohl die zeitliche Verteilung, die Anzahl und die Intensität der Geräusche variieren. Für die menschliche Wahrnehmung von Geräuschen ist der Dauerschallpegel damit meist kein guter Indikator, da das Gehör nicht über einen definierten Zeitraum bilanziert, sondern auf Schallpegelschwankungen reagiert [6].

### 3.5 Psychoakustische Parameter

Die Psychoakustik ist ein Teilgebiet der Psychophysik, in welcher die Zusammenhänge zwischen den physikalischen Reizen und den beim Menschen hervorgerufenen Empfindungen beschrieben werden. Der physikalische Reiz ist dabei als Schall zu verstehen der auf das Gehör trifft, während die Hörempfindung jener Empfindung entspricht, die dadurch hervorgerufen wird. [5]

Häufig verwendete psychoakustische Parameter sind die Lautheit, Schärfe, Rauigkeit und Tonalität, weshalb sie im Folgenden näher erläutert werden.

#### 3.5.1 Lautheit

In der gehörbezogenen Geräuschbewertung spielt die wahrgenommene Lautstärke eine große Rolle, sie wird als Lautheit bezeichnet und in der Einheit „sone“ angegeben. Sie ist eine Intensitätsempfindung und, wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt, nur bedingt mit dem A-bewerteten Schalldruckpegel vergleichbar. Die Lautheit  $N$  gibt an wie laut ein Schall, im Vergleich zu einem Referenzschall, ist. Verdoppelt sich die Lautheit, wird das Schallereignis als doppelt so laut empfunden. Besitzt ein Schalldruckpegel beispielsweise eine Lautheit von 14 sone, wird er somit 14 Mal lauter als der 1 kHz-Referenzton mit 40 dB empfunden.

Die Lautheit  $N$  darf nicht mit dem Lautstärkepegel  $L_N$  (siehe Kapitel 3.3) verwechselt werden. Ein Lautstärkepegel  $L_N$  kann in eine Lautheit  $N$  umgerechnet werden (z.B. 40 phon = 1 sone). Er ist aber im Unterschied zur Lautheit keine Empfindungsgröße, sondern eine Zwischengröße, die auf die physiologisch bedingte, frequenzabhängige Bewertung des Schalls durch das menschliche Gehör Rücksicht nimmt (vgl. Abbildung 2 in Kapitel 3.3). [5]

Nach Kalivoda [6] können im Wesentlichen drei Mechanismen genannt werden, die den Lautstärkeindruck eines Geräusches wesentlich bestimmen:

- **Das menschliche Gehör verarbeitet Geräusche parallel.** Das bedeutet, das Schallsignal wird in verschiedene Frequenzgruppen zerlegt bzw. Teillautheiten gebildet, welche gleichzeitig verarbeitet werden.
- **Das menschliche Gehör verdeckt spektral.** Tritt beispielsweise gleichzeitig ein tieffrequenter und hochfrequenter Ton auf und besitzt der tieffrequente Ton einen deutlich höheren Pegel, dann wird der hochfrequente Ton verdeckt und somit nicht wahrgenommen.
- **Das menschliche Gehör verdeckt zeitlich nach.** Die beschriebene Bildung von Teillautheiten in den Frequenzgruppen wirkt noch zeitlich verzögert, selbst nach der Abschaltung des Geräusches („nachklingen“).

Das Verfahren zur Berechnung der Lautheit nach Zwicker berücksichtigt diese Rahmenbedingungen für die Wahrnehmung von Geräuschen.

Die Lautheit nach Zwicker [5] wird durch die Beantwortung der Frage bestimmt, um wieviel lauter oder leiser ein zu messender Schall im Vergleich zu einem Referenzschall empfunden wird. Aus diesem Grund wird auch der Ausdruck Verhältnislautheit verwendet. Einem 1 kHz-Ton mit einem Schalldruckpegel von 40 dB in einem ebenen Schallfeld entspricht definitionsgemäß die Lautheit 1 sone. Für die Bestimmung der Lautheitsfunktion wird durch eine Versuchsperson derjenige Pegelzuwachs gesucht, bei dem sich beispielsweise eine Verdopplung der Lautstärke ergibt. Für einen 1 kHz-Ton ist dies im Mittel bei einer Steigerung des Ausgangspegels um 10 dB der Fall. Das heißt, dass unter diesen Bedingungen ein Pegel von 40 dB auf 50 dB gesteigert werden muss, damit er doppelt so laut empfunden wird. Dem Schallpegel mit 50 dB wird in diesem Fall eine Lautheit von 2 sone zugeordnet. Entsprechende Experimente wurden für weitere Pegel durchgeführt und damit ergibt sich die in Abbildung 4 dargestellte Lautheitsfunktion.  $\Delta L$  gibt dabei den Pegelzuwachs an, der für eine Verdopplung der Lautheit notwendig ist. Bei kleinen Pegeln ist die Lautheitsfunktion sehr steil. Das heißt, dass nur eine kleine Steigerung des Pegels ausreicht, damit eine Verdopplung der Lautheit eintritt. Ab einem Pegel von 40 dB bleibt die Pegeldifferenz  $\Delta L$  im Mittel konstant bei etwa 10 dB.

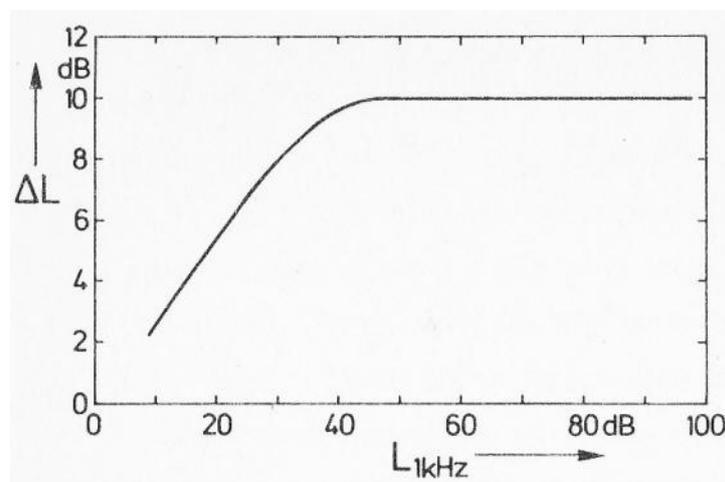


Abb. 4. Pegelanstieg  $\Delta L$  zur Verdopplung der Lautheit eines 1 kHz-Tones [5]

Bei der Bewertung der Lautheit für Geräusche spielt zudem deren Bandbreite eine wesentliche Rolle. Wird die Lautheit eines Breitbandrauschens mit jener eines 1 kHz-Tones verglichen, so ergibt sich der in Abbildung 5 dargestellte Zusammenhang.

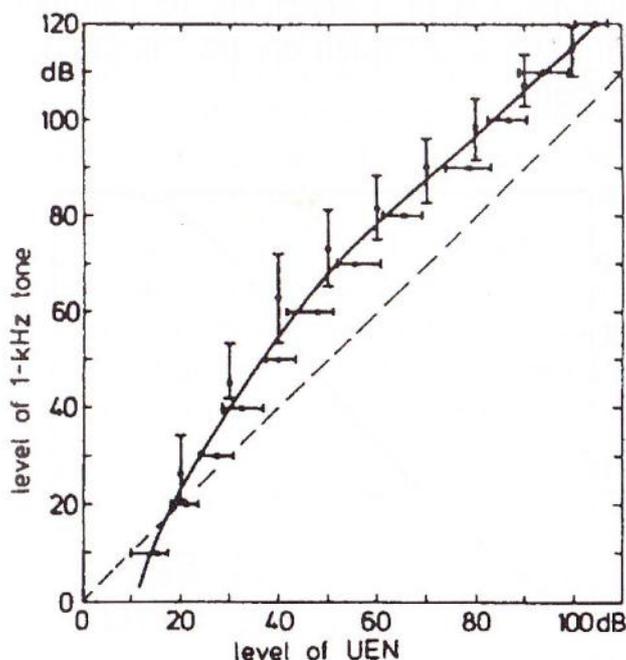


Abb. 5. Lautheitsvergleich von Breitbandrauschen und 1 kHz-Tönen [6]

Auf der Abszisse ist der Schalldruckpegel eines Breitbandrauschens aufgetragen und längs der Ordinate kann der Pegel eines gleich lauten 1 kHz-Tones abgelesen werden. Ein Breitbandrauschen wird allgemein lauter wahrgenommen als ein 1 kHz-Sinuston mit gleichem Schalldruckpegel.

### 3.5.2 Schärfe

Die Schärfe  $S$  eines Geräusches ist, wie zuvor die Lautheit  $N$ , eine Empfindungsgröße und eine Verhältnisgröße. Sie wird angegeben in der Einheit „acum“. Durch die Schärfe können Aussagen über die Klangfarbe eines Geräusches getätigt werden. Geräusche, deren energetischer Schwerpunkt bei hohen Frequenzen liegt, werden grundsätzlich als „scharf“ bezeichnet. [9] Je höher die Schärfe, umso unangenehmer wird im Regelfall ein Schallereignis empfunden. Die Schärfe ist weniger vom Schalldruckpegel, sondern mehr von der spektralen Zusammensetzung des Geräusches abhängig. Einem Schmalbandrauschen mit der Mittenfrequenz von 1 kHz und einem Pegel von 60 dB wird eine Schärfe von 1 acum zugeordnet (Kreuz in Abbildung 6). Die durchgezogene Kurve in Abbildung 6 zeigt die Abhängigkeit der Schärfe eines Schmalbandrauschens von der Frequenz. Die Schärfe  $S$  wächst mit steigender Frequenz, wodurch sie im Fall des Schmalbandrauschens bei 8 kHz etwa fünf Mal so groß ist, wie bei einer Frequenz von 1 kHz. [5]

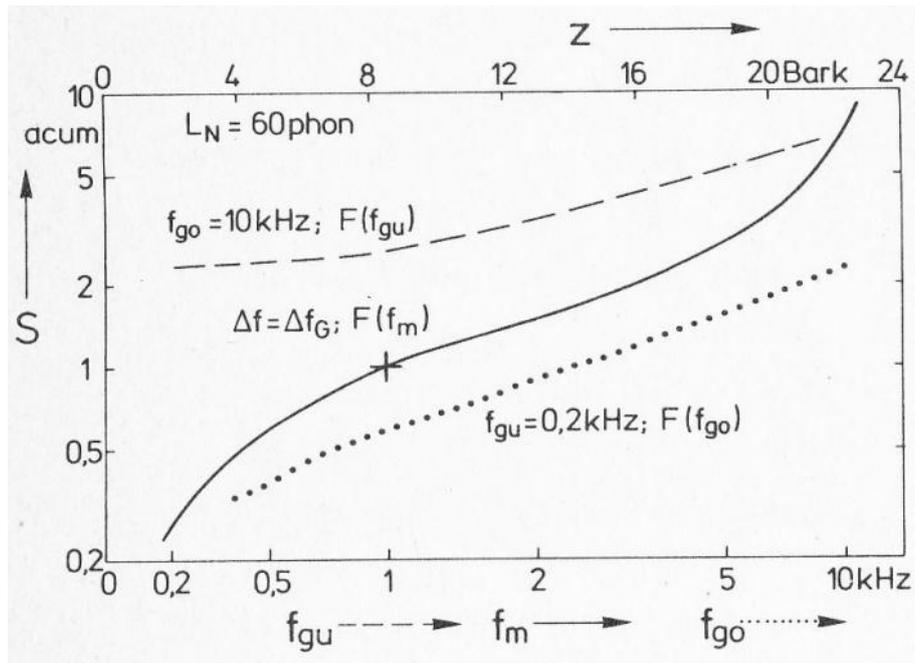


Abb. 6. Schärfe  $S$  von Schmalbandrauschen (durchgezogen), Tiefpassrauschen (punktiert) und Hochpassrauschen (gestrichelt) [5]

Einseitig begrenztes Breitbandrauschen (Tiefpassrauschen), welches durch die untere Grenzfrequenz  $f_{gu}$  (punktierte Kurve in Abbildung 6) charakterisiert erzeugt grundsätzlich eine geringere Schärfe, als ein Schmalbandrauschen. Im Gegensatz dazu erzeugt ein Hochpassrauschen mit der oberen Grenzfrequenz  $f_{go}$  größere Schärfewerte. Damit kann sich bei der Analyse von Geräuschen das Phänomen ergeben, dass durch Hinzufügung von tieffrequenten Spektralanteilen, die Schärfe eines Geräusches reduziert wird und es somit als angenehmer empfunden wird, obwohl sich dabei die Lautheit erhöht. [6]

### 3.5.3 Rauigkeit

Die Rauigkeit  $R$  beschreibt die Fluktuation von Schallen bei Schwankungsfrequenz zwischen 20 Hz und etwa 250 Hz und wird in der Einheit „asper“ gemessen. Bei zeitlichen Schwankungen mit einer Frequenz unter 20 Hz wird von der Hörempfindung Schwankungsstärke (Einheit „vacil“), die in dieser Arbeit nicht weiter untersucht wird, gesprochen.

Geräusche mit hoher Rauigkeit werden als lästig empfunden. Zur Definition der Rauigkeit  $R$  wird einem 1 kHz-Ton, der mit einem Modulationsgrad von  $m=1$  und einer Modulationsfrequenz  $f_{mod}$  von 70 Hz sinusförmig moduliert ist und einen Pegel von 60 dB besitzt, eine Rauigkeit von 1 asper zugewiesen. Die Abhängigkeit der Rauigkeit vom Modulationsgrad  $m$  und der Modulationsfrequenz  $f_{mod}$  ist in Abbildung 7 dargestellt.

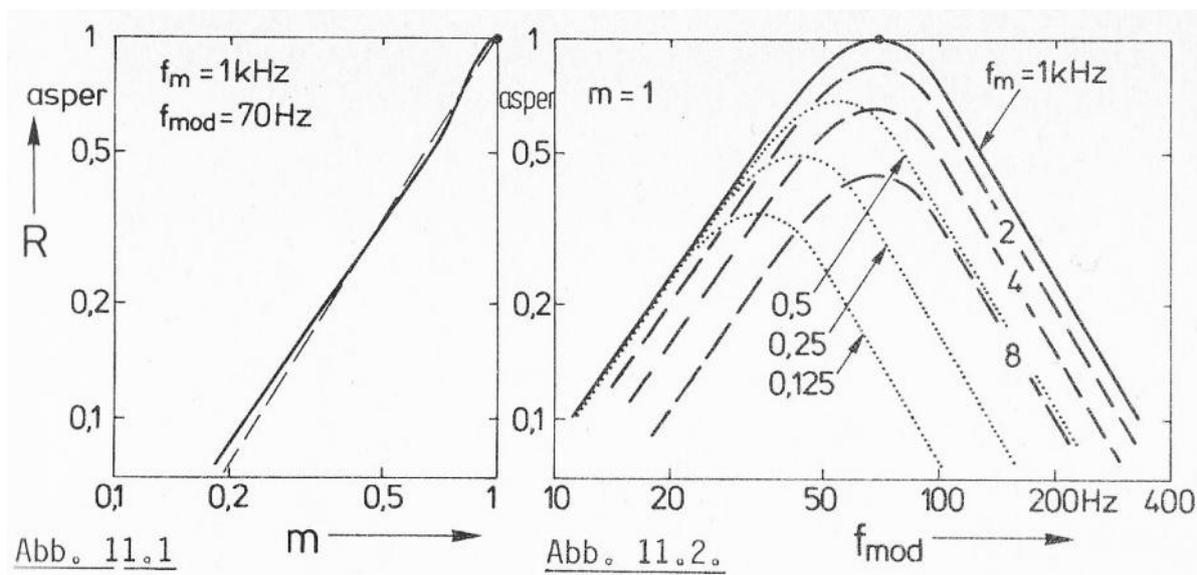


Abb. 7. Rauigkeit  $R$  in Abhängigkeit vom Modulationsgrad  $m$  und der Modulationsfrequenz  $f_{\text{mod}}$  [5]

Im linken Diagramm ist ersichtlich, dass erst bei einem Modulationsgrad über 0,2 nennenswerte Rauigkeiten auftreten und dass die Rauigkeit mit zunehmendem Modulationsgrad  $m$  steigt. Dieser Zusammenhang gilt auch für modulierte Töne anderer Trägerfrequenzen ( $f_m$  ungleich 1 kHz). [5]

Die Rauigkeit hängt für verschiedene Trägerfrequenzen  $f_m$  stark von der Modulationsfrequenz  $f_{\text{mod}}$  ab (siehe rechtes Diagramm in Abbildung 7). Der Maximalwert der Rauigkeit von 1 asper wird für die Trägerfrequenz von 1 kHz erreicht, wenn die Modulationsfrequenz bei 70 Hz liegt. Bei kleineren Trägerfrequenzen wird das Rauigkeitsmaximum schon bei geringeren Modulationsfrequenzen erreicht, während es bei größeren Trägerfrequenzen weiter bei 70 Hz Modulationsfrequenz zu finden ist.

Eine Erhöhung des Schallpegels hat eine verhältnismäßig geringe Auswirkung auf die Rauigkeit. Ein Schallpegelzuwachs von 40 auf 90 dB bei einem Sinuston und einem Modulationsgrad von 0,5 bewirkt eine Erhöhung der Rauigkeit etwa um den Faktor 2. Bei stark frequenzmodulierten Tönen können, wie auch im Extremfall mit stark amplitudenmodulierten Tönen, größere Rauigkeiten von bis zu 4 asper erreicht werden. [5]

### 3.5.4 Tonalität

Die Tonalität oder auch Tonhaltigkeit (Klanghaftigkeit) ist eine weitere psychoakustische Empfindungsgröße. Sie beschreibt in wie weit einzelne Töne oder tonale Komponenten in einem Geräusch wahrnehmbar sind. Die Tonalität in der Einheit „tu“ (tonality unit) wird durch einen 1 kHz-Ton mit einem Schalldruckpegel von 60 dB definiert. Dieser Referenzschall entspricht der Tonalität 1 tu.

In der Regel wird ein schmalbandiges Geräusch eher als tonhaltig empfunden als ein Geräusch mit größerer Bandbreite. Die Tonalität hängt jedoch davon ab, wie viele tonale Komponenten in einem Geräusch enthalten sind. Je deutlicher Komponenten wahrgenommen werden können, desto lästiger wird ein Geräusch empfunden. [9]

### 3.6 Wohlklang und psychoakustische Lästigkeit

Der Wohlklang als Gegenstück zur Lästigkeit von Geräuschen ist von den in den vorigen Kapiteln beschriebenen Hörempfindungen abhängig. Er setzt sich somit aus der Lautheit, Schärfe, Rauigkeit und der Ausprägung von tonalen Komponenten in den Geräuschen zusammen. Allerdings steigt bei einer großen Ausprägtheit der Tonhöhe gleichzeitig mit dem Wohlklang meist auch die Lästigkeit von Geräuschen, darum ist Wohlklang nur bedingt als Gegenteil der Lästigkeit anzusehen.

Die Definition der Lästigkeit ist keine einfache Aufgabe, da sie von mehreren Komponenten abhängig ist. Laut Aures [13], der einen umfassenden Algorithmus zur Beschreibung des Wohlklangs verfasste, basiert die Lästigkeit auf zwei Komponenten: Der Lärmempfindlichkeit, die von den psychologischen Eigenschaften des Beurteilers abhängig ist und der Lärmigkeit, die durch die physiologischen Höreigenschaften beurteilt wird.

Geräusche werden häufig als lästig empfunden, wenn sie hohe Lautheit besitzen. Ist diese sehr gering können jedoch die Ausprägungen der anderen Hörempfindungen, wie Schärfe, Rauigkeit als auch Tonalität für die Bewertung des Geräusches maßgebend sein [6]. Bei der Lästigkeitsbewertung spielen jedoch nicht nur akustische Eigenschaften und Zusammensetzung der Geräusche eine wesentliche Rolle, sondern auch andere Faktoren (wie Einstellung zur Quelle, Erfahrungen, Lebenssituation, etc.). Bezieht man diese Faktoren auch in die Beurteilung ein, spricht man von „Psychoakustischer Lästigkeit“.

Oft wird bei der Bewertung von Geräuschen der Begriff „Geräuschqualität“ verwendet. Da es keine Skala für die Bewertung der Geräuschqualität bzw. Lästigkeit gibt, konzentrieren sich die Fragestellungen in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Hörversuchen auf den direkten Vergleich von Hörsamples und deren Relation zueinander.

### 3.7 Binaurales Gehör des Menschen

Der Mensch ist in der Lage, den Ursprungsort einer Schallquelle zu bestimmen. Dafür ist er mit zwei Ohren ausgestattet und besitzt somit die Fähigkeit „binaural“ zu hören. Die Schallquellenlokalisierung ist sowohl in der Horizontal- als auch in der Medianebene möglich.

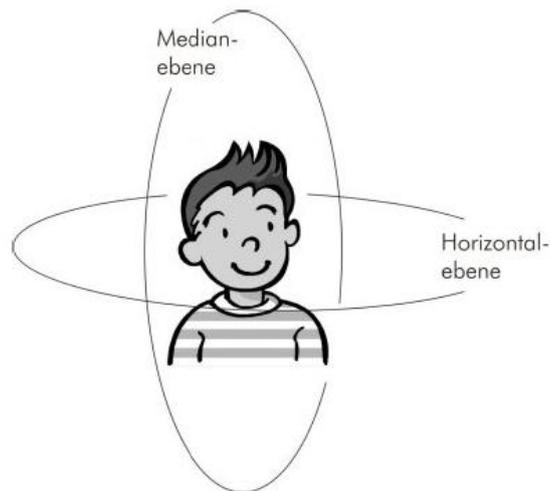


Abb. 8. Median- und Horizontalebene (Quelle: Head acoustics)

Die Lokalisation in der Horizontalebene beruht auf der Auswertung interauraler Unterschiede. Diese entstehen, wenn sich eine Schallquelle nicht direkt vor dem Kopf befindet. Aufgrund der unterschiedlichen Weglängen, die der Schall in diesem Fall zu den Ohren zurücklegen muss, kommt es zu interauralen Laufzeitunterschieden. Diese Unterschiede sind sehr gering (deutlich weniger als 0,1 ms) und werden nicht bewusst wahrgenommen. Das Gehirn kann die Unterschiede aber als Richtung interpretieren. Die interauralen Laufzeitunterschiede stellen die wichtigste Grundlage für die Schallquellenlokalisierung dar. Durch den Kopf wird die Schallausbreitung zudem beeinflusst und es kann durch Abschattung zu interauralen Pegeldifferenzen kommen. Auch diese Informationen werden vom Gehirn interpretiert und dienen ebenfalls der Schallquellenlokalisierung in der Horizontalebene. [9]

In der Medianebene entstehen keine interauralen Unterschiede, wenn eine Schallquelle entlang der Medianebene bewegt wird. Trotzdem kann das Gehirn durch die richtungsabhängige Filterung des Schalls eine Schallquellenlokalisierung in dieser Ebene durchführen. Durch die geometrischen bzw. anatomischen Formen der Ohrmuscheln, des Kopfes, der Schultern und des Rumpfes wird der Schall je nach Einfallsrichtung beeinflusst. Das Spektrum des an den Ohren eintreffenden Signals wird dadurch verzerrt und die spektralen Unterschiede können vom Gehirn als Richtung interpretiert werden. Die Genauigkeit der Lokalisation in der Horizontalebene ist aber weniger genau aufgelöst, als jene in der Medianebene. [9]

Durch das binaurale Gehör ist der Mensch außerdem in der Lage eine Schallquellenseparierung, Störgeräuschunterdrückung und Selektion beim Hören durchzuführen. Als Beispiel dazu kann der Cocktail-Party-Effekt angeführt werden: „Auf einer Party mit vielen Gästen, die sich in kleinen Gruppen unterhalten und zusammen einen relativ hohen Geräuschpegel erzeugen, ist es trotzdem möglich, sich auf einen Sprecher zu konzentrieren und die restlichen Sprecher auszublenden. Diese Fähigkeit basiert auf der räumlichen Trennung der Geräuschquellen, die wiederum nur möglich ist, weil das Gehör die einzelnen Ursprungsorte der Quellen lokalisieren kann.“ [9]

### 3.8 Kunstkopftechnologie

Für realitätsnahe Aufzeichnung von Geräuschen kann heutzutage ein Kunstkopfmesssystem eingesetzt werden. Der Kunstkopf bildet dabei das menschliche Gehör detailgetreu nach und sorgt für eine entsprechende, digitale Aufzeichnung der Geräusche. Die kopfbezogenen Stereophonie ermöglicht eine verzerrungsfreie Messung, Archivierung und Reproduktion der Schallereignisse an den menschlichen Trommelfellen.

#### 3.8.1 Aufnahmen mit dem Kunstkopf

Für die Lokalisation von Geräuschen werden, wie in Kapitel 3.7 beschrieben, die interauralen Unterschiede und die Schallfeldänderungen durch das menschliche Gehör ausgewertet. Nur durch eine Schallaufnahme, die diese Informationen enthält, kann beim Abhören ein Räumlichkeitsgefühl wahrgenommen werden. Wird eine Aufnahme mit nur einem Mikrofon durchgeführt, können diese Informationen nicht aufgezeichnet werden. Aufnahmen mit Stereomikrofonen enthalten Intensitäts- oder Laufzeitunterschiede, die durch den räumlichen Abstand der Mikrofone erzeugt werden. Hier wird die Verzerrung des Schallfeldes durch den Kopf, die für die Lokalisation in der Medianebene nötig ist, nicht berücksichtigt. Somit kann auch mittels einer Stereoaufnahme keine korrekte Lokalisation ermöglicht werden, sondern nur eine ungefähre Positionsbestimmung in der Horizontalebene. Nur mit einer Kunstkopf-Aufnahme können alle nötigen Informationen für die Schallquellenlokalisierung aufgezeichnet werden. Durch die zwei Aufzeichnungskanäle im linken und rechten Ohr des Kunstkopfes werden sowohl die nötigen interauralen Differenzen als auch die nötigen Verzerrungen abgebildet. Durch eine Kunstkopf-Aufnahme kann der Hörer, ein Geräusch so wahrnehmen, als ob er selbst im entsprechenden Schallfeld anwesend wäre. [10]



Abb. 9. Head Kunstkopf HMS VI (Quelle: Head acoustics)

### 3.8.2 Wiedergabe der Kunstkopf-Aufnahmen

Die Wiedergabe einer Kunstkopf-Aufnahme ist genauso wichtig wie die verzerrungsfreie Aufzeichnung. Dafür wird vom Abhörsystem gefordert, dass der gleiche Höreindruck entsteht, als hätte der Hörer das Schallereignis unmittelbar wahrgenommen (siehe Abbildung 10).

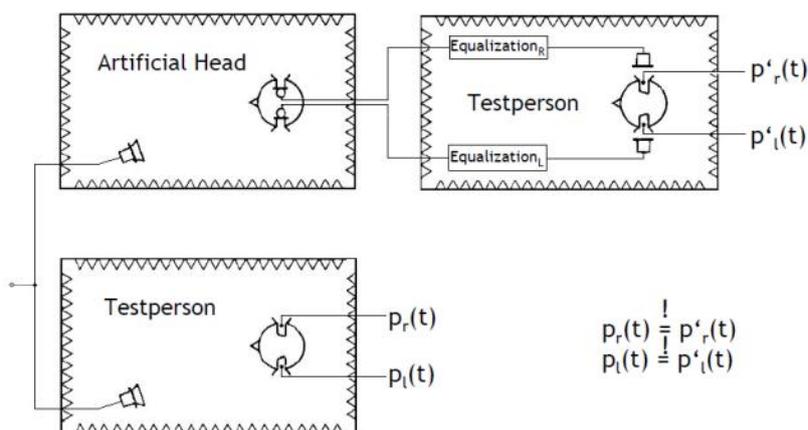


Abb. 10. Anforderungen an die Wiedergabe einer Kunstkopf-Aufnahme (Quelle: Head acoustics)

Um den gleichen Schalldruck an den Trommelfellen des Hörers zu reproduzieren müssen die mit dem Kunstkopf aufgenommenen Signale vor der Wiedergabe gefiltert werden. Diese Filterung bzw. Entzerrung (engl. Equalization) ist nötig, weil die Kopfhörermembran nicht an der gleichen Stelle wie die Mikrofonmembran im Kunstkopf platziert werden kann. In Abbildung 11 ist dies in einer Skizze vereinfacht dargestellt.

Vor der Aufnahme mit dem Mikrofon im Kunstkopfohr hat der Schall bereits eine Nachbildung der menschlichen Ohrmuschel (Cavum-Conchae) passiert. Bei der Wiedergabe durch einen Kopfhörer wird der Schall nochmals durch das menschliche Cavum-Conchae geleitet. Durch das Anliegen des Kopfhörers am Ohr bzw. die unterschiedliche Aufnahmeeigenschaften von Trommelfell und Mikrofon können zusätzliche Änderungen des Schallfeldes hervorgerufen werden.

Mit der Entzerrung sollen die genannten Effekte ausgeglichen werden, sodass beim Abhören einer Kunstkopf-Aufnahme am Trommelfell des Hörers die gleichen Signale anliegen, als wäre er selber im ursprünglichen Schallfeld anwesend. Zusätzlich können eventuell auftretende Unregelmäßigkeiten der Übertragungseigenschaften des Kopfhörers durch die Entzerrung ausgeglichen werden. [10]

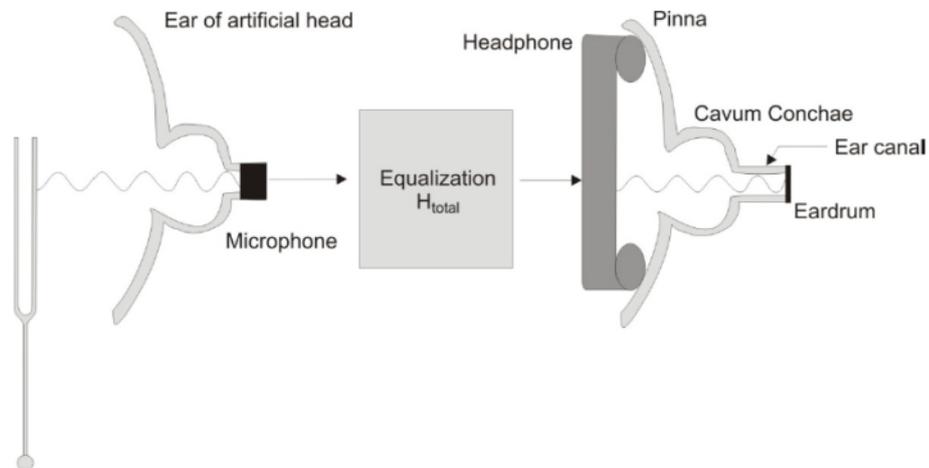


Abb. 11. Entzerrung einer Kunstkopf-Aufnahme für die korrekte Wiedergabe (Quelle: Head acoustics)

Die Wiedergabe der binauralen Aufnahmen kann beispielsweise über einen programmierbaren Equalizer (PEQ), dargestellt in Abbildung 12, erfolgen. Damit ist es möglich den korrekten Pegel und die passende Entzerrung für die Wiedergabe einzustellen. Die Übertragungseigenschaften der Kopfhörer können durch die Filter der PEQ abgestimmt werden.



Abb. 12. PEQ V mit elektro-dynamischen Kopfhörer (Quelle: Head acoustics)

## 4 Messung der Geräuschkulissen

Die Neubaustrecke Wien - St. Pölten wurden am 09. Dezember 2012 in Betrieb genommen. Im Vorfeld (Juni bis September 2012) umfangreiche Inbetriebnahmefahrten durchgeführt. An den sogenannten Innovationsmessfahrten der ÖBB Infrastruktur AG nahmen zahlreiche Spezialisten ihres Faches aus den Bereichen Oberbau, Aerodynamik, Oberleitung, Einbauten und Arbeitssicherheit teil und konnten eine große Menge an neuen Erkenntnissen und Messwerten sammeln. Im Rahmen dieser Messfahrten war es möglich die Geräuschkulissen während der Fahrt, ohne eventuelle Störgeräusche anderer Reisender, in einem modernen Reisezugwagen aufzuzeichnen. Zudem fanden keine weiteren Zugfahrten auf der Strecke statt, wodurch es keine Zugsbegegnungen oder sonstige Beeinflussungen der Messungen durch den Betrieb gab.

### 4.1 Messstrecke

Die Neubaustrecke Wien – St. Pölten hat eine Gesamtlänge von etwa 60 km, wobei ca. 55 km für die Aufzeichnungen und Auswertungen der Geräuschkulissen genutzt wurden (siehe Abbildung 13). Die zugehörige Infrastruktur ist nach dem aktuellen Stand der Technik ausgeführt und der Streckenzustand war zum Zeitpunkt der Messfahrten absolut neuwertig. Die Neubaustrecke ist mit einer Regelgeschwindigkeit von 250 km/h projektiert. Für den Planbetrieb besteht jedoch nur eine Zulassung für 230 km/h.



Abb. 13. Neubaustrecke Wien - St. Pölten (Quelle: FCP)

Die Neubaustrecke besteht unter anderem aus dem Lainzer Tunnel, Wienerwaldtunnel und weiteren Tunneln im Tullnerfeld. Die insgesamt acht Tunnelbauwerke weisen eine Gesamtlänge von etwa 35 km aufweisen und machen somit mehr als die Hälfte der Strecke aus.

## Kapitel 4 - Messung der Geräuschkulissen

Die Tunnelabschnitte sind entweder zweiröhrig und somit mit einem Gleis pro Tunnelröhre ausgeführt (z.B. Teile des Lainzer Tunnels und Wienerwaldtunnels) oder besitzen eine gemeinsame Tunnelröhre für beide Gleise. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Positionen und Querschnitte aller Tunnelabschnitte der gesamten Neubaustrecke.

Bezeichnung	Querschnitt	Länge-km	Anf-km	End-km	Akustische Ausbildung
Lainzer Tunnel (LT)	einröhrig-zweigleisig	7,353	0,000	7,353	ohne Gleisabsorber
Lainzer Tunnel (LT)	zweiröhrig-eingleisig	0,922	7,353	8,275	ohne Gleisabsorber
Bereich Weichenhalle Hadersdorf	Weichenbereiche	1,264	8,275	9,539	ohne Gleisabsorber
Wienerwaldtunnel (WWT)	einröhrig-zweigleisig	2,661	9,539	12,200	Gleisabsorber
Wienerwaldtunnel (WWT)	zweiröhrig-eingleisig	11,320	12,200	23,520	Gleisabsorber
Tunnel Atzenbrugg (ABT)	einröhrig-zweigleisig	2,460	35,840	38,300	Gleisabsorber
Tunnel Hankenfeld (HFT)	einröhrig-zweigleisig	0,663	38,841	39,504	Gleisabsorber
Tunnel Saladorf (SDT)	einröhrig-zweigleisig	0,729	40,171	40,900	Gleisabsorber
Reiserbergtunnel (RBT)	einröhrig-zweigleisig	1,370	42,863	44,233	Gleisabsorber
Stierschweiffeld-tunnel (SST)	einröhrig-zweigleisig	3,293	45,660	48,953	Gleisabsorber
Raingrabentunnel (RGT)	einröhrig-zweigleisig	2,775	50,775	53,550	Gleisabsorber
<b>Summe</b>		<b>34,810</b>			

Tab. 4. Übersicht über Tunnelabschnitte auf der Neubaustrecke Wien – St. Pölten



Abb. 14. Feste Fahrbahn System ÖBB/Porr (Quelle: Porr AG)

## Kapitel 4 - Messung der Geräuschkulissen

Auf der Neubaustrecke Wien – St. Pölten ist in den Tunneln und auf einigen Abschnitten zwischen Atzenbrugg – Hankenfelder – und Saladorfer Tunnel ist der Oberbau als Feste Fahrbahn (FF) ausgeführt, wodurch der mehrheitliche Teil der Strecke aus dieser Bauform besteht. Bei dem verwendeten FF-System ÖBB/Porr (siehe Abbildung 14) wird das Schotterbett durch eine Betonfertigteileplatte ersetzt, die das Gleis trägt.

Die Feste Fahrbahn ist, mit Ausnahme des Lainzer Tunnels und der Weichenhalle, mit Absorberplatten (Gleisabsorbern) ausgestattet, die einen Teil des Schalls, der durch den Rad-Schiene Kontakt entsteht, absorbieren. Dadurch wird auch die Befahrbarkeit der Tunnel mit konventionellen Einsatzfahrzeugen ermöglicht. Die Absorberplatten werden zwischen den Schienen angebracht und bestehen aus Porenbeton und einer Lochstruktur an der Oberfläche (siehe Abbildung 15).



Abb. 15. Feste Fahrbahn mit Gleisabsorber im WWT-Tunnel

Außerhalb der Tunnelabschnitte ist im Regelfall Schotteroberbau vorzufinden. Als Lärmschutzmaßnahmen werden auf freier Strecke entweder einseitig oder zweiseitig Lärmschutzwälle (LS-Wälle), sowie LS-Wände eingesetzt. Darüber hinaus sind LS-Wände vorwiegend auf Brückenbauwerken installiert und dort wo sich ein weiteres parallel führendes Gleis neben der Trasse befindet, wie zum Beispiel im Umfeld des Regional- und Überholbahnhofes Tullnerfeld. Die Höhen der LS-Wände entlang der Strecke bewegen sich zwischen 1m und 4m. Die vorhandenen LS-Wälle sind zwischen 2m und 8m hoch.

### 4.2 Messgeschwindigkeiten

Im Regelfall wurden auf freier Strecke, sowie in den meisten Tunnelabschnitten, Geschwindigkeiten von 200 km/h, 230 km/h und 250 km/h gefahren. Lediglich im Lainzer Tunnel wurden aufgrund der verringerten zulässigen Höchstgeschwindigkeiten Messungen bei 100 km/h und 160 km/h aufgezeichnet (Details siehe Kapitel 5.3).

Im Hinblick auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit der Neubaustrecke von 230 km/h konnten somit auch die Auswirkungen auf den Höreindruck bei einer Anhebung der Fahrgeschwindigkeit auf 250 km/h untersucht werden.

### 4.3 Messfahrzeug und Messposition

Die Wahrnehmung der Fahrgeräusche während einer Eisenbahnfahrt hängt in großem Ausmaß vom Wagenmaterial ab. Die ausgewerteten Messungen wurden in einer Railjet-Garnitur der ÖBB aufgenommen, welche stellvertretend für einen aktuell im Fernverkehr eingesetzten Reisezugwagen herangezogen werden kann.

Für die Messfahrten wurde ein Testzug, wie in Abbildung 16 ersichtlich, zusammengestellt. Insgesamt waren 3 Lokomotiven BR 1116 und 9 Wagen Teil des Zugverbandes. Der gekennzeichnete Railjet-Wagen ist stellvertretend für eine 6-teilige Railjet-Wagengarnitur dargestellt.



Abb. 16. Wagenverband des Testzuges

#### Wagenreihung des Testzuges:

- Lokomotive BR 1116
- Elektrotechnischer Messwagen ETMW 9981
- Lokomotive BR 1116
- Lokomotive BR 1116
- Oberbaumesswagen EM 250
- Railjet Wagen 1
- Railjet Wagen 2 (Standort des Kunstmesskopfes)
- Railjet Wagen 3
- Railjet Wagen 4
- Railjet Wagen 5
- Railjet Wagen 6
- Railjet-Steuerwagen

Vom Oberbaumesswagen EM250 der ÖBB, der auch Teil des Testzugverbandes war, konnten die Verortungsdaten und Geschwindigkeitsaufzeichnungen für die Analyse der Messungen verwendet werden.

Die Messungen der Geräuschkulissen fanden mit einem Kunstkopfmesssystem in einem leeren Railjet Großraumwagen der Economy-Klasse statt (Typ Bmpz, Serie 22-90.2, Sitz 54 – siehe Abbildung 17 und 18).

## Kapitel 4 - Messung der Geräuschkulissen

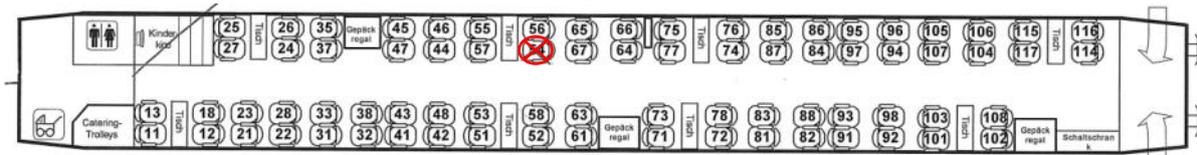


Abb. 17. Skizze des Aufnahmeortes im Railjet Großraumwagen

Die Aufnahmeposition wurde etwa in der Mitte des Wagens gewählt, um etwaige Störeinflüsse an den Wagenenden zu vermeiden (Vibrationen von Schiebetüren, schlechtere Dämmung im Bereich der Wagenübergänge, etc.). Der Kunstkopf war an einem Gangsitzplatz einer Sitzgruppe, etwa in der Höhe des Kopfes einer sitzenden Person mit durchschnittlicher Größe, positioniert.



Abb. 18. Aufnahmeort des Kunstkopfes in der Railjet Garnitur

Um eine stabile Lage des Kunstkopfes während der Fahrt zu gewährleisten wurde eine Unterkonstruktion hergestellt, die am Sitz und am Fahrzeugboden auflag. Zusätzlich wurden Verstrebungen zur Erhöhung der Steifigkeit und für die Fixierung der Konstruktion zwischen den Sitzen bzw. dem Tisch montiert (siehe Abbildung 19).



Abb. 19. Aluminium-Holzkonstruktion für die Positionierung des Kunstkopfes

#### 4.4 Kunstkopfmesssystem

Das Ziel bei der Aufnahme der Fahrgeräusche war es, die Situation des Fahrgastes im fahrenden Fahrzeug möglichst realitätsnah abzubilden. Zur Aufzeichnung der Geräuschsituation wurde daher ein Kunstkopfmesssystem (HMS IV von Head acoustics) verwendet. Der Kunstkopf wurde an der Aufnahmeposition mit einem Notebook, welches sich einige Sitzreihen dahinter befand, per USB-Schnittstelle verbunden. Mittels der Aufnahmesoftware von Head acoustics (Head Recorder Version 2.0.610) wurden die Aufnahmen bei Fahrtbeginn gestartet und am Fahrtende manuell beendet.

Zu Beginn der Messfahrten wurde ein Zeitabgleich zwischen dem Kunstkopfmesssystem und dem Oberbaumesswagen EM250 durchgeführt, der die Verortungsdaten lieferte. Während jeder Messung wurden in einem Protokoll Besonderheiten während der Messung wie Störungen durch Türöffnungen und Gleiswechsel festgehalten.

## 5 Erstellung der Hörproben

Um repräsentative Hörproben für bestimmte Infrastrukturelemente zu erhalten, war es notwendig zunächst eine Datenbank über die Infrastrukturelemente der Messstrecke aufzubauen. In dieser Streckendatenbank wurden Informationen über die Lage von Bauwerken, Weichen und Lärmschutzmaßnahmen, sowie über die Oberbauform auf der Strecke gesammelt. Als Grundlage für die darin enthaltenen Informationen, dienten die Lagepläne [16] und Streckenbilder der Messstrecke.

Die Streckendatenbank, Verortungsdaten des Oberbaumesswagens EM250 und Zeitdaten der Aufnahmen wurden im Anschluss mit dem Programm MATLAB zusammengeführt. Damit war es möglich zeitbezogene Aufnahmen direkt den Infrastrukturelementen zuzuordnen.

### 5.1 Zu untersuchende Streckenabschnitte und Infrastrukturelemente

Um von einem Streckenabschnitt bzw. Infrastrukturelement einen gleichmäßigen Höreindruck zu erlangen, müssen für die Dauer eines Hörsamples gleiche Verhältnisse während der Aufnahme vorherrschen. Ein Streckenabschnitt bzw. Infrastrukturelement muss somit eine bestimmte geschwindigkeitsabhängige Mindestlänge aufweisen. Objekte, wie Weichen, kurze Brückentragwerke und kurze Lärmschutzwände erfüllen diese Anforderung aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung nicht.

Da die Sample-Länge mit drei Sekunden festgelegt wurde und die gefahrene Höchstgeschwindigkeit während der Messfahrten 250 km/h betrug (siehe Kapitel 4.2), ergibt sich die erforderliche **Mindestlänge eines einheitlichen Streckenabschnittes** zu  $69,44 \text{ m/s} \cdot 3 \text{ s} = \mathbf{208,33 \text{ m}}$ .

### 5.2 Definition der Parameter-Sets

Für die Hörproben werden in Kapitel 5.4 jeweils mehrere charakteristische Abschnitte mit unterschiedlichen Streckeneigenschaften definiert. Diese Streckeneigenschaften betreffen den Oberbau, die Streckenform und die Lärmschutzmaßnahmen und werden zu Parameter-Sets zusammengefasst (siehe Tabelle 5). Die charakteristischen Streckenabschnitte werden im Folgenden somit durch diese Parameter-Sets gekennzeichnet.

Parameter-Set	Streckeneigenschaften
<b>1</b>	Schotterbett, freie Strecke, Wall einseitig
<b>2</b>	Schotterbett, freie Strecke, Wall beidseitig
<b>3</b>	Schotterbett, freie Strecke, Wall beidseitig, Bogen
<b>4</b>	Schotterbett, freie Strecke, Wall beidseitig, 4m LSW, Bogen
<b>5</b>	FF, freie Strecke, Wall beidseitig, Bogen
<b>(6)</b>	(FF, Tunnelportal, Wall beidseitig)
<b>(7)</b>	(FF, Tunnelportal, Wanne)
<b>8</b>	FF, Tunnel 2-gleisig, mit Gleisabsorber
<b>9</b>	FF, Tunnel 1-gleisig, mit Gleisabsorber
<b>10</b>	FF, Tunnel 2-gleisig, ohne Gleisabsorber
<b>11</b>	FF, Tunnel 1-gleisig, ohne Gleisabsorber

Tab. 5. Übersicht der definierten Parameter-Sets und der zugehörigen Streckeneigenschaften

Bei genauer Untersuchung der Hörsamples der Parameter-Sets 6 und 7 wurden Unregelmäßigkeiten in der Geräuschwahrnehmung erkannt, die vermutlich davon abhängig sind, ob es sich um eine Tunneleinfahrt oder –ausfahrt handelt. Da für eine entsprechende Untersuchung dieser Abschnitte nicht nur die Streckeneigenschaften, sondern auch die Fahrtrichtung berücksichtigt werden müsste, wurden die Bereiche der Tunnelportale nicht näher untersucht. In dieser Arbeit ist der Fokus auf die akustische Wahrnehmung von Streckenabschnitten, unabhängig der Fahrtrichtung, gelegt. Die Streckenparameter, die die Bereich der Tunnelportale kennzeichnen (6, 7) werden daher nicht weiter berücksichtigt.

### 5.3 Überblick aller Messfahrten

In der Railjet – Garnitur wurden während der Innovationsmessfahrten Geräuschmessungen bei mehreren Messfahrten durchgeführt (siehe Tabelle 6). Die Aufzeichnungen der Fahrten am 05.07.2012 wurden an einem anderen Messpunkt in der Garnitur durchgeführt und bleiben aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen in dieser Arbeit unberücksichtigt.

Datum	Fahrt	Gleis	Gleiswechsel	Geschw.	Richtung	Störungen
<b>(05.07.2012)</b>	10	7	0	230 km/h	Wien	
	11	9	2	200 km/h	St.Pölten	Personendurchgang
	12	7	0	250 km/h	Wien	
<b>06.07.2012</b>	1	9	0	100 km/h	St.Pölten	keine GPS Daten zu Beginn
	2	9	0	200 km/h	Wien	Durchsage
	3	9	0	230 km/h	St.Pölten	Durchsage
	4	9	0	200 km/h	Wien	Türöffnung
	5	9	0	250 km/h	St.Pölten	
	6	9	0	200 km/h	Wien	Geschwindigkeitsreduktion bei Ausfahrt St.Pölten
	7	9	1	230 km/h	St.Pölten	Türschließung
	8	7	2	200 km/h	Wien	Türschließung
	9	7	1	250 km/h	St.Pölten	

Tab. 6. Übersicht aller Messfahrten im Railjet

In Fahrtrichtung St. Pölten wurden am 06.07.2012 die sogenannten „Hochtastfahrten“ durchgeführt, wobei die Geschwindigkeit bis auf 250 km/h gesteigert wurde. Diese Richtung wurde als Hauptmessrichtung definiert und ist durch eine ungerade Fahrtnummer erkennbar. In die andere Fahrtrichtung (Richtung Wien) betrug die Geschwindigkeit stets 200 km/h, wobei diese Fahrten an der geraden Fahrtnummer erkennbar sind. Für die Hörversuche wurden Hörsamples von den Fahrten 2, 3, 4 und 5 herangezogen, da diese alle auf Gleis 9, ohne Gleiswechsel und mit den geringsten Störungen stattfanden.

## 5.4 Auswahl charakteristischer Streckenabschnitte

### 5.4.1 Analyse der Pegelverläufe

Vor der Auswahl der konkreten Streckenabschnitte wurden die gemessenen Schallpegel entlang der Strecke untersucht. Damit soll verhindert werden, dass gewählte Hörproben eventuelle Ausreißer im Pegel beinhalten. Außerdem kann anhand der Streckeninformationen und der erkennbaren Pegelanstiege in den Tunneln die Übereinstimmung von der Zeit- und Ortsinformation in der Datenbank geprüft werden. Die Abbildung 20 zeigt die übereinandergelegten Verläufe des A-bewerteten Schalldruckpegels der Messfahrten 2 bis 9. Der exakte Wert des dargestellten Pegels entspricht dem Mittelwert der A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel des rechten und linken Messkanals des Kunstkopfes (Zeitintervall 1s).

Die Fahrgeschwindigkeit zeigt direkten Einfluss auf die Pegel, weshalb zur Vergleichbarkeit in Abbildung 20 nur Pegelwerte dargestellt werden, wo die Fahrgeschwindigkeit 160, 200, 230 oder 250 km/h (+/- 3 km/h) beträgt.

Da bei Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsabschnitten Geschwindigkeiten außerhalb dieser Bereiche auftreten, werden die zugehörigen Pegelwerte nicht eingetragen (z.B. von km 11,000 bis km 13,000).

Aufgrund der gewählten Darstellung in Abbildung 20 werden die Pegelschwankungen von Fahrten mit gleicher Geschwindigkeit klar ersichtlich. Speziell im Bereich des Lainzer Tunnels ist erkennbar, dass auch bei Geschwindigkeiten von 160 km/h vergleichsweise hohe Pegel auftreten und es zudem große Schwankungen trotz gleicher Geschwindigkeiten gibt (siehe grüne Pegelwerte in Abbildung 20).

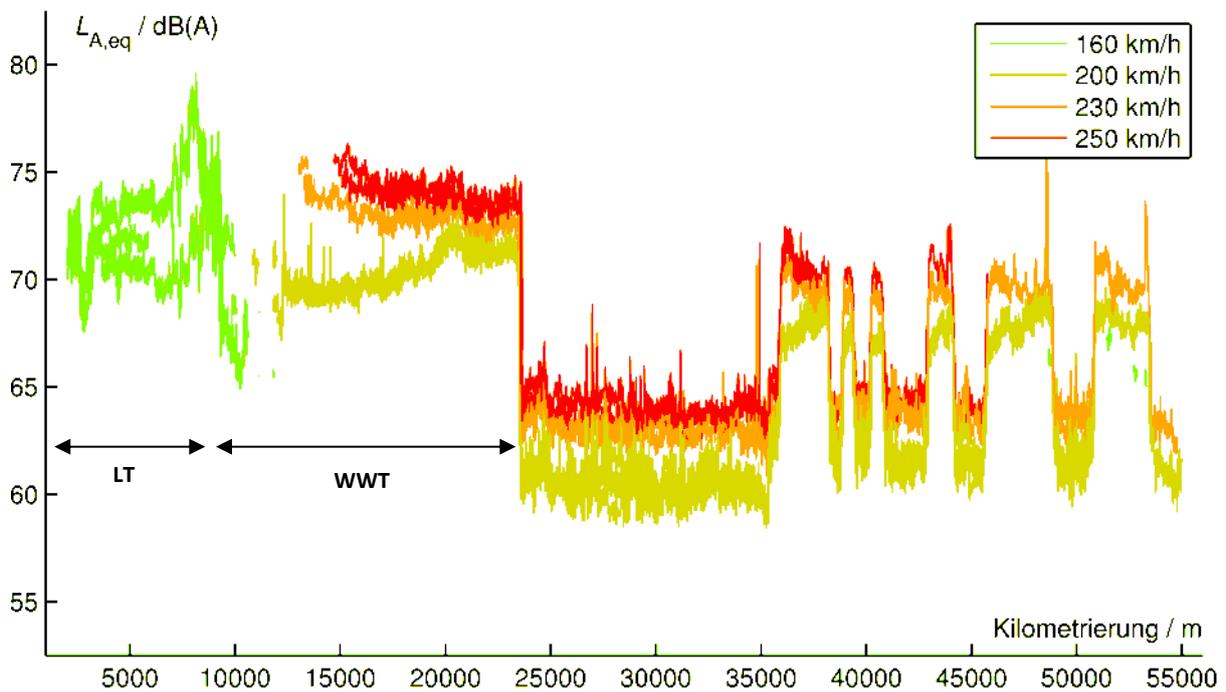


Abb. 20. Pegelschriebe aller Messfahrten bei Geschwindigkeiten von 160, 200, 230 und 250 km/h entlang der Neubaustrecke Wien – St. Pölten

Bei der Detaildarstellung der Pegelschriebe der sechs Tunnel im Tullnerfeld (km 35,000 bis km 55,000 - Tunneldetails siehe Tabelle 4) ist, in Abhängigkeit der Fahrtrichtung, ein reproduzierbarer, um bis zu 1,5 dB fallender Pegelverlauf während der Tunnelfahrt zu erkennen (siehe Abbildung 21).

Um diesen Effekt auszugleichen, wurden die Hörproben für diese Tunnel jeweils aus der Tunnelmitte entnommen, wo sich etwa ein Mittelwert des Pegels von Tunnelanfang und –ende einstellt.

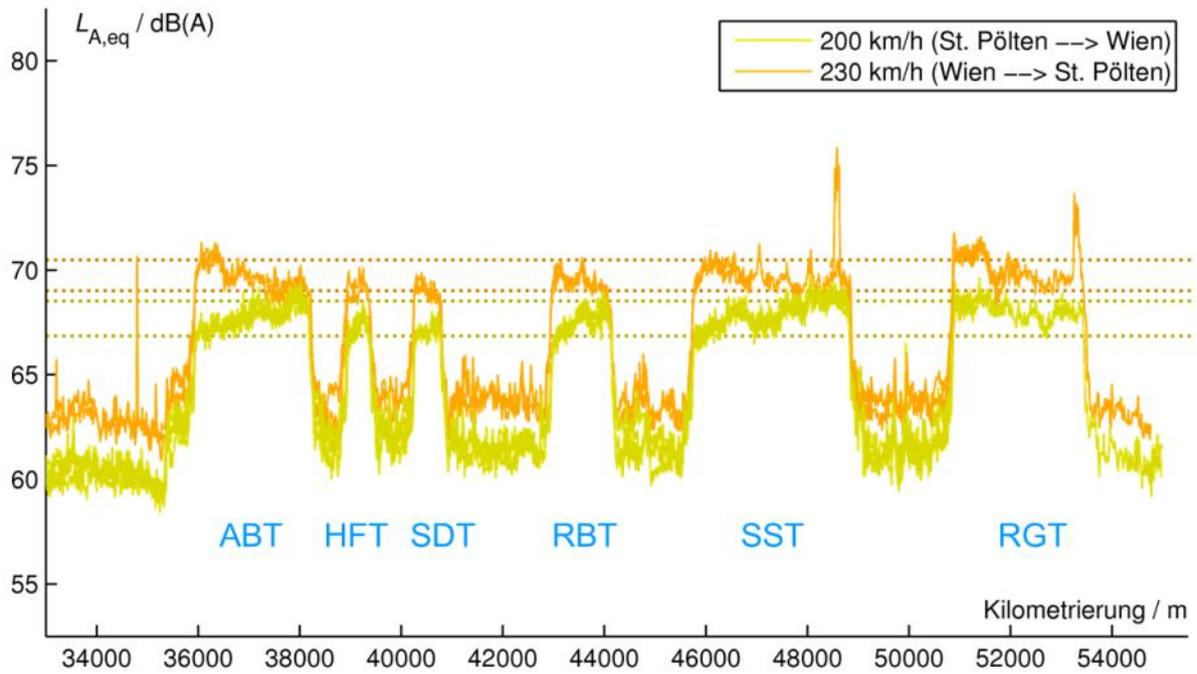


Abb. 21. Fallende Schalldruckpegel bei Tunneldurchfahrten

Im 2-gleisigen Lainzer Tunnel ist etwa bei km 3,000 ein Pegelabfall um ca. 3 dB erkennbar (siehe Abbildung 22). Dieser Pegelabfall ist bei allen Fahrten erkennbar und ist nicht auf unterschiedliche Infrastrukturausstattung, Querschnittsänderungen oder sonstige Einbauten zurückzuführen. Dieser Bereich liegt in einem Bogen und wurde aufgrund dieser Erkenntnis nicht für Hörsamples herangezogen. Da es im gesamten Lainzer- und Wienerwaldtunnel größere Pegelschwankungen als in den anderen Tunneln gibt, wurden dort jeweils drei Hörproben von jedem homogenen Tunnelabschnitt entnommen (im Anfangsbereich, in Tunnelmitte und im Endbereich). Die Entnahmepunkte der Hörproben sind in Abbildung 22 durch die blau strichlierten, vertikalen Linien markiert, welche jeweils die Mitte eines charakteristischen Abschnittes bzw. eines Hörsamples zeigen.

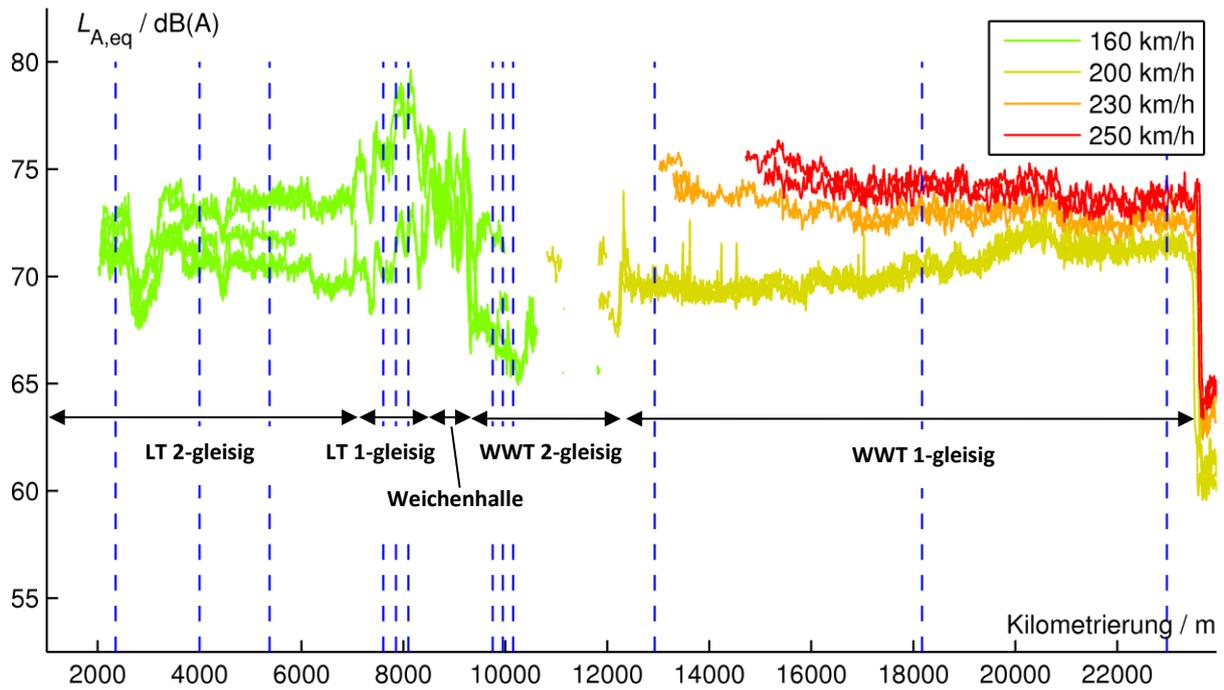


Abb. 22. Entnahmepunkte der Hörproben im Lainzer Tunnel und Wienerwaldtunnel

#### 5.4.2 Übersicht der charakteristischen Streckenabschnitte

Bei der Auswahl der Hörsamples wurde allgemein darauf geachtet, dass diese eine charakteristische Hörprobe für den zu untersuchenden Streckenabschnitt (definiert durch die Parameter-Sets aus Kapitel 5.2) darstellen. Um dies zu verwirklichen, wurde berücksichtigt, dass sich keine anderen Elemente im Bereich des jeweiligen Hörsamples befinden, die den Höreindruck möglicherweise verfälschen. Darunter fallen etwa Weichen, Notausstiege in den Tunnelstrecken und Überführungen oder Brückentragwerke auf der freien Strecke. Diese Ausschlusskriterien wurden durch die erstellte Streckendatenbank und anhand der zur Verfügung stehenden Lagepläne und Streckenbilder geprüft. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass keine Hörsamples während Beschleunigungsfahrten entnommen werden, da sich dadurch womöglich eine andere Geräuschsituation einstellen könnte.

Tabelle 7 stellt eine Übersicht aller charakteristischen Streckenabschnitte auf der Neubaustrecke Wien –St. Pölten, sortiert nach deren Mittenkilometer, dar. Überall dort, wo nicht speziell gekennzeichnet, sind die Hörproben in einer Geraden entnommen worden.

## Kapitel 5 - Erstellung der Hörproben

Mitten km	Parameter-Set	Streckeneigenschaften
2.350	10	FF, Tunnel 2-gleisig, ohne Gleisabsorber
4.000	10	FF, Tunnel 2-gleisig, ohne Gleisabsorber
5.375	10	FF, Tunnel 2-gleisig, ohne Gleisabsorber
7.604	11	FF, Tunnel 1-gleisig, ohne Gleisabsorber
7.850	11	FF, Tunnel 1-gleisig, ohne Gleisabsorber
8.096	11	FF, Tunnel 1-gleisig, ohne Gleisabsorber
9.750	8	FF, Tunnel 2-gleisig, mit Gleisabsorber
9.950	8	FF, Tunnel 2-gleisig, mit Gleisabsorber
10.150	8	FF, Tunnel 2-gleisig, mit Gleisabsorber
12.925	9	FF, Tunnel 1-gleisig, mit Gleisabsorber
18.175	9	FF, Tunnel 1-gleisig, mit Gleisabsorber
22.975	9	FF, Tunnel 1-gleisig, mit Gleisabsorber
28.025	2	Schotterbett, freie Strecke, LS-Wall beidseitig
32.125	1	Schotterbett, freie Strecke, LS-Wall einseitig
33.225	1	Schotterbett, freie Strecke, LS-Wall einseitig
35.050	4	Schotterbett, freie Strecke, LSW 4m, Bogen
35.300	3	Schotterbett, freie Strecke, LS-Wall beidseitig, Bogen
35.625	7	FF, Tunnelportal, Wanne
37.075	8	FF, Tunnel 2-gleisig, mit Gleisabsorber
38.625	5	FF, freie Strecke, LS-Wall beidseitig
39.175	8	FF, Tunnel 2-gleisig, mit Gleisabsorber
39.900	5	FF, freie Strecke, LS-Wall beidseitig
40.550	8	FF, Tunnel 2-gleisig, mit Gleisabsorber
41.035	6	FF, Tunnelportal, LS-Wall beidseitig
43.575	8	FF, Tunnel 2-gleisig, mit Gleisabsorber
44.350	6	FF, Tunnelportal, LS-Wall beidseitig
45.075	2	Schotterbett, freie Strecke, LS-Wall beidseitig
47.325	8	FF, Tunnel 2-gleisig, mit Gleisabsorber
50.625	7	FF, Tunnelportal, Wanne
52.175	8	FF, Tunnel 2-gleisig, mit Gleisabsorber
53.660	6	FF, Tunnelportal, LS-Wall beidseitig
54.275	3	Schotterbett, freie Strecke, LS-Wall beidseitig, Bogen

**Tab. 7. Übersicht aller charakteristischen Streckenabschnitte gekennzeichnet durch Mittenkilometer**

In der Abbildung 23 sind alle Mittenkilometer der Hörproben, die in Tabelle 7 aufgelistet sind und Basis der weiteren Untersuchungen waren, zusammen mit den Pegelschrieben grafisch dargestellt.

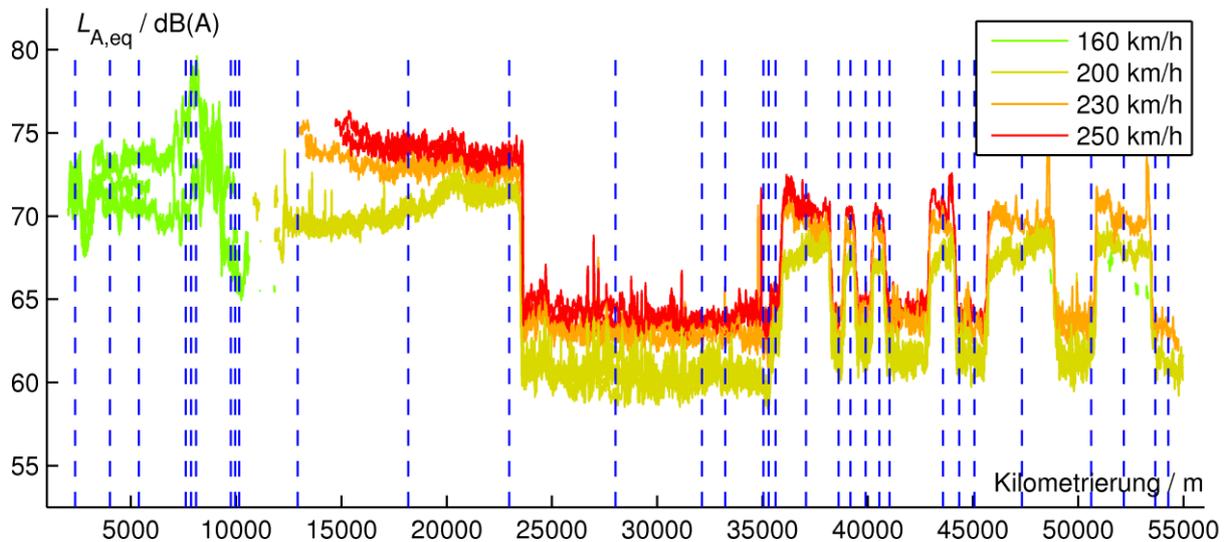


Abb. 23. Charakteristische Streckenabschnitte und Pegelschriebe entlang der gesamten Messstrecke

## 5.5 Vorgangsweise für die Erstellung der Hörsample-Dateien

Um eine Datenbank der Infrastrukturelemente aufzubauen, diese mit den Zeitbasen der Kunstkopfaufnahmen zusammenzuführen und um schließlich die Hörsamples von den charakteristischen Streckenabschnitten automatisiert zu erstellen, wurden in MATLAB und Visual Basic verschiedene Funktionen implementiert. Abbildung 24 zeigt dafür die grundsätzliche Vorgangsweise („Workflow“), wobei die dargestellten Rechtecke jeweils einen Arbeitsschritt und die Funktionsaufrufe symbolisieren.

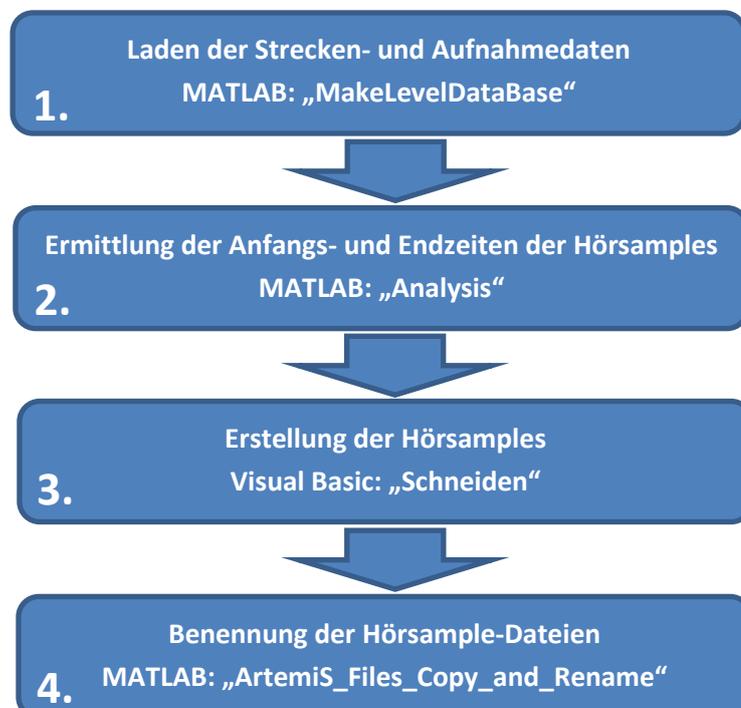


Abb. 24. Darstellung der Arbeitsschritte für die automatisierte Erstellung der Hörsample-Dateien

## Kapitel 5 - Erstellung der Hörproben

1. Das Zusammenführen von Streckeninformationen, Verortungsdaten und der Zeitbasis der Geräuschaufnahmen während der Messfahrten wird als Grundlage für die Hörsampleerstellung benötigt.
2. Aus der Tabelle der charakteristischen Streckenabschnitte (Tabelle 7) werden die jeweiligen Mittenkilometer ausgelesen und die zugehörigen Zeitpunkte der Aufnahmen ermittelt. Aufgrund der festgelegten Hörsamplelänge von drei Sekunden ergeben sich die Anfangs- und Endzeitpunkte der Hörsamples durch Addition und Subtraktion der halben Hörsamplelänge. Die entsprechenden Streckenpositionen sind dabei von der zu diesem Zeitpunkt gefahrenen Geschwindigkeit abhängig. Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes sind Excel-Tabellen, in welchen für jede Fahrt die Anfangs- und Endzeitpunkte der Hörsamples in der Aufnahme, sowie zugehörige Kilometrierung (Anfangskilometer und Endkilometer), die Geschwindigkeit (minimal, mittel, maximal), das Parameter-Set und die Gleisnummer ausgegeben werden. Exemplarisch wird für Fahrt 4 eine solche Excel-Tabelle im Anhang A dargestellt.
3. Die Funktion „Schneiden“ extrahiert aus der Kunstkopfaufnahme einer gesamten Fahrt die einzelnen Hörsamples, als hdf-Dateien. Dafür werden die Anfangs- und Endzeiten der Hörsamples, die im vorherigen Arbeitsschritt ermittelt wurden, benötigt. Diese Funktion wurde mittels eines Visual Basic Programms, das die Akustiksoftware ArtemiS ansteuert, realisiert.
4. Um für die erstellen Hörsamples aussagekräftige Dateinamen festzulegen, die das weitere Handling und die rasche Identifizierbarkeit erleichtern sollen, wurde mittels MATLAB eine automatische Dateiumbenennung durchgeführt. Der resultierende Dateiname eines Hörsamples weist folgende Syntax auf:

[Hoerprobe\\_Para\\_aa\\_v\\_bbb\\_km\\_ccccc\\_Fahrt\\_dd\\_eee\\_ffff\\_ggggg.hdf](#)

Die Hörsample-Bezeichnung beinhaltet folgende Informationen:

- das Parameter-Set aa (z.B. Para\_01)
- die planmäßige Geschwindigkeit der Messfahrt bbb (z.B. v\_200)
- den Mittenkilometer des Hörsamples ccccc (z.B. km\_32100)
- die Name der Fahrt dd (z.B. Fahrt\_04)
- die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit im Bereich des Hörsamples eee (z.B. 200)
- den Kilometerbereich des Hörsamples fffff\_ggggg (z.B. 32055\_32205)

Anhand dieser Benennung kann bei der Zusammenstellung der Hörversuche rasch das passende Sample ausgewählt werden.

## 6 Hörversuche

Die Bezeichnung Hörversuch wird gebraucht um Verfahren zur subjektiven Bewertung von Geräuschen zu beschreiben. Die Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA) definiert in [11] einen Hörversuch folgendermaßen: „Unter dem Begriff Hörversuch wird eine planmäßige, wiederholbare und unter kontrollierten Bedingungen durchgeführte Untersuchung mit Probanden verstanden, denen akustische Reize präsentiert werden, die von den Probanden nach entsprechender Instruktion beurteilt werden. Ein Hörversuch stellt somit eine experimentelle Untersuchung dar. Unsystematische, eher beiläufig erhobene Beobachtungen können unter Umständen wertvolle Anregungen liefern oder interessante Fragen aufwerfen, stellen jedoch keine Hörversuche dar.“

Es gibt hochentwickelte psychoakustische Messverfahren, die auf physikalischen Messungen basieren. Hierbei werden die Daten entsprechend psychoakustischer Funktionsmodelle gewichtet. Hörversuche mit Versuchspersonen sind jedoch weiter unerlässlich, da bestimmte wahrgenommene akustische Eigenschaften wie „scheppernd“ oder „knirschend“ instrumentell nicht ermittelbar sind. Durch Hörversuche kann zudem untersucht werden, ob akustische Reize überhaupt hörbar sind, ob sie unterscheidbar sind und welchen Ausprägungsgrad diese besitzen. Weiters bieten Hörversuche den Vorteil, dass stets der Gesamteindruck eines Geräusches, wie zum Beispiel die Lästigkeit oder der Wohlklang, mehrdimensional beurteilt werden kann. [11]

### 6.1 Objektivität der Beurteilungen durch Versuchspersonen

Beurteilungen von Geräuschen durch Versuchspersonen mögen auf den ersten Blick wie subjektive Bewertungen wirken. Durch eine geeignete Versuchsdurchführung können aber auch Bewertungsergebnisse erzielt werden, die weitgehend unabhängig von den individuellen Personen und somit objektiv erscheinen. Zwar kann in der Regel keine vollständige Objektivität erreicht werden, bei einer geeigneten Auswahl der Probanden und einer entsprechenden Stichprobengröße kann jedoch sichergestellt werden, dass die Eigenheiten der Versuchsperson nicht in die Urteile eingehen. [8]

Laut Quang- Hue [8] wird in der Psychoakustik der Begriff Objektivität im Grundsatz wie folgt verstanden: „Objektivität liegt vor, wenn die statistische Verteilung der Beurteilungsergebnisse unterschiedlicher Versuchspersonen gleich und insoweit unabhängig von der individuellen Versuchsperson sind.“

### 6.2 Steuerung der Geräuschwiedergabe

Bei der Geräuschwiedergabe in Hörversuchen wird grundsätzlich zwischen folgenden Varianten der Steuerung unterschieden:

- **Definierte Abfolge der Geräuschwiedergabe (externe Steuerung)**

Alle am Hörversuch teilnehmenden Personen haben die exakt gleiche Zeit für die Bewertung der Geräusche zur Verfügung. Es werden dadurch gleiche Voraussetzungen für die Intensität geschaffen, mit der sich die Probanden mit den Geräuschstimuli auseinandersetzen, um eine Beurteilung abzugeben.

- **Individuelle Steuerung der Geräuschwiedergabe**

Bei kurzen Geräuschdarbietungen und bei Unsicherheiten hinsichtlich der Bewertung haben die Probanden die Möglichkeit, diese beliebig oft zu wiederholen. Dies erlaubt es, sehr geringe Unterschiede in Beurteilung der Hörproben in den Ergebnissen abzubilden. Der Zeitbedarf für Bewertung kann jedoch von Proband zu Proband unterschiedlich sein.

Da in den Hörversuchen teilweise sehr ähnliche Hörsamples zu bewerten sind und eine möglichst genaue Bewertung der Lästigkeit erfolgen sollen, wurde die individuelle Steuerung der Geräuschwiedergabe den Versuchen zu Grunde gelegt. Zu diesem Zweck wurde eine eigene Eingabeoberfläche in Visual Basic programmiert mit der ein gewünschter Ablauf und eine entsprechende Ansteuerung der Wiedergabe realisiert wurden. Im Detail wird durch das Programm der Head Audio Recorder 7.00, mit welchem die Hörsamples (hdf-Dateien) gehörriichtig abgespielt werden.

### 6.3 Arten der Vergleichstests

Da für die Beurteilung der Lästigkeit von Geräuschsituationen keine absolute Bewertungsskala existiert, basieren Hörversuche im Allgemeinen auf direkten Vergleichen. Hierbei steht häufig die Beantwortung folgender Fragen im Vordergrund:

- Welches von zwei oder mehreren Hörsamples wird als lästiger empfunden? (Rangordnung)
- Wie groß ist der Unterschied in der Lästigkeit zwischen zwei oder mehreren Hörsamples? (Relation)

Um dies zu beantworten, wurde ein Hörversuchsprogramm zusammengestellt, welches aus Paarvergleichen sowie aus 3er-, 4er- und 6er-Relationsvergleiche besteht. In den folgenden Kapiteln werden diese Vergleichstests und deren Implementierung näher erläutert.

#### 6.3.1 Paarvergleich

Ein Paarvergleich ist in der Regel eine einfache Vergleichsaufgabe bei der nur zwischen zwei Geräuschen hinsichtlich einer Merkmalsausprägung eine Entscheidung zu treffen ist. Es ist daher davon auszugehen, dass in einem Paarvergleich feinere Unterschiede herausgefunden werden können, als bei Aufgabenstellungen mit mehreren Samples.

Je nach Umsetzung kann ein Paarvergleich zwei oder drei Urteilmöglichkeiten zulassen, indem entweder nur zwei Urteile ( $A > B$  oder  $A < B$ ) oder drei Urteile ( $A > B$ ,  $A = B$ ,  $A < B$ ) zur Auswahl stehen. Es ergibt sich somit eine direkte Rangordnung, bezüglich des definierten Merkmals.

Dadurch sind dadurch Ordnungsrelationen interpretierbar, aber es können keine Aussagen über die Abstände der Ränge getätigt werden. Wenn mehr als zwei Objekte zu untersuchen sind, kann die sogenannte „Dominanzpaarvergleichsmethode“ angewandt werden, welche mehrere miteinander verknüpfte Paarvergleiche umfasst. Jedes Objekt muss dabei mit jedem anderen Objekt verglichen werden. Es ergibt sich daher für einen vollständigen Vergleich mit  $n$  zu untersuchenden Objekten eine Anzahl von

$$\binom{n}{2} = \frac{n \cdot (n - 1)}{2}$$

Paarvergleichen. Mit Hilfe dieser Methode kann eine indirekte Rangordnung erstellt werden. [12]

Im Hörversuchsprogramm der vorliegenden Arbeit werden nur Paarvergleiche mit zwei Urteilmöglichkeiten verwendet, sodass stets eine Entscheidung hinsichtlich des lästigeren Geräusches erzwungen wird. Aufgrund der gewählten Fragestellungen sind nur Paarvergleiche enthalten, beziehungsweise wird auf einen Dominanzpaarvergleich verzichtet.



Abb. 25. Programmoberfläche eines Paarvergleiches

Abbildung 25 zeigt die in Visual Basic erstellte Eingabemaske eines Paarvergleiches. Der Proband hat die Möglichkeit jedes Hörsample beliebig oft abzuspielen oder die Wiedergabe zu unterbrechen. Die Bewertung erfolgt durch Auswahl des angenehmeren Geräusches.

### 6.3.2 Relation

Soll nicht nur eine Rangordnung (Ranking) der Hörsamples, sondern auch der Unterschied (Abstand) zwischen ihnen ermittelt werden, dann ist eine Kombination aus Ranking und Skalierung anzuwenden. Diese Bewertungsform, welche im Weiteren als Relation bezeichnet wird, im Gegensatz zum Paarvergleich den Vergleich von mehreren Hörsamples. Die Ergebnisse sind dabei Daten auf Intervallskalen-Niveau, wodurch Abstände interpretierbar sind. Jedoch können keine Aussagen über Verhältnisse getroffen werden, da es keinen absoluten Nullpunkt gibt (vgl. Celsius-Skala).

Bei Hörversuchen empfiehlt es sich die Anzahl von sieben Geräuschen nicht zu übersteigen, um den kombinatorischen Aufwand für die Versuchspersonen überschaubar zu halten. [9] Unter Berücksichtigung dieser Maximalanzahl und um den Schwierigkeitsgrad im Rahmen zu halten, werden im Hörversuchsprogramm nur Relationen mit drei, vier und sechs Hörsamples verwendet.

Als Bewertungsmaßstab für die Geräusche wird bei den Relationen, wie auch bei den Paarvergleichen, die empfundene Lästigkeit gewählt. Jedes Hörsample innerhalb einer Relation ist durch die Probanden zu beurteilen, indem diese mit Hilfe eines stufenlosen Schiebereglers zwischen den Extremwerten „am angenehmsten“ und „am unangenehmsten“ wählen (siehe exemplarisch dargestellte Eingabemaske in Abbildung 26). In den Instruktionen vor Beginn des Hörversuches wurde auf eine Ausnutzung der Skala hingewiesen, wodurch die Abstände zwischen den Hörsamples höher aufgelöst (deutlicher dargestellt) werden. Auf die Angabe von Skalenwerte wurde bewusst verzichtet, um keinen absoluten Bezugspunkt zwischen den einzelnen Relationen zu schaffen. Zur besseren Orientierung wurden lediglich unbeschriftete Intervalle durch die horizontalen Linien dargestellt (siehe Abbildung 26).

Analog zum Paarvergleich hat der Proband auch bei der Relation die Möglichkeit alle Hörsamples beliebig oft abzuspielen oder die Wiedergabe abubrechen. Zudem kann der Proband auch alle Hörsamples in der Reihenfolge seiner Beurteilungen anhören (siehe „sortiert abspielen“ in Abbildung 26).

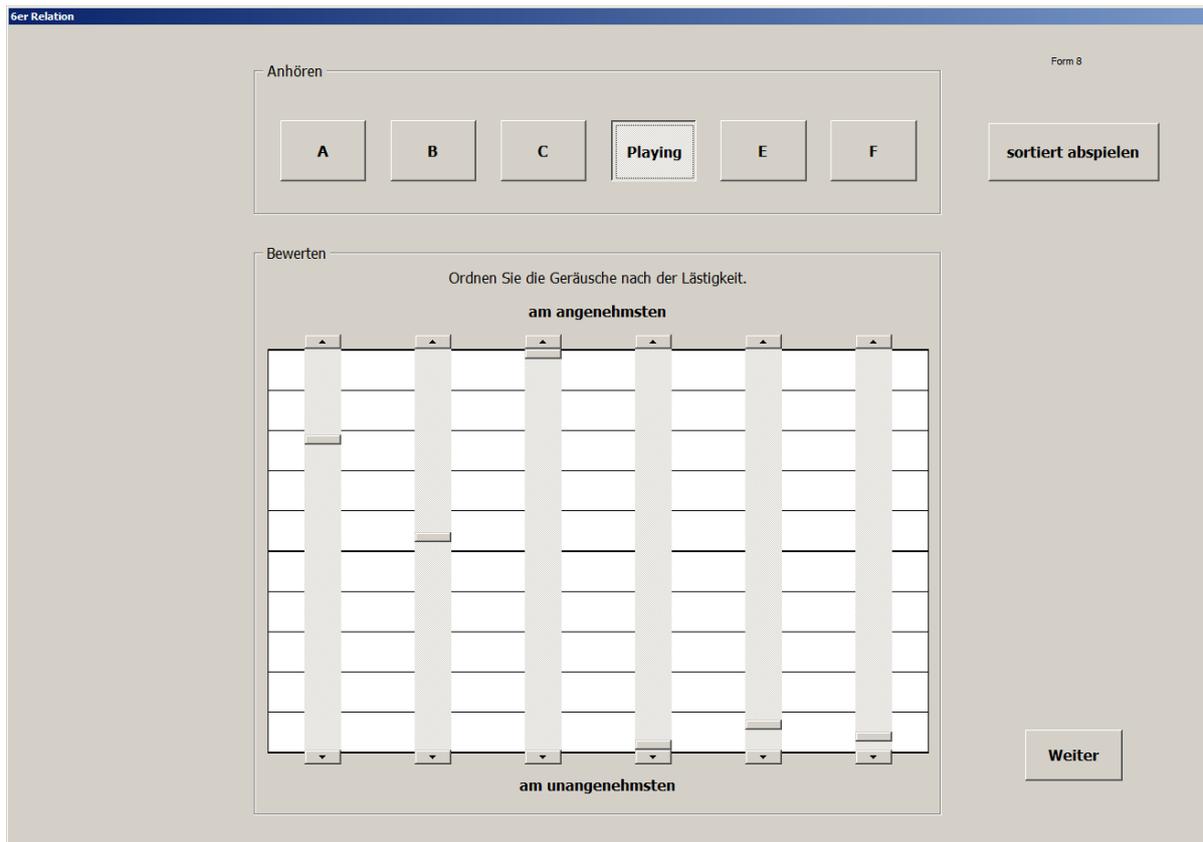


Abb. 26. Programmoberfläche einer 6er-Relation

## 6.4 Aufbau und Fragestellungen der Hörversuche

Für die Zusammensetzung des Hörversuchs wurden einige Fragestellungen entwickelt, die mit Hilfe der beschriebenen Vergleichsarten (Paarvergleich und Relationen) untersucht werden sollen.

Der gesamte Hörversuch, der von jedem Probanden zu durchlaufen ist, besteht aus insgesamt 23 verschiedenen Fragestellungen (bezeichnet als Test 1 bis Test 23). Das Hörversuchsprogramm wurde so zusammengestellt, dass Paarvergleiche und Relationen in unterschiedlicher Abfolge zu absolvieren sind. Insgesamt beinhaltet der gesamte Hörversuch 13 Relationen und 10 Paarvergleiche. Eine Übersicht der dabei verwendeten Hörsamples ist im Anhang D zu finden.

Tabelle 8 zeigt eine Übersicht der Fragestellungen. Alle Paarvergleiche sind zwei Mal mit gleicher oder ähnlicher Fragestellung vorhanden. Damit sollte die Aussagekräftigkeit der Paarvergleichsergebnisse erhöht werden. Bei den Relationen wurden nur einige ähnlich formulierte Fragestellungen abgefragt, um die Hörversuchsdauer im zeitlichen Rahmen zu halten.

## Kapitel 6 - Hörversuche

Test	Vergleichsart	Fragestellung
1	Paarvergleich	Wird ein Abschnitt mit einseitigem Wall oder beidseitigem Wall als angenehmer empfunden?
2	Paarvergleich	Wird ein Schotteroberbau oder eine Feste Fahrbahn als angenehmer empfunden?
3	Paarvergleich	Wird ein Abschnitt mit oder ohne 4m hoher Lärmschutzwand neben dem Gleis als angenehmer empfunden?
4	Paarvergleich	Wird ein 2-gleisiger Tunnelabschnitt bei 160 km/h mit oder ohne Gleisabsorber als angenehmer empfunden?
5	4er-Relation	Wie groß ist der akustische Wahrnehmungsunterschied zwischen freier Strecke und einem Tunnel bei 200 km/h?
6	6er-Relation	Wie groß ist der akustische Wahrnehmungsunterschied zwischen Abschnitten auf freier Strecke mit unterschiedlichen Streckenparametern und einem 2-gleisigen Tunnel bei 200 km/h?
7	3er-Relation	Wie groß ist der akustische Wahrnehmungsunterschied von Streckenabschnitten mit und ohne LSW?
8	6er-Relation	Wird die freie Strecke mit Schotterbett bei 230 und 250 km/h noch immer angenehmer wahrgenommen, als ein 2-gleisiger Tunnel mit Absorber bei 100, 160 und 200 km/h?
9	4er-Relation	Wie groß ist der akustische Wahrnehmungsunterschied zw. einem 2-gleisigen Tunnel mit und ohne Gleisabsorber bei 160 km/h? Und wie sind im Vergleich dazu die Höreindrücke eines 2-gl. Tunnels mit Absorber bei 230 km/h und eines 1-gl. Tunnels ohne Absorber bei 160 km/h?
10	6er-Relation	Gibt es akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen 2-gleisigen Tunneln mit Gleisabsorber bei 160, 200, 230 und 250 km/h, ohne Absorber bei 160 km/h und 1-gleisigen Tunneln ohne Absorber bei 160 km/h?
11	Paarvergleich	Wird ein 2-gleisiger Tunnelabschnitt bei 100 km/h mit oder ohne Gleisabsorber als angenehmer empfunden?
12	4er-Relation	Gibt es akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen einem Schotteroberbau bei 200, 230 und 250 km/h und einer Festen Fahrbahn bei 200 km/h?
13	6er-Relation	Gibt es akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen 1-gleisigen Tunneln mit Gleisabsorber bei 200, 230 und 250 km/h, ohne Absorber bei 160 km/h und 2-gleisigen Tunneln mit Absorber bei 160 und 200 km/h?
14	Paarvergleich	Wird ein Schotteroberbau oder eine Feste Fahrbahn als angenehmer empfunden?
15	Paarvergleich	Wird ein Abschnitt mit oder ohne 4m hoher Lärmschutzwand neben dem Gleis als angenehmer empfunden?
16	Paarvergleich	Wird ein Abschnitt mit einseitigem Wall oder beidseitigem Wall als angenehmer empfunden?
17	4er-Relation	Gibt es akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen einer Festen Fahrbahn bei 200, 230 und 250 km/h und einem Schotteroberbau bei 250 km/h?
18	4er-Relation	Gibt es akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen einer Festen Fahrbahn und einem Schotteroberbau auf freier Strecke bei 230 km/h?
19	4er-Relation	Wie groß ist der akustische Wahrnehmungsunterschied zwischen Abschnitten auf freier Strecke mit unterschiedlichen Streckenparametern bei 200 km/h?
20	4er-Relation	Wie groß ist der akustische Wahrnehmungsunterschied zw. einem 2-gleisigen Tunnel mit Absorber und ohne Absorber bei 160 km/h? Und wie sind im Vergleich dazu die Höreindrücke auf freier Strecke und Fester Fahrbahn bei 230 und 250 km/h?
21	4er-Relation	Gibt es akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen einer Festen Fahrbahn und einem Schotteroberbau auf freier Strecke bei 250 km/h?
22	Paarvergleich	Wird ein 1-gleisiger Tunnel bei 160 km/h ohne Gleisabsorber oder bei 230 km/h mit Gleisabsorber als angenehmer empfunden?
23	Paarvergleich	Wird ein 1-gleisiger Tunnel bei 160 km/h ohne Gleisabsorber oder bei 230 km/h mit Gleisabsorber als angenehmer empfunden?

**Tab. 8. Übersicht der Fragestellungen des Hörversuches**

### 6.5 Testläufe

Nach Festlegung der Fragestellungen und der Programmierung der Eingabeoberfläche in Visual Basic wurden Testläufe durchgeführt, um mögliche Fehlerquellen zu identifizieren und auch den zeitlichen Aufwand für den Hörversuch abzuschätzen. Nach diesen Probeläufen wurde ersichtlich, dass keine Änderungen in der Programmsteuerung vorzunehmen sind und der Umfang des Hörversuchs, aufgrund der Aussagen der Testpersonen, nicht mehr erhöht werden sollte.

## 6.6 Durchführung der Hörversuche

### 6.6.1 Durchführungsort

Die Hörversuche wurden in einem Labor durchgeführt, welches beinahe ungestört von etwaigen Umgebungsgeräuschen ist. Durch die Wiedergabe der Hörsamples über Kopfhörer sind die Einflüsse der Raumakustik als geringer einzustufen, als bei einer Wiedergabe über Lautsprecher [14]. Es wurde daher auf eine Adaptierung des Versuchsraumes hinsichtlich der Raumakustik verzichtet.

Das menschliche Gehör besitzt die Fähigkeit sich permanent an die jeweilige akustische Umgebung anzupassen, wodurch Geräusche jeweils gemäß der aktuell vorhandenen Raumakustik interpretiert werden. Dieser Effekt kann reduziert werden, indem der Proband versucht sich in einen „virtuellen akustischen Raum“ hineinzusetzen. [9] Dies wurde durch den anfänglichen Hinweis an die Probanden, dass die Geräusche während der Fahrt in einem Reisezugwagen aufgenommen wurden, gefördert.



Abb. 27. Proband während der Durchführung des Hörversuches

### 6.6.2 Versuchspersonen

Insgesamt 36 Probanden haben an den Hörversuchen teilgenommen. Bei der Auswahl der Probanden wurde eine ausgeglichene Verteilung zwischen weiblichen und männlichen Probanden angestrebt. Obwohl es an einer technischen Universität deutlich mehr männliche Studierende gibt und viele davon bereit waren an den Hörversuchen teilzunehmen, konnte auch ein großer Anteil an weiblichen Probanden (39%) gewonnen werden (siehe Abbildung 28).

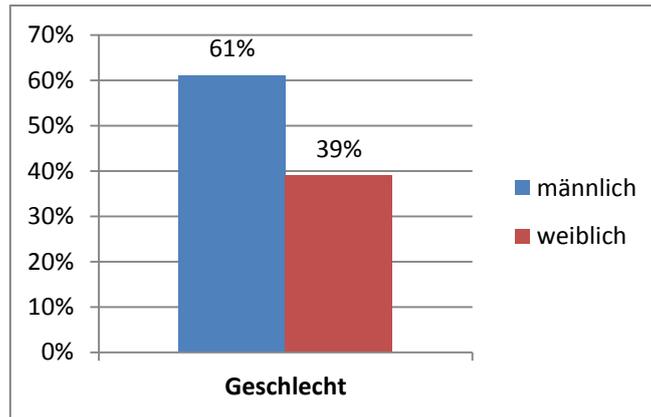


Abb. 28. Verteilung der Probanden nach dem Geschlecht

Von Fahrgastbefragungen im Fernverkehr ist bekannt, dass die Altersgruppe der unter 30-jährigen, im Vergleich zur Gesamtbevölkerung, im Bahnverkehr überrepräsentiert ist. Für diese Altersgruppen wird, aufgrund der fehlenden finanziellen Mittel für ein Kraftfahrzeug und des Führerscheinalters, eine eingeschränkte Verkehrsmittelwahl vermutet. [15] Die Altersverteilung der Reisenden im Vergleich zur Bevölkerung Österreichs wird in Abbildung 29 dargestellt.

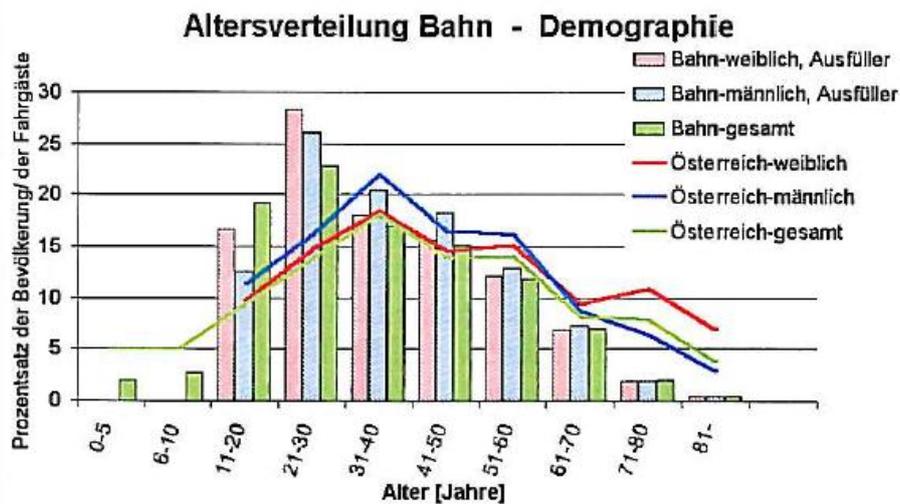


Abb. 29. Altersgruppenverteilung im Eisenbahnfernverkehr mit Demografie Österreichs [15]

Bei der Auswahl der Probanden wurde als Ziel angestrebt, dass die Altersverteilung der Probanden repräsentativ für die dargestellte eisenbahnfahrende Bevölkerung Österreichs ist. Da jedoch bei Personen über 60 Jahren eine altersbedingte Verminderung des Hörvermögens vorkommen kann und da der Personenkreis unter 20 Jahren für eine Teilnahme am Hörversuch schwerer verfügbar war, wurde vorwiegend auf eine charakteristische Verteilung im Altersbereich von 20 bis 60 Jahren geachtet. Die schlussendliche Altersverteilung der Probanden setzte sich wie in Abbildung 30 dargestellt zusammen.

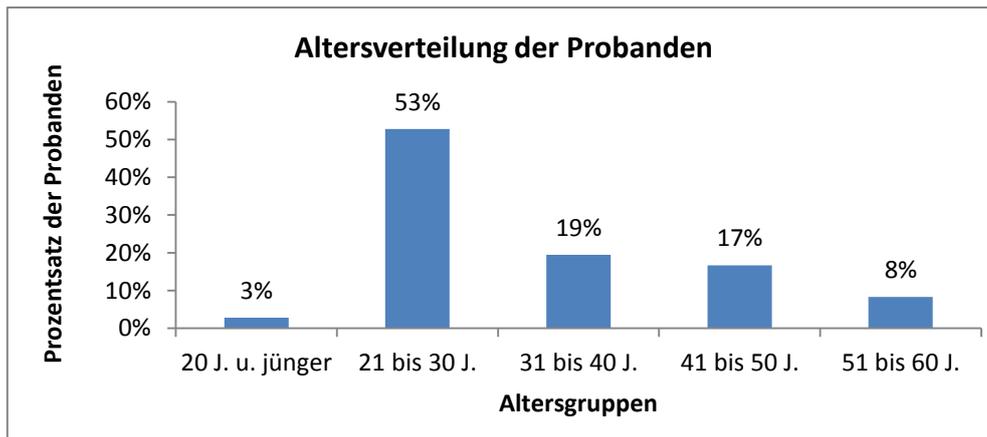


Abb. 30. Altersverteilung der Probanden

### 6.6.3 Durchführungsablauf

Vor Beginn jedes Hörversuches wurden die schriftlich vorliegenden Instruktionen (siehe Anhang A) mit den Probanden durchgegangen. Dabei wurden speziell die Steuerung des Programms und die Bewertungsmethoden erklärt. Es wurde darauf geachtet, dass jeder Proband vor Versuchsbeginn, dieselben Informationen zur Verfügung gestellt bekommt.

Die in Visual Basic programmierte Eingabeoberfläche wurde aus MS Excel unter Verwendung des Betriebssystems Windows 7 gestartet. Die Hörsamples wurden über den programmierbaren Equalizer PEQ V von Head acoustics und zugehörigen offenen Kopfhörern abgespielt.

Der Hörversuch konnte anschließend von den Probanden vollkommen eigenständig, ohne jegliche Zeitvorgabe durchgeführt werden. Der Versuchsleiter war für allfällige Fragen während des Tests in einem Nebenzimmer anwesend. Die Ergebnisse der Bewertungen jedes Probanden wurden in einem eigenen Tabellenblatt gespeichert. Zudem wurden darin auch die Anzahl der Hörsample-Wiedergaben und die Dauer pro Test erfasst.

Nach den Hörversuchen wurde jedem Proband ein Fragebogen vorgelegt, welcher Feedback über den Ablauf und die Aufgabenstellungen geben sollte (siehe Anhang C). Die Ergebnisse werden im Rahmen dieser Arbeit nicht dargestellt, da sie lediglich das Befinden der Probanden dokumentieren sollten.

## 7 Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

Die Hörversuche wurden unter Laborbedingungen ohne störende Nebengeräusche durchgeführt. Die Aussagen und Interpretationen bezüglich der Wahrnehmung und Unterscheidbarkeit von Hörproben werden daher auf Grundlage dieser Bedingungen gefällt. Es ist anzunehmen, dass während einer alltäglichen Zugfahrt die Unterscheidbarkeit der Geräuschsituationen geringer ist, da andere Geräusche, beispielsweise von anderen Fahrgästen, wesentlichen Einfluss zeigen. Der Vorteil der Laborversuche ist jedoch, dass die Fahrgeräusche, die im Fokus dieser Arbeit stehen, exakter bewertet und analysiert werden können.

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte vorwiegend mit MS Excel. Die Paarvergleichsergebnisse werden nachstehend als Tortendiagramme grafisch dargestellt. Die Bewertungsergebnisse der Relationen werden mit Box-Whisker Plots präsentiert, womit zahlreiche Informationen über die Verteilung der Bewertungen in einer Grafik dargestellt werden können. Es sind Median, oberes und unteres Quartil (Box), Ausreißer und Extremwerte auf einen Blick erkennbar. Erstellt wurden die Box-Whisker Plots mit der Statistiksoftware STATISTICA.

### Erklärung - Box-Whisker Plot:

Abbildung 31 zeigt einen exemplarischen Box-Whisker Plot. Der rechteckige Punkt stellt den Median einer Wertemenge dar. Durch seine Lage bekommt man Auskunft über die mittlere abgegebene Bewertung und die Schiefe der Verteilung der Daten.

Die rechteckige Box, die den Median umrahmt, stellt jenen Bereich dar, in dem 50% der Werte liegen. Sie repräsentiert somit das untere und obere Quartil und wird durch den unteren Box-Wert (LBV engl. Lower Box Value) und oberen Box-Wert (UBV engl. Upper Box Value) begrenzt. Die Distanz zwischen diesen beiden Werten entspricht dem Interquartilsabstand (Boxhöhe H). Die Antennen, oder auch Whisker genannt, erweitern im Regelfall den Wertebereich der Box. Sie kennzeichnen jenen Wertebereich in dem mit Ausnahme der Ausreißer alle Werte liegen. Die Whisker reichen so weit, dass sie den höchsten und niedrigsten Wert erfassen, die einem Ausreißer am nächsten sind, aber selbst noch keine sind.

Für die Definition von Ausreißern werden die in Abbildung 31 gekennzeichneten Abstände erläutert. Wird vom unteren Box-Wert (LBV) die 1,5-fache Boxhöhe H abgezogen bzw. zum oberen Box-Wert (UBV) dazugezählt, erhält man den sogenannten „Non-Outlier“-Bereich. Werte außerhalb dieses Bereiches werden als Ausreißer angesehen und mit einem Kreis gekennzeichnet, sofern sie keine Extremwerte sind. Diese Extremwerte liegen außerhalb der 3-fachen Boxhöhe, jeweils vom oberen und unteren Box-Wert gemessen. Sie werden mit einem Kreuz gekennzeichnet.

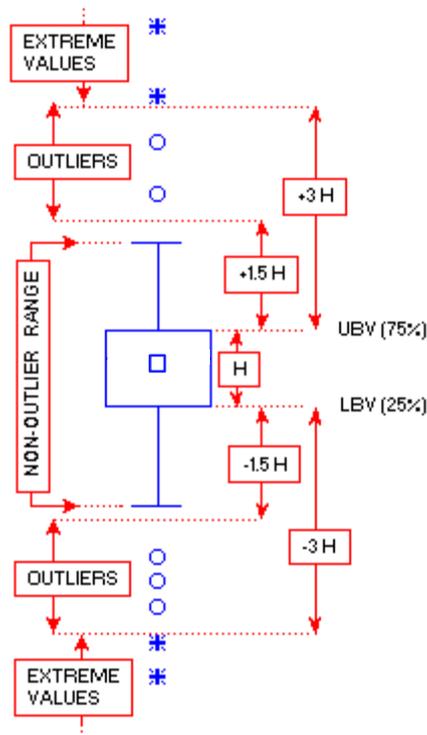


Abb. 31. Exemplarischer Box-Whisker Plot und grafische Darstellung von Ausreißern

## 7.1 Ergebnisse der Paarvergleiche

Um bei der Interpretation der Ergebnisse mehr Informationen zur Verfügung zu haben, wurden auch aus den Relationen Paarvergleiche extrahiert, wenn darin die gleichen Hörsamples enthalten waren. In einer Relation war es möglich, durch die exakt gleiche Positionierung des Schieberegler, eine gleiche Bewertung der Hörsamples abzugeben, wodurch eine dritte Option der Beurteilung möglich ist.

Nach der Darstellung der Bewertungsergebnisse werden die Schalldruckpegel und die psychoakustischen Parameter der verwendeten Hörsamples gegenübergestellt. Alle Parameterwerte wurden mit der Analyse-Software ArtemiS berechnet und stellen jeweils einen Mittelwert über die Hörsampledauer von 3 s dar. Der dargestellte Pegel entspricht dem gemittelten, A-bewerteten, energieäquivalenten Dauerschallpegel. Der Parameter der Lautheit wurde mit der Berechnungsmethode „FFT / ISO 532 B“ ermittelt. Die auf der Lautheitsberechnung basierende Schärfe eines Hörsamples wurde mit dem Algorithmus von Aures errechnet. Die Rauigkeit und Tonalität der Samples wurde mit den vorgegebenen Standardeinstellungen von ArtemiS bestimmt.

### 7.1.1 Statistische Auswertung der Paarvergleiche

Die Bewertungen der Probanden sollen statistisch untersucht werden, um Aussagen über die allgemeine Wahrnehmung von Fahrgästen tätigen zu können. Zu diesem Zweck werden Signifikanztests eingesetzt. Daher wird eine **Nullhypothese  $H_0$**  aufgestellt, die besagt, dass **Streckenabschnitte eines Paarvergleichs gleich angenehm empfunden** werden. Dafür muss sich für die Allgemeinheit der Fahrgäste (Grundgesamtheit) eine ausgeglichene Wahrnehmung der Streckenabschnitte ergeben. Die Wahrscheinlichkeit dass eine der beiden Hörproben als angenehmer empfunden wird, muss somit bei 50% liegen ( $p=0,5$ ).

Die **Alternativhypothese  $H_1$**  besteht darin, dass **ein Streckenabschnitt unangenehmer empfunden** wird. Die Verteilung der allgemeinen Wahrnehmung von zwei Abschnitten ist in diesem Fall nicht mehr ausgeglichen, sondern ein Streckenabschnitt wird weniger häufig als angenehm empfunden ( $p<0,5$ ). Diese Wahl der Alternativhypothese entspricht einem einseitigen Test.

Das Signifikanzniveau für die Hypothesentests wird mit 1% festgesetzt. Dies entspricht jener Wahrscheinlichkeit, die für ein irrtümliches Verwerfen der Nullhypothese  $H_0$  akzeptiert wird (Irrtumswahrscheinlichkeit).

Die insgesamt 36 Probanden konnten in jedem Paarvergleich wählen, welches Hörsample sie als angenehmer empfinden. Die Paarvergleiche können somit jeweils zwei verschiedene Merkmalsausprägungen besitzen:

$$X_i = \begin{cases} 0 & \dots \text{Sample 1 angenehmer} \\ 1 & \dots \text{Sample 2 angenehmer} \end{cases}$$

Die Stichprobendaten können folglich als binomialverteilt angesehen werden:

$$X_i \sim B(n, p)$$

Der Nullhypothese  $H_0$  liegt eine Erfolgswahrscheinlichkeit für die angenehmere Bewertung eines Hörsamples von  $p=0,5$  zugrunde. Der Stichprobenumfang  $n$  beträgt 36. Die Binomialverteilung unter diesen Bedingungen besitzt somit einen Erwartungswert von  $n \cdot p = 18$ .

Um die aufgestellten Hypothesen zu prüfen wird ein Binomialtest durchgeführt. In Abhängigkeit des festgesetzten Signifikanzniveaus von 1% wird der größte Wert  $c$  ermittelt für den gilt:

$$P(X \leq c \mid p = 0,5) \leq 0,01$$

Die zu berechnende Wahrscheinlichkeit  $P$  kann durch die Kumulation der Erfolgswahrscheinlichkeiten der Binomialverteilung (dargestellt in Tabelle 9) errechnet werden. Die Zahl  $i$  beschreibt wie oft ein Sample als angenehmer bewertet wurde („Anzahl der Erfolge“):

$$P(X \leq c \mid p = 0,5) = \sum_{i=1}^c B(i \mid 0,5, 36)$$

$i$	$B(i   0,5, 36)$	$\sum_1^i B(i   0,5, 36)$
1	5,239E-10	0,000%
2	9,168E-09	0,000%
3	1,039E-07	0,000%
4	8,572E-07	0,000%
5	5,486E-06	0,001%
6	2,834E-05	0,003%
7	1,215E-04	0,016%
8	4,403E-04	0,060%
9	1,370E-03	0,197%
10	3,699E-03	0,507%
11	8,743E-03	1,381%

Tab. 9. Erfolgswahrscheinlichkeiten der Binomialverteilung (einzeln und kumuliert) bis von  $i=1$  bis 11

Der größte Wert  $c$  bei dem die kumulierte Erfolgswahrscheinlichkeit (dargestellt in der letzten Spalte der Tabelle 9) kleiner als das Signifikanzniveau von 1 % ist, ist 10. Somit ergeben sich die in Abbildung 32 dargestellten Ablehnungs- und Vereinbarkeitsbereiche für die Nullhypothese  $H_0$ .

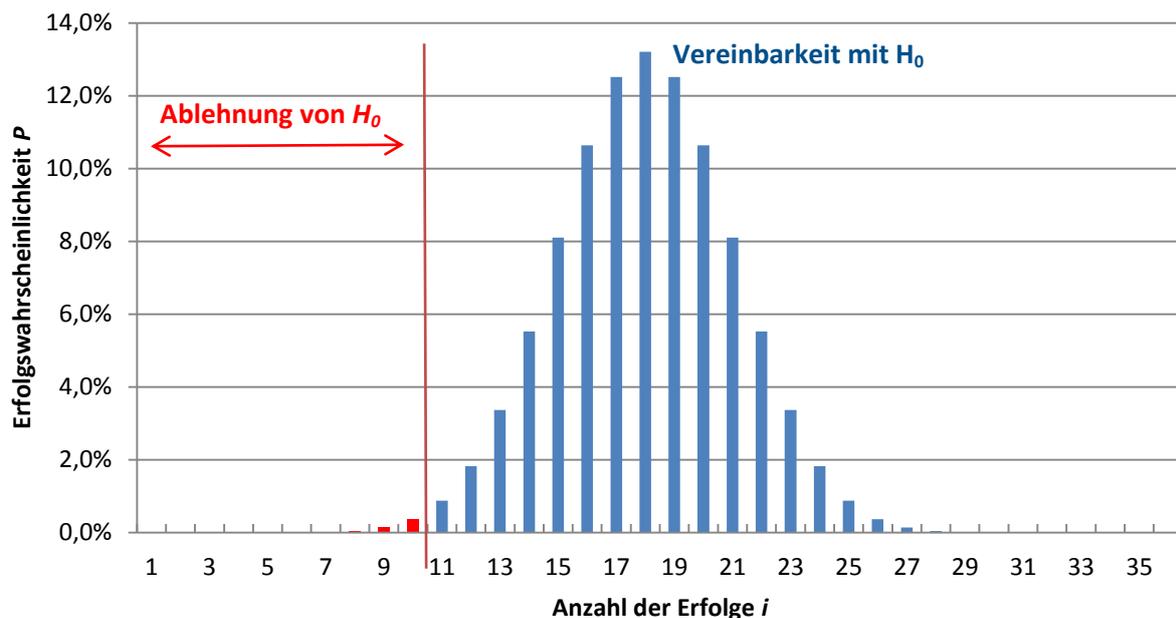


Abb. 32. Grafische Darstellung der Erfolgswahrscheinlichkeiten sowie der Ablehnungs- und Vereinbarkeitsbereiche der Nullhypothese  $H_0$

**Der Binomialtest bringt folgende zwei Entscheidungsmöglichkeiten über die Nullhypothese  $H_0$ :**

1. Wird ein Streckenabschnitt in der gewählten Stichprobengröße maximal 10 Mal als angenehmer bewertet, ist die kumulierte Erfolgswahrscheinlichkeit  $P$  kleiner als das gewählte Signifikanzniveau von 1% und die Nullhypothese  $H_0$  wird abgelehnt. Es gilt die Alternativhypothese  $H_1$ , die besagt, dass dieser Streckenabschnitt als unangenehmer empfunden wird.

2. Wird ein Streckenabschnitt mehr als 10 Mal als angenehmer bewertet, kann dieses Ergebnis unter den Bedingungen der Nullhypothese  $H_0$  zustande gekommen sein (Vereinbarkeit). Kein Streckenabschnitt kann somit als unangenehmer identifiziert werden.

### 7.1.2 Paarvergleich freie Strecke mit einseitigem/beidseitigem Wall

Dieser Paarvergleich soll Aufschluss darüber geben, ob ein Unterschied zwischen dem Fahrzeuginnengeräusch eines Streckenabschnittes mit einseitigem Wall und eines Abschnittes mit beidseitigem Wall, bei sonst gleichen Streckeneigenschaften, wahrnehmbar ist.

Die gewählten Streckenabschnitte, aus denen die Hörsamples stammen, weisen folgende Eigenschaften auf:

- Freie Strecke
- Schotterbett
- Gerade

Die Aufzeichnung der Hörsamples fand jeweils bei 200 km/h am Gleis 9 (jeweils rechtes Gleis in Abbildung 33) statt. Die Streckenabschnitte unterscheiden sich lediglich durch den Wall rechts der Strecke, der die freie Schallausbreitung einschränkt bzw. fördert wenn er nicht vorhanden ist.

Es wurden im Hörversuchsprogramm zwei dieser Paarvergleiche (Test 1 und 16) abgefragt. Darüber hinaus wurden in zwei Relationen (Test 6 und 19) dieselben Hörsamples in Kombination mit weiteren Hörproben bewertet. Aus diesen Relationen können zwei weitere Paarvergleiche (PV) gebildet werden (Ergebnisse siehe Tabelle 10 und Abbildung 34).

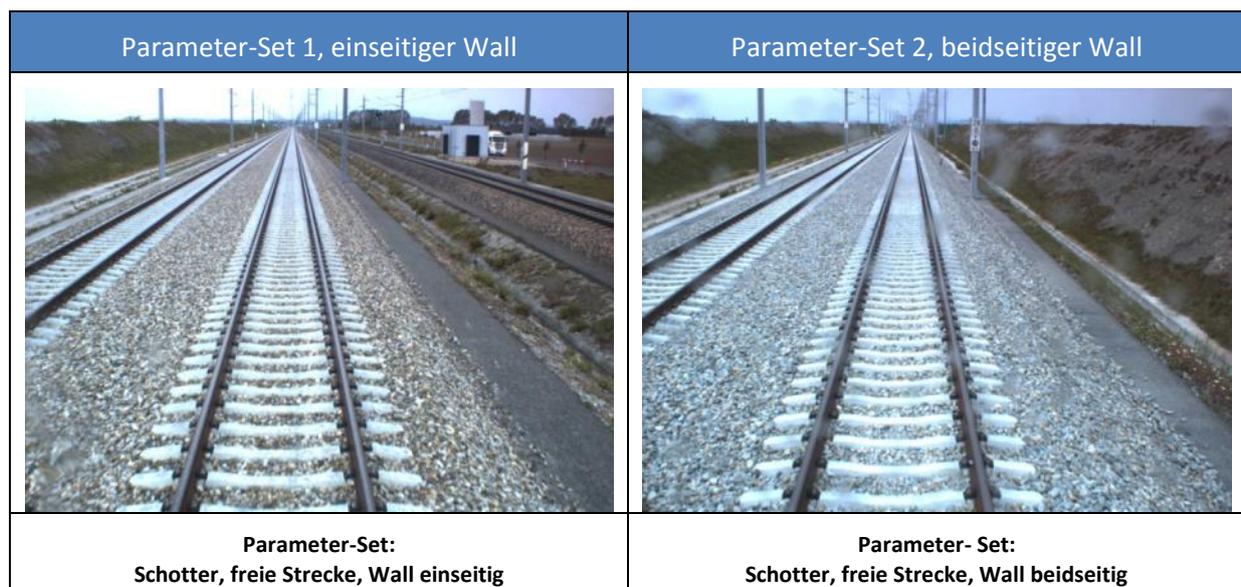


Abb. 33. Streckenbilder der Abschnitte mit einseitigem und beidseitigem Wall

**Bewertungen der Hörproben**

Wird ein Abschnitt mit einseitigem Wall oder beidseitigem Wall als angenehmer empfunden?			
Tests	Abgegebene Bewertungen		
	einseitiger Wall	beidseitiger Wall	gleiche Bewertung
PV (Test 1)	6	30	-
PV (Test 16)	17	19	-
Relation (Test 6)	17	15	4
Relation (Test 19)	15	18	3

Tab. 10. Tabellarische Übersicht der Bewertungsergebnisse

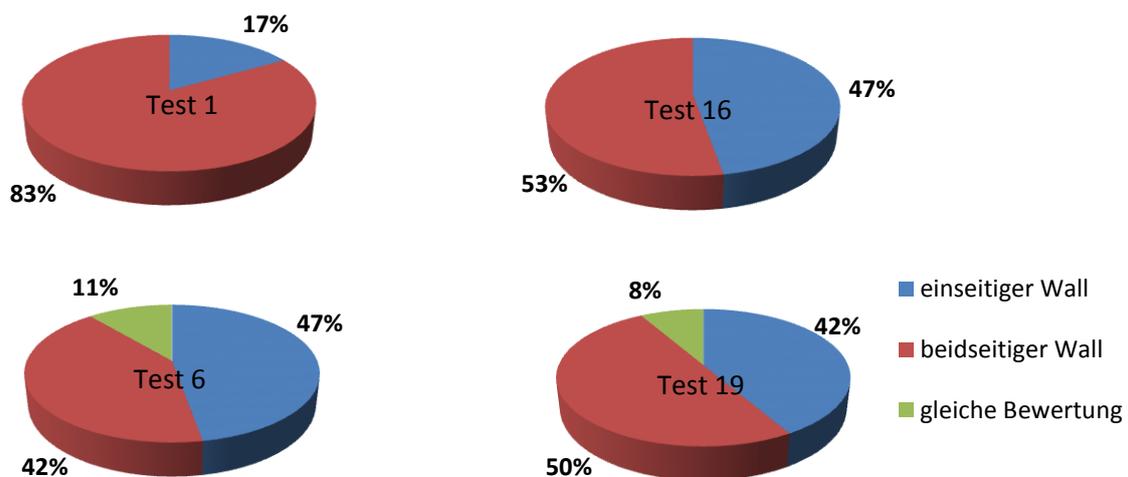


Abb. 34. Grafische Darstellung der Bewertungen bei der Frage nach angenehmerem Geräusch

Mit Ausnahme von Test 1 sind die Bewertungen der beiden Hörsamples von den Streckenabschnitten mit einseitigem und beidseitigem Wall in allen Tests annähernd gleich verteilt. In Tabelle 10 ist ersichtlich, dass 4 bzw. 3 Mal die Samples in den Relationen als gleich lästig bewertet wurden.

Diese Ausgeglichenheit bei den Bewertungen bestätigt sich auch bei der Betrachtung der zugehörigen Box-Whisker Plots. So ist in Abbildung 35, welche exemplarisch den Box-Whisker Plot von Test 6 zeigt, zu erkennen, dass die betreffenden Hörsamples (Sample 1 und 4) einen annähernd gleichen Median und eine sehr ähnliche Streuung der Bewertungen aufweisen.

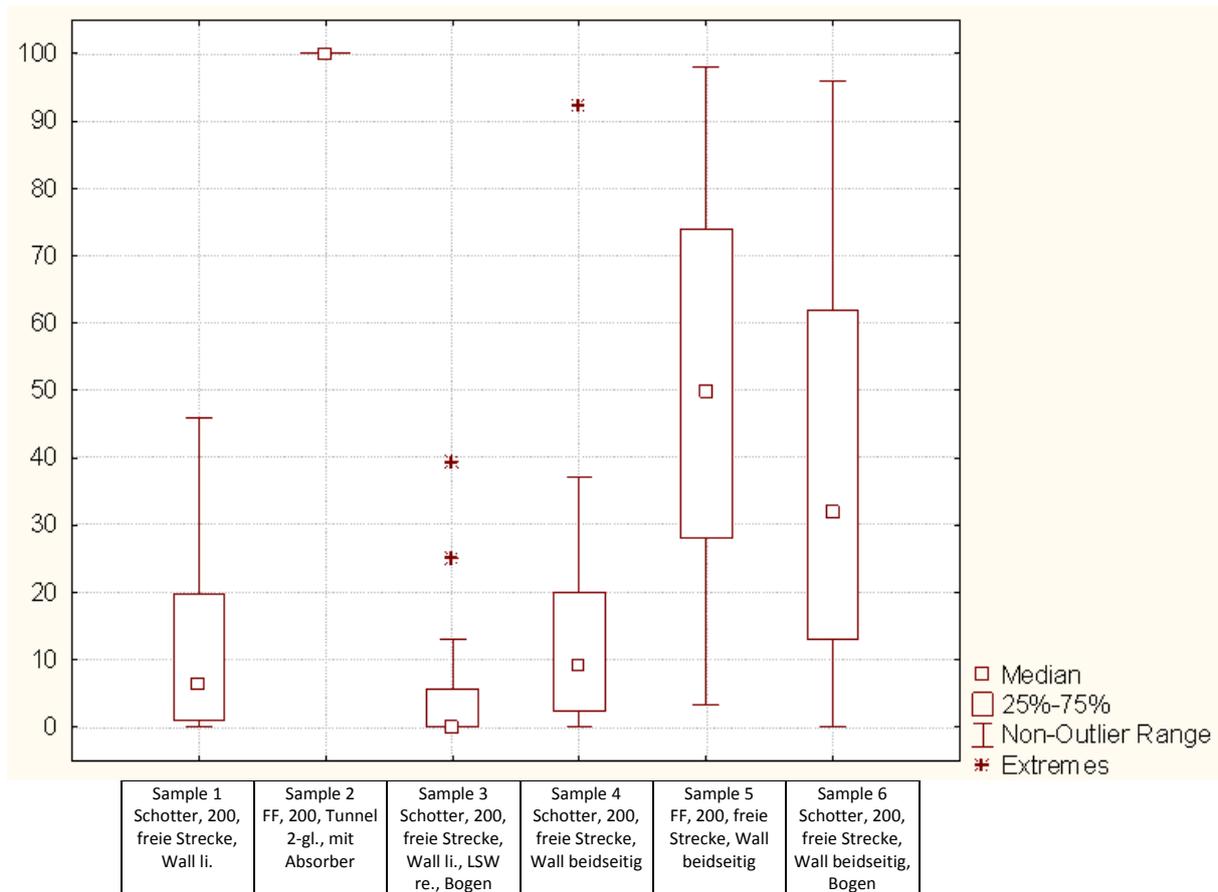


Abb. 35. Box-Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 6

Aufgrund der sehr ähnlichen Verteilung von Test 6, 16 und 19 wird das Ergebnis des Tests 1 verworfen, da hier ein statistischer Ausreißer vermutet werden kann. Bei der Durchführung weiterer Paarvergleiche dürfte dieses Ergebnis nur sehr selten auftreten.

### Schalldruckpegel und psychoakustische Parameter der Hörsamples

Der Vergleich der Parameter der Hörsamples zeigt einen annähernd gleichen Schalldruckpegel der Samples und eine sehr ähnlich Geräuschcharakteristik anhand der psychoakustischen Parameter (siehe Tabelle 11). In den insgesamt vier Tests (1, 6, 16 und 19) wurden je zwei Hörsamples für die Abschnitte mit einseitigem und beidseitigem Wall verglichen.

Parameter	Verwendung in	einseitiger Wall	beidseitiger Wall
Pegel in dBA	Test 1, 6	60,18	60,30
	Test 16, 19	59,89	59,56
	<b>Mittelwert</b>	<b>60,04</b>	<b>59,93</b>
Lautheit in sone	Test 1, 6	14,33	14,42
	Test 16, 19	14,13	13,91
	<b>Mittelwert</b>	<b>14,23</b>	<b>14,16</b>
Rauhigkeit in asper	Test 1, 6	1,78	1,82
	Test 16, 19	1,80	1,79
	<b>Mittelwert</b>	<b>1,79</b>	<b>1,81</b>
Schärfe in acum	Test 1, 6	1,46	1,45
	Test 16, 19	1,45	1,45
	<b>Mittelwert</b>	<b>1,46</b>	<b>1,45</b>
Tonalität in tu	Test 1, 6	0,0298	0,0375
	Test 16, 19	0,0389	0,0240
	<b>Mittelwert</b>	<b>0,0344</b>	<b>0,0308</b>

Tab. 11. Parameterübersicht der Hörsamples mit einseitigem und beidseitigem Wall

#### Statistische Auswertung der Bewertungsergebnisse

Auf Basis der Bewertungen der 36 Probanden soll geprüft werden, ob der Streckenabschnitt mit einseitigem Wall allgemein als unangenehmer wahrgenommen wird. Dafür wird der in Kapitel 7.1.1 erläuterte Hypothesentest durchgeführt. In Tabelle 12 werden die Bewertungsergebnisse für die Hörproben „einseitiger Wall“ zusammengefasst und die Verwerfung der Nullhypothese untersucht.

Einseitiger Wall				
Test	Anzahl „angenehmer“	Gleiche Bewertung (nur bei Relation)	Kumulierte Erfolgswahrscheinlichkeit	Verwerfung der Nullhypothese
16	17	-	0,43397	nein
6	17	4	0,43397	nein
19	15	3	0,20252	nein

Tab. 12. Bewertungsübersicht und Hypothesenprüfung für die Hörproben „einseitiger Wall“

Die Hörproben des Streckenabschnittes mit einseitigem Wall wurden in jedem Test öfters als 10 Mal als angenehmer bewertet (siehe Spalte 2 in der Tabelle 12), womit der Höreindruck dieses Streckenabschnittes für die Allgemeinheit nicht als unangenehmer identifizierbar ist.

### Interpretation

Aufgrund der sehr ausgeglichenen Bewertung der Hörproben mit einseitigem und beidseitigem Wall kann keiner der zugehörigen Streckenabschnitte als akustisch unangenehm identifiziert werden. Es ist anzunehmen, dass die Schallausbreitung durch die Lärmschutzwälle auf beiden Seiten der Strecke nicht oder nur in einem sehr geringen Ausmaß beeinflusst wird, sodass ein Fahrgast keinen eindeutigen Unterschied im Innengeräusch wahrnehmen kann.

Die Parameter der Hörsamples, dargestellt in Tabelle 11, variieren in sehr geringem Ausmaß. Es ist somit plausibel, dass kein Wahrnehmungsunterschied zwischen den beiden Streckenabschnitten erkannt werden konnte.

#### 7.1.3 Paarvergleich Feste Fahrbahn/Schotteroberbau

In diesem Paarvergleich werden die Oberbauformen Feste Fahrbahn und Schotterbett im Hinblick auf deren akustische Wahrnehmung im Fahrzeuginneren untersucht. Dieser Paarvergleich soll Auskunft darüber geben welcher Oberbau vom Fahrgast als angenehmer empfunden wird.

Die gewählten Streckenabschnitte, aus denen die Hörsamples stammen, weisen folgende Eigenschaften auf:

- Freie Strecke
- Beidseitiger Wall

Die Aufzeichnung der Hörsamples fand jeweils bei 200 km/h am Gleis 9 (jeweils rechtes Gleis in Abbildung 36) statt. Die Streckenabschnitte unterscheiden sich durch die Oberbauform. Da auf der Messstrecke die Feste Fahrbahn auf freier Strecke nur im Bogen vorzufinden ist, wurden die Hörsamples für diesen Paarvergleich aus diesen Abschnitten entnommen. Wie in Abbildung 36 (links) ersichtlich ist, wurde die Feste Fahrbahn auf freier Strecke mit Gleisabsorbern ausgestattet.

Es wurden zwei Paarvergleiche (PV) mit diesem Untersuchungsschwerpunkt abgefragt (Test 2 und Test 14). In drei Relationen (Test 5, 12 und 19) wurden dieselben Hörsamples in Kombination mit weiteren Hörproben bewertet. Aus diesen Relationen werden drei weitere Paarvergleiche gebildet werden (Ergebnisse siehe Tabelle 13).

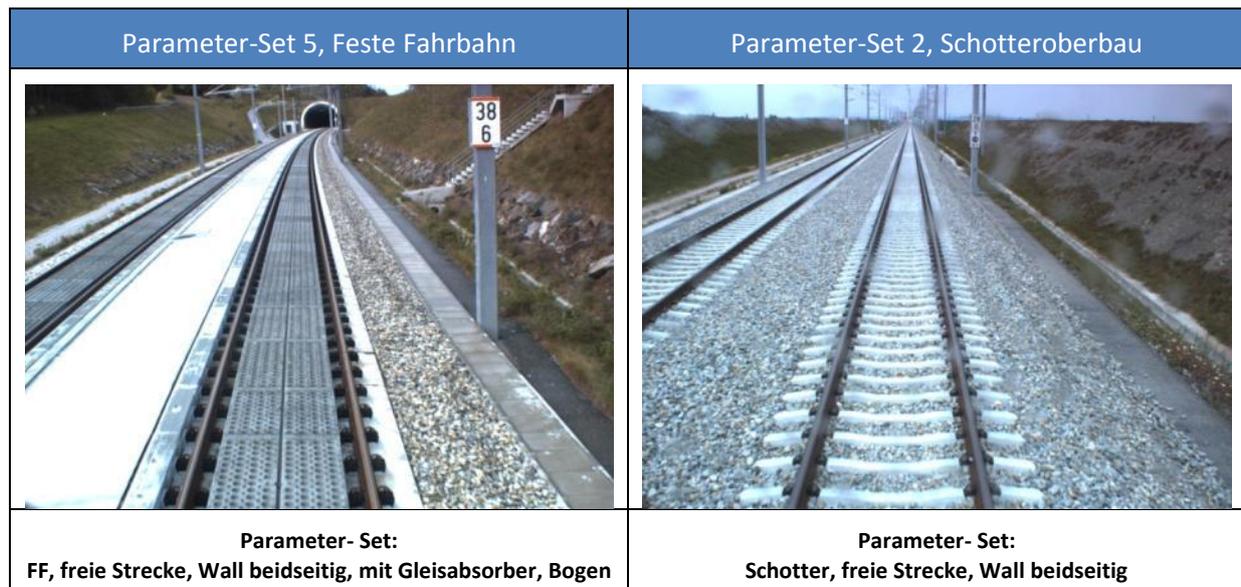


Abb. 36. Streckenbilder der Abschnitte mit Fester Fahrbahn und Schotteroberbau

### Bewertungen der Hörproben

Wird ein Schotteroberbau oder eine Feste Fahrbahn als angenehmer empfunden?			
Tests	Abgegebene Bewertungen		
	Feste Fahrbahn	Schotteroberbau	gleiche Bewertung
PV (Test 2)	9	27	-
PV (Test 14)	4	32	-
Relation (Test 5)	10	26	0
Relation (Test 12)	7	29	0
Relation (Test 19)	6	30	0

Tab. 13. Tabellarische Übersicht der Bewertungsergebnisse

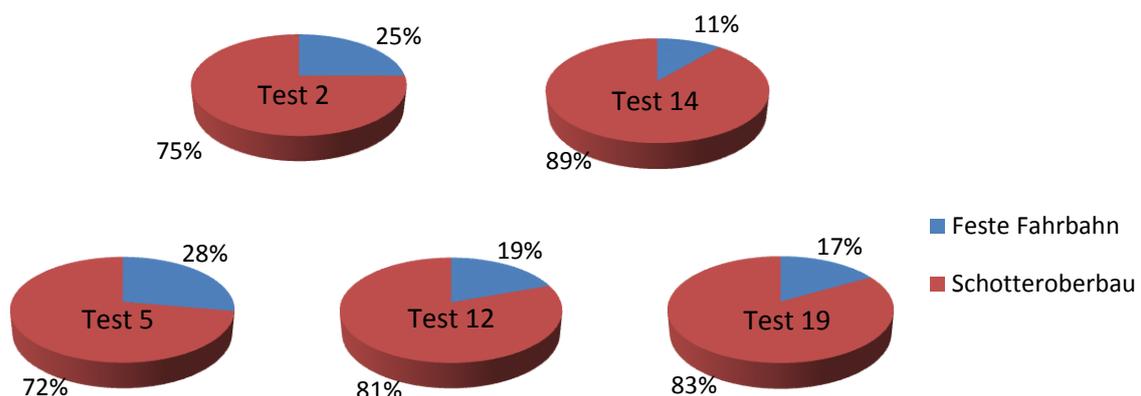


Abb. 37. Grafische Darstellung der Bewertungen bei der Frage nach angenehmerem Geräusch

Die Ergebnisse aller Tests zeigen eine ähnliche prozentuelle Verteilung der Bewertungen (siehe Abbildung 37). Der Schotteroberbau wurde von etwa drei Viertel der Probanden als angenehmer bewertet. In den Relationen wurde nie die gleiche Bewertung für Feste Fahrbahn und Schotteroberbau abgegeben (siehe Tabelle 13).

### Schalldruckpegel und psychoakustische Parameter der Hörsamples

Die Hörsamples der Festen Fahrbahn weisen geringfügig höhere Werte für den Schalldruckpegel und für die Lautheit auf (siehe Tabelle 14). Die Rauigkeit der Samples ist annähernd gleich. Für die Schärfe und die Tonalität ergeben sich die größten prozentuellen Unterschiede.

Parameter	Verwendung in	Feste Fahrbahn	Schotteroberbau
Pegel in dBA	Test 2, 5, 12	61,52	60,30
	Test 14, 19	60,96	59,56
	<b>Mittelwert</b>	<b>61,24</b>	<b>59,93</b>
Lautheit in sone	Test 2, 5, 12	15,49	14,42
	Test 14, 19	14,76	13,91
	<b>Mittelwert</b>	<b>15,12</b>	<b>14,16</b>
Rauigkeit in asper	Test 2, 5, 12	1,88	1,82
	Test 14, 19	1,79	1,79
	<b>Mittelwert</b>	<b>1,84</b>	<b>1,81</b>
Schärfe in acum	Test 2, 5, 12	1,33	1,45
	Test 14, 19	1,29	1,45
	<b>Mittelwert</b>	<b>1,31</b>	<b>1,45</b>
Tonalität in tu	Test 2, 5, 12	0,0444	0,0375
	Test 14, 19	0,0474	0,0240
	<b>Mittelwert</b>	<b>0,0459</b>	<b>0,0308</b>

Tab. 14. Parameterübersicht der Hörsamples mit Fester Fahrbahn und Schotteroberbau

### Statistische Auswertung der Bewertungsergebnisse

Auf Basis der Bewertungen aus den Hörversuchen soll geprüft werden, ob der Streckenabschnitt mit Fester Fahrbahn allgemein als unangenehmer wahrgenommen wird. Dafür wird der in Kapitel 7.1.1 erläuterte Hypothesentest durchgeführt. In Tabelle 15 werden die Bewertungsergebnisse für die Hörproben „Feste Fahrbahn“ zusammengefasst und die Verwerfung der Nullhypothese untersucht.

Feste Fahrbahn				
Test	Anzahl „angenehmer“	Gleiche Bewertung (nur bei Relation)	Kumulierte Erfolgswahrscheinlichkeit	Verwerfung der Nullhypothese
2	9	-	0,00197	ja
14	4	-	0,00000	ja
5	10	0	0,00567	ja
12	7	0	0,00016	ja
19	6	0	0,00003	ja

Tab. 15. Bewertungsübersicht und Hypothesenprüfung für die Hörproben „Feste Fahrbahn“

In allen fünf Tests wurde die Hörsamples der Festen Fahrbahn maximal 10 Mal als angenehmer bewertet, was jeweils zu einer Ablehnung Nullhypothese führt.

### Interpretation

Aufgrund der statistischen Auswertung der Bewertungsergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass die Feste Fahrbahn bei 200 km/h vom Fahrgast als unangenehmer empfunden wird. Über das Ausmaß des akustischen Wahrnehmungsunterschiedes kann jedoch durch die Paarvergleiche keine Aussage getätigt werden.

Die dargestellten Parameterunterschiede in Tabelle 14 sind sehr gering und bewegen sich im Bereich der Messungenauigkeiten. Die Geräuschcharakteristik der Festen Fahrbahn dürfte sich jedoch von jener des Schotteroberbaus in einem wahrnehmbaren Ausmaß unterscheiden.

#### 7.1.4 Paarvergleich mit/ohne 4m Lärmschutzwand

In diesem Paarvergleich soll untersucht werden, ob Fahrgäste Lärmschutzwände direkt neben dem Gleis akustisch wahrnehmen können und ob sie einen negativen Einfluss auf den Höreindruck haben. Dazu wurden zwei Streckenabschnitte mit beidseitigem Wall ausgewählt (siehe Abbildung 38), die sich nur darin unterscheiden, dass sich in dem einen Abschnitt keine Lärmschutzwand (LSW) befindet und in dem anderen eine 4m hohe Lärmschutzwand direkt neben dem Gleis steht. Wenn in diesem Abschnitt mit Lärmschutzwand keine negativen Auswirkungen feststellbar sind, ist anzunehmen, dass auch alle niedrigeren und weiter entfernten Lärmschutzwände keinen Einfluss auf die Hörempfindung haben.

Da entlang der Messstrecke charakteristische Streckenabschnitte mit 4m hoher Lärmschutzwand nur in Bögen vorgefunden werden konnten, befinden sich jeweils beide Hörsamples der Paarvergleiche im Bogen.

Die gewählten Streckenabschnitte, aus denen die Hörsamples stammen, weisen folgende Eigenschaften auf:

- Freie Strecke
- Beidseitiger Wall
- Schotteroberbau
- Bogen

Die Aufzeichnung der Hörsamples fand jeweils bei 200 km/h am Gleis 9 (jeweils rechtes Gleis in Abbildung 38) statt.

Es wurden zwei Paarvergleiche abgefragt (Test 3 und 15) und aus den Relationen (Test 6 und 7) konnten weitere zwei Paarvergleiche gewonnen werden (Ergebnisse siehe Tabelle 16).



Abb. 38. Streckenbilder der Abschnitte mit und ohne Lärmschutzwand

### Bewertungen der Hörproben

Wird ein Abschnitt mit oder ohne 4m hoher Lärmschutzwand neben dem Gleis als angenehmer empfunden?			
Tests	Abgegebene Bewertungen		
	mit LSW	ohne LSW	gleiche Bewertung
PV (Test 3)	26	10	-
PV (Test 15)	25	11	-
Relation (Test 6)	29	6	1
Relation (Test 7)	27	8	1

Tab. 16. Tabellarische Übersicht der Bewertungsergebnisse

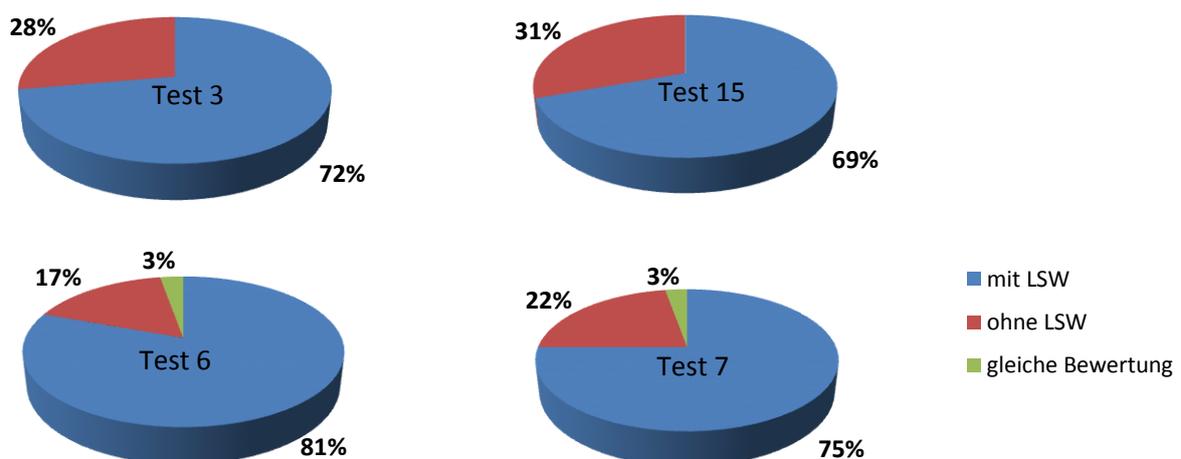


Abb. 39. Grafische Darstellung der Bewertungen bei der Frage nach angenehmerem Geräusch

Die Ergebnisse aller in Abbildung 39 dargestellten Tests zeigen, dass jeweils mehr als zwei Drittel der Probanden den Streckenabschnitt mit der Lärmschutzwand neben dem Gleis als angenehmer bewertet haben. In den Relationen wurde je einmal eine gleiche Bewertung für die Hörsamples abgegeben (siehe Tabelle 16).

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

Zur genaueren Untersuchung der Unterschiede zwischen den Hörsamples werden die Bewertungsergebnisse der Relation aus Test 6 im Box-Whisker Plot (bereits dargestellt in Abbildung 31 in Kapitel 7.1.2) betrachtet. Die Hörsamples dieses Paarvergleiches entsprechen den Samples 3 und 6 in Test 6. Der Median der Sample-Bewertungen unterscheidet sich weit mehr als zwischen anderen Samples (vgl. Sample 1 und 4). Das Hörsample mit Lärmschutzwand (Sample 3) wurde sehr oft als das Angenehmste in Test 6 gewählt, die Streuung der Bewertungen ist gering. Das Sample ohne Lärmschutzwand (Sample 6) besitzt eine große Streuung der Bewertungen und wurde im Mittel auch lästiger eingestuft, als die beiden Samples des Paarvergleiches „einseitiger/beidseitiger Wall“ in Kapitel 7.1.2 (Sample 1 und 4).

### Schalldruckpegel und psychoakustische Parameter der Hörsamples

Der Vergleich der Parameter der Hörsamples (siehe Tabelle 17) zeigt annähernd keine Unterschiede. In der Tonalität besteht der größte prozentuelle Unterschied.

Parameter	Verwendung in	mit LSW	ohne LSW
Pegel in dBA	Test 3, 6, 7	59,83	59,40
	Test 15	59,83	59,85
	<b>Mittelwert</b>	<b>59,83</b>	<b>59,63</b>
Lautheit in sone	Test 3, 6, 7	13,98	13,85
	Test 15	13,98	14,10
	<b>Mittelwert</b>	<b>13,98</b>	<b>13,98</b>
Rauhigkeit in asper	Test 3, 6, 7	1,78	1,73
	Test 15	1,78	1,75
	<b>Mittelwert</b>	<b>1,78</b>	<b>1,74</b>
Schärfe in acum	Test 3, 6, 7	1,40	1,38
	Test 15	1,40	1,38
	<b>Mittelwert</b>	<b>1,40</b>	<b>1,38</b>
Tonalität in tu	Test 3, 6, 7	0,0289	0,0323
	Test 15	0,0289	0,0351
	<b>Mittelwert</b>	<b>0,0289</b>	<b>0,0337</b>

Tab. 17. Parameterübersicht der Hörsamples mit und ohne Lärmschutzwand

### Statistische Auswertung der Bewertungsergebnisse

Auf Basis der Bewertungen aus den Hörversuchen soll geprüft werden, ob der Streckenabschnitt ohne Lärmschutzwand allgemein als unangenehmer wahrgenommen wird. Dafür wird der in Kapitel 7.1.1 erläuterte Hypothesentest durchgeführt. In Tabelle 18 werden die Bewertungsergebnisse für die Hörproben „ohne LSW“ zusammengefasst und die Verwerfung der Nullhypothese untersucht.

ohne LSW				
Test	Anzahl „angenehmer“	Gleiche Bewertung (nur bei Relation)	Kumulierte Erfolgswahrscheinlichkeit	Verwerfung der Nullhypothese
3	10	-	0,00567	ja
15	11	-	0,01441	nein
6	6	1	0,00003	ja
7	8	1	0,00060	ja

Tab. 18. Bewertungsübersicht und Hypothesenprüfung für die Hörproben „ohne LSW“

Die Nullhypothese wird in drei von vier Tests abgelehnt. In Test 15 wurde das Hörsample „ohne LSW“ mehr als 10 Mal als angenehmer bewertet, wodurch das Sample in diesem Test nicht als unangenehmer angesehen werden kann.

### Interpretation

Die Hypothesentests liefern keine Information über das Ausmaß des Geräuschunterschiedes. Im Paarvergleich zweier Hörsample können sehr geringe Unterschiede für die Bewertung ausschlaggebend sein. Aufgrund der mehrheitlich unangenehmeren Bewertung des Abschnittes ohne Lärmschutzwand kann jedoch angenommen werden, dass eine 4 m hohe Lärmschutzwand neben dem befahrenden Gleis, keinen negativen Einfluss auf die Hörempfindung des Fahrgastes hat.

Die Bewertungsergebnisse lassen vermuten, dass der Höreindruck im Bereich der Lärmschutzwand durch die veränderte Schallsituation positiv beeinflusst wird. Es ist vorstellbar, dass die Geräuschkulisse im Fahrzeuginneren durch zusätzliche Schallreflexionen an der Lärmschutzwand überlagert wird und die empfundene Lästigkeit abnimmt. Anhand der Parameterübersicht in Tabelle 17 sind jedoch eindeutige Unterschiede zwischen den Hörproben, die auf einen Wahrnehmungsunterschied schließen lassen, nicht ersichtlich.

Es sei darauf hingewiesen, dass der Vergleich im Bogen stattfand und für eine generelle Aussage auch eine Untersuchung auf der Geraden nötig wäre, um etwaige Effekte, die durch die Bogenfahrt hervorgerufen werden, auszuschließen.

### 7.1.5 Paarvergleich 2-gleisiger Tunnel mit/ohne Gleisabsorber bei gleicher Geschwindigkeit

Durch diesen Paarvergleich soll die Wirksamkeit der Gleisabsorber für den Fahrkomfort geprüft werden. In einem Paarvergleich werden die Hörsamples von 2-gleisigen Tunnelabschnitten mit und ohne Gleisabsorber (Abbildung 40) bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h verglichen (Regelgeschwindigkeit im Lainzer Tunnel). In einem weiteren Paarvergleich werden die Hörproben der Tunnelabschnitte bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h gegenübergestellt. Somit kann auch überprüft werden, ob sich die Wirkung der Gleisabsorber in Abhängigkeit der Geschwindigkeit ändert.

Die gewählten Streckenabschnitte, aus denen die Hörsamples stammen, weisen folgende Eigenschaften auf:

- 2-gleisiger Tunnel
- Feste Fahrbahn

Es wurden zwei Paarvergleiche abgefragt (Test 4 und 11) und aus den Relationen (Test 8, 9 und 10) konnten weitere drei Paarvergleiche gewonnen werden (Ergebnisse siehe Tabelle 19).



**Abb. 40. Streckenbilder von 2-gleisigen Tunneln mit und ohne Gleisabsorber**

Die Hörsamples für die Paarvergleiche wurden aus dem 2-gleisigen Hauptteil des Lainzer Tunnels (Abbildung 40 links) und dem kurzen 2-gleisigen Abschnitt des Wienerwaldtunnels (Abbildung 40 rechts) entnommen.

**Bewertungen der Hörproben**

Wird ein 2-gleisiger Tunnelabschnitt mit oder ohne Gleisabsorber bei 160 km/h bzw. 100 km/h als angenehmer empfunden?			
Tests	Abgegebene Bewertungen		
	ohne Gleisabsorber	mit Gleisabsorber	gleiche Bewertung
<b>160 km/h</b>			
PV (Test 4)	0	36	-
Relation (Test 6)	0	36	0
Relation (Test 7)	0	36	0
<b>100 km/h</b>			
PV (Test 11)	2	34	-
Relation (Test 8)	3	32	1

Tab. 19. Tabellarische Übersicht der Bewertungsergebnisse

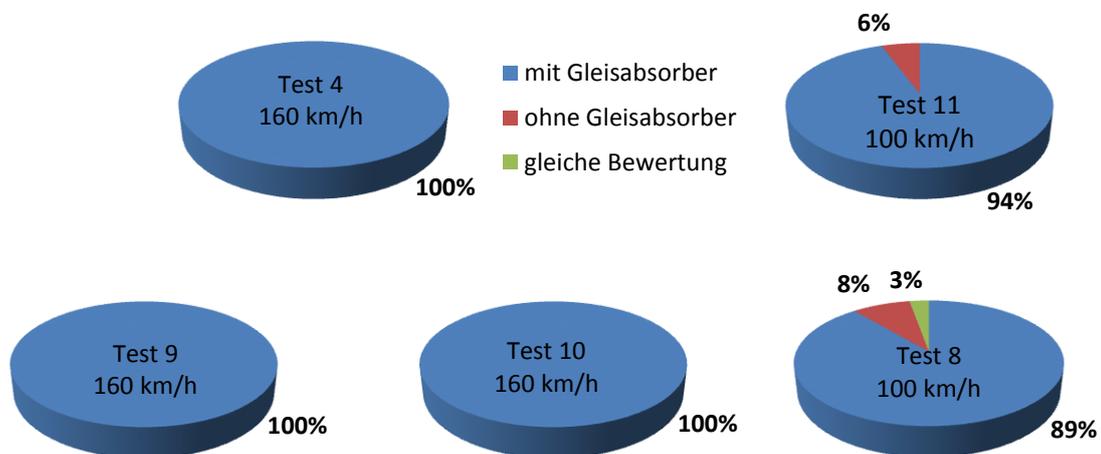


Abb. 41. Grafische Darstellung der Bewertungen bei der Frage nach angenehmerem Geräusch

Die Ergebnisse der Bewertungen (dargestellt in Abbildung 41) zeigen, dass der 2-gleisige Tunnelabschnitt mit Gleisabsorber bei 160 km/h von allen Probanden als angenehmer bewertet wurde. Bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h und sonst gleichen Bedingungen wurde, bis auf wenige Ausnahmen (siehe Tabelle 19), ebenfalls das Hörsample mit Gleisabsorber von annähernd allen Probanden als angenehmer bewertet.

**Schalldruckpegel und psychoakustische Parameter der Hörsamples**

Der Vergleich der Parameter der Hörsamples (Tabelle 20) zeigt, dass das Hörsample ohne Gleisabsorber deutliche höhere Werte für den Schalldruckpegel und die Lautheit besitzt. Bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h ist der Unterschied für diese Parameter deutlich größer, als bei 100 km/h. Bei den Parametern für die Rauigkeit und Schärfe ist derselbe Trend zu beobachten, jedoch nicht so ausgeprägt. Die Tonalität variiert unabhängig von der Geschwindigkeit.

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

Parameter	Verwendung in	mit Gleisabsorber	ohne Gleisabsorber
Pegel in dBA	Test 4, 9, 10 (160 km/h)	66,61	73,12
	Test 8, 11 (100 km/h)	63,97	66,45
Lautheit in sone	Test 4, 9, 10 (160 km/h)	21,44	29,07
	Test 8, 11 (100 km/h)	16,11	17,98
Rauhigkeit in asper	Test 4, 9, 10 (160 km/h)	2,42	3,01
	Test 8, 11 (100 km/h)	2,05	2,27
Schärfe in acum	Test 4, 9, 10 (160 km/h)	1,67	1,86
	Test 8, 11 (100 km/h)	1,41	1,46
Tonalität in tu	Test 4, 9, 10 (160 km/h)	0,0218	0,0286
	Test 8, 11 (100 km/h)	0,0341	0,0302

Tab. 20. Parameterübersicht der Hörsamples mit und ohne Gleisabsorber

### Statistische Auswertung der Bewertungsergebnisse

Es wird geprüft, ob der Tunnelabschnitt ohne Gleisabsorber allgemein als unangenehmer wahrgenommen wird. Dafür wird der in Kapitel 7.1.1 erläuterte Hypothesentest durchgeführt. In Tabelle 21 werden die Bewertungsergebnisse für die Hörproben „ohne Gleisabsorber“ zusammengefasst und die Verwerfung der Nullhypothese untersucht.

ohne Gleisabsorber				
Test	Anzahl „angenehmer“	Gleiche Bewertung (nur bei Relation)	Kumulierte Erfolgswahrscheinlichkeit	Verwerfung der Nullhypothese
<b>160 km/h:</b>				
4	0	-	1,455E-11	ja
9	0	0	1,455E-11	ja
10	0	0	1,455E-11	ja
<b>100 km/h:</b>				
8	2	-	1,039E-07	ja
11	3	1	9,168E-09	ja

Tab. 21. Bewertungsübersicht und Hypothesenprüfung für die Hörproben „2-gl. Tunnel ohne Gleisabsorber“

In allen Tests sowohl bei 160 km/h als auch bei 100 km/h kann die Nullhypothese verworfen werden (siehe Tabelle 21) und es ergibt sich eine akustisch unangenehmere Wahrnehmung der 2-gleisigen Tunnelabschnitte ohne Gleisabsorber.

## Interpretation

Sowohl bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h, als auch bei 100 km/h kann die positive Auswirkung der Gleisabsorber auf den Fahrkomfort in einem 2-gleisigen Tunnel belegt werden. Die Tunnelabschnitte ohne Gleisabsorber wurden stets unangenehmer empfunden. Diese Aussage stimmt auch mit dem Vergleich der Parameterwerte in Tabelle 20 überein.

Die geringeren Unterschiede in den Parametern bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h lassen vermuten, dass die Gleisabsorber bei geringeren Geschwindigkeiten weniger Einfluss auf das Fahrzeuginnengeräusch besitzen, da allgemein eine günstigere Schallsituation vorherrscht.

### 7.1.6 Paarvergleich 1-gleisiger Tunnel mit/ohne Gleisabsorber bei unterschiedlicher Geschwindigkeit

In diesem Paarvergleich soll überprüft werden, ob ein Befahren eines 1-gleisigen Tunnels mit Gleisabsorber bei 230 km/h aus akustischer Sicht angenehmer empfunden wird, als das Befahren eines 1-gleisigen Tunnels ohne Gleisabsorber bei 160 km/h. Diese Fragestellung ist deshalb von großer Bedeutung, da im Regelbetrieb auf der Neubaustrecke die Tunnelabschnitte ohne Gleisabsorber (Lainzer Tunnel) mit 160 km/h und Abschnitte mit Gleisabsorber (Wienerwaldtunnel) mit 230 km/h befahren werden.

Die gewählten Streckenabschnitte, aus denen die Hörsamples stammen, weisen folgende Eigenschaften auf:

- 1-gleisiger Tunnel
- Feste Fahrbahn

Es wurden zwei Paarvergleiche abgefragt (Test 22 und 23) und aus einer Relation (Test 13) konnte ein weiterer Paarvergleich gewonnen werden (Ergebnisse siehe Tabelle 22).

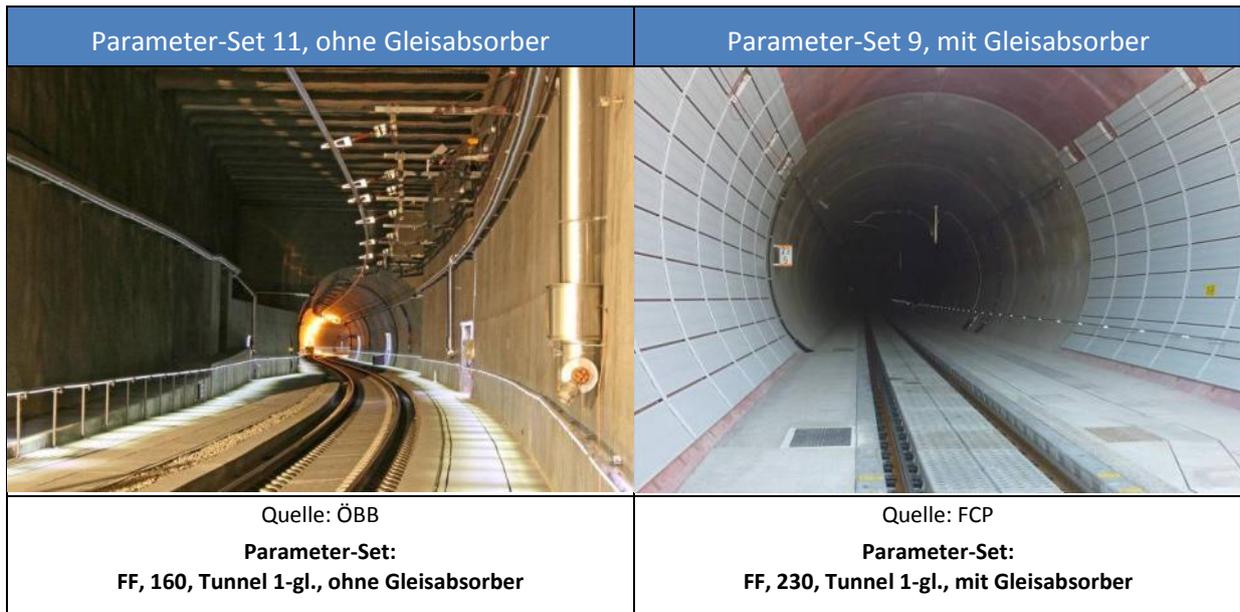


Abb. 42. Streckenbilder der Hörsamples im 1-gleisigen Tunnel mit und ohne Gleisabsorber

Die Hörsamples für die Paarvergleiche wurden aus dem 1-gleisigen Hauptteil des Wienerwaldtunnels (Abbildung 42 rechts) und dem kurzen 1-gleisigen Abschnitt des Lainzer Tunnels (Abbildung 42 links) entnommen.

### Bewertungen der Hörproben

Wird ein 1-gleisiger Tunnel bei 160 km/h ohne Gleisabsorber oder bei 230 km/h mit Gleisabsorber als angenehmer empfunden?			
Tests	Abgegebene Bewertungen		
	160 km/h ohne Absorber	230 km/h mit Absorber	gleiche Bewertung
PV (Test 22)	27	9	-
PV (Test 23)	26	10	-
Relation (Test 13)	22	11	3

Tab. 22. Tabellarische Übersicht der Bewertungsergebnisse

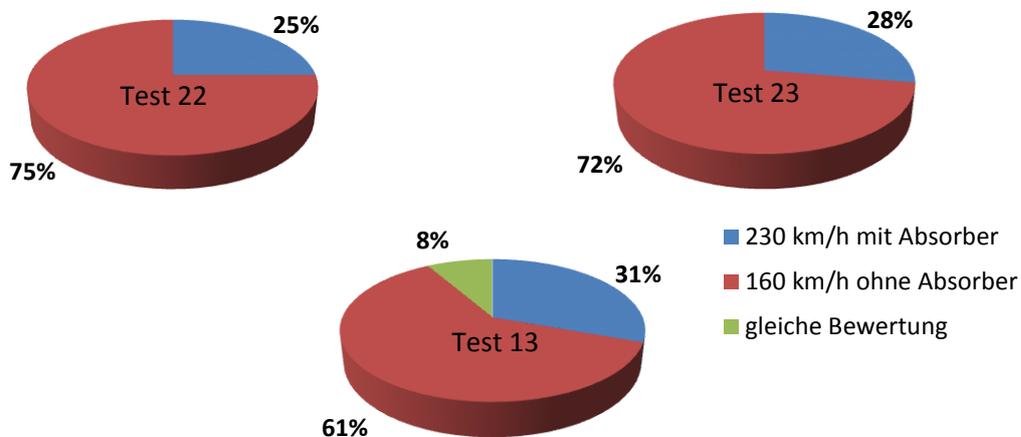


Abb. 43. Grafische Darstellung der Bewertungen bei der Frage nach angenehmerem Geräusch

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

Die Ergebnisse der beiden Paarvergleiche (Test 22 und 23) zeigen eine ähnliche prozentuelle Verteilung der Bewertungen. Etwa drei Viertel der Probanden empfinden einen 1-gleisigen Tunnelabschnitt ohne Gleisabsorber bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h als angenehmer, als einen gleichartigen Abschnitt mit Absorber bei einer Geschwindigkeit von 230 km/h. Im Paarvergleich der aus der Relation (Test 13) stammt, wurde das Hörsample mit Gleisabsorber bei 230 km/h 11 Mal als angenehmer bewertet (siehe Tabelle 22). Zusätzlich wurde 3 Mal kein Unterschied zwischen den Samples erkannt.

### Schalldruckpegel und psychoakustische Parameter der Hörsamples

Der Vergleich der Parameter der Hörsamples (Tabelle 23) zeigt, dass der Schalldruckpegel des Hörsamples ohne Gleisabsorber bei 160 km/h um mehr als 4 dB höher ist, als jener des Samples mit Gleisabsorber bei 230 km/h. Der Lautheitsunterschied ist betragsmäßig geringer (2 sone). Die Rauigkeit, Schärfe und Tonalität des Hörsamples ohne Gleisabsorber ist betragsmäßig ebenfalls geringfügig höher.

Parameter	Verwendung in	ohne Absorber 160 km/h	mit Absorber 230 km/h
Pegel in dBA	Test 13, 22, 23	77,93	73,20
Lautheit in sone	Test 13, 22, 23	36,70	34,67
Rauhigkeit in asper	Test 13, 22, 23	3,47	2,98
Schärfe in acum	Test 13, 22, 23	1,99	1,86
Tonalität in tu	Test 13, 22, 23	0,0279	0,0221

Tab. 23. Parameterübersicht der Hörsamples ohne Gleisabsorber bei 160 km/h und mit Gleisabsorber bei 230 km/h

### Statistische Auswertung der Bewertungsergebnisse

Es wird geprüft, ob der Tunnelabschnitt mit Gleisabsorber bei 230 km/h allgemein als unangenehmer wahrgenommen wird. Dafür wird der in Kapitel 7.1.1 erläuterte Hypothesentest durchgeführt. In Tabelle 24 werden die Bewertungsergebnisse für die Hörprobe „mit Gleisabsorber bei 230 km/h“ zusammengefasst und die Verwerfung der Nullhypothese untersucht.

mit Gleisabsorber bei 230 km/h				
Test	Anzahl „angenehmer“	Gleiche Bewertung (nur bei Relation)	Kumulierte Erfolgswahrscheinlichkeit	Verwerfung der Nullhypothese
22	9	-	0,00197	ja
23	10	-	0,00567	ja
13	11	3	0,01441	nein

Tab. 24. Bewertungsübersicht und Hypothesenprüfung für die Hörprobe „1-gl. Tunnel mit Gleisabsorber bei 230 km/h“

In 2 von 3 Tests (in Test 22 und 23) ergibt sich eine signifikant unangenehmere Wahrnehmung des Tunnelabschnittes mit Gleisabsorber. Für Test 13 wird die Nullhypothese nicht abgelehnt und es kann hierbei keiner der Abschnitte als unangenehmer identifiziert werden.

### **Interpretation**

Die statistische Auswertung der Paarvergleiche zeigt ein nicht erwartetes Bewertungsverhalten der Probanden. Der 1-gleisige Tunnelabschnitt mit Gleisabsorber bei 230 km/h wird trotz geringerer Schalldruckpegel (siehe Tabelle 23) in 2 von 3 Paarvergleichen unangenehmer empfunden, als der 1-gleisige Tunnel ohne Gleisabsorber bei 160 km/h. In Test 13 kann keine Aussage über einen Wahrnehmungsunterschied getroffen werden.

Für den Regelbetrieb auf der Neubaustrecke heißt das zusammenfassend: Der 1-gleisige Tunnelabschnitt ohne Absorber im Lainzer Tunnel wird, auf Grundlage der Hörversuche, nicht als unangenehmer empfunden, als der mit Gleisabsorbern ausgestattete 1-gleisige Wienerwaldtunnel, der anstatt mit 160 km/h mit 230 km/h durchfahren wird. Der Einbau von Gleisabsorbern im Bereich des Lainzer Tunnels würde zwar den Fahrkomfort in diesem Abschnitt lokal verbessern, der Wienerwaldtunnel würde im Vergleich jedoch, weiter als mehrheitlich unangenehmer empfunden werden.

Obwohl alle Parameter aus Tabelle 23 für eine unangenehmere Wahrnehmung des Tunnels ohne Gleisabsorber sprechen würden, wäre es möglich, dass zusätzlich geschwindigkeitsabhängige Empfindungen für das Wohlbefinden der Fahrgäste ausschlaggebend sind. Bei höheren Geschwindigkeiten könnten Effekte auftreten, die durch die dargestellten Parameter nicht ausreichend abgebildet werden.

## 7.2 Ergebnisse der Relationen

In einem Relationsvergleich werden im Rahmen dieser Arbeit drei, vier oder sechs Hörsamples in Bezug auf deren Lästigkeit verglichen. Die Probanden konnten für die Bewertung jedes Hörsamples zwischen 0 (am unangenehmsten) und 100 (am angenehmsten) durch Positionierung des zugehörigen Schiebereglers wählen.

Die Auswertung der Relationen gliedert sich in die Fragestellungen der Kapitel 7.2.2 bis 7.2.7. Die Hörsamples, welche in einem Test verglichen wurden, werden zu Beginn aufgelistet und beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der Bewertungen in einem Box-Whisker Plot (Erklärung siehe Einleitung Kapitel 7) dargestellt. Werden weitere Tests in Bezug auf die Fragestellung ausgewertet, werden die Ergebnisse ebenfalls analog abgebildet. Durch statistische Signifikanztests (siehe Kapitel 7.2.1) wird gezeigt, ob zwischen bestimmten Hörsamples signifikante Unterschiede in der Wahrnehmung der Lästigkeit feststellbar sind.

### Skalierung der Bewertungen

Wurde bei einer Relation, trotz des anfänglichen Hinweises während der Instruktionen, die Bewertungsskala vom Probanden nicht ausgenutzt, so wurden die abgegebenen Beurteilungen für die Auswertung transformiert. Die Werte jedes Probanden wurden so skaliert, dass das unangenehmste Geräusch stets den Wert 100 und das angenehmste Geräusch den Wert 0 besitzt. Somit werden die Bewertungen vergleichbar.

Für die Skalierung des Bewertung  $x$  wurde folgende Formel benutzt:

$$x_{skaliert} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} * 100$$

Als Beispiel werden in Tabelle 25 die Bewertungen „ $x$ “, die vom Probanden abgegeben wurden und die skalierten Bewertung „ $x$  skaliert“ angegeben.

	Hörprobe 1	Hörprobe 2	Hörprobe 3	Hörprobe 4
$x$	87,0	21,0	97,0	24,0
$x$ skaliert	86,8	0,0	100,0	3,9

Tab. 25. Skalierung der Bewertungen bei nicht ausgenutzter Bewertungsskala

### Interpretation der Bewertungsdifferenzen

Wie am Beginn des Kapitels 6.3 beschrieben, sollen durch die Relationen auch Rückschlüsse auf die Lästigkeitsunterschiede der Hörsamples möglich sein. Im Unterschied zum Paarvergleich gibt es bei den Ergebnissen der Relation Bewertungsdifferenzen zwischen Hörsamples, die in Zahlenwerte ausgedrückt werden können.

Bei der Interpretation der Bewertungsdifferenzen ist zu beachten, dass sie nur auf den aktuellen Test und die darin verglichenen Hörsamples bezogen werden dürfen. Die Bewertungsdifferenz zwischen dem angenehmsten und unangenehmsten Sample ist beispielsweise in jedem Test immer gleich 100 und somit unabhängig von der Ausmaß des Geräuschunterschiedes.

### 7.2.1 Statistische Auswertung der Relationen

Zur Prüfung des allgemeinen Wahrnehmungsunterschiedes von zwei Hörsamples wird für jeden Proband  $i = 1 \dots 36$  die Bewertungsdifferenz  $X_i$  von den zu untersuchenden Hörsamples ermittelt. Jede dieser Differenzen  $X_1, X_2, \dots, X_n$  ist eine Zufallsvariable und stellt eine unabhängige Beobachtung dar. Es wird angenommen, dass die Differenzen normalverteilt sind:

$$X \sim N(\mu, \sigma^2)$$

Die Varianz  $\sigma^2$  wird mit der empirischen Varianz  $s^2$  geschätzt:

$$\sigma^2 \sim s^2 = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1)}$$

Aufgrund der für die einzelnen Beobachtungen  $X_i$  festgelegten Bedingungen gilt folgende Verteilung für die Summe der Beobachtungen  $\sum X_i$ :

$$\sum X_i \sim N(n\mu, ns^2)$$

Da es sich um  $n$  unabhängige Beobachtungen handelt und davon ausgegangen wird, dass sie ähnlich verteilt sind, ist die Summe der Beobachtungen  $\sum X_i$  ebenfalls normalverteilt mit der  $n$ -fachen Varianz  $ns^2$ . Diese Varianz wird im Weiteren als  $s_X^2$  bezeichnet.

#### Hypothesentests zur Feststellung von Wahrnehmungsunterschieden

Um von den Bewertungsdifferenzen aus den Hörversuchen (Beobachtungen) auf die allgemeine Empfindung eines Wahrnehmungsunterschiedes von Hörsamples schließen zu können, werden Hypothesentests durchgeführt. Die allgemeine Empfindung soll dabei die Grundgesamtheit aller Fahrgäste widerspiegeln.

Es wird eine Nullhypothese  $H_0$  aufgestellt, die besagt, dass es keinen Wahrnehmungsunterschied zwischen zwei Samples gibt. Für die Gültigkeit dieser Aussage muss die Summe der Bewertungsdifferenzen  $\sum X_i$  von einer Verteilung mit Mittelwert von  $\mu = 0$  stammen:

$$H_0: \mu = 0$$

Die Alternativhypothese  $H_1$  besagt, dass es einen Unterschied in der allgemeinen Wahrnehmung der Hörsamples gibt. Die Summe der Bewertungsdifferenzen  $\sum X_i$  muss daher von einer Verteilung mit Mittelwert von  $\mu > 0$  stammen:

$$H_1: \mu > 0$$

Für die Prüfung der Nullhypothese  $H_0$  wird für die Summe der Bewertungsdifferenzen  $\sum X_i$  folgende Verteilung angenommen:

$$N(0, s_x)$$

Als Prüfgröße  $T$  wird die Wahrscheinlichkeit  $P(x)$  herangezogen, dass  $\sum X_i$  oder ein extremerer Wert auftritt (einseitiger Test).

$$T = P\left(x \geq \sum X_i\right)$$

Zur Ermittlung der Annahme- und Ablehnbereiche der Nullhypothese  $H_0$  wird die Prüfgröße  $T$  mit dem festgelegten Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,01$  verglichen.

$$\text{Ablehnung von } H_0: T < \alpha$$

$$\text{Vereinbarkeit mit } H_0: T \geq \alpha$$

**Es ergeben sich zwei Entscheidungsmöglichkeiten über die Nullhypothese  $H_0$ :**

1. Wird die Nullhypothese abgelehnt, ist  $H_1$  gültig und es ist von einem Wahrnehmungsunterschied der Hörsamples auszugehen.
2. Wird die Nullhypothese nicht abgelehnt, sind die Bewertungsdifferenzen so verteilt, dass sie unter Gültigkeit der Nullhypothese zustande gekommen sein können. In diesem Fall ist es möglich, dass es keinen Unterschied in der allgemeinen Wahrnehmung der Samples gibt.

### **Erhöhung des Mittelwert $\mu$**

Ein größerer Wahrnehmungsunterschied zwischen zwei Hörsamples kann durch die Erhöhung des Mittelwerts  $\mu$  für den Hypothesentest statistisch nachgewiesen werden.

Es sei in Erinnerung gerufen, dass die Differenz zwischen dem angenehmsten und unangenehmsten Hörsample immer gleich ist, unabhängig davon wie sehr sich die Samples voneinander unterscheiden. Die Absolutwerte von  $\mu$  liefern nur Auskunft darüber wie sehr sich die allgemeine Wahrnehmung der Hörsamples innerhalb eines Tests unterscheidet. Die  $\mu$ -Werte dürfen jedoch nicht zwischen verschiedenen Tests verglichen werden, da die Bewertungsbedingungen unterschiedlich sind.

### 7.2.2 Unterschiede zwischen freier Strecke und Tunnel

In diesem Kapitel sollen die Wahrnehmungsunterschiede der Fahrzeuginnengeräusche bei einer Fahrt auf freier Strecke (mit Schotteroberbau oder Fester Fahrbahn) und einer Fahrt in einem Tunnel (1-gleisig oder 2-gleisig) bei gleicher Geschwindigkeit untersucht werden (siehe Tabelle 26).

Wie groß ist der akustische Wahrnehmungsunterschied zwischen freier Strecke und einem Tunnel bei 200 km/h?				
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Parameter-Set	2	5	9	8
Streckentyp	freie Strecke	freie Strecke	Tunnel 1-gl.	Tunnel 2-gl.
Oberbau	Schotter	FF	FF	FF
Geschwindigkeit	200 km/h	200 km/h	200 km/h	200 km/h
LS-Maßnahme	Wall beidseitig	Wall beidseitig	-	-
Gleisabsorber	nein	ja	ja	ja
Bogen	nein	ja	nein	nein

Tab. 26. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 5

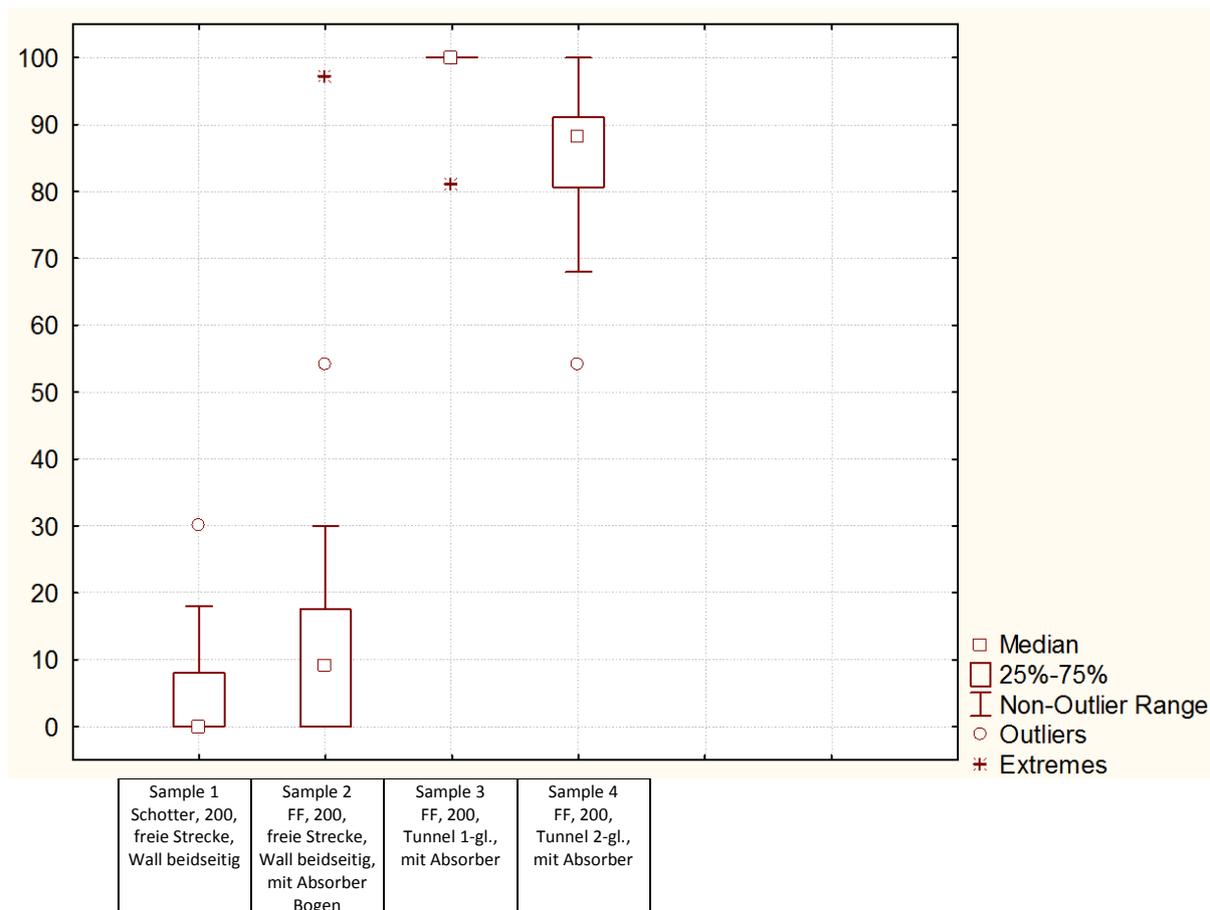


Abb. 44. Box -Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 5

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

Der in Abbildung 44 dargestellte Box-Whisker Plot stellt die Bewertungen der Probanden dar. Der 1-gl. Tunnel (Sample 3) wurde, mit Ausnahme eines statistischen Ausreißers, von allen Probanden als unangenehmstes Hörsample identifiziert (Wert 100). Der 2-gl. Tunnel (Sample 4) wurde, mit Ausnahme des erwähnten Ausreißers, immer als zweit unangenehmstes Hörsample bewertet (Bewertungsdaten siehe Tabelle 59 in Anhang E). Die Tunnelfahrten werden als deutlich unangenehmer wahrgenommen, als die Hörproben von der freien Strecke.

Um die Unterschiede zwischen der freien Strecke und den Tunnelabschnitten genauer analysieren zu können, werden folgende Werte errechnet: Je Proband wird die Differenz zwischen der besten Bewertung eines Tunnelabschnittes (niedrigster Wert von Sample 3 oder 4) und der schlechtesten Bewertung auf der freien Strecke (höchster Wert von Sample 1 oder 2) errechnet. Diese Differenz „Diff Tun-fS“ wird in Tabelle 59 in Anhang E dargestellt. Der Median dieser Differenz beträgt 72 und weist, bei einer maximalen Bewertungsdifferenz von 100, auf einen großen Unterschied zwischen den Hörsamples hin.

### Statistische Auswertung der Bewertungsunterschiede

Mit Hilfe des in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Hypothesentests soll statistisch geprüft werden, ob aufgrund der Bewertungsdifferenzen von Hörsamples ein Wahrnehmungsunterschied für die Allgemeinheit der Fahrgäste anzunehmen ist.

Die Bewertungsdifferenzen zwischen Streckenabschnitten **auf freier Strecke und im Tunnel** („Diff Tun-fS“) bei 200 km/h in Test 5 werden in Tabelle 27 statistisch geprüft.

#### Wie groß ist der Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines Abschnittes auf freier Strecke und in einem Tunnel bei 200 km/h?

Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
5	18,71	2460	112,28	$\mu = 0$	1,128E-106	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
5	18,71	2460	112,28	$\mu = 60$	0,003802	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$

Interpretation: Zwischen der freien Strecke (mit Schotteroberbau oder FF) und einem Tunnelabschnitt (1-gl. oder 2-gl.) besteht ein großer akustischer Wahrnehmungsunterschied ( $\mu=60$ ). Der Tunnelabschnitt wird deutlich unangenehmer empfunden.

Tab. 27. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede zwischen freier Strecke und Tunnel in Test 5

### 7.2.3 Unterschiede auf freier Strecke bei unterschiedlichen Streckenparametern

In diesem Kapitel sollen die Einflüsse der unterschiedlichen Streckenparameter, die auf freier Strecke vorhanden sind, untersucht werden. Der Vergleich der jeweils zugehörigen Hörsamples soll Auskunft über die akustische Unterscheidbarkeit der Streckenabschnitte liefern.

Es werden im Folgenden zwei Test (Test 6 und 19) in Bezug auf diese Fragestellung ausgewertet. Die statistische Auswertung der Bewertungsdifferenzen erfolgt nach der Darstellung der Ergebnisse der beiden Tests.

Wie groß ist der akustische Wahrnehmungsunterschied zwischen Abschnitten auf freier Strecke mit unterschiedlichen Streckenparametern und einem 2-gleisigen Tunnel bei 200 km/h?						
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
<b>Parameter-Set</b>	1	8	4	2	5	3
<b>Streckentyp</b>	freie Strecke	Tunnel 2-gl.	freie Strecke	freie Strecke	freie Strecke	freie Strecke
<b>Oberbau</b>	Schotter	FF	Schotter	Schotter	FF	Schotter
<b>Geschw.</b>	200 km/h	200 km/h	200 km/h	200 km/h	200 km/h	200 km/h
<b>LS-Maßnahme</b>	Wall einseitig	-	Wall beidseitig, 4m LSW	Wall beidseitig	Wall beidseitig	Wall beidseitig
<b>Gleisabsorber</b>	nein	ja	nein	nein	ja	nein
<b>Bogen</b>	nein	nein	ja	nein	ja	ja

Tab. 28. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 6

Das Tunnel-Sample in Test 6 (Sample 2 in Tabelle 28) soll einen Kontrast in den Bewertungsergebnissen zeigen, um die Unterschiede zwischen den Hörsamples besser einordnen zu können.

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

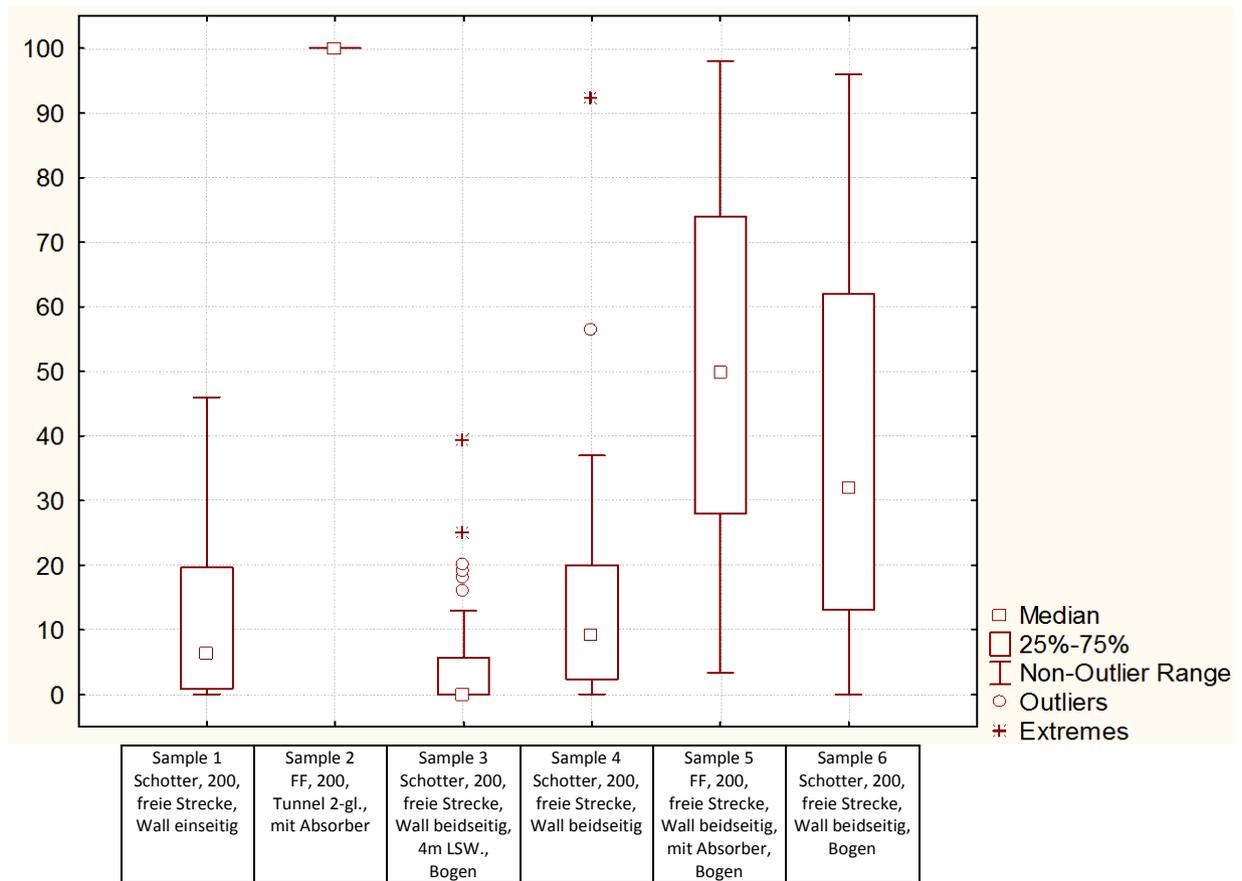


Abb. 45. Box -Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 6

Das Tunnel-Sample (Sample 2) wurde eindeutig als das unangenehmste identifiziert (siehe Bewertung 100 von allen 36 Probanden in Abbildung 45). Das Hörsample mit der Lärmschutzwand (Sample 3) wurde hingegen von den meisten Probanden (22) als angenehmstes bewertet (Bewertungsdaten siehe Tabelle 60 im Anhang E). Die Samples 1 und 4 (mit Wall einseitig bzw. Wall beidseitig) wurden im Mittel geringfügig schlechter eingestuft.

Die Bewertungen des Samples 6 (Wall beidseitig, im Bogen) schwanken sehr stark, wie im Box-Whisker Plot (Abbildung 45) ersichtlich ist. Es wurde 6 Mal als angenehmstes Sample bewertet. Im Median der Bewertungen unterscheidet sich das Sample 6 dennoch deutlich von den Samples 1, 3 und 4.

Die Bewertungen der Festen Fahrbahn (Sample 5) liegen im Mittel zwischen dem angenehmsten und dem unangenehmsten Sample. Sample 5 wurde nie als angenehmste Hörprobe gewählt.

Wie groß ist der akustische Wahrnehmungsunterschied zwischen Abschnitten auf freier Strecke mit unterschiedlichen Streckenparametern bei 200 km/h?				
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Parameter-Set	2	5	3	1
Streckentyp	freie Strecke	freie Strecke	freie Strecke	freie Strecke
Oberbau	Schotter	FF	Schotter	Schotter
Geschwindigkeit	200 km/h	200 km/h	200 km/h	200 km/h
LS-Maßnahme	Wall beidseitig	Wall beidseitig	Wall beidseitig	Wall einseitig
Gleisabsorber	nein	ja	nein	nein
Bogen	nein	ja	ja	nein

Tab. 29. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 19

In Test 19 gibt es im Unterschied zu Test 6 kein Tunnelsample (siehe Tabelle 29) und somit ist der Unterschied des Höreindrucks zwischen dem angenehmsten und unangenehmsten Sample geringer. Der absolute Abstand (Bewertungsdifferenz) zwischen den Samples wird aufgrund der gleichbleibenden Bewertungsskala größer erwartet.

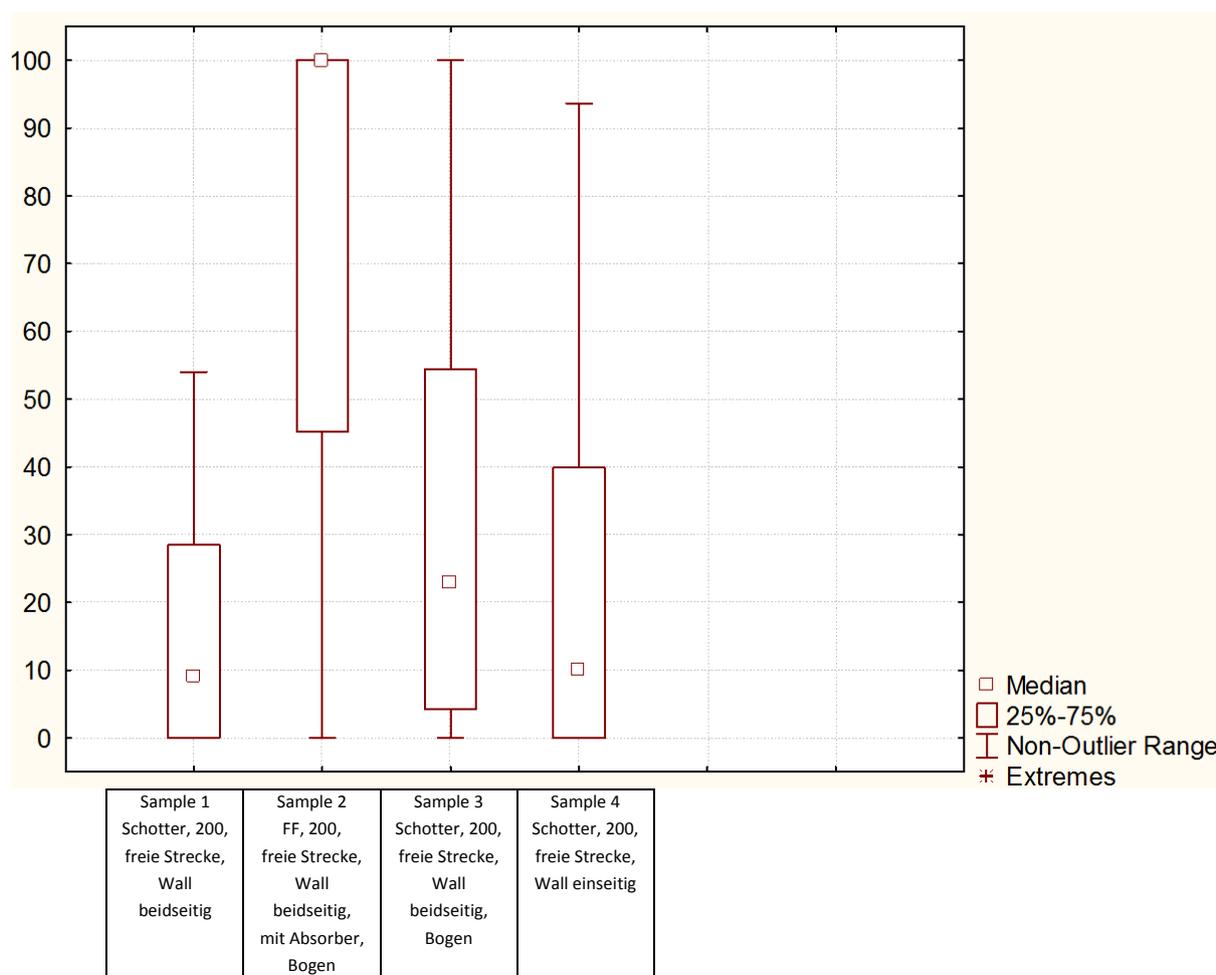


Abb. 46. Box-Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 19

Die Streuung der Sample-Bewertungen ist größer als in Test 6 (siehe Box-Whisker Plot in Abbildung 46). Dies ist vermutlich auf die schwierige Einordnung der Höreindrücke zurückzuführen, da sie sehr ähnlich sind und es im Unterschied zu Test 6 kein Tunnel-Sample als Kontrast gibt.

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

Streckenabschnitte mit Schotteroberbau und einseitigem bzw. beidseitigem Wall (Sample 1 und 4) wurden sehr ähnlich bewertet (annähernd gleicher Median). Sample 3 unterscheidet sich nur darin, dass es aus einer Bogenfahrt stammt. Es wurde geringfügig schlechter bewertet. Das Sample 2 mit Fester Fahrbahn wurde eindeutig am unangenehmsten bewertet. Alle Bewertungsdaten des Test 19 sind in Tabelle 69 in Anhang E dargestellt.

### Statistische Auswertung der Bewertungsunterschiede

Mit Hilfe des in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Hypothesentests soll statistisch geprüft werden, ob aufgrund der Bewertungsdifferenzen von Hörsamples ein Wahrnehmungsunterschied für die Allgemeinheit der Fahrgäste anzunehmen ist.

Die Bewertungsdifferenzen zwischen **Schotteroberbau und Fester Fahrbahn (FF)** bei 200 km/h in Test 6, 19, 5 und 12 werden in den Tabellen 30 und 31 statistisch geprüft und sind in den Tabellen 59, 60, 65 und 69 des Anhang E dargestellt. Die Bewertungen des Tests 12 werden in Kapitel 7.2.7 genauer analysiert.

#### Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines Schotteroberbaus (Gerade) und einer FF (Bogen) bei 200 km/h?

Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
6 (Diff 5-4)	33,89	1313	203,34	$\mu=20$	0,00176	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
19 (Diff 2-1)	65,27	1765	391,63	$\mu=20$	0,00382	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
5 (Diff 1-2)	32,84	559	197,06	$\mu=0$	0,00227	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
12 (Diff 4-1)	33,27	682	199,61	$\mu=0$	0,000318	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$

Interpretation:

In Test 6 und 19 kann ein großer Wahrnehmungsunterschied ( $\mu=20$ ) zwischen dem Schotteroberbau (auf Gerade) und der Festen Fahrbahn (im Bogen) nachgewiesen werden. In Test 5 und 12 wird ebenfalls der Schotteroberbau akustisch angenehmer empfunden.

In einem Test mit ähnlicheren Hörsamples ist die Bewertungsspanne zwischen dem angenehmsten und unangenehmsten geringer, darum ist bei der Bewertung dieser Hörsamples ein größerer Abstand zu erwarten, wie in den Ergebnissen von Test 6 und 19 zu sehen ist.

In den Paarvergleichen in Kapitel 7.1.3 wurden ebenfalls dieselben Hörsamples verglichen und sie zeigen ebenfalls, wie hier in allen Hypothesentests, eine angenehmere Wahrnehmung des Schotteroberbaus.

Tab. 30. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede zwischen Schotteroberbau (Gerade) und FF (Bogen) in Test 5, 6, 12 und 19

**Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines Schotteroberbaus (Bogen) und einer FF (Bogen) bei 200 km/h?**

Test	s	$\Sigma X_i$	$s_\Sigma$	$H_0$	T	Ergebnis
6 (Diff 5-6)	23,80	503	142,78	$\mu = 0$	0,000213	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
19 (Diff 2-3)	52,76	1286	316,53	$\mu = 15$	0,009226	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$

Interpretation:

Beim Vergleich der beiden Oberbauformen im Bogen wird der Schotteroberbau signifikant angenehmer empfunden, als die FF. In Test 19 ergibt sich ein größerer Wahrnehmungsunterschied ( $\mu=15$ ), da sehr ähnliche Samples (nur von der freien Strecke) verglichen werden.

Tab. 31. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede zwischen Schotteroberbau (Bogen) und FF (Bogen) in Test 6 und 19

Die Bewertungsdifferenzen zwischen **Bogen und Gerade eines Schotteroberbaus** bei 200 km/h in Test 6 und 19 werden in Tabelle 32 statistisch geprüft und sind in den Tabellen 60 und 69 des Anhang E dargestellt.

**Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung zwischen Bogen und Gerade eines Schotteroberbaus bei 200 km/h?**

Test	s	$\Sigma X_i$	$s_\Sigma$	$H_0$	T	Ergebnis
6 (Diff 6-4)	33,05	810	198,31	$\mu = 5$	0,000739	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
19 (Diff 3-1)	60,19	479	361,14	$\mu = 0$	0,092436	$T > \alpha$ : Vereinbarkeit mit $H_0$

Interpretation:

In Test 6 ergibt sich ein akustischer Wahrnehmungsunterschied zwischen Bogen und Gerade eines Schotteroberbaus bei 200 km/h, obwohl unterschiedliche Samples (inkl. Tunnel-Sample) verglichen werden. In Test 19 befinden sich ähnlichere Samples (nur von der freien Strecke) und hier kann kein Unterschied nachgewiesen werden. Aufgrund der Annahme, dass in Test 19 größere Bewertungsdifferenzen zwischen den Samples zu erwarten sind und hier kein Wahrnehmungsunterschied nachgewiesen werden kann, wird dem Hypothesentest in Test 19 mehr Bedeutung geschenkt.

Der Höreindruck in einem Bogen kann daher nicht als unangenehmer identifiziert werden, als jener auf der Geraden. Es ist somit nicht von entscheidender Bedeutung, dass die Höreindrücke der Oberbauformen jeweils im Bogen bzw. jeweils auf der Geraden verglichen werden. Dies zeigen auch die Ergebnisse der beiden zuvor angeführten Signifikanztests (Tabelle 30 und 31).

Tab. 32. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede zwischen Schotteroberbau im Bogen und auf der Geraden in Test 6 und 19

Die Bewertungsdifferenzen zwischen Streckenabschnitten mit **beidseitigem und einseitigem Wall auf freier Strecke** bei 200 km/h in Test 6 und 19 werden in Tabelle 33 statistisch geprüft und sind in den Tabellen 60 und 69 des Anhang E dargestellt.

**Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines beidseitigen und einseitigen Walls als Lärmschutzmaßnahme?**

Test	s	$\Sigma X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
6 (Diff 4-1)	21,91	50	131,44	$\mu=0$	0,35317	$T > \alpha$ : Vereinbarkeit mit $H_0$
19 (Diff 1-4)	49,26	-78	295,54	$\mu=0$	0,60374	$T > \alpha$ : Vereinbarkeit mit $H_0$

Interpretation: Zwischen Streckenabschnitten mit beidseitigem und einseitigem Wall kann kein Unterschied in der akustischen Wahrnehmung nachgewiesen werden. Auch die Paarvergleiche in Kapitel 7.1.2 kommen zum selben Ergebnis.

Tab. 33. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede zwischen Streckenabschnitten mit einseitigem und beidseitigem Wall in Test 6 und 19

Neben den einseitigen und beidseitigen Wällen gibt es auch Lärmschutzwände als Lärmschutzmaßnahmen neben der Strecke. Da sich ein der Test 7 ausschließlich der Feststellung von Wahrnehmungsunterschieden zwischen Abschnitten mit und ohne Lärmschutzwände widmet, wird diese Thematik in einem eigenen Kapitel 7.2.4 behandelt.

### 7.2.4 Unterschiede von Streckenabschnitten mit und ohne 4m Lärmschutzwand

In diesem Kapitel wird der akustische Wahrnehmungsunterschied zwischen einem Streckenabschnitt mit Lärmschutzwand (Sample 1) und einem Streckenabschnitt ohne Lärmschutzwand (Sample 3) untersucht.

<i>Wie groß ist der akustische Wahrnehmungsunterschied von Streckenabschnitten mit und ohne Lärmschutzwand?</i>			
	<b>Sample 1</b>	<b>Sample 2</b>	<b>Sample 3</b>
<b>Parameter-Set</b>	4	9	3
<b>Streckentyp</b>	freie Strecke	Tunnel 1-gl.	freie Strecke
<b>Oberbau</b>	Schotter	FF	Schotter
<b>Geschwindigkeit</b>	200 km/h	200 km/h	200 km/h
<b>LS-Maßnahme</b>	Wall einseitig, 4m LSW	-	Wall beidseitig
<b>Gleisabsorber</b>	nein	ja	nein
<b>Bogen</b>	nein	nein	nein

Tab. 34. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 7

Als Kontrast zu diesen zwei vermutlich sehr ähnlichen Samples wurde ein Hörsample aus einem 1-gleisigen Tunnel (Sample 2) hinzugefügt (siehe Tabelle 34), um die Unterschiede zwischen den Hörsamples besser einordnen zu können.

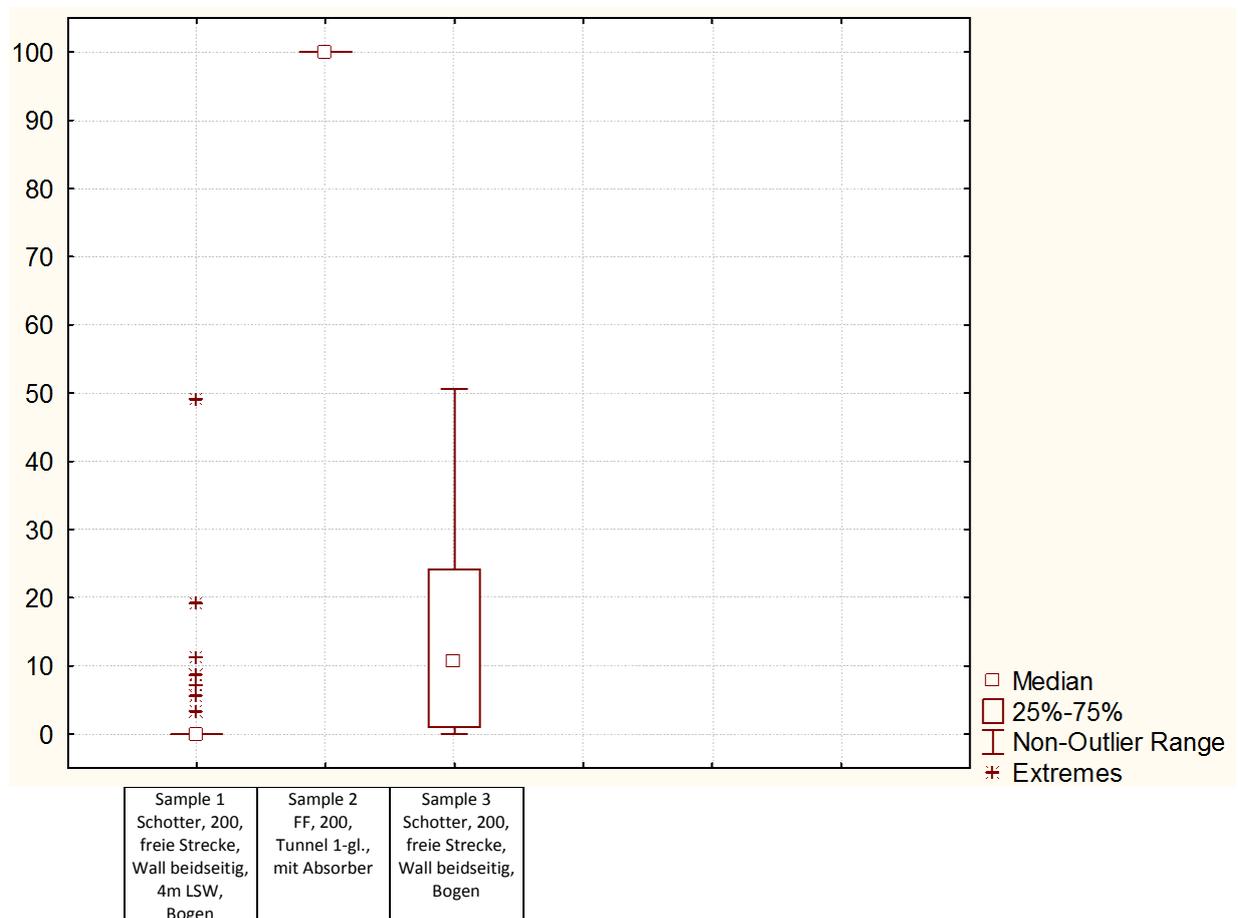


Abb. 47. Box-Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 7

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

Das Hörsample aus dem 1-gl. Tunnel wurde von allen Probanden als unangenehmstes Sample identifiziert (siehe Abbildung 47). Das Hörsample mit Lärmschutzwand (Sample 1) wurde wie schon in Test 6 als am angenehmsten beurteilt. Hier ist jedoch das Augenmerk nur auf den Vergleich mit dem Sample ohne Lärmschutzwand (Sample 3) gelegt, welches einen Median von 10,5 besitzt. Acht Mal wurde das Sample 3 zwar als angenehmer als Sample 1 bewertet, vom Großteil der Versuchspersonen wurde es jedoch unangenehmer eingestuft (Bewertungsdaten siehe Tabelle 61 in Anhang E).

### Statistische Auswertung der Bewertungsunterschiede

Mit Hilfe des in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Hypothesentest soll statistisch geprüft werden, ob aufgrund der Bewertungsdifferenzen von Hörsamples ein Wahrnehmungsunterschied für die Allgemeinheit der Fahrgäste anzunehmen ist.

Die Bewertungsdifferenzen von Streckenabschnitten mit und ohne Lärmschutzwand in Test 6 und 7 werden in Tabelle 35 statistisch geprüft und sind in den Tabellen 60 und 61 des Anhang E dargestellt.

Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines Streckenabschnittes mit und ohne LSW?						
Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
6 (Diff 6-3)	32,43	1136	194,58	$\mu = 0$	2,601E-09	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
7 (Diff 3-1)	21,35	461	128,10	$\mu = 0$	0,00016	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$

Interpretation:  
 Der Streckenabschnitt ohne Lärmschutzwand wird akustisch gesehen unangenehmer wahrgenommen. Aufgrund dessen kann davon ausgegangen werden, dass eine Lärmschutzwand keinen negativen Einfluss auf den Höreindruck im Fahrzeuginnern hat. Zum selben Ergebnis kamen auch die Paarvergleiche in Kapitel 7.1.4.  
 Der Bewertungsunterschied zwischen den Hörsamples fällt in Test 6 größer aus, als in Test 7, obwohl in beiden Tests dieselben Samples verglichen wurden. Ein möglicher Grund dafür ist, dass in Test 6 ein Sample eines 2-gleisigen Tunnels und in Test 7 ein Sample eines 1-gleisigen Tunnels vorhanden ist und somit die Bewertungsspannen bzw. die Abstände zwischen den Samples unterschiedlich sind.

Tab. 35. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede zwischen Streckenabschnitten mit und ohne LSW in Test 6 und 7

### 7.2.5 Unterschiede von Streckenabschnitten auf freier Strecke mit hoher Geschwindigkeit und im Tunnel mit geringerer Geschwindigkeit

In diesem Kapitel wird untersucht, ob ein Streckenabschnitt auf freier Strecke immer angenehmer empfunden wird, als ein Tunnelabschnitt, selbst wenn die Geschwindigkeit im Tunnel wesentlich geringer ist. Dazu werden Samples von der freien Strecke bei Geschwindigkeiten von 230 und 250 km/h (Sample 1 und Sample 2) mit Tunnelsamples bei Geschwindigkeiten von 100 bis 200 km/h verglichen (siehe Tabelle 36).

<i>Wird die freie Strecke mit Schotterbett bei 230 und 250 km/h noch immer angenehmer wahrgenommen, als ein 2-gleisiger Tunnel mit Absorber bei 100, 160 und 200 km/h?</i>						
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
<b>Parameter-Set</b>	2	2	8	8	10	8
<b>Streckentyp</b>	freie Strecke	freie Strecke	Tunnel 2-gl.	Tunnel 2-gl.	Tunnel 2-gl.	Tunnel 2-gl.
<b>Oberbau</b>	Schotter	Schotter	FF	FF	FF	FF
<b>Geschw.</b>	230 km/h	250 km/h	200 km/h	160 km/h	100 km/h	100 km/h
<b>LS-Maßnahme</b>	Wall beidseitig	Wall beidseitig	-	-	-	-
<b>Gleisabsorber</b>	nein	nein	ja	ja	nein	ja
<b>Bogen</b>	nein	nein	nein	nein	nein	nein

Tab. 36. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 8

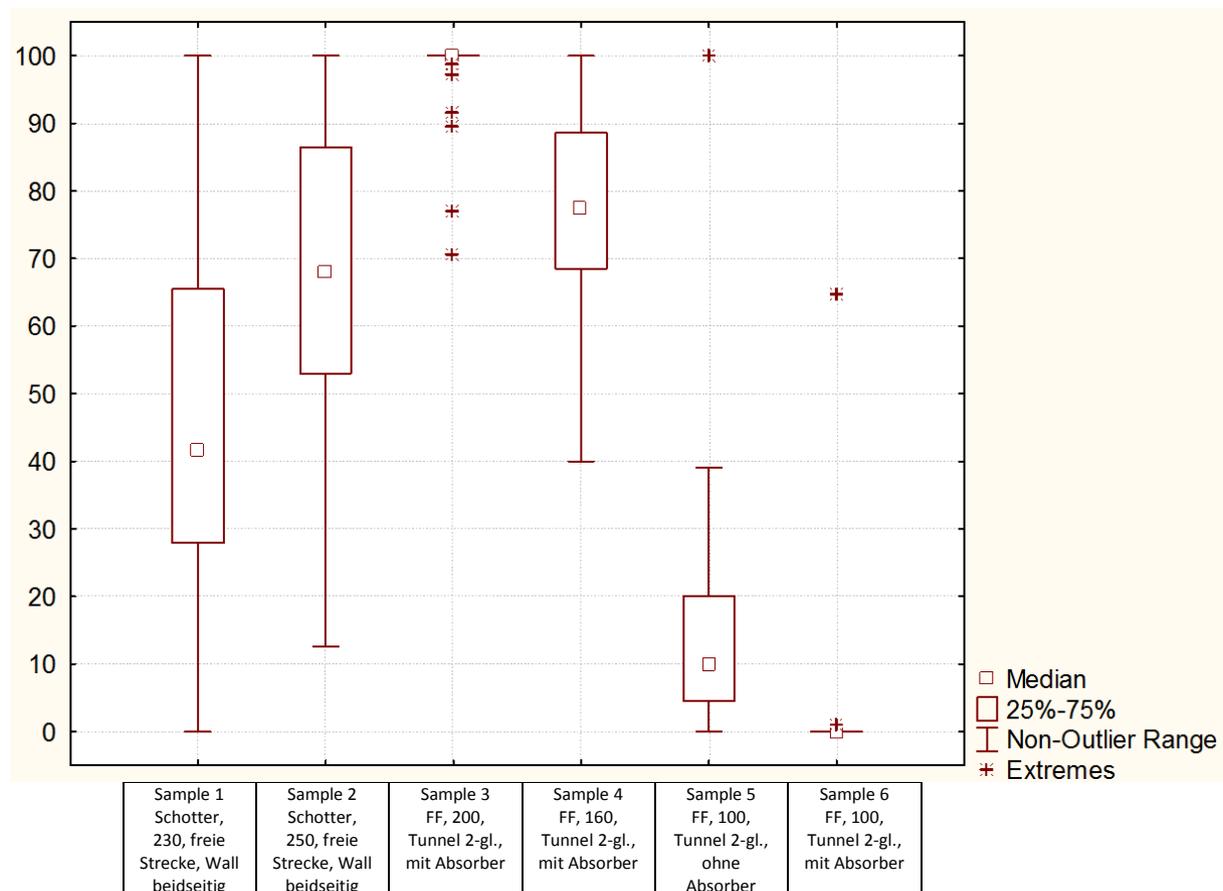


Abb. 48. Box-Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 8

Das Sample 6 wurde von annähernd allen Probanden als angenehmstes bewertet (siehe Abbildung 48). Es handelt sich hierbei um das Tunnelsample mit Absorbern und der niedrigsten Geschwindigkeit. Das Sample 5 wurde ebenfalls bei 100 km/h aufgezeichnet, jedoch stammt es aus einem Tunnelabschnitt ohne Gleisabsorber. Der Bewertungsunterschied zwischen den beiden Hörproben ist im Mittel sehr gering. Die beiden Tunnelsamples bei 100 km/h wurden fast immer angenehmer bewertet als die Samples der freien Strecke (Sample 1 und Sample 2) (Bewertungsdaten siehe Tabelle 62 im Anhang E).

Das Tunnelsample mit 200 km/h (Sample 3) wurde von annähernd allen Probanden als unangenehmstes Sample bewertet. Das Tunnelsample mit 160 km/h (Sample 4) wurde nur vier Mal unangenehmer eingeschätzt, als Sample 3. Insgesamt 16 Probanden haben Sample 4 besser bewertet, als eines der beiden Samples auf freier Strecke bei 230 bzw. 250 km/h (Sample 1 oder Sample 2).

### Statistische Auswertung der Bewertungsunterschiede

Mit Hilfe des in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Hypothesentests soll statistisch geprüft werden, ob aufgrund der Bewertungsdifferenzen von Hörsamples ein Wahrnehmungsunterschied für die Allgemeinheit der Fahrgäste anzunehmen ist.

Die Bewertungsdifferenzen von Streckenabschnitten auf freier Strecke und im Tunnel bei verschiedenen Geschwindigkeiten in Test 8 werden in Tabelle 35 bis 40 statistisch geprüft und sind in der Tabelle 62 im Anhang E dargestellt.

Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines Abschnittes auf freier Strecke bei 250 km/h und einem 2-gleisigen Tunnel mit Gleisabsorbern bei 200 km/h?						
Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
8 (Diff 3-2)	25,09	1147	150,55	$\mu = 0$	1,308E-14	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
Interpretation: Der 2-gleisige Tunnel mit Gleisabsorber bei 200 km/h wird akustisch unangenehmer wahrgenommen, als der Abschnitt auf freier Strecke bei 250 km/h.						

Tab. 37. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede zwischen freier Strecke 250 km/h und Tunnel mit Gleisabsorber 200 km/h

Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines Abschnittes auf freier Strecke bei 250 km/h und einem 2-gleisigen Tunnel mit Gleisabsorbern bei 160 km/h?						
Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
8 (Diff 4-2)	36,12	313	216,72	$\mu = 0$	0,07442	$T > \alpha$ : Vereinbarkeit mit $H_0$
Interpretation: Zwischen einem 2-gleisigen Tunnel mit Gleisabsorber bei 160 km/h und einem Abschnitt auf freier Strecke bei 250 km/h kann kein akustischer Wahrnehmungsunterschied nachgewiesen werden.						

Tab. 38. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede zwischen freier Strecke 250 km/h und Tunnel mit Gleisabsorber 160 km/h

**Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines Abschnittes auf freier Strecke bei 230 km/h und einem 2-gleisigen Tunnel mit Gleisabsorbern bei 160 km/h?**

Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
8 (Diff 4-1)	34,91	1018	209,44	$\mu = 0$	5,798E-07	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$

Interpretation: Der 2-gleisige Tunnel mit Gleisabsorber bei 160 km/h wird akustisch unangenehmer wahrgenommen, als der Abschnitt auf freier Strecke bei 230 km/h.

Tab. 39. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede zwischen freier Strecke 230 km/h und Tunnel mit Gleisabsorber 160 km/h

**Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines Abschnittes auf freier Strecke bei 230 km/h und einem 2-gleisigen Tunnel ohne Gleisabsorber bei 100 km/h?**

Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
8 (Diff 1-5)	33,78	1157	202,65	$\mu = 0$	5,626E-09	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$

Interpretation: Der Abschnitt auf freier Strecke bei 230 km/h wird akustisch unangenehmer wahrgenommen, als der 2-gleisige Tunnel ohne Gleisabsorber bei 100 km/h.

Tab. 40. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede zwischen freier Strecke 230 km/h und Tunnel mit Gleisabsorber 100 km/h

Der akustische Höreindruck bei einer Fahrt auf der freien Strecke mit 230 oder 250 km/h wird allgemein unangenehmer empfunden, als jener bei einer Fahrt in einem 2-gleisigen Tunnel mit 100 km/h (siehe Tabelle 40). Bei Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit im Tunnel auf 160 km/h wird dieser unangenehmer empfunden (Tabelle 39) bzw. ist bei 250 km/h auf freier Strecke kein Wahrnehmungsunterschied mehr identifizierbar (Tabelle 38). Eine Fahrt mit 200 km/h im Tunnel wird immer unangenehmer wahrgenommen als eine Fahrt auf freier Strecke bei 230 oder 250 km/h (siehe Tabelle 37).

### 7.2.6 Unterschiede verschiedener Tunnelabschnitte mit und ohne Gleisabsorber

In diesem Kapitel werden verschiedene Tunnelsamples mit unterschiedlichen Streckenparametern verglichen.

Es werden in Bezug auf diese Fragestellung vier Tests (Test 9, 10, 13 und 20) ausgewertet. Die statistische Auswertung der Bewertungsdifferenzen erfolgt nach der Darstellung der Ergebnisse der Tests.

<i>Wie groß ist der akustische Wahrnehmungsunterschied zw. einem 2-gleisigen Tunnel mit und ohne Gleisabsorber bei 160 km/h? Und wie sind im Vergleich dazu die Höreindrücke eines 2-gl. Tunnels mit Absorber bei 230 km/h und eines 1-gl. Tunnels ohne Absorber bei 160 km/h?</i>				
	<b>Sample 1</b>	<b>Sample 2</b>	<b>Sample 3</b>	<b>Sample 4</b>
<b>Parameter-Set</b>	10	8	8	11
<b>Streckentyp</b>	Tunnel 2-gl.	Tunnel 2-gl.	Tunnel 2-gl.	Tunnel 1-gl.
<b>Oberbau</b>	FF	FF	FF	FF
<b>Geschwindigkeit</b>	160 km/h	230 km/h	160 km/h	160 km/h
<b>LS-Maßnahme</b>	-	-	-	-
<b>Gleisabsorber</b>	nein	ja	ja	nein
<b>Bogen</b>	nein	nein	nein	nein

**Tab. 41. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 9**

In allen Tunnels befindet sich eine FF als Oberbauform. Bei den drei Hörsamples mit einer Geschwindigkeit von 160 km/h sind die Streckenparameter unterschiedlich (siehe Tabelle 41). Zwei davon sind aus einem 2-gleisigen Tunnel (Sample 1 und 3), die sich nur darin unterscheiden, dass ein Sample aus einem Abschnitt mit und das andere aus einem Abschnitt ohne Gleisabsorber stammt. Damit kann die Wirksamkeit der Gleisabsorber im Hinblick auf den Höreindruck des Fahrgastes untersucht werden. Dieser direkte Vergleich von Tunnel mit und ohne Absorber bei gleicher Geschwindigkeit war ausschließlich für einen 2-gleisigen Tunnel möglich, da im Rahmen der Messfahrten im 1-gleisigen Tunnel mit Absorber (WWT) höhere Geschwindigkeiten gefahren wurden.

Sample 4 stammt aus einem 1-gleisigen Tunnel ohne Absorber bei 160 km/h (LT). Sample 2 wurde bei einer Geschwindigkeit von 230 km/h in einem 2-gleisigen Tunnel mit Absorber aufgezeichnet. Damit kann verglichen werden, ob ein solcher Tunnelabschnitt selbst bei höherer Geschwindigkeit noch immer als angenehmer empfunden wird, als jene Abschnitte ohne Gleisabsorber.

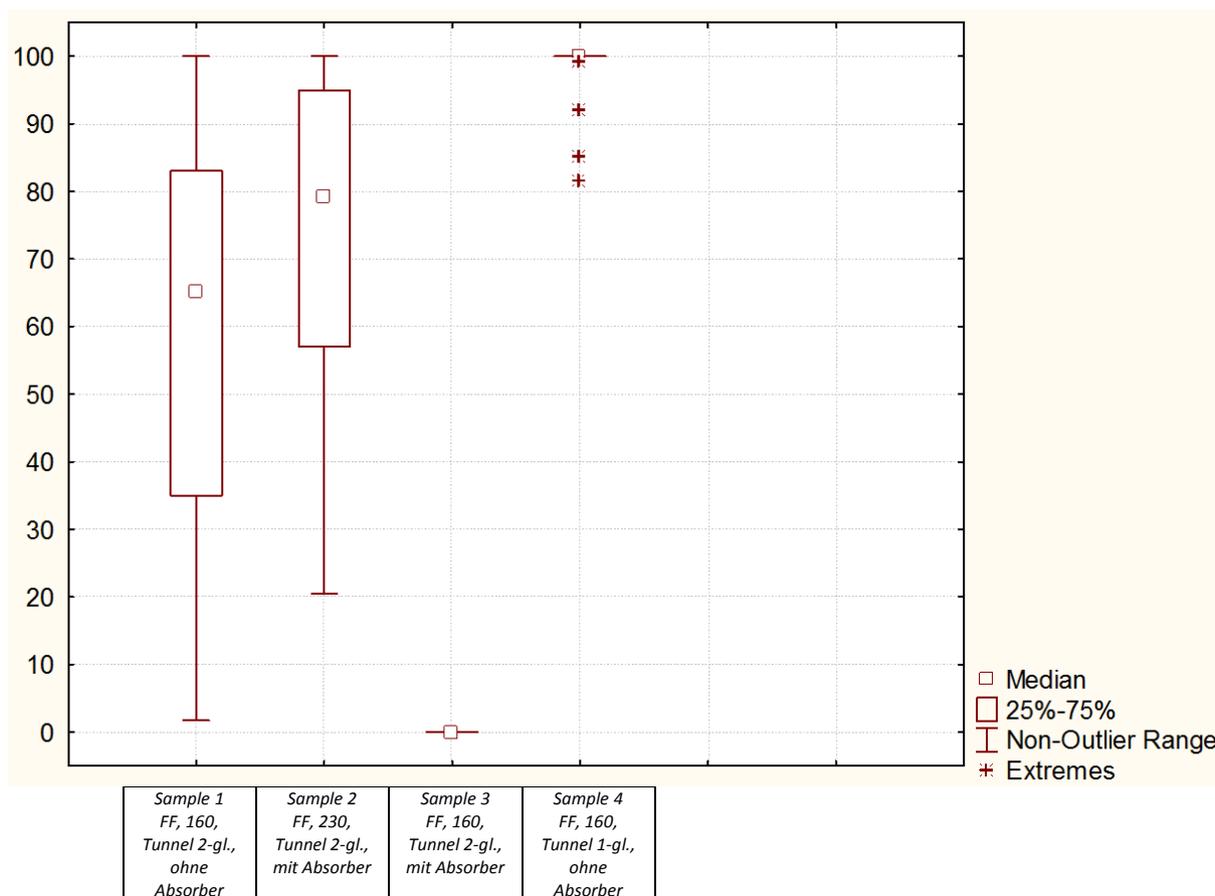


Abb. 49. Box-Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 9

Der 2-gleisige Tunnel mit Gleisabsorbern (Sample 3) wurde von allen Probanden am angenehmsten bewertet (siehe Box-Whisker Plot in Abbildung 49). Der gleiche Tunnel ohne Absorber (Sample 1) wurde von allen Probanden als unangenehmer bewertet, wie auch schon im Paarvergleich in Kapitel 7.1.5.

Die Bewertungen des Tunnels mit Absorber bei 230 km/h (Sample 2) sind ähnlich verteilt wie jene von Sample 1. Dieser Hörsample-Vergleich spiegelt die Bedingungen und Regelgeschwindigkeiten des Lainzer Tunnels und der anderen 2-gleisigen Tunnels auf der Neubaustrecke wider.

Der 1-gleisige Tunnel ohne Absorber (Sample 4) wurde mit Ausnahme von vier Probanden immer als unangenehmstes Sample bewertet, obwohl hier die Geschwindigkeit deutlich geringer ist als bei Sample 2 (Bewertungsdaten siehe Tabelle 63 im Anhang E).

Gibt es akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen 2-gleisigen Tunneln mit Gleisabsorber bei 160, 200, 230 und 250 km/h, ohne Absorber bei 160 km/h und 1-gleisigen Tunneln ohne Absorber bei 160 km/h?

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Parameter-Set	8	10	11	8	8	8
Streckentyp	Tunnel 2-gl.	Tunnel 2-gl.	Tunnel 1-gl.	Tunnel 2-gl.	Tunnel 2-gl.	Tunnel 2-gl.
Oberbau	FF	FF	FF	FF	FF	FF
Geschw.	230 km/h	160 km/h	160 km/h	160 km/h	200 km/h	250 km/h
LS-Maßnahme	-	-	-	-	-	-
Gleisabsorber	ja	nein	nein	ja	ja	ja
Bogen	nein	nein	nein	nein	nein	nein

Tab. 42. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 10

In Test 10 befinden sich ebenfalls nur Samples von Tunnelabschnitten (siehe Tabelle 42). Sample 1 bis 4 wurden bereits in Test 9 verwendet. Zusätzlich wurden die Samples 5 und 6 hinzugefügt, die aus einem 2-gleisigen Tunnelabschnitt mit Absorber bei 200 und 250 km/h stammen. Somit gibt es in diesem Test von einem 2-gleisigen Tunnel für jede gefahrene Geschwindigkeit (von 160 bis 250 km/h) je ein Hörsample.

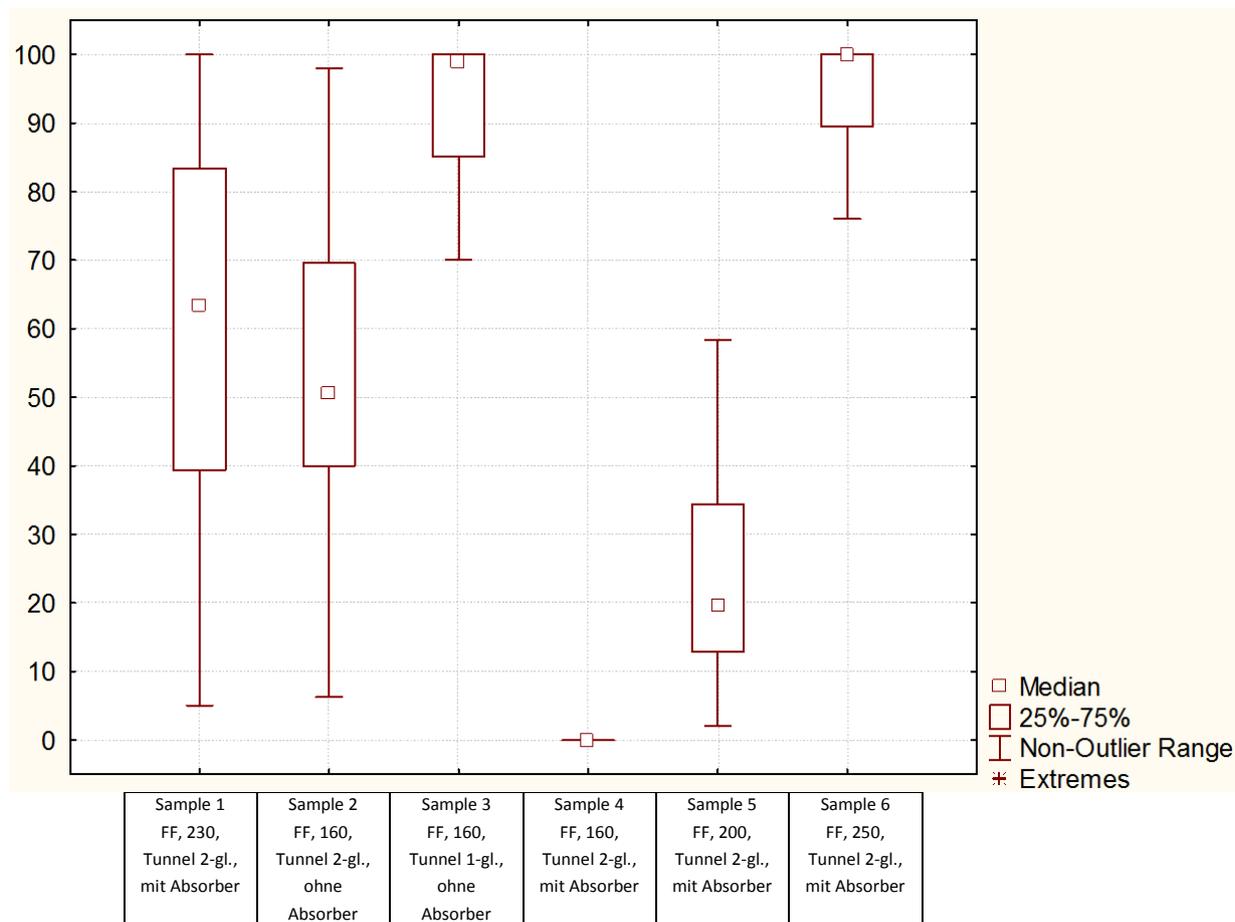


Abb. 50. Box -Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 10

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

Die Bewertungen von Sample 5 liegen im Mittel erwartungsgemäß zwischen jenen von Sample 4 und 1, da es diesen Hörproben von gleichartigen Tunneln stammen und die zugehörigen Geschwindigkeiten dieselbe Reihenfolge einnehmen (siehe Abbildung 50).

Beim Vergleich von 2-gleisigen Tunneln mit und ohne Gleisabsorber bei verschiedenen Geschwindigkeiten ist zu erkennen, dass Sample 6 und 3 und ebenso Sample 1 und 2 eine sehr ähnliche Bewertungsverteilung aufzuweisen (Bewertungsdaten siehe Tabelle 64 im Anhang E).

**Gibt es akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen 1-gleisigen Tunneln mit Gleisabsorber bei 200, 230 und 250 km/h, ohne Absorber bei 160 km/h und 2-gleisigen Tunneln mit Absorber bei 160 und 200 km/h?**

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6
Parameter-Set	9	9	9	10	11	8
Streckentyp	Tunnel 1-gl.	Tunnel 1-gl.	Tunnel 1-gl.	Tunnel 2-gl.	Tunnel 1-gl.	Tunnel 2-gl.
Oberbau	FF	FF	FF	FF	FF	FF
Geschw.	250 km/h	230 km/h	200 km/h	160 km/h	160 km/h	230 km/h
LS-Maßnahme	-	-	-	-	-	-
Gleisabsorber	ja	ja	ja	nein	nein	ja
Bogen	nein	nein	nein	nein	nein	nein

**Tab. 43. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 13**

In Test 13 werden, wie in den beiden Tests zuvor, Tunnelsamples verglichen (siehe Tabelle 43). In diesem Test ist das Augenmerk hauptsächlich auf 1-gleisige Tunnelabschnitte gelegt. Die ersten drei Samples sind alle aus einem 1-gl. Tunnel mit Gleisabsorber. In diesem Tunneltyp (Wienerwaldtunnel) wurden während der Messfahrten Geschwindigkeiten von 200, 230 und 250 km/h gefahren.

Sample 4 und 5 stammen aus einem 1-gleisigen und 2-gleisigen Tunnelabschnitt, jeweils ohne Gleisabsorber, bei einer Geschwindigkeit von 160 km/h (Lainzer Tunnel).

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

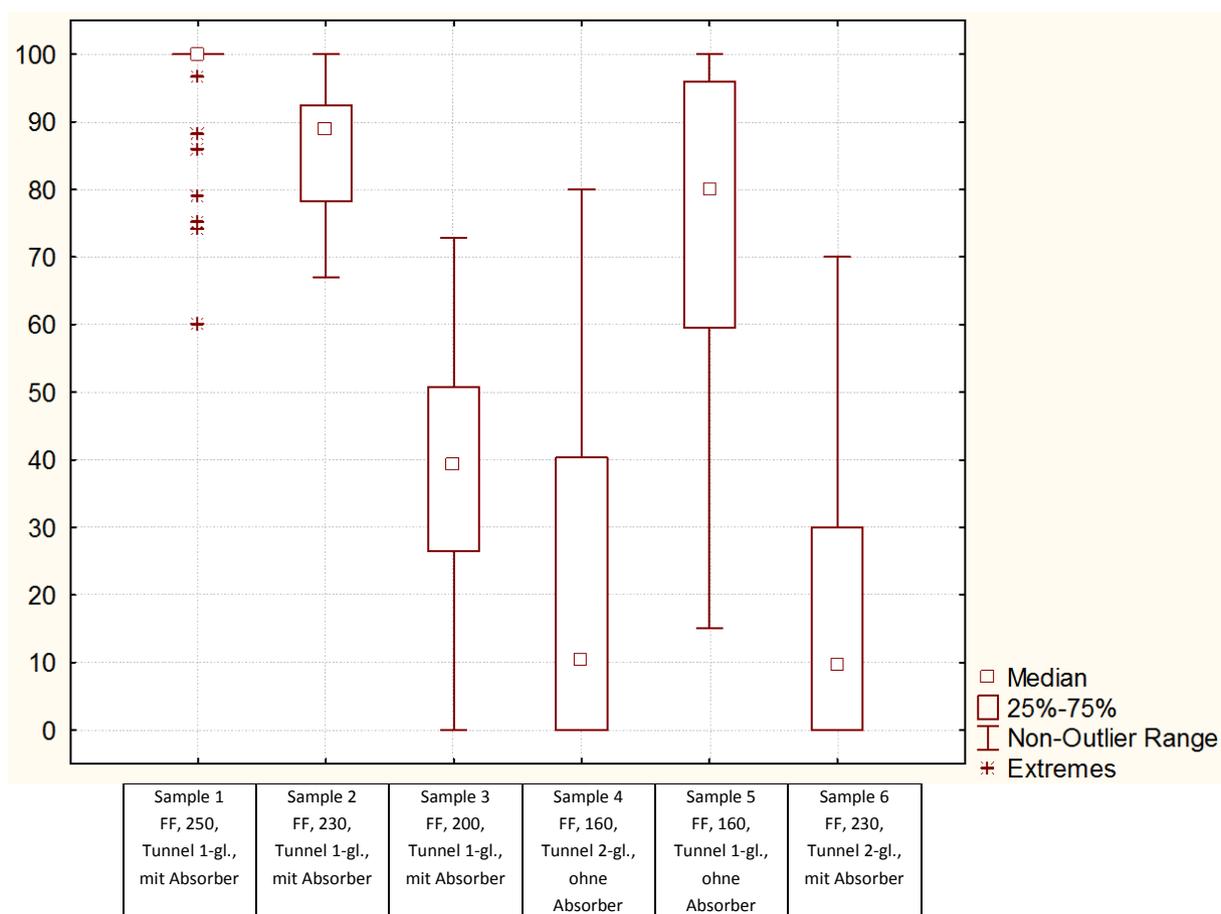


Abb. 51. Box-Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 13

Die Bewertungen der 1-gleisigen Tunnelabschnitte mit Gleisabsorber (Sample 1 bis 3) sind, wie deren zugehörige Geschwindigkeiten vermuten lassen, angeordnet (siehe Box-Whisker Plot in Abbildung 51). Die 2-gleisigen Tunnel (Sample 4 und 6) werden mit annähernd gleichen Median (20,7 und 18,9) als angenehmste Samples bewertet. Die Bewertungen des 1-gleisigen Tunnels ohne Absorber bei 160 km/h (Sample 5) sind geringfügig besser aus, als jene für Sample 2 (Bewertungsdaten siehe Tabelle 66 im Anhang E).

*Wie groß ist der akustische Wahrnehmungsunterschied zw. einem 2-gleisigen Tunnel mit Absorber und ohne Absorber bei 160 km/h? Und wie sind im Vergleich dazu die Höreindrücke auf freier Strecke und Fester Fahrbahn bei 230 und 250 km/h?*

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
<b>Parameter-Set</b>	10	5	8	5
<b>Streckentyp</b>	Tunnel 2-gl.	freie Strecke	Tunnel 2-gl.	freie Strecke
<b>Oberbau</b>	FF	FF	FF	FF
<b>Geschwindigkeit</b>	160 km/h	230 km/h	230 km/h	250 km/h
<b>LS-Maßnahme</b>	-	Wall beidseitig	-	Wall beidseitig
<b>Gleisabsorber</b>	nein	ja	ja	ja
<b>Bogen</b>	nein	ja	nein	ja

Tab. 44. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 20

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

In Test 20 befinden sich, im Unterschied zu den anderen Tests in diesem Kapitel, auch zwei Hörsamples von der freien Strecke (Sample 2 und 4). Sample 1 repräsentiert den 2-gleisigen Hauptteil des Lainzer Tunnels, welcher planmäßig mit 160 km/h durchfahren und keine Gleisabsorber besitzt. Sample 3 spiegelt jene Bedingungen wider, die in den sechs Tunneln im Tullnerfeld und in einem kurzen Abschnitt des Wienerwald Tunnels vorherrschen.

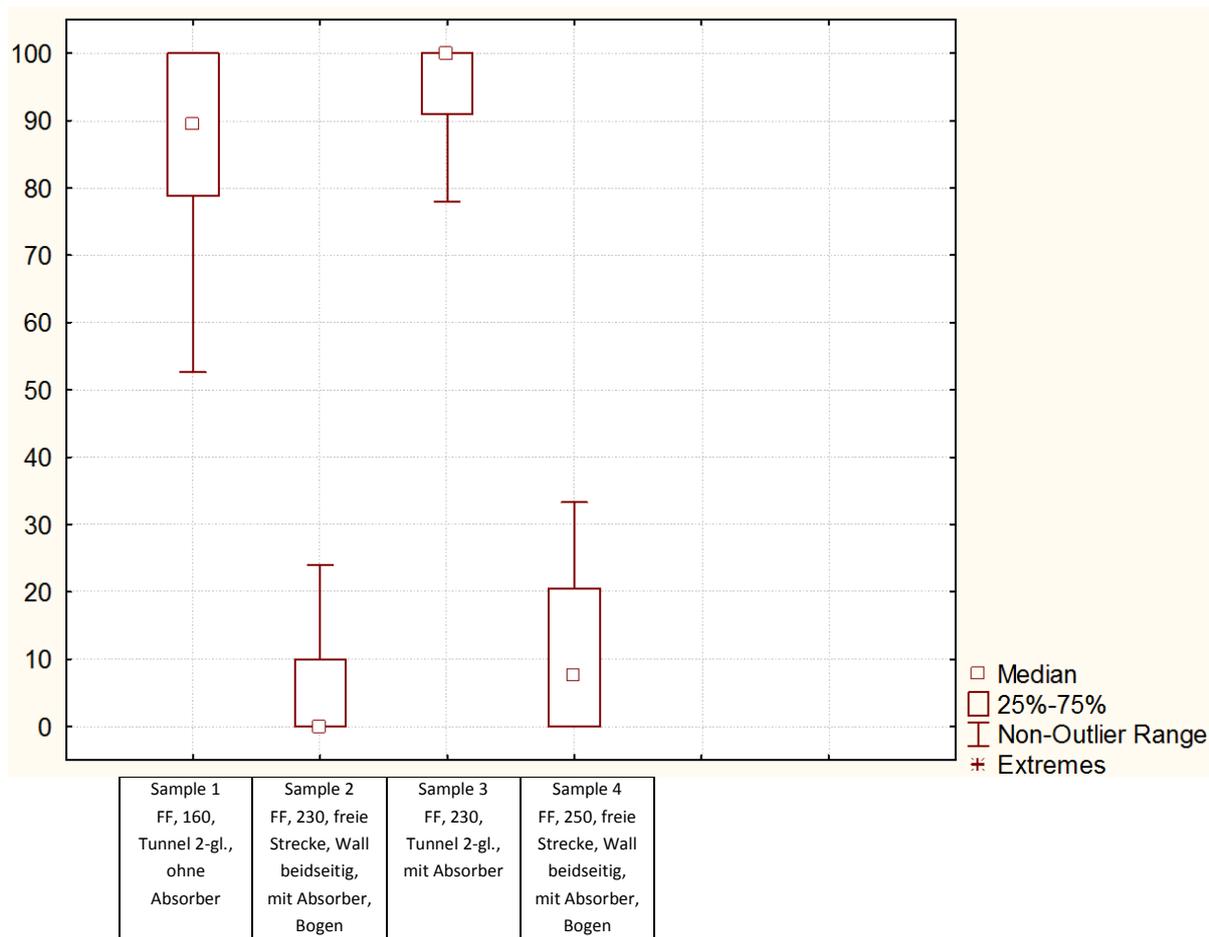


Abb. 52. Box-Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 20

Die Tunnel-Samples (Sample 1 und 3) werden unangenehmer bewertet, als die Samples von der freien Strecke (Sample 2 und 4). Die Bewertungsunterschiede zwischen den Tunnel-Samples und jenen von der freien Strecke sind, wie im Box-Whisker Plot der Abbildung 20 ersichtlich ist, sehr gering.

### Statistische Auswertung der Bewertungsunterschiede

Mit Hilfe des in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Hypothesentests soll statistisch geprüft werden, ob aufgrund der Bewertungsunterschiede von Hörsamples ein Wahrnehmungsunterschied für die Allgemeinheit der Fahrgäste anzunehmen ist.

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

Im Anschluss werden die akustischen Wahrnehmungen in 2-gleisigen Tunneln mit unterschiedlicher Ausstattung gegenübergestellt (Tabelle 45 und 46). Danach erfolgt der Vergleich von 1-gleisigen und 2-gleisigen Tunneln mit unterschiedlichen Parametern (Tabelle 47 und 48). Zuletzt werden 1-gleisige Tunnelabschnitte gegenübergestellt (siehe Tabelle 49).

Die Bewertungsdifferenzen von **2-gleisigen Tunneln mit und ohne Gleisabsorber bei gleicher Geschwindigkeit** in Test 8, 9 und 10 werden in Tabelle 45 statistisch geprüft und sind in den Tabellen 62, 63 und 64 im Anhang E dargestellt.

Wie groß ist der Unterschied in der akustischen Wahrnehmung von 2-gl. Tunneln mit und ohne Gleisabsorber bei 100 bzw. 160 km/h?						
Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
<b>100 km/h:</b>						
8 (Diff 5-6)	9,79	449	58,73	$\mu = 5$	2,349E-06	<i>T &lt; <math>\alpha</math>: Ablehnung von <math>H_0</math></i>
<b>160 km/h:</b>						
9 (Diff 1-3)	28,43	2109	170,55	$\mu = 40$	4,421E-05	<i>T &lt; <math>\alpha</math>: Ablehnung von <math>H_0</math></i>
10 (Diff 2-4)	21,06	1910	126,37	$\mu = 40$	9,843E-05	<i>T &lt; <math>\alpha</math>: Ablehnung von <math>H_0</math></i>
Interpretation:						
In allen Tests werden die 2-gleisigen Tunnelabschnitte ohne Gleisabsorber unangenehmer wahrgenommen. Die Absorber leisten somit einen wahrnehmbaren Beitrag für die Verbesserung des akustischen Fahrkomforts. Zu diesem Ergebnis kommen auch die in Kapitel 7.1.5 durchgeführten Paarvergleiche.						
Die Hörsamples in Test 8 wurden bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h aufgezeichnet. Es ist bei diesen Samples ein geringerer Wahrnehmungsunterschied feststellbar ( $\mu=5$ ), als bei den Samples aus Test 9 und 10 ( $\mu=40$ ), welche bei 160 km/h aufgezeichnet wurden. Für diesen Vergleich wurde jeweils der maximale $\mu$ -Wert (in 5er-Schritten) ermittelt. Diese Gegenüberstellung ist jedoch mit Vorsicht zu genießen, da in den Tests nie absolut gleiche Bewertungsbedingungen vorliegen.						

*Tab. 45. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede von 2-gleisigen Tunneln mit Gleisabsorber bei 230 km/h und ohne Absorber bei 160 km/h*

Die Bewertungsdifferenzen von **2-gleisigen Tunneln mit und ohne Gleisabsorber bei verschiedenen Geschwindigkeiten** in Test 9, 10, 13 und 20 werden in Tabelle 46 statistisch geprüft und sind in den Tabellen 63, 64, 66 und 70 im Anhang E dargestellt.

Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung von 2-gl. Tunneln mit Gleisabsorbern bei 230 km/h und ohne Absorber bei 160 km/h?						
Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
9 (Diff 2-1)	32,84	559	197,06	$\mu = 0$	0,002269	<i>T &lt; <math>\alpha</math>: Ablehnung von <math>H_0</math></i>
10 (Diff 1-2)	31,99	318	191,94	$\mu = 0$	0,048836	<i>T &gt; <math>\alpha</math>: Vereinbarkeit mit <math>H_0</math></i>
13 (Diff 6-4)	40,26	-3	241,58	$\mu = 0$	0,609224	<i>T &gt; <math>\alpha</math>: Vereinbarkeit mit <math>H_0</math></i>
20 (Diff 3-1)	24,56	267	147,38	$\mu = 0$	0,035248	<i>T &gt; <math>\alpha</math>: Vereinbarkeit mit <math>H_0</math></i>

Interpretation:

Die Auswertung der Bewertungsdifferenzen ergibt eine mehrheitliche Vereinbarkeit der Ergebnisse mit der Nullhypothese, somit kann kein Wahrnehmungsunterschied zwischen den beiden Tunnelabschnitten angenommen werden.

Dieser Vergleich entspricht in Bezug auf die Neubaustrecke Wien-St. Pölten der Gegenüberstellung der 2-gleisigen Tunnel im Tullnerfeld (230 km/h) und des 2-gleisigen Lainzer Tunnels (160 km/h) unter Betriebsbedingungen.

In Test 9 wird der Höreindruck des 2-gleisigen Tunnels mit Gleisabsorber bei 230 km/h unangenehmer wahrgenommen, als jener des 2-gleisigen Tunnels ohne Absorber bei 160 km/h. Dieser feststellbare Wahrnehmungsunterschied kann durch die unterschiedliche Bewertungsspanne zwischen dem angenehmsten und unangenehmsten Sample in den Tests entstehen.

Tab. 46. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede von 2-gleisigen Tunneln mit Gleisabsorber bei 230 km/h und ohne Absorber bei 160 km/h

Die Bewertungsdifferenzen eines **1-gleisigen und 2-gleisigen Tunneln ohne Gleisabsorber bei gleicher Geschwindigkeit** in Test 9, 10, 13 werden in Tabelle 47 statistisch geprüft und sind in den Tabellen 63, 64 und 66 im Anhang E dargestellt.

Wie groß ist der Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines 1-gl. und 2-gl. Tunneln ohne Gleisabsorber bei 160 km/h?

Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
9 (Diff 4-1)	28,38	1449	170,28	$\mu = 25$	0,000634	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
10 (Diff3-2)	23,17	1359	139,00	$\mu = 25$	0,000477	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
13 (Diff 5-4)	30,70	1902	184,20	$\mu = 25$	2,669E-08	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$

Interpretation:

Zwischen einem 1-gleisigen und 2-gleisigen Tunnel ohne Gleisabsorber bei 160 km/h kann ein großer Wahrnehmungsunterschied ( $\mu=25$ ) nachgewiesen werden. Der 1-gl. Tunnel wird immer unangenehmer wahrgenommen. Dies ist plausibel, da es in einem 1-gleisigen Tunnel aufgrund des kleineren Tunnelquerschnitts zu einer ungünstigeren Schallsituation kommt.

Der Vergleich dieser Tunnelabschnitte entspricht der Gegenüberstellung des 2-gl. Hauptteils und des 1-gleisigen Abschnitts des Lainzer Tunnels auf der Neubaustrecke Wien - St. Pölten unter Betriebsbedingungen.

Tab. 47. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede zwischen einem 1-gleisigen und 2-gleisigen Tunnel ohne Gleisabsorber bei 160 km/h

Die Bewertungsdifferenzen eines **1-gleisigen Tunneln ohne Gleisabsorber und eines 2-gleisigen Tunneln mit Absorber bei verschiedenen Geschwindigkeiten** in Test 9, 10, 13 werden in Tabelle 48 statistisch geprüft und sind in den Tabellen 63, 64 und 66 im Anhang E dargestellt.

**Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines 1-gl. Tunnels ohne Gleisabsorber bei 160 km/h und eines 2-gl. Tunnels mit Absorber bei 230 km/h?**

Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
9 (Diff 4-2)	25,32	890	151,94	$\mu = 10$	0,000246	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
10 (Diff 3-1)	30,23	1041	181,40	$\mu = 10$	0,000086	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
13 (Diff 5-6)	38,39	1969	230,34	$\mu = 10$	1,423E-12	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$

Interpretation:

Ein 1-gleisiger Tunnel ohne Gleisabsorber wird, trotz niedrigerer Geschwindigkeit (160 km/h) unangenehmer wahrgenommen, als ein 2-gleisiger Tunnel mit Absorber bei 230 km/h ( $\mu=10$ ). Die ungünstigere Schallsituation im 1-gleisigen Tunnel kann durch die geringere Geschwindigkeit nicht kompensiert werden.

Dieser Vergleich entspricht in Bezug auf die Neubaustrecke Wien - St. Pölten der Gegenüberstellung des 1-gleisigen Abschnittes des Lainzer Tunnels (160 km/h) und der 2-gleisigen Tunnel im Tullnerfeld (230 km/h) unter Betriebsbedingungen.

Tab. 48. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede zwischen einem 1-gleisigen Tunnel ohne Gleisabsorber bei 160 km/h und 2-gleisigen Tunnel mit Absorber bei 230 km/h

Die Bewertungsdifferenzen von **1-gleisigen Tunneln mit und ohne Gleisabsorber bei verschiedenen Geschwindigkeiten** in Test 13 werden in Tabelle 49 statistisch geprüft und sind in der Tabelle 66 im Anhang E dargestellt.

**Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines 1-gl. Tunnels mit Gleisabsorbern bei 230 km/h und ohne Absorber bei 160 km/h?**

Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
13 (Diff 2-5)	29,13	454	174,79	$\mu = 0$	0,004665	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$

Interpretation:

Der 1-gleisige Tunnel mit Gleisabsorber bei 230 km/h wird unangenehmer wahrgenommen, als der 1-gleisige Tunnel ohne Absorber bei 160 km/h.

Der hier festgestellte Wahrnehmungsunterschied unterscheidet sich zum Ergebnis des Signifikanztests des extrahierten Paarvergleiches, welcher in Kapitel 7.1.6 dargestellt ist und der zu keiner Ablehnung der Nullhypothese führte. Die anderen beiden Paarvergleiche zeigen, wie das Ergebnis hier, eine unangenehmere Wahrnehmung des 1-gleisigen Tunnels mit Gleisabsorber bei 230 km/h.

Der negative Einfluss der höheren Geschwindigkeit auf den Höreindruck im Fahrzeuginneren scheint in diesem Vergleich durch den Einsatz von Gleisabsorbern nicht mehr aufgewogen zu werden.

Dieser Vergleich entspricht in Bezug auf die Neubaustrecke Wien-St. Pölten der Gegenüberstellung des 1-gleisigen Abschnittes des Lainzer Tunnels (160 km/h) und des 1-gleisigen Wienerwaldtunnels (230 km/h) unter Betriebsbedingungen.

Tab. 49. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede von 1-gleisigen Tunneln mit Gleisabsorber bei 230 km/h und ohne Absorber bei 160 km/h

### 7.2.7 Unterschiede zwischen Fester Fahrbahn und Schotteroberbau auf freier Strecke bei hohen Fahrgeschwindigkeiten

In Kapitel 7.2.3 und in den Paarvergleichen des Kapitels 7.1.3 konnte der Schotteroberbau bei 200 km/h als akustisch angenehmere Oberbauform für den Fahrgast identifiziert werden. In diesem Kapitel sollen die Hörempfindungen beim Befahren einer Festen Fahrbahn (FF) und eines Schotteroberbaus auf der freien Strecke bei einer Geschwindigkeit von größer oder gleich 200 km/h untersucht werden.

Es werden in Bezug auf diese Fragestellung vier Tests (Test 12, 17, 18 und 21) ausgewertet. Die statistische Auswertung der Bewertungsdifferenzen erfolgt nach der Darstellung der Ergebnisse der Tests.

<b>Gibt es akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen einem Schotteroberbau bei 200, 230 und 250 km/h und einer Festen Fahrbahn bei 200 km/h?</b>				
	<b>Sample 1</b>	<b>Sample 2</b>	<b>Sample 3</b>	<b>Sample 4</b>
Parameter-Set	2	2	2	5
Streckentyp	freie Strecke	freie Strecke	freie Strecke	freie Strecke
Oberbau	Schotter	Schotter	Schotter	FF
Geschwindigkeit	200 km/h	230 km/h	250 km/h	200 km/h
LS-Maßnahme	Wall beidseitig	Wall beidseitig	Wall beidseitig	Wall beidseitig
Gleisabsorber	nein	nein	nein	ja
Bogen	nein	nein	nein	ja

**Tab. 50. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 12**

In Test 12 werden Hörsamples von Streckenabschnitten mit einem Schotteroberbau bei Geschwindigkeiten von 200, 230 und 250 km/h und mit einer Festen Fahrbahn bei 200 km/h jeweils auf freier Strecke gegenübergestellt (siehe Tabelle 50).

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

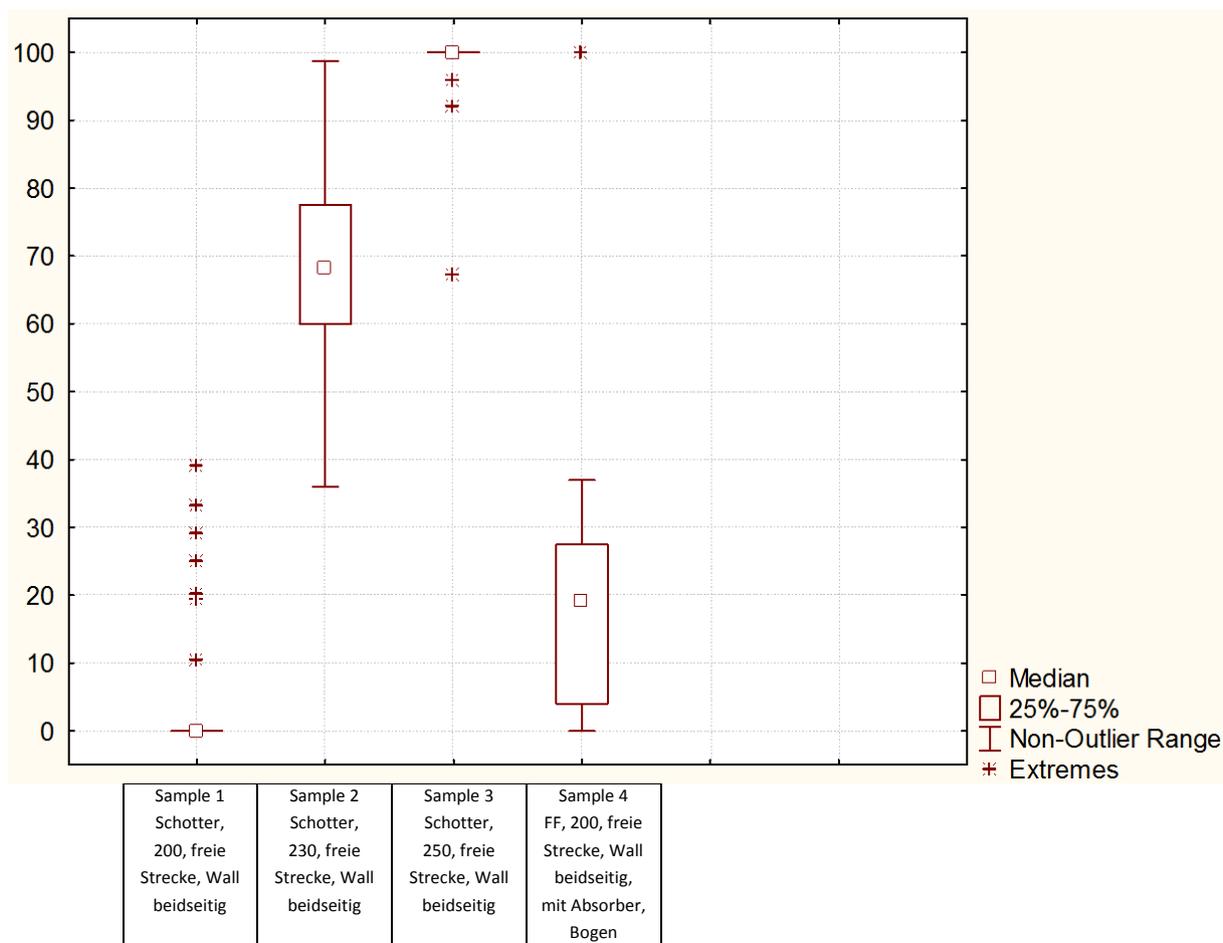


Abb. 53. Box-Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 12

Das Sample 3 mit Schotteroberbau und der höchsten Geschwindigkeit (250 km/h) wurde größtenteils als unangenehmstes bewertet (siehe Box-Whisker Plot in Abbildung 53). Lediglich drei Mal wurde die Feste Fahrbahn als noch unangenehmer bewertet. Gleichzeitig wurde die Feste Fahrbahn sieben Mal als angenehmstes Sample bewertet. Im Mittel wird sie aber zwischen dem Schotteroberbau bei 200 und bei 230 km/h eingeordnet (Bewertungsdaten siehe Tabelle 65 in Anhang E).

**Gibt es akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen einer Festen Fahrbahn bei 200, 230 und 250 km/h und einem Schotteroberbau bei 250 km/h?**

	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Parameter-Set	5	5	2	5
Streckentyp	freie Strecke	freie Strecke	freie Strecke	freie Strecke
Oberbau	FF	FF	Schotter	FF
Geschwindigkeit	200 km/h	250 km/h	250 km/h	230 km/h
LS-Maßnahme	Wall beidseitig	Wall beidseitig	Wall beidseitig	Wall beidseitig
Gleisabsorber	ja	ja	nein	ja
Bogen	ja	ja	nein	ja

Tab. 51. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 17

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

In Test 17 werden Hörsamples von Streckenabschnitten mit einer Festen Fahrbahn bei Geschwindigkeiten von 200, 230 und 250 km/h und mit einem Schotteroberbau bei 250 km/h jeweils auf freier Strecke gegenübergestellt (siehe Tabelle 51).

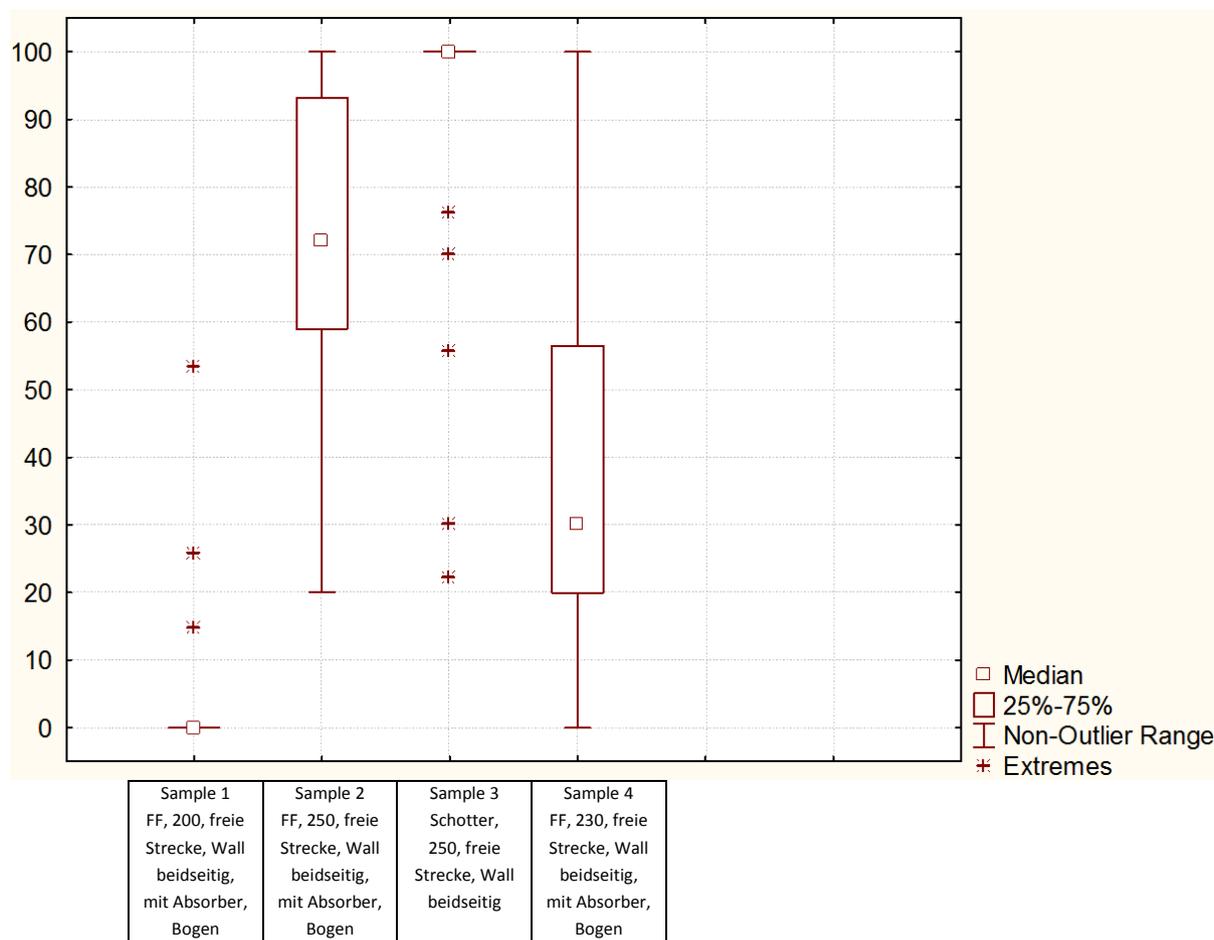


Abb. 54. Box -Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 17

Der Schotteroberbau bei 250 km/h (Sample 3) wurde in Test 17 bis auf wenige Ausnahmen (gekennzeichnet in Abbildung 54) als unangenehmstes Geräusch bewertet. Der Schotteroberbau wurde damit auch gegenüber der Festen Fahrbahn bei 250 km/h mehrheitlich als unangenehmer bewertet (alle Bewertungsdaten dargestellt in Tabelle 67 im Anhang E).

Gibt es akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen einer Festen Fahrbahn und einem Schotteroberbau auf freier Strecke bei 230 km/h?				
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Parameter-Set	5	8	9	2
Streckentyp	freie Strecke	Tunnel 2-gl.	Tunnel 1-gl.	freie Strecke
Oberbau	FF	FF	FF	Schotter
Geschwindigkeit	230 km/h	230 km/h	230 km/h	230 km/h
LS-Maßnahme	Wall beidseitig	-	-	Wall beidseitig
Gleisabsorber	ja	ja	ja	nein
Bogen	ja	nein	nein	nein

Tab. 52. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 18

## Kapitel 7 - Ergebnisse und Interpretation der Hörversuche

In Test 18 werden Hörsamples von Streckenabschnitten mit einer Festen Fahrbahn und mit einem Schotteroberbau auf freier Strecke, gemeinsam mit Tunnel-Samples, bei einer Geschwindigkeit von 230 km/h verglichen (siehe Tabelle 52).

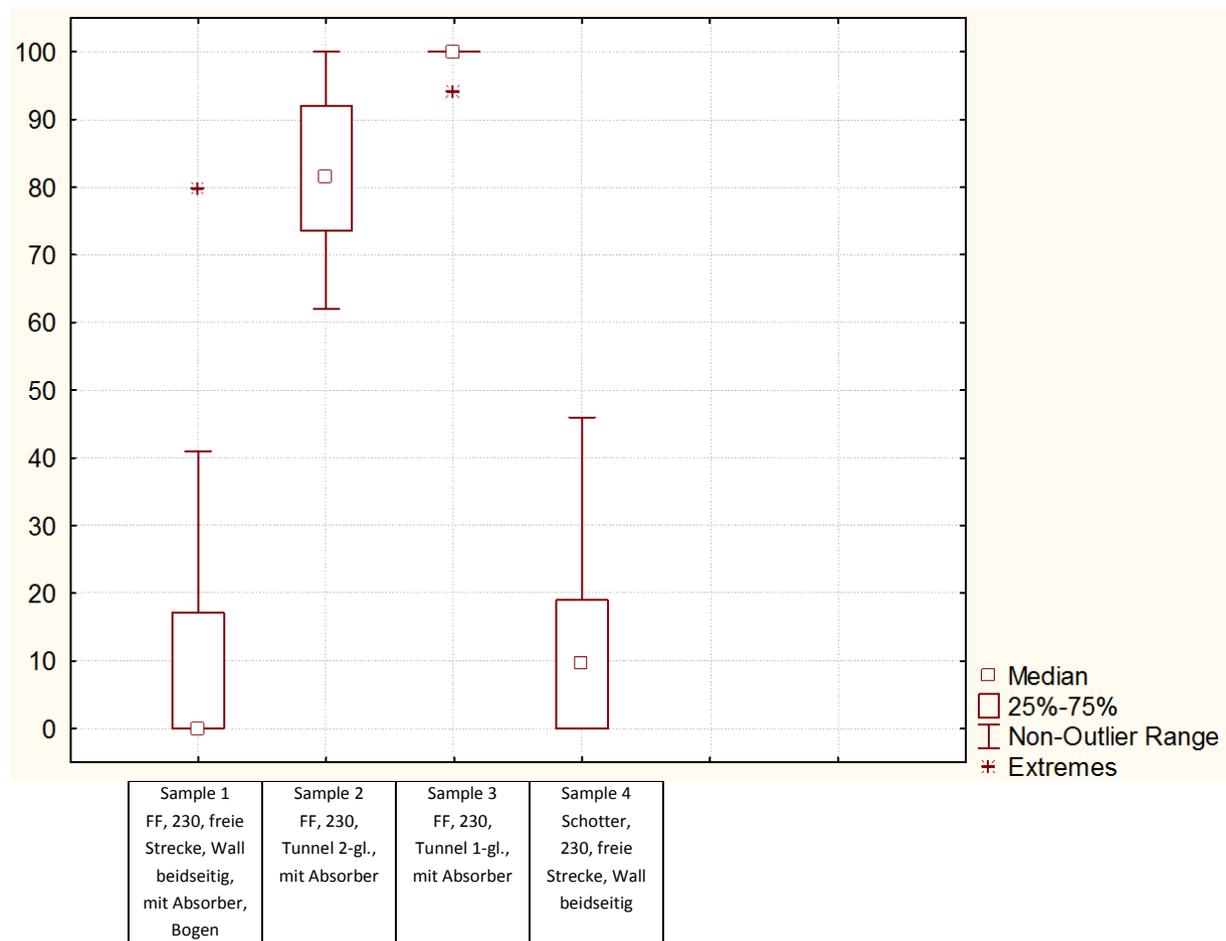


Abb. 55. Box -Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 18

Abbildung 55 zeigt, dass die beiden Tunnel-Samples (Sample 2 und 3) klar unangenehmer bewertet wurden. Die Hörsamples der freien Strecke besitzen eine ähnliche Streuung der Bewertungen und es ist ersichtlich, dass der Schotteroberbau (Sample 4) im Mittel unangenehmer bewertet wurde (Median 9,5 – Bewertungsdaten siehe Tabelle 68 im Anhang E).

Gibt es akustische Wahrnehmungsunterschiede zwischen einer Festen Fahrbahn und einem Schotteroberbau auf freier Strecke bei 250 km/h?				
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4
Parameter-Set	8	5	9	2
Streckentyp	Tunnel 2-gl.	freie Strecke	Tunnel 1-gl.	freie Strecke
Oberbau	FF	FF	FF	Schotter
Geschwindigkeit	250 km/h	250 km/h	250 km/h	250 km/h
LS-Maßnahme	-	Wall beidseitig	-	Wall beidseitig
Gleisabsorber	ja	ja	ja	nein
Bogen	nein	ja	nein	nein

Tab. 53. Zusammensetzung der Hörsamples in Test 21

In Test 21 werden Hörsamples von Streckenabschnitten mit einer Festen Fahrbahn und mit einem Schotteroberbau auf freier Strecke, gemeinsam mit Tunnel-Samples, bei einer Geschwindigkeit von 250 km/h, verglichen (siehe Tabelle 53).

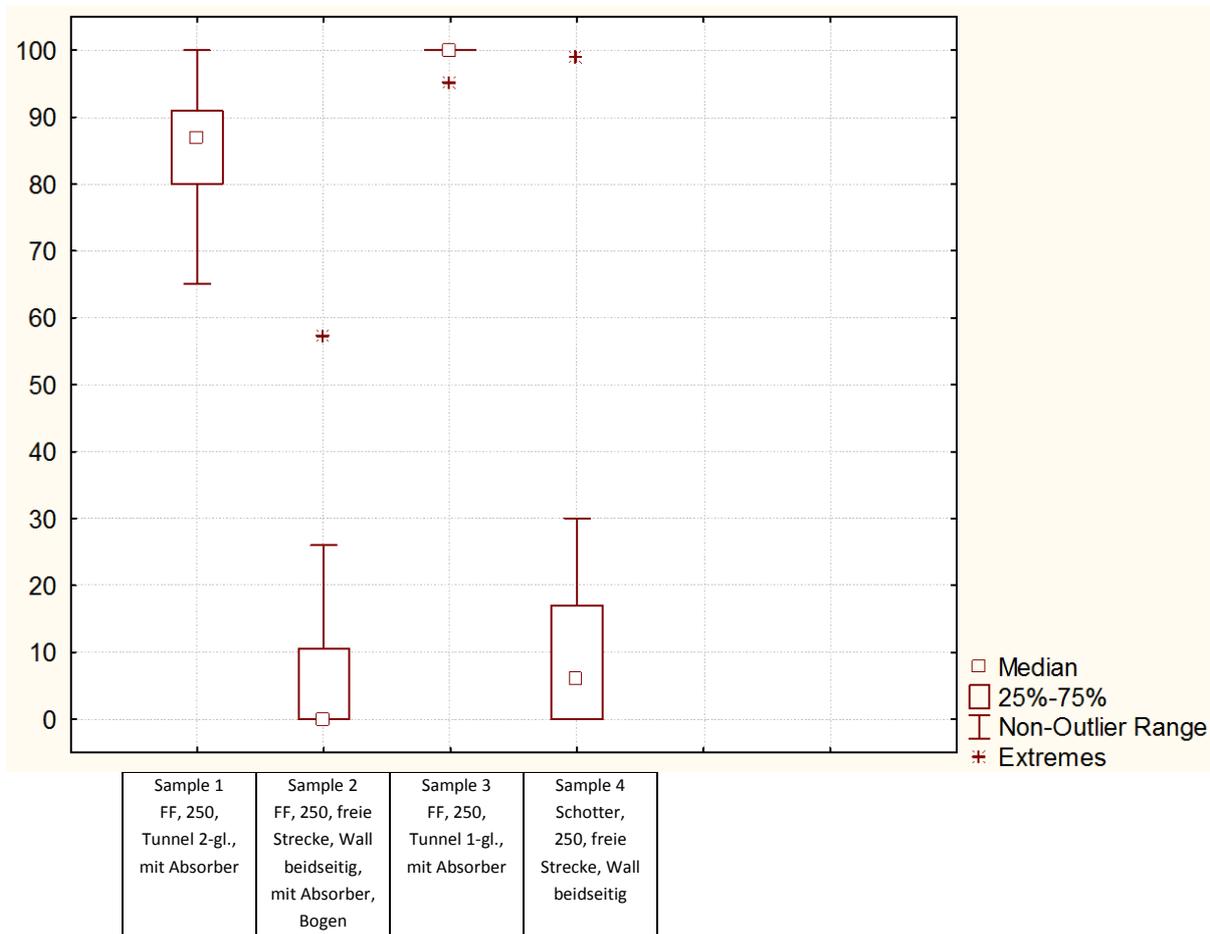


Abb. 56. Box -Whisker Plot der Hörsample-Bewertungen in Test 21

Wie in Test 18 werden die Tunnel-Samples (1 und 3) am lästigsten eingestuft und der Streckenabschnitt mit dem Schotteroberbau im Mittel geringfügig unangenehmer bewertet als jener mit der Festen Fahrbahn (siehe Abbildung 56).

### Statistische Auswertung der Bewertungsunterschiede

Mit Hilfe des in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Hypothesentests soll statistisch geprüft werden, ob aufgrund der Bewertungsdifferenzen von Hörsamples ein Wahrnehmungsunterschied für die Allgemeinheit der Fahrgäste anzunehmen ist.

Im Folgenden werden die Bewertungen des Schotteroberbaus und der Festen Fahrbahn bei Geschwindigkeiten über 200 km/h gegenübergestellt. Die Bewertungsdifferenzen in Test 12, 17, 18 und 21 werden in Tabelle 54, 55 und 56 statistisch geprüft und sind in den Tabellen 65, 67, 68 und 71 im Anhang E dargestellt.

**Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines Schotteroberbaus bei 230 km/h und einer Festen Fahrbahn bei 200 km/h?**

Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
12 (Diff 2-4)	35,00	1496	210,02	$\mu = 0$	5,362E-13	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$

Interpretation:

Durch die Erhöhung der Geschwindigkeit von 200 auf 230 km/h wird der Schotteroberbau im Vergleich zur Festen Fahrbahn bei 200 km/h als akustisch unangenehmer wahrgenommen.

Tab. 54. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede eines Schotteroberbaus bei 230 km/h und einer FF bei 200 km/h

**Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines Schotteroberbaus und einer Festen Fahrbahn bei 230 km/h?**

Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
18 (Diff 4-1)	28,17	29	169,03	$\mu = 0$	0,430793	$T > \alpha$ : Vereinbarkeit mit $H_0$

Interpretation:

Es kann kein Unterschied in der akustischen Wahrnehmung des Schotteroberbaus und der Festen Fahrbahn bei 230 km/h festgestellt werden.

Diese Aussage unterscheidet sich zum Vergleich des Höreindrucks der beiden Oberbauformen bei einer Geschwindigkeit von 200 km/h. Bei dieser Geschwindigkeit konnte der Schotteroberbau als angenehmer identifiziert werden (siehe Kapitel 7.2.3 und Paarvergleiche des Kapitels 7.1.3).

Der Grund für den nicht mehr feststellbaren Wahrnehmungsunterschied könnten aerodynamische Effekte sein, die bei höheren Geschwindigkeiten mehr an Bedeutung gewinnen und die Wahrnehmung der Oberbauform in den Hintergrund gerät.

Tab. 55. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede eines Schotteroberbaus und einer FF bei 230 km/h

**Gibt es einen Unterschied in der akustischen Wahrnehmung eines Schotteroberbaus und einer Festen Fahrbahn bei 250 km/h?**

Test	s	$\sum X_i$	$s_{\Sigma}$	$H_0$	T	Ergebnis
17 (Diff 3-2)	33,64	746	201,87	$\mu = 0$	0,000109	$T < \alpha$ : Ablehnung von $H_0$
21 (Diff 4-2)	26,25	155	157,53	$\mu = 0$	0,163252	$T > \alpha$ : Vereinbarkeit mit $H_0$

Interpretation:

In Test 17 wird der Schotteroberbau bei 250 km/h unangenehmer wahrgenommen, als die Feste Fahrbahn. In Test 21 kann kein Wahrnehmungsunterschied zwischen den gleichen Hörsamples nachgewiesen werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Bewertungsbedingungen in den beiden Tests ist anzunehmen, dass in Test 17 Wahrnehmungsunterschiede deutlicher zur Geltung kommen, da sich in diesem Test 17 sehr ähnliche Samples, ausschließlich von der freien Strecke, befinden. In Test 21 sind auch Tunnel-Samples inkludiert sind, wodurch die absoluten Abstände zwischen ähnlichen Hörsamples geringer werden.

Ein Wahrnehmungsunterschied zwischen den Oberbauformen auf freier Strecke bei 250 km/h kann somit bei der Betrachtung von Hörsamples der gesamten Strecke (wie in Test 21) nicht eindeutig festgestellt werden.

Tab. 56. Signifikanztest der Bewertungsunterschiede eines Schotteroberbaus und einer FF bei 250 km/h

## 8 Vergleich der psychoakustischen Parameter und des Schalldruckpegels mit der subjektiven Wahrnehmung

Die durch die Hörversuche erlangten Lästigkeitsbeurteilungen (aus den Relationen) werden im Folgenden den Parametern der Hörsamples gegenübergestellt. Dabei wird speziell der A-bewertete Schalldruckpegel mit den psychoakustischen Parametern verglichen, denn dieser wird häufig, beispielsweise in Normen, zur Grenzwertdefinition herangezogen. Es wird untersucht, ob dieser besser für die Bestimmung der subjektiven Wahrnehmung geeignet ist, als andere psychoakustische Größen.

### 8.1 Korrelationen der psychoakustischen Parameter und des Schalldruckpegels mit den Lästigkeitsbewertungen

In jedem Hörversuch wurden die zu einer Relation gehörenden Samples nach der Lästigkeit auf einer Skala von 0 (am angenehmsten) bis 100 (am unangenehmsten) eingeordnet. Da diese Skala in jedem Test voll auszunutzen war (siehe Kapitel 6.3.2) und somit in jedem Test unterschiedliche Bedeutung hat, können Korrelationen zwischen den Lästigkeitsbewertungen und den Parametern nur innerhalb eines Tests hergestellt werden.

Da die Prüfung einer Korrelation mit nur wenigen Vergleichswerten auf sehr wenig Information beruht und die Aussagekraft dadurch gering ist, werden nur die Korrelationen von Tests mit 6er-Relationen genauer untersucht. Zur Vervollständigung und zum Vergleich sind die Korrelationen der 4er-Relationen im Anhang F in Tabelle 72 dargestellt.

Für die Ermittlung der Korrelation zwischen der Lästigkeit und den Parametern wurde der Korrelationskoeffizient  $r$  nach Pearson berechnet. Für die Lästigkeit eines Hörsamples wurde der Median der abgegebenen Bewertungen des jeweiligen Tests herangezogen (dargestellt in den Tabellen des Anhang F). Zur Ermittlung der Parameterwerte wurde die Analyse-Software ArtemiS mit den gleichen Berechnungsgrundlagen, wie zu Beginn des Kapitels 7.1 erwähnt, verwendet. Die Parameterwerte (dargestellt in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) mit welchen die Korrelationskoeffizienten berechnet wurden, stellen somit Mittelwerte über die Hörsampledauer (3 s) dar.

	6er-Relationen			
	Test 6	Test 8	Test 10	Test 13
Pegel	0,92	0,47	0,76	0,66
Lautheit	0,91	0,93	0,92	0,95
Rauhigkeit	0,90	0,62	0,73	0,65
Schärfe	0,64	0,97	0,91	0,65
Tonalität	0,10	-0,58	-0,12	-0,36

Tab. 57. Überblick der Korrelationskoeffizienten zwischen Lästigkeitsbewertungen und Parametern der 6er-Relationen

## Kapitel 8 - Vergleich der psychoakustischen Parameter und des Schalldruckpegels mit der subjektiven Wahrnehmung

Wie in Tabelle 57 ersichtlich ist, besitzt in Test 6 der Schalldruckpegel eine geringfügig höhere Korrelation mit den Lästigkeitsbewertungen als die Lautheit. In allen anderen Tests ist die Korrelation der Lautheit deutlich größer, als jene des Pegels. Damit liegt die Annahme nahe, dass der Parameter der Lautheit besser als der A-bewertete Pegel für die Bestimmung der Lästigkeit eines Hörsamples geeignet ist. Die Gegenüberstellung der Streudiagramme (Scatterplots) der beiden Parameter erfolgt in Kapitel 8.2.

Die Korrelationskoeffizienten der Rauigkeit und Schärfe korrelieren bis auf eine Ausnahme immer weniger mit den Lästigkeitsbewertungen, als die Lautheit (siehe Abbildung 57). Die Tonalität weist eine sehr geringe, meist negative Korrelation mit der Lästigkeit auf.

Die Aussagekraft der Korrelationen soll in den folgenden Kapiteln untersucht werden, denn diese hängt nicht nur von der Höhe und der Stichprobengröße ab, sondern es können sich auch mögliche Scheinkorrelationen durch die Verteilung der Werte ergeben.

### 8.2 Vergleich der Korrelationseigenschaften von Pegel und Lautheit

Die Korrelationen zwischen Lästigkeit und Pegel bzw. Lästigkeit und Lautheit werden im Folgenden für jede 6er-Relation gegenübergestellt und analysiert. Für diese Relationen ergeben sich 6 Wertepaare, welche die Grundlage für die Konstruktion der Regressionsgerade sind (siehe z.B. Abbildung 57). Auf der Ordinate kann stets die Lästigkeitsbewertung des Hörsamples im jeweiligen Test abgelesen werden und auf der Abszisse sind die zugehörigen Parameterwerte ersichtlich.

Der Signifikanzwert der Korrelationen, dargestellt durch p-Wert in den folgenden Scatterplots, ist statistisch von sehr großer Bedeutung. Er ist das Ergebnis einer vorab aufgestellten Hypothese. Er berücksichtigt nicht nur die Höhe der Korrelation, sondern auch die Größe der Stichprobe und gibt Auskunft über die Wahrscheinlichkeit, dass diese Korrelation rein zufällig zustande kam. [12]

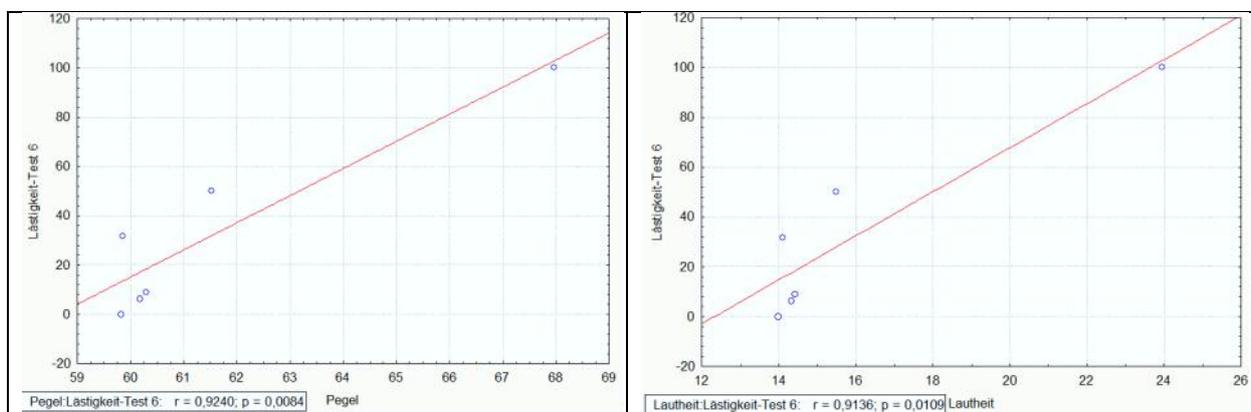


Abb. 57. . Streudiagramme Lästigkeit vs. Lautheit und Pegel in Test 6

## Kapitel 8 - Vergleich der psychoakustischen Parameter und des Schalldruckpegels mit der subjektiven Wahrnehmung

In Test 6 gab es ein Tunnelsample das in Abbildung 57 durch die deutlich höheren Werte für Pegel und Lautheit identifizierbar ist. Dieses Sample unterscheidet sich von den anderen durch extremere Parameterwerte und es können sich dadurch mögliche Scheinkorrelationen ergeben. Test 6 wird daher in den weiteren Korrelationsuntersuchungen nicht weiter berücksichtigt.

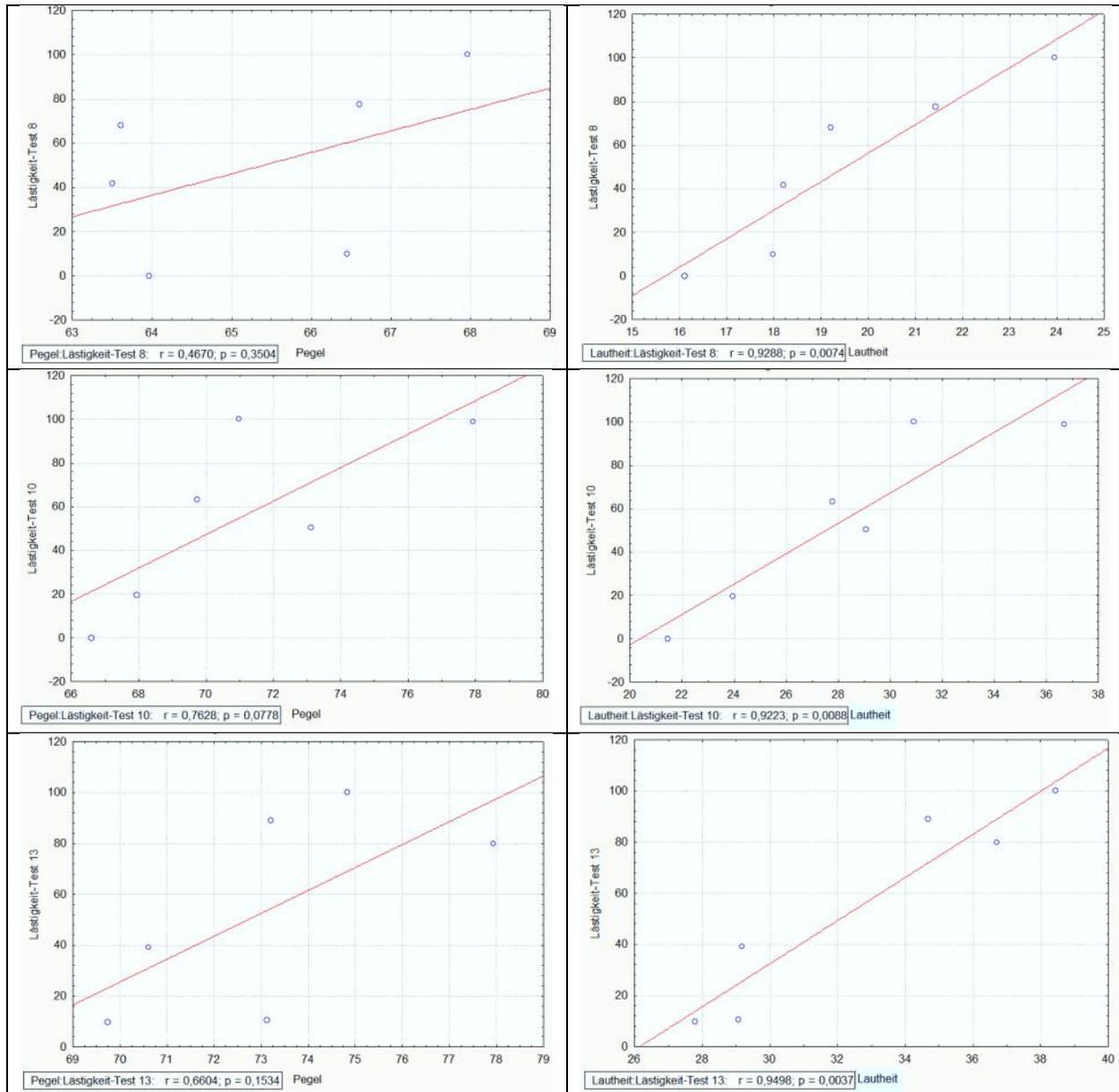


Abb. 58. Streudiagramme Lästigkeit vs. Lautheit und Pegel in Test 8, 10 und 13

## Kapitel 8 - Vergleich der psychoakustischen Parameter und des Schalldruckpegels mit der subjektiven Wahrnehmung

Die Korrelation zwischen den Lästigkeitsbewertungen im Hörversuch und der Lautheit (rechts oben in Abbildung 58) ist in Test 8 deutlich höher, als die Korrelation zwischen Lästigkeit und Pegel. Auch in Test 10 korreliert die Lautheit mehr mit der Lästigkeit, als der Schalldruckpegel (Abbildung 58 – Mitte). Die Korrelationen aus Test 13 bekräftigen ebenfalls die Annahme, dass die Lautheit für die Beschreibung der Lästigkeit eines Hörsamples ein mindestens so aussagekräftiger oder sogar besserer Parameter als der A-bewertete Schalldruckpegel ist. Der Signifikanzwert  $p$  der Korrelationen ist für Test 8, 10 und 13 immer kleiner 1%. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit für eine zufällig auftretende Korrelation stets kleiner 1% ist.

### 8.3 Vergleich der Korrelationseigenschaften von Rauigkeit, Schärfe, Tonalität und Lautheit

Die Korrelationen der psychoakustischen Parameter mit den Lästigkeitsbewertungen der Hörsamples werden für die Tests 8, 10 und 13 gegenübergestellt. Test 6 wurde aufgrund des Wertepaars, welches eine Scheinkorrelation erzeugen könnte (siehe Abbildung 57), ausgeschlossen.

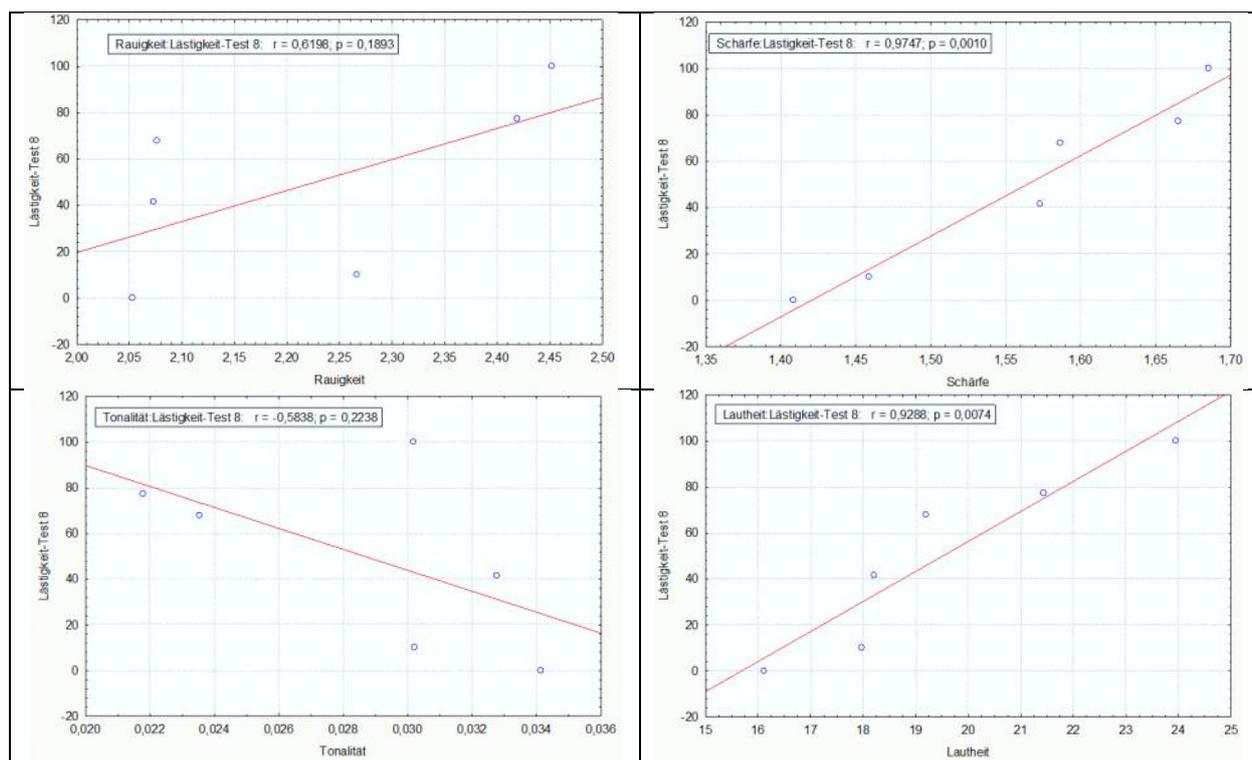


Abb. 59. . Streudiagramme Lästigkeit vs. psychoakustische Parameter in Test 8

Für die Lästigkeitsbewertungen in Test 8 besitzt die Schärfe mit  $r=0,97$  die höchste Korrelation der psychoakustischen Parameter (siehe Abbildung 59). Die Lautheit korreliert nur geringfügig weniger (0,93). Für die Korrelation der Rauigkeit (0,62) liegt die Wahrscheinlichkeit für einen zu Unrecht angenommenen linearen Zusammenhang der Wertepaare bei 19% ( $p$ -Wert = 0,1893).

## Kapitel 8 - Vergleich der psychoakustischen Parameter und des Schalldruckpegels mit der subjektiven Wahrnehmung

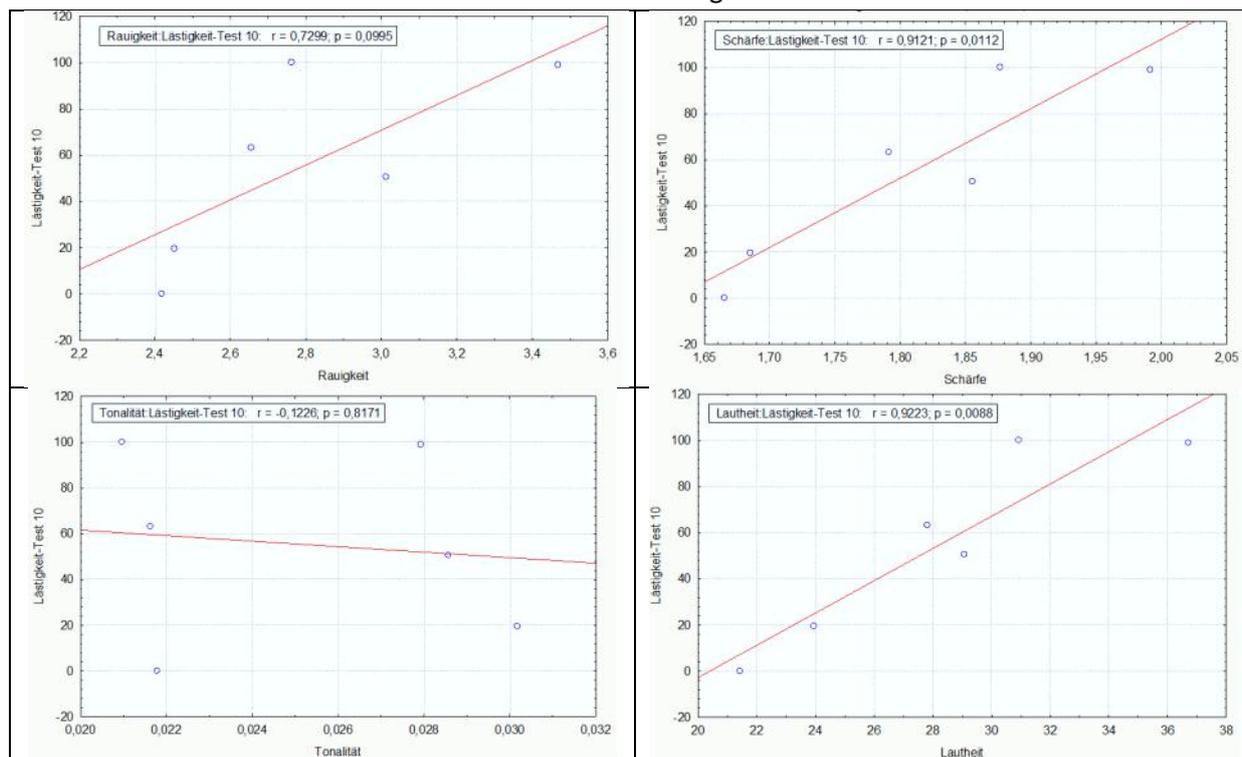


Abb. 60. Streudiagramme Lästigkeit vs. psychoakustische Parameter in Test 10

In Test 10 sind die Parameter für Lautheit und Schärfe in Bezug auf die Lästigkeit der Hörsamples ähnlich verteilt und weisen eine Korrelation über 0,9 auf (Abbildung 61). Die Rauigkeit zeigt in diesem Test weniger Abhängigkeit von der Lästigkeit (0,73). Die Wahrscheinlichkeit, dass es ein Zusammenhang zwischen Tonalität und Lästigkeit zufällig zustande kam, liegt hier bei 82% ( $p=0,8171$ ).

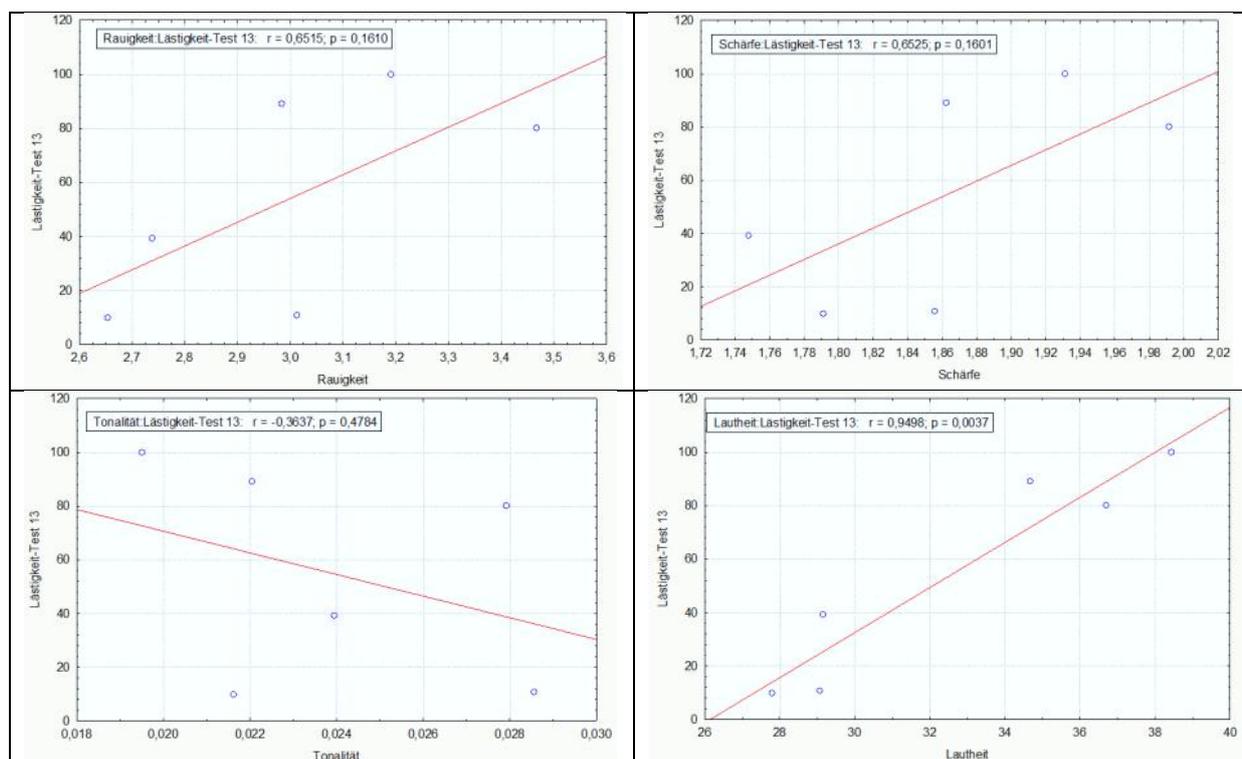


Abb. 61. Streudiagramme Lästigkeit vs. psychoakustische Parameter in Test 13

## Kapitel 8 - Vergleich der psychoakustischen Parameter und des Schalldruckpegels mit der subjektiven Wahrnehmung

Wie in den Tests zuvor besitzt die Lautheit einen sehr hohen Korrelationskoeffizienten über 0,9 und einen Signifikanzwert unter 1%. Schärfe und Rauigkeit korrelieren mit den Lästigkeitsbewertungen aus Test 13 annähernd gleich (0,65). Mit Steigerung der Tonalität ist auch hier eine schwach ausgeprägte Abnahme der Lästigkeit zu erkennen.

Auf Basis der Ergebnisse aus den 6-er-Relationen besitzt der Parameter der Lautheit die höchste Korrelation mit den Lästigkeitsbewertungen der Probanden. Die Schärfe eines Geräusches zeigt ebenfalls einen deutlich erkennbaren Einfluss auf die empfundene Lästigkeit. Die Abhängigkeit der Rauigkeit ist wesentlich geringer einzustufen und zwischen Tonalität und Lästigkeit ist kein eindeutiger Zusammenhang feststellbar.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Forschungsarbeit wird die subjektive Wahrnehmung von Fahrgeräuschen im Inneren eines Reisezugwagens durch die Fahrgäste untersucht. Dabei wird analysiert, ob Reisende während der Fahrt Streckenabschnitte mit unterschiedlicher Infrastruktur (wie verschiedenen Oberbauformen und Lärmschutzmaßnahmen) akustisch unterscheiden können und wie sie den Höreindruck eines Streckenabschnittes in Bezug auf die Lästigkeit bewerten. Damit wird der Frage nachgegangen, ob und in welchem Ausmaß der akustische Fahrkomfort durch verschiedene Elemente der Infrastruktur beeinflusst wird. Zu diesem Zweck wurden auf der Neubaustrecke Wien – St. Pölten mit einem Kunstkopfmesssystem binaurale Geräuschmessungen durchgeführt. Diese Aufzeichnungen wurden bei mehreren Fahrten im Rahmen der Innovationsmessfahrten der ÖBB Infrastruktur AG im Inneren eines Railjet Großraumwagen erstellt.

Ausgewählte Hörproben dieser Geräusche wurden anschließend Probanden im Labor gehörrichtig vorgespielt und die Lästigkeit bewertet. Durch statistische Auswertung der Bewertungsergebnisse können Rückschlüsse auf die Wahrnehmungen der Fahrgäste im jeweiligen Streckenabschnitt gezogen werden:

- Das Fahrzeuginnengeräusch in Tunnelabschnitten wird deutlich unangenehmer empfunden, als jenes von Abschnitten auf freier Strecke.
- Abschnitte auf freier Strecke mit fester Fahrbahn werden bei 200 km/h unangenehmer wahrgenommen, als Abschnitte mit klassischem Schotteroberbau. Bei höheren Geschwindigkeiten kann ein derartiger Unterschied nicht bestätigt werden. Dies erscheint plausibel, da mit zunehmender Geschwindigkeit der Anteil der aerodynamischen Geräusche an der Gesamtschallemission wächst und der Einfluss der Oberbauform in den Hintergrund tritt.
- Befindet sich ein Lärmschutzwall neben dem befahrenen Gleis (Wall beidseitig), so ist gegenüber einem Streckenabschnitt mit einseitigem Wall und annähernd freier Schallausbreitung kein Unterschied in der Wahrnehmung der Fahrzeuginnengeräusche nachweisbar.
- Beim Vergleich von einem Streckenabschnitt mit einer 4m hohen, konventionellen Lärmschutzwand und einem Abschnitt mit beidseitigem Wall, wird das Innengeräusch des Abschnittes mit der Lärmschutzwand als angenehmer empfunden.
- 1-gleisige Tunnel werden aufgrund des geringen Querschnitts und der daraus entstehenden ungünstigen Schallsituation gegenüber 2-gleisigen Tunneln akustisch als unangenehmer wahrgenommen.

## Kapitel 9 - Zusammenfassung und Ausblick

- Der Wirkung von Gleisabsorbern im Tunnel konnte durch den Vergleich von 2-gleisigen Tunnelanschnitten mit und ohne Absorber bei gleicher Geschwindigkeit untersucht werden. Es zeigte sich, dass der akustische Fahrkomfort durch den Einsatz von Gleisabsorbern positiv beeinflusst werden kann.
- Des Weiteren wurden die Schallsituationen aus dem Lainzer Tunnel und dem Wienerwaldtunnel unter Betriebsbedingungen einander gegenübergestellt. Dabei wurden die Innengeräusche im Lainzer Tunnel (1-gleisiger Abschnitt bei 160 km/h) trotz Fehlens von Gleisabsorbern und, obwohl erfasste Geräusche höhere A-bewertete Schalldruckpegel aufweisen, angenehmer wahrgenommen als im Wienerwaldtunnel (1-gleisig bei 230 km/h).
- Darüber hinaus wurde auch der 2-gleisige Abschnitt des Lainzer Tunnels (160 km/h ohne Gleisabsorber) mit dem Atzenbrugger Tunnel (230 km/h mit Gleisabsorber), welcher ebenfalls einen 2-gleisigen Querschnitt aufweist, verglichen. Da keine Wahrnehmungsunterschiede nachweisbar sind, scheint die Geschwindigkeitsdifferenz die Geräuschqualität in ähnlichem Maße zu beeinflussen, wie die Absorber.

Die Analyse der Korrelationseigenschaften zwischen den Lästigkeitsbewertungen und dem Schalldruckpegel, sowie den psychoakustischen Parametern (Lautheit, Schärfe, Rauigkeit und Tonalität) zeigt, dass die Lautheit meist mehr Aussagekraft über die Lästigkeit der Geräusche besitzt, als der A-bewertete Schalldruckpegel. Rauigkeit und Schärfe korrelieren mit den Lästigkeitsbewertungen in ähnlichem Ausmaß wie der Schalldruckpegel. Der Parameter der Tonalität lässt hingegen wenige Rückschlüsse auf die Lästigkeit von Geräuschen zu.

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf Hörversuchen unter Laborbedingungen. Bei einer Zugfahrt ist ein direkter und wiederholbarer Vergleich der akustischen Auswirkung unterschiedlicher Infrastrukturelemente im Allgemeinen nicht möglich. Darüber hinaus treten zumeist weitere Geräuschen im Fahrzeuginneren auf (Gespräche von Fahrgästen, etc.), weshalb erwähnte Wahrnehmungsunterschiede nicht immer erkennbar sein müssen. Dennoch liefert die Arbeit einen wesentlich Beitrag zur Beantwortung der Frage, welchen grundsätzlichen Einfluss verschiedene Infrastrukturelemente auf den Fahrkomfort zeigen.

Die den Auswertung zugrunde liegenden Schallsituationen wurden an einer Position im Fahrzeug und in einem Fahrzeugtyp erfasst. Zudem wurde der Fokus auf gleichbleibende Geräusche gelegt. Um vorliegende Erkenntnisse unter verschiedenen Rahmenbedingungen zu verifizieren und um den Fahrkomfort auch hinsichtlich kurzer, transienter Geräusche zu bewerten besteht weiterer Forschungsbedarf zu folgenden Themen:

## Kapitel 9 - Zusammenfassung und Ausblick

- Gibt es wahrnehmbare Unterschiede in der Geräuschqualität zwischen verschiedenen Positionen im Fahrzeug (Fenster-/Gangplatz, Abstand zum Drehgestell, fahrzeugseitige Anlagen und Betriebseinrichtungen, etc.)?
- Verändert sich der Höreindruck in verschiedenen Fahrzeugtypen mit unterschiedlichem Aufbau und Raumkonzepten (Großraum-/Abteilwagen, unterschiedliche Reisezugwagen)?
- Wie verhält sich die Wahrnehmung transienter Geräusche zum Beispiel beim Vergleich von Tunneleinfahrten und -ausfahrten, sowie von Weichen- und Brückenüberfahrten?
- Kann der Lästigkeit des Geräusches bei Tunnelein- und -ausfahrten für Fahrgäste bei durch infrastrukturseitige Maßnahmen verringert werden?

Eine angenehme und möglichst homogene Geräuschsituation während der Fahrt fördert im Allgemeinen das Wohlbefinden des Reisenden und somit die Akzeptanz des Verkehrsmittels Bahn. Aus diesem Grund erscheint es vorteilhaft, wenn zukünftig für die Bewertung der Geräuschqualität im Fahrzeuginneren ergänzend zur Bewertung mit Schalldruckpegel psychoakustische Ansätze herangezogen werden.

## 10 Quellenverzeichnis

- [1] Internationaler Eisenbahnverband (UIC): UIC Merkblatt 660 VE, 2. Ausgabe, August 2002 – Bestimmung zur Sicherung der technischen Verträglichkeit der Hochgeschwindigkeitszüge. Paris, 2002. ISBN 2-7464-0214-5.
- [2] Rechtsinformationssystem (RIS): Schienenfahrzeug-Lärmzulässigkeitsverordnung – SchLV. Wien. Online im Internet:  
<http://www.ris.bka.gv.at/Dokument.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Dokumentnummer=NOR11012551>  
(14.01.2013).
- [3] Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft: Studie sysBahnLärm. Wien. Online im Internet:  
<http://www2.ffg.at/verkehr/projekte.php?id=656&lang=de&browse=programm> (11.03.2013)
- [4] Schick, A.: Schallwirkung aus psychologischer Sicht. Verlagsgemeinschaft Klett-Cotta, Stuttgart, 1979. ISBN 3-12-927960-1.
- [5] Zwicker, E.: Psychoakustik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1982. ISBN 3-540-11401-7.
- [6] Kalivoda M., Steiner J. (Hrsg.): Taschenbuch der Angewandten Psychoakustik. Springer Verlag, Wien New York, 1998. ISBN 3-211-83131-2.
- [7] Stani, M.: Psychoakustik. Gehörbezogene Lärmbewertung. Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie unter Mitwirkung des Österreichischen Arbeitsringes für Lärmbekämpfung, Wien, 1993. ISBN 3-8169-1177-3.
- [8] Quang-Hue, V. (Hrsg.): Soundengineering. Kundenbezogene Akustikentwicklung in der Fahrzeugtechnik. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994. ISBN 3-8169-1177-3.
- [9] Genuit K.: Sound-Engineering im Automobilbereich – Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen. Springer Verlag Berlin Heidelberg 2010. ISBN 978-3-642-01414-7. e-ISBN 978-3-642-01415-4. DOI 10.1007/978-3-642-01415-4.
- [10] Head acoustics: Binaural Messen, Auswerten und Wiedergeben. Herzogenrath. Online im Internet: [http://www.head-acoustics.de/downloads/de/application\\_notes/Entzerrung\\_06\\_11d.pdf](http://www.head-acoustics.de/downloads/de/application_notes/Entzerrung_06_11d.pdf)  
(13.07.2012).
- [11] Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA): Kompendium zur Durchführung von Hörversuchen in Wissenschaft und industrieller Praxis. Berlin. Online im Internet:  
[http://www.dega-akustik.de/publikationen/Kompendium\\_Hoerversuche\\_2008.pdf](http://www.dega-akustik.de/publikationen/Kompendium_Hoerversuche_2008.pdf) (14.01.2013).

## Kapitel 10 - Quellenverzeichnis

[12] Bortz J., Döring N.: Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler. Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 2006. ISBN 3-540-33305-3.

[13] Aures W.: Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale. Ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalyse. Technische Universität München, Dissertation, 1984.

[14] Steuer F.: Rock my PC – Musikproduktion am PC in der Sozialen Arbeit. Diplomarbeit, 2008. ISBN 978-3-640-18785-0.

[15] Rüter B.: Reisegepäck im Eisenbahnverkehr. Technische Universität Wien, Dissertation, 2004.

[16] Übersichtslagepläne Teil 1-4 – Innovationsmessfahrten 2012, Einreichunterlagen (Einlagezahl 109-112) (22.05.2012).

## Anhang A. Tabelle mit Anfangs- und Endzeiten der Hörsamples

Fahrt	Mitten-km	Streckenparameter	Anfangszeit	Endzeit	Anf-km	End-km	Gleis	v min	v mittel	v max
4	2.350	10	1067,35	1070,35	2.273	2.410	9	157,0	157,6	158,0
4	4.000	10	1029,85	1032,85	3.940	4.060	9	160,0	160,0	160,0
4	5.375	10	998,85	1001,85	5.306	5.448	9	160,0	160,0	160,0
4	7.604	11	949,10	952,10	7.535	7.660	9	159,0	159,6	160,0
4	7.850	11	943,35	946,35	7.774	7.923	9	159,0	159,7	160,0
4	8.096	11	937,85	940,85	8.030	8.156	9	159,0	159,5	160,0
4	9.750	8	899,85	902,85	9.693	9.822	9	159,0	159,4	160,0
4	9.950	8	895,60	898,60	9.883	10.024	9	159,5	159,9	160,0
4	10.150	8	890,85	893,85	10.095	10.220	9	160,0	160,0	160,0
4	12.925	9	849,10	852,10	12.845	12.995	9	199,0	199,5	200,0
4	18.175	9	755,85	758,85	18.076	18.248	9	199,3	199,9	200,0
4	22.975	9	670,10	673,10	22.871	23.063	9	199,0	199,3	200,0
4	28.025	2	578,10	581,10	27.930	28.105	9	200,0	200,0	200,0
4	32.125	1	504,10	507,10	32.055	32.205	9	199,0	199,5	200,0
4	33.225	1	484,10	487,10	33.155	33.318	9	199,0	199,2	200,0
4	35.050	4	451,60	454,60	34.974	35.130	9	199,0	199,0	199,0
4	35.300	3	447,10	450,10	35.210	35.390	9	199,0	199,0	199,0
4	35.625	7	441,10	444,10	35.555	35.705	9	199,0	199,0	199,0
4	37.075	8	415,10	418,10	36.993	37.155	9	199,0	199,7	200,0
4	38.625	5	387,35	390,35	38.553	38.701	9	200,0	200,0	200,0
4	39.175	8	377,10	380,10	39.105	39.255	9	199,0	199,5	200,0
4	39.900	5	364,35	367,35	39.807	39.998	9	199,0	199,6	200,0
4	40.550	8	352,85	355,85	40.476	40.621	9	199,0	199,6	200,0
4	41.035	6	344,10	347,10	40.947	41.113	9	199,0	199,8	200,0
4	43.575	8	298,35	301,35	43.489	43.646	9	198,0	198,7	199,0
4	44.350	6	284,35	287,35	44.253	44.437	9	198,8	199,0	199,4
4	45.075	2	271,35	274,35	44.989	45.145	9	200,0	200,0	200,3
4	47.325	8	230,85	233,85	47.234	47.418	9	199,0	199,8	200,0
4	50.625	7	171,35	174,35	50.543	50.715	9	199,3	199,9	200,0
4	52.175	8	143,60	146,60	52.087	52.273	9	199,0	199,7	200,0
4	53.660	6	117,10	120,10	53.575	53.735	4	199,0	199,8	200,0
4	54.275	3	106,35	109,35	54.186	54.377	4	201,0	201,1	201,8

Tab. 58. Beispiel einer Excel-Tabelle mit Anfangs- und Endzeiten der Hörsamples (Messfahrt 4)

## Anhang B. Instruktionen für den Hörversuch

### Inhalt der Diplomarbeit

- Psychoakustische Analyse von Fahrgeräuschen im Eisenbahnwesen
- Geräusche wurden im Inneren eines Reisezugwagens aufgenommen
- Bewertung der Lästigkeit durch die Versuchspersonen um den Fahrkomfort beurteilen zu können
- Hörsamplelängen 3 Sekunden
- Stichprobengröße von 30 Personen

### Bedienung

- Im oberen Bereich der Oberfläche können durch Drücken der Buttons die versch. Geräusche angehört werden. (Manchmal ist ein zweimaliges Drücken des Buttons notwendig)
- Im unteren Bereich kann die entsprechende Bewertung abgegeben werden:

### Paarvergleich

- Entscheidung zw. 2 Hörproben (welche ist angenehmer?)

### Relation

- Relation zw. den Hörproben mit Schiebereglern einstellbar
- Ausnutzung der Skala: Angenehmste Geräusch ganz nach oben, unangenehmste Geräusch ganz nach unten, restlichen dazwischen anordnen mit Beachtung der Relation
- es muss jeder Schieberegler mindestens einmal verschoben werden
- Möglichkeit des sortierten Abspielens (vom angenehmsten bis zum unangenehmsten Sample); während dem Anhören können die Scrollbars verschoben werden, blinken aber aufgrund der Verstellung
- Es gibt 3er-, 4er- und 6er-Relationen

### Zusammenfassung

- Insgesamt gibt es 23 Tests (Fragestellungen)
- Dauer ca. 25 min. – es gibt aber keine Zeitvorgabe!
- Bei auftretenden Fragen einfach melden
- Es ist keine Prüfung, man kann nichts falsch machen!
- Es soll eine Erforschung der subjektiven Beurteilung sein, daher sollte man sich bemühen die Geräusche so gut als möglich zu beurteilen und die Relation zueinander einzuschätzen!
- Kopfhörer richtig aufsetzen (L+R)

## Anhang C. Feedback-Formular nach dem Hörversuch

Waren die Informationen die zu Beginn mitgeteilt wurden ausreichend?

- zu wenig       könnte mehr sein       genau richtig       zu viel

Haben sich die Erwartungen an den Test mit dem tatsächlichen Ablauf gedeckt?

- nein       teilweise       größtenteils       voll und ganz

Wurden Sie durch eine bestimmte Information vor dem Hörtest in Ihrer Beurteilung beeinflusst oder hätten Sie sich deshalb etwas anderes vorgestellt?

- ja       teilweise       nein

Wenn ja, welche Informationen:

Waren die Geräusche wie erwartet? (Mehrfachnennung möglich)

- ähnlicher       lauter       leiser       komplett anders       größtenteils ja

Waren die Geräuscheindrücke realistisch für eine Fahrt in einem Reisezugwagen?

- nein       teilweise       größtenteils       voll und ganz

Wie war die Bedienung und Steuerung während des Hörversuches?

- mangelhaft       könnte besser sein       zu kompliziert       genau richtig

Bemerkung:

Wie waren der Umfang und die Dauer des Tests?

- zu kurz       genau richtig       nicht länger       zu lang

Wie haben Sie den Mix von Paarvergleich, 3er-, 4er- und 6er Relationen empfunden?

- einseitig       ausgewogen

Wie würden Sie die Schwierigkeit des Tests, in Bezug auf die Unterscheidbarkeit der verschiedenen Geräusche, bewerten?

- einfach       mittel       anspruchsvoll       schwierig

Wie würden Sie die Schwierigkeit einer Relation mit 6 verschiedenen Hörsamples bewerten?

- einfach       anspruchsvoll       schwierig       zu schwierig

Hat es störende Umgebungsgeräusche oder Ablenkungen gegeben?

- ja       nein

Wenn ja, welche:

Haben Sie sich während des Versuches unwohl gefühlt?

- ja sehr       geringfügig       größtenteils nicht       überhaupt nicht

Würden Sie einen ähnlichen Versuch wieder machen?

- sicher nicht       vielleicht       eher schon       ja sicher

Sonstiges Feedback oder Bemerkungen:

## Anhang D

# Anhang D. Übersicht des Hörversuchprogramms und der verwendeten Hörsamples

Test	Formular	Hörprobe 1	Hörprobe 2
1	Paarvergleich	Hoerprobe_Para_02_v_200_km_28000_Fahrt_04__200_27930_28105.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_01_v_200_km_32100_Fahrt_04__200_32055_32205.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall li.,
2	Paarvergleich	Hoerprobe_Para_02_v_200_km_28000_Fahrt_04__200_27930_28105.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_05_v_200_km_38600_Fahrt_04__200_38553_38701.hdf FF, 200, freie Strecke, Wall beidseitig
3	Paarvergleich	Hoerprobe_Para_03_v_200_km_35300_Fahrt_04__199_35210_35390.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig, Bogen	Hoerprobe_Para_04_v_200_km_35100_Fahrt_04__199_34974_35130.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall li., LSW re., Bogen
4	Paarvergleich	Hoerprobe_Para_10_v_200_km_02300_Fahrt_04__158_02273_02410.hdf FF, 160, Tunnel 2-gl., ohne Absorber	Hoerprobe_Para_08_v_200_km_10000_Fahrt_04__160_09883_10024.hdf FF, 160, Tunnel 2-gl., mit Absorber
5	Relation4	Hoerprobe_Para_02_v_200_km_28000_Fahrt_04__200_27930_28105.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_05_v_200_km_38600_Fahrt_04__200_38553_38701.hdf FF, 200, freie Strecke, Wall beidseitig
6	Relation6	Hoerprobe_Para_01_v_200_km_32100_Fahrt_04__200_32055_32205.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall li.,	Hoerprobe_Para_08_v_200_km_37100_Fahrt_04__200_36993_37155.hdf FF, 200, Tunnel 2-gl., mit Absorber
7	Relation3	Hoerprobe_Para_04_v_200_km_35100_Fahrt_04__199_34974_35130.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall li., LSW re., Bogen	Hoerprobe_Para_09_v_200_km_18200_Fahrt_04__200_18076_18248.hdf FF, 200, Tunnel 1-gl., mit Absorber
8	Relation6	Hoerprobe_Para_02_v_230_km_28000_Fahrt_03__229_27920_28125.hdf Schotter, 230, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_02_v_250_km_28000_Fahrt_05__249_27915_28127.hdf Schotter, 250, freie Strecke, Wall beidseitig
9	Relation4	Hoerprobe_Para_10_v_200_km_02300_Fahrt_04__158_02273_02410.hdf FF, 160, Tunnel 2-gl., ohne Absorber	Hoerprobe_Para_08_v_230_km_37100_Fahrt_03__229_36979_37178.hdf FF, 230, Tunnel 2-gl., mit Absorber
10	Relation6	Hoerprobe_Para_08_v_230_km_37100_Fahrt_03__229_36979_37178.hdf FF, 230, Tunnel 2-gl., mit Absorber	Hoerprobe_Para_10_v_200_km_02300_Fahrt_04__158_02273_02410.hdf FF, 160, Tunnel 2-gl., ohne Absorber
11	Paarvergleich	Hoerprobe_Para_10_v_200_km_02400_Fahrt_02__099_02308_02398.hdf FF, 100, Tunnel 2-gl., ohne Absorber	Hoerprobe_Para_08_v_200_km_10000_Fahrt_02__098_09906_09995.hdf FF, 100, Tunnel 2-gl., mit Absorber
12	Relation4	Hoerprobe_Para_02_v_200_km_28000_Fahrt_04__200_27930_28105.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_02_v_230_km_28000_Fahrt_03__229_27920_28125.hdf Schotter, 230, freie Strecke, Wall beidseitig
13	Relation6	Hoerprobe_Para_09_v_250_km_18200_Fahrt_05__249_18065_18279.hdf FF, 250, Tunnel 1-gl., mit Absorber	Hoerprobe_Para_09_v_230_km_18200_Fahrt_03__231_18075_18270.hdf FF, 230, Tunnel 1-gl., mit Absorber
14	Paarvergleich	Hoerprobe_Para_05_v_200_km_38600_Fahrt_02__201_38553_38712.hdf FF, 200, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_02_v_200_km_28000_Fahrt_02__199_27943_28105.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig
15	Paarvergleich	Hoerprobe_Para_03_v_200_km_35300_Fahrt_02__199_35205_35385.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig, Bogen	Hoerprobe_Para_04_v_200_km_35100_Fahrt_04__199_34974_35130.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall li., LSW re., Bogen
16	Paarvergleich	Hoerprobe_Para_02_v_200_km_28000_Fahrt_02__199_27943_28105.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_01_v_200_km_33200_Fahrt_02__199_33143_33305.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall li.,
17	Relation4	Hoerprobe_Para_05_v_200_km_38600_Fahrt_02__201_38553_38712.hdf FF, 200, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_05_v_250_km_38600_Fahrt_05__250_38521_38717.hdf FF, 250, freie Strecke, Wall beidseitig
18	Relation4	Hoerprobe_Para_05_v_230_km_38600_Fahrt_03__229_38537_38724.hdf FF, 230, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_08_v_230_km_37100_Fahrt_03__229_36979_37178.hdf FF, 230, Tunnel 2-gl., mit Absorber
19	Relation4	Hoerprobe_Para_02_v_200_km_28000_Fahrt_02__199_27943_28105.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_05_v_200_km_38600_Fahrt_02__201_38553_38712.hdf FF, 200, freie Strecke, Wall beidseitig
20	Relation4	Hoerprobe_Para_10_v_200_km_02300_Fahrt_04__158_02273_02410.hdf FF, 160, Tunnel 2-gl., ohne Absorber	Hoerprobe_Para_05_v_230_km_38600_Fahrt_03__229_38537_38724.hdf FF, 230, freie Strecke, Wall beidseitig
21	Relation4	Hoerprobe_Para_08_v_250_km_37100_Fahrt_05__251_36980_37187.hdf FF, 250, Tunnel 2-gl., mit Absorber	Hoerprobe_Para_05_v_250_km_38600_Fahrt_05__250_38521_38717.hdf FF, 250, freie Strecke, Wall beidseitig
22	Paarvergleich	Hoerprobe_Para_11_v_200_km_07800_Fahrt_04__160_07774_07923.hdf FF, 160, Tunnel 1-gl., ohne Absorber	Hoerprobe_Para_09_v_230_km_18200_Fahrt_03__231_18075_18270.hdf FF, 230, Tunnel 1-gl., mit Absorber
23	Paarvergleich	Hoerprobe_Para_09_v_230_km_18200_Fahrt_03__231_18075_18270.hdf FF, 230, Tunnel 1-gl., mit Absorber	Hoerprobe_Para_11_v_200_km_07800_Fahrt_04__160_07774_07923.hdf FF, 160, Tunnel 1-gl., ohne Absorber

## Anhang D

Test	Formular	Hörprobe 3	Hörprobe 4
1	Paarvergleich		
2	Paarvergleich		
3	Paarvergleich		
4	Paarvergleich		
5	Relation4	Hoerprobe_Para_09_v_200_km_18200_Fahrt_04__200_18076_18248.hdf FF, 200, Tunnel 1-gl., mit Absorber	Hoerprobe_Para_08_v_200_km_37100_Fahrt_04__200_36993_37155.hdf FF, 200, Tunnel 2-gl., mit Absorber
6	Relation6	Hoerprobe_Para_04_v_200_km_35100_Fahrt_04__199_34974_35130.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall li., LSW re., Bogen	Hoerprobe_Para_02_v_200_km_28000_Fahrt_04__200_27930_28105.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig
7	Relation3	Hoerprobe_Para_03_v_200_km_35300_Fahrt_04__199_35210_35390.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig, Bogen	
8	Relation6	Hoerprobe_Para_08_v_200_km_37100_Fahrt_04__200_36993_37155.hdf FF, 200, Tunnel 2-gl., mit Absorber	Hoerprobe_Para_08_v_200_km_10000_Fahrt_04__160_09883_10024.hdf FF, 160, Tunnel 2-gl., mit Absorber
9	Relation4	Hoerprobe_Para_08_v_200_km_10000_Fahrt_04__160_09883_10024.hdf FF, 160, Tunnel 2-gl., mit Absorber	Hoerprobe_Para_11_v_200_km_07800_Fahrt_04__160_07774_07923.hdf FF, 160, Tunnel 1-gl., ohne Absorber
10	Relation6	Hoerprobe_Para_11_v_200_km_07800_Fahrt_04__160_07774_07923.hdf FF, 160, Tunnel 1-gl., ohne Absorber	Hoerprobe_Para_08_v_200_km_10000_Fahrt_04__160_09883_10024.hdf FF, 160, Tunnel 2-gl., mit Absorber
11	Paarvergleich		
12	Relation4	Hoerprobe_Para_02_v_250_km_28000_Fahrt_05__249_27915_28127.hdf Schotter, 250, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_05_v_200_km_38600_Fahrt_04__200_38553_38701.hdf FF, 200, freie Strecke, Wall beidseitig
13	Relation6	Hoerprobe_Para_09_v_200_km_18200_Fahrt_04__200_18076_18248.hdf FF, 200, Tunnel 1-gl., mit Absorber	Hoerprobe_Para_10_v_200_km_02300_Fahrt_04__158_02273_02410.hdf FF, 160, Tunnel 2-gl., ohne Absorber
14	Paarvergleich		
15	Paarvergleich		
16	Paarvergleich		
17	Relation4	Hoerprobe_Para_02_v_250_km_28000_Fahrt_05__249_27915_28127.hdf Schotter, 250, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_05_v_230_km_38600_Fahrt_03__229_38537_38724.hdf FF, 230, freie Strecke, Wall beidseitig
18	Relation4	Hoerprobe_Para_09_v_230_km_18200_Fahrt_03__231_18075_18270.hdf FF, 230, Tunnel 1-gl., mit Absorber	Hoerprobe_Para_02_v_230_km_28000_Fahrt_03__229_27920_28125.hdf Schotter, 230, freie Strecke, Wall beidseitig
19	Relation4	Hoerprobe_Para_03_v_200_km_35300_Fahrt_02__199_35205_35385.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig, Bogen	Hoerprobe_Para_01_v_200_km_33200_Fahrt_02__199_33143_33305.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall li.,
20	Relation4	Hoerprobe_Para_08_v_230_km_37100_Fahrt_03__229_36979_37178.hdf FF, 230, Tunnel 2-gl., mit Absorber	Hoerprobe_Para_05_v_250_km_38600_Fahrt_05__250_38521_38717.hdf FF, 250, freie Strecke, Wall beidseitig
21	Relation4	Hoerprobe_Para_09_v_250_km_18200_Fahrt_05__249_18065_18279.hdf FF, 250, Tunnel 1-gl., mit Absorber	Hoerprobe_Para_02_v_250_km_28000_Fahrt_05__249_27915_28127.hdf Schotter, 250, freie Strecke, Wall beidseitig
22	Paarvergleich		
23	Paarvergleich		

## Anhang D

Test	Formular	Hörprobe 5	Hörprobe 6
1	Paarvergleich		
2	Paarvergleich		
3	Paarvergleich		
4	Paarvergleich		
5	Relation4		
6	Relation6	Hoerprobe_Para_05_v_200_km_38600_Fahrt_04__200_38553_38701.hdf FF, 200, freie Strecke, Wall beidseitig	Hoerprobe_Para_03_v_200_km_35300_Fahrt_04__199_35210_35390.hdf Schotter, 200, freie Strecke, Wall beidseitig, Bogen
7	Relation3		
8	Relation6	Hoerprobe_Para_10_v_200_km_02400_Fahrt_02__099_02308_02398.hdf FF, 100, Tunnel 2-gl., ohne Absorber	Hoerprobe_Para_08_v_200_km_10000_Fahrt_02__098_09906_09995.hdf FF, 100, Tunnel 2-gl., mit Absorber
9	Relation4		
10	Relation6	Hoerprobe_Para_08_v_200_km_37100_Fahrt_04__200_36993_37155.hdf FF, 200, Tunnel 2-gl., mit Absorber	Hoerprobe_Para_08_v_250_km_37100_Fahrt_05__251_36980_37187.hdf FF, 250, Tunnel 2-gl., mit Absorber
11	Paarvergleich		
12	Relation4		
13	Relation6	Hoerprobe_Para_11_v_200_km_07800_Fahrt_04__160_07774_07923.hdf FF, 160, Tunnel 1-gl., ohne Absorber	Hoerprobe_Para_08_v_230_km_37100_Fahrt_03__229_36979_37178.hdf FF, 230, Tunnel 2-gl., mit Absorber
14	Paarvergleich		
15	Paarvergleich		
16	Paarvergleich		
17	Relation4		
18	Relation4		
19	Relation4		
20	Relation4		
21	Relation4		
22	Paarvergleich		
23	Paarvergleich		

## Anhang E

### Anhang E. Bewertungsdaten und -differenzen der Relationen

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4		Diff Tun-fS	Diff 1-2	Diff 3-4
1	9,0	0,0	100,0	91,0		82,0	-9,0	9,0
2	0,0	18,0	100,0	76,0		58,0	18,0	24,0
3	0,0	8,0	100,0	90,0		82,0	8,0	10,0
4	30,0	0,0	100,0	92,0		62,0	-30,0	8,0
5	0,0	10,0	100,0	90,0		80,0	10,0	10,0
6	14,0	0,0	100,0	88,0		74,0	-14,0	12,0
7	9,0	0,0	100,0	80,0		71,0	-9,0	20,0
8	0,0	54,0	100,0	84,0		30,0	54,0	16,0
9	0,0	14,0	100,0	70,0		56,0	14,0	30,0
10	0,0	7,8	100,0	76,7		68,9	7,8	23,3
11	0,0	8,0	100,0	81,0		73,0	8,0	19,0
12	18,0	0,0	100,0	81,0		63,0	-18,0	19,0
13	8,0	0,0	100,0	92,0		84,0	-8,0	8,0
14	0,0	11,0	100,0	84,0		73,0	11,0	16,0
15	0,0	30,0	100,0	81,0		51,0	30,0	19,0
16	0,0	9,0	100,0	91,0		82,0	9,0	9,0
17	0,0	9,0	100,0	90,0		81,0	9,0	10,0
18	8,5	0,0	100,0	90,1		81,7	-8,5	9,9
19	0,0	18,5	100,0	98,9		80,4	18,5	1,1
20	0,0	2,0	100,0	97,0		95,0	2,0	3,0
21	0,0	97,0	100,0	98,0		1,0	97,0	2,0
22	8,0	0,0	100,0	85,0		77,0	-8,0	15,0
23	0,0	11,0	100,0	68,0		57,0	11,0	32,0
24	0,0	17,0	100,0	93,0		76,0	17,0	7,0
25	9,9	0,0	100,0	80,2		70,3	-9,9	19,8
26	0,0	9,0	100,0	91,0		82,0	9,0	9,0
27	0,0	12,3	100,0	87,7		75,3	12,3	12,3
28	0,0	20,0	100,0	91,0		71,0	20,0	9,0
29	0,0	20,0	100,0	81,0		61,0	20,0	19,0
30	0,0	22,9	100,0	54,2		31,3	22,9	45,8
31	0,0	11,0	100,0	68,1		57,1	11,0	31,9
32	0,0	29,0	100,0	80,0		51,0	29,0	20,0
33	0,0	11,2	80,9	100,0		69,7	11,2	-19,1
34	0,0	2,0	100,0	96,0		94,0	2,0	4,0
35	18,0	0,0	100,0	88,0		70,0	-18,0	12,0
36	0,0	3,3	100,0	91,2		87,9	3,3	8,8
<b>Median</b>	<b>0,0</b>	<b>9,0</b>	<b>100,0</b>	<b>88,0</b>	<b>Median</b>	<b>72,0</b>	<b>9,0</b>	<b>12,0</b>
<b>Standardabw.</b>	<b>7,0</b>	<b>18,3</b>	<b>3,2</b>	<b>9,8</b>	<b>Summe</b>	<b>2460</b>	<b>333</b>	<b>505</b>

Tab. 59. Bewertungsdaten und -differenzen des Test 5

## Anhang E

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6		Diff 5-4	Diff 4-1	Diff 6-3	Diff 6-4	Diff 5-6
1	19,0	100,0	13,0	9,0	30,0	0,0		21,0	-10	-13	-9	30
2	0,0	100,0	19,0	20,0	77,0	63,0		57,0	20	44	43	14
3	40,0	100,0	18,0	28,0	9,0	0,0		-19,0	-12	-18	-28	9
4	44,0	100,0	0,0	26,0	71,0	20,0		45,0	-18	20	-6	51
5	0,0	100,0	0,0	0,0	80,6	28,6		80,6	0	29	29	52
6	18,0	100,0	0,0	25,0	49,0	27,0		24,0	7	27	2	22
7	9,0	100,0	0,0	9,0	62,0	50,0		53,0	0	50	41	12
8	4,0	100,0	2,0	0,0	69,0	54,0		69,0	-4	52	54	15
9	0,0	100,0	0,0	0,0	19,0	0,0		19,0	0	0	0	19
10	19,6	100,0	39,1	56,5	3,3	0,0		-53,3	37	-39	-57	3
11	2,0	100,0	0,0	7,0	45,0	24,0		38,0	5	24	17	21
12	0,0	100,0	19,0	20,0	66,0	65,0		46,0	20	46	45	1
13	21,0	100,0	0,0	4,0	27,0	37,0		23,0	-17	37	33	-10
14	28,6	100,0	0,0	8,2	39,8	34,7		31,6	-20	35	27	5
15	31,9	100,0	0,0	9,9	42,9	7,7		33,0	-22	8	-2	35
16	7,0	100,0	0,0	9,0	91,0	81,0		82,0	2	81	72	10
17	3,0	100,0	0,0	0,0	17,0	38,0		17,0	-3	38	38	-21
18	1,7	100,0	1,7	1,7	12,1	0,0		10,3	0	-2	-2	12
19	5,6	100,0	0,0	92,1	82,0	68,5		-10,1	87	69	-24	13
20	2,0	100,0	0,0	3,0	94,0	86,0		91,0	1	86	83	8
21	2,0	100,0	0,0	1,0	98,0	96,0		97,0	-1	96	95	2
22	46,0	100,0	25,0	0,0	78,0	13,0		78,0	-46	-12	13	65
23	3,0	100,0	16,0	12,0	68,0	0,0		56,0	9	-16	-12	68
24	0,0	100,0	1,0	14,1	92,9	89,9		78,8	14	89	76	3
25	41,9	100,0	0,0	9,7	29,0	19,4		19,4	-32	19	10	10
26	0,0	100,0	20,0	8,0	61,0	70,0		53,0	8	50	62	-9
27	36,1	100,0	0,0	26,5	12,0	13,3		-14,5	-10	13	-13	-1
28	0,0	100,0	4,6	16,1	33,3	46,0		17,2	16	41	30	-13
29	9,0	100,0	0,0	6,0	79,0	29,0		73,0	-3	29	23	50
30	19,7	100,0	0,0	31,0	50,7	62,0		19,7	11	62	31	-11
31	0,0	100,0	0,0	6,2	59,8	61,9		53,6	6	62	56	-2
32	4,8	100,0	0,0	9,6	68,7	16,9		59,0	5	17	7	52
33	16,9	100,0	6,7	0,0	27,0	38,2		27,0	-17	31	38	-11
34	17,0	100,0	0,0	1,0	30,0	5,0		29,0	-16	5	4	25
35	10,0	100,0	0,0	37,0	29,0	62,0		-8,0	27	62	25	-33
36	0,0	100,0	1,1	5,7	22,7	15,9		17,0	6	15	10	7
<b>Median</b>	<b>6,3</b>	<b>100,0</b>	<b>0,0</b>	<b>9,0</b>	<b>49,9</b>	<b>31,8</b>	<b>Median</b>	<b>32,3</b>	<b>0,0</b>	<b>30,2</b>	<b>24,0</b>	<b>9,8</b>
<b>St.abw.</b>	<b>14,6</b>	<b>0,0</b>	<b>9,5</b>	<b>18,3</b>	<b>27,7</b>	<b>29,1</b>	<b>Summe</b>	<b>1313</b>	<b>50</b>	<b>1136</b>	<b>810</b>	<b>503</b>

Tab. 60. Bewertungsdaten und –differenzen des Test 6

## Anhang E

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3		Diff 3-1
1	0,0	100,0	19,0		19,0
2	7,0	100,0	0,0		-7,0
3	19,0	100,0	0,0		-19,0
4	0,0	100,0	24,0		24,0
5	0,0	100,0	0,0		0,0
6	0,0	100,0	9,0		9,0
7	0,0	100,0	19,0		19,0
8	0,0	100,0	47,0		47,0
9	0,0	100,0	9,0		9,0
10	0,0	100,0	2,0		2,0
11	0,0	100,0	13,0		13,0
12	0,0	100,0	50,0		50,0
13	11,0	100,0	0,0		-11,0
14	0,0	100,0	27,1		27,1
15	0,0	100,0	22,0		22,0
16	0,0	100,0	40,0		40,0
17	0,0	100,0	3,0		3,0
18	3,1	100,0	0,0		-3,1
19	0,0	100,0	24,4		24,4
20	7,1	100,0	0,0		-7,1
21	0,0	100,0	3,0		3,0
22	49,0	100,0	0,0		-49,0
23	0,0	100,0	7,0		7,0
24	0,0	100,0	47,0		47,0
25	0,0	100,0	11,0		11,0
26	0,0	100,0	30,0		30,0
27	0,0	100,0	15,5		15,5
28	0,0	100,0	10,0		10,0
29	0,0	100,0	20,0		20,0
30	0,0	100,0	2,6		2,6
31	5,6	100,0	0,0		-5,6
32	0,0	100,0	16,5		16,5
33	0,0	100,0	50,6		50,6
34	0,0	100,0	4,0		4,0
35	0,0	100,0	46,0		46,0
36	8,7	100,0	0,0		-8,7
<b>Median</b>	<b>0,0</b>	<b>100,0</b>	<b>10,5</b>	<b>Median</b>	<b>10,5</b>
<b>St.abw.</b>	<b>8,9</b>	<b>0,0</b>	<b>16,6</b>	<b>Summe</b>	<b>461</b>

Tab. 61. Bewertungsdaten und –differenzen des Test 7

## Anhang E

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6		Diff 3-2	Diff 4-2	Diff 4-1	Diff 5-6	Diff 1-5
1	40,0	59,0	100,0	70,0	0,0	0,0		41,0	11,0	30,0	0	40
2	34,0	90,0	100,0	68,0	9,0	0,0		10,0	-22,0	34,0	9	25
3	30,0	41,0	100,0	91,0	20,0	0,0		59,0	50,0	61,0	20	10
4	77,0	61,0	100,0	81,0	21,0	0,0		39,0	20,0	4,0	21	56
5	80,4	90,7	100,0	85,6	5,2	0,0		9,3	-5,2	5,2	5	75
6	25,0	51,0	100,0	70,0	18,0	0,0		49,0	19,0	45,0	18	7
7	19,0	42,0	100,0	71,0	9,0	0,0		58,0	29,0	52,0	9	10
8	26,0	87,0	100,0	57,0	4,0	0,0		13,0	-30,0	31,0	4	22
9	28,6	57,1	100,0	40,0	11,4	0,0		42,9	-17,1	11,4	11	17
10	9,5	12,6	89,5	100,0	3,2	0,0		76,8	87,4	90,5	3	6
11	47,0	55,0	100,0	75,0	15,0	0,0		45,0	20,0	28,0	15	32
12	76,0	85,0	100,0	41,0	10,0	0,0		15,0	-44,0	-35,0	10	66
13	51,0	75,0	100,0	69,0	19,0	0,0		25,0	-6,0	18,0	19	32
14	10,2	28,6	100,0	83,7	20,4	0,0		71,4	55,1	73,5	20	-10
15	27,2	64,2	100,0	50,6	12,3	0,0		35,8	-13,6	23,5	12	15
16	100,0	100,0	76,9	78,0	20,9	0,0		-23,1	-22,0	-22,0	21	79
17	39,0	41,0	100,0	80,0	4,0	0,0		59,0	39,0	41,0	4	35
18	8,0	20,0	100,0	88,0	4,0	0,0		80,0	68,0	80,0	4	4
19	57,5	100,0	98,6	98,6	0,0	0,0		-1,4	-1,4	41,1	0	58
20	89,0	96,0	100,0	12,0	6,0	0,0		4,0	-84,0	-77,0	6	83
21	98,0	99,0	100,0	97,0	0,0	1,0		1,0	-2,0	-1,0	-1	98
22	71,0	86,0	100,0	71,0	8,0	0,0		14,0	-15,0	0,0	8	63
23	14,0	19,0	100,0	90,0	4,0	0,0		81,0	71,0	76,0	4	10
24	57,8	62,7	100,0	81,9	12,0	0,0		37,3	19,3	24,1	12	46
25	42,9	67,0	100,0	76,9	9,9	0,0		33,0	9,9	34,1	10	33
26	40,4	60,6	97,0	100,0	30,3	0,0		36,4	39,4	59,6	30	10
27	38,1	82,1	100,0	98,8	11,9	0,0		17,9	16,7	60,7	12	26
28	79,0	72,0	100,0	62,0	39,0	0,0		28,0	-10,0	-17,0	39	40
29	60,0	71,0	100,0	84,0	20,0	0,0		29,0	13,0	24,0	20	40
30	33,3	69,0	100,0	47,6	21,4	0,0		31,0	-21,4	14,3	21	12
31	33,0	67,0	100,0	70,3	0,0	0,0		33,0	3,3	37,4	0	33
32	50,0	100,0	91,4	56,9	8,6	0,0		-8,6	-43,1	6,9	9	41
33	54,0	87,0	100,0	70,0	8,0	0,0		13,0	-17,0	16,0	8	46
34	72,0	86,0	100,0	97,0	22,0	0,0		14,0	11,0	25,0	22	50
35	54,0	73,0	100,0	89,0	7,0	0,0		27,0	16,0	35,0	7	47
36	0,0	19,6	70,6	88,2	100,0	64,7		51,0	68,6	88,2	35	-100
Median	41,6	68,0	100,0	77,5	9,9	0,0	Median	32,0	10,4	29,0	9,9	33,0
St.abw.	26,1	25,2	6,4	19,6	17,2	10,8	Summe	1147	313	1018	449	1157

Tab. 62. Bewertungsdaten und -differenzen des Test 8

## Anhang E

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4		Diff 1-3	Diff 2-1	Diff 4-1	Diff 4-2
1	71,0	39,0	0,0	100,0		71,0	-32,0	29,0	61,0
2	30,0	90,0	0,0	100,0		30,0	60,0	70,0	10,0
3	90,1	56,0	0,0	100,0		90,1	-34,1	9,9	44,0
4	62,6	79,1	0,0	100,0		62,6	16,5	37,4	20,9
5	84,4	95,8	0,0	100,0		84,4	11,5	15,6	4,2
6	80,0	45,0	0,0	100,0		80,0	-35,0	20,0	55,0
7	44,0	79,0	0,0	100,0		44,0	35,0	56,0	21,0
8	65,0	86,0	0,0	100,0		65,0	21,0	35,0	14,0
9	37,0	49,0	0,0	100,0		37,0	12,0	63,0	51,0
10	16,2	54,5	0,0	100,0		16,2	38,4	83,8	45,5
11	65,0	43,0	0,0	100,0		65,0	-22,0	35,0	57,0
12	29,0	90,0	0,0	100,0		29,0	61,0	71,0	10,0
13	100,0	92,4	0,0	100,0		100,0	-7,6	0,0	7,6
14	76,5	23,5	0,0	100,0		76,5	-53,1	23,5	76,5
15	26,8	75,6	0,0	100,0		26,8	48,8	73,2	24,4
16	92,0	100,0	0,0	99,0		92,0	8,0	7,0	-1,0
17	34,0	58,0	0,0	100,0		34,0	24,0	66,0	42,0
18	81,7	92,7	0,0	100,0		81,7	11,0	18,3	7,3
19	84,7	100,0	0,0	100,0		84,7	15,3	15,3	0,0
20	4,0	98,0	0,0	100,0		4,0	94,0	96,0	2,0
21	98,0	99,0	0,0	100,0		98,0	1,0	2,0	1,0
22	73,0	68,0	0,0	100,0		73,0	-5,0	27,0	32,0
23	24,0	33,0	0,0	100,0		24,0	9,0	76,0	67,0
24	74,6	94,9	0,0	100,0		74,6	20,3	25,4	5,1
25	1,7	67,2	0,0	100,0		1,7	65,5	98,3	32,8
26	79,0	100,0	0,0	92,0		79,0	21,0	13,0	-8,0
27	85,0	95,0	0,0	100,0		85,0	10,0	15,0	5,0
28	42,0	63,0	0,0	100,0		42,0	21,0	58,0	37,0
29	72,0	91,0	0,0	100,0		72,0	19,0	28,0	9,0
30	30,6	71,4	0,0	100,0		30,6	40,8	69,4	28,6
31	36,0	65,0	0,0	100,0		36,0	29,0	64,0	35,0
32	43,2	100,0	0,0	81,5		43,2	56,8	38,3	-18,5
33	100,0	80,0	0,0	100,0		100,0	-20,0	0,0	20,0
34	90,2	73,2	0,0	100,0		90,2	-17,1	9,8	26,8
35	42,0	100,0	0,0	85,0		42,0	58,0	43,0	-15,0
36	43,2	20,5	0,0	100,0		43,2	-22,7	56,8	79,5
<b>Median</b>	<b>65,0</b>	<b>79,1</b>	<b>0,0</b>	<b>100,0</b>	<b>Median</b>	<b>65,0</b>	<b>15,9</b>	<b>35,0</b>	<b>20,9</b>
<b>St.abw.</b>	<b>28,4</b>	<b>23,7</b>	<b>0,0</b>	<b>4,1</b>	<b>Summe</b>	<b>2109</b>	<b>559</b>	<b>1449</b>	<b>890</b>

Tab. 63. Bewertungsdaten und -differenzen des Test 9

## Anhang E

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6		Diff 2-4	Diff 1-2	Diff 3-2	Diff 3-1
1	60,0	71,0	100,0	0,0	19,0	92,0		71,0	-11,0	29,0	40,0
2	84,0	55,0	70,0	0,0	12,0	100,0		55,0	29,0	15,0	-14,0
3	56,0	91,0	100,0	0,0	21,0	79,0		91,0	-35,0	9,0	44,0
4	45,0	32,0	100,0	0,0	22,0	68,0		32,0	13,0	68,0	55,0
5	85,4	68,8	92,7	0,0	58,3	100,0		68,8	16,7	24,0	7,3
6	31,0	48,0	100,0	0,0	18,0	93,0		48,0	-17,0	52,0	69,0
7	53,3	33,3	70,0	0,0	30,0	100,0		33,3	20,0	36,7	16,7
8	41,0	46,0	82,0	0,0	6,0	100,0		46,0	-5,0	36,0	41,0
9	20,0	39,0	100,0	0,0	20,0	100,0		39,0	-19,0	61,0	80,0
10	5,1	57,6	88,9	0,0	3,0	100,0		57,6	-52,5	31,3	83,8
11	33,0	44,0	100,0	0,0	14,0	76,0		44,0	-11,0	56,0	67,0
12	71,0	19,0	60,0	0,0	39,0	100,0		19,0	52,0	41,0	-11,0
13	37,6	62,4	96,8	0,0	36,6	100,0		62,4	-24,7	34,4	59,1
14	33,0	70,1	85,6	0,0	13,4	100,0		70,1	-37,1	15,5	52,6
15	29,6	71,8	85,9	0,0	14,1	100,0		71,8	-42,3	14,1	56,3
16	100,0	69,0	81,0	0,0	69,0	91,0		69,0	31,0	12,0	-19,0
17	58,0	41,0	100,0	0,0	19,0	79,0		41,0	17,0	59,0	42,0
18	70,8	50,0	84,7	0,0	5,6	100,0		50,0	20,8	34,7	13,9
19	35,6	91,1	97,8	0,0	71,1	100,0		91,1	-55,6	6,7	62,2
20	92,7	6,3	100,0	0,0	3,1	100,0		6,3	86,5	93,8	7,3
21	99,0	98,0	100,0	0,0	2,0	99,0		98,0	1,0	2,0	1,0
22	76,0	72,0	100,0	0,0	67,0	91,0		72,0	4,0	28,0	24,0
23	55,0	44,0	100,0	0,0	18,0	73,0		44,0	11,0	56,0	45,0
24	84,3	57,3	100,0	0,0	38,2	89,9		57,3	27,0	42,7	15,7
25	62,0	40,0	100,0	0,0	9,0	69,0		40,0	22,0	60,0	38,0
26	71,0	30,0	91,0	0,0	71,0	100,0		30,0	41,0	61,0	20,0
27	64,4	50,8	100,0	0,0	32,2	100,0		50,8	13,6	49,2	35,6
28	67,0	48,0	100,0	0,0	13,0	89,0		48,0	19,0	52,0	33,0
29	82,0	72,0	91,0	0,0	20,0	100,0		72,0	10,0	19,0	9,0
30	61,8	14,5	100,0	0,0	12,7	89,1		14,5	47,3	85,5	38,2
31	65,0	35,0	81,0	0,0	15,0	100,0		35,0	30,0	46,0	16,0
32	83,8	43,8	91,3	0,0	23,8	100,0		43,8	40,0	47,5	7,5
33	83,1	59,2	45,1	0,0	77,5	100,0		59,2	23,9	-14,1	-38,0
34	97,0	78,0	100,0	0,0	5,0	95,0		78,0	19,0	22,0	3,0
35	98,0	40,0	75,0	0,0	22,0	100,0		40,0	58,0	35,0	-23,0
36	36,9	61,5	100,0	0,0	20,0	66,2		61,5	-24,6	38,5	63,1
<b>Median</b>	<b>63,2</b>	<b>50,4</b>	<b>98,9</b>	<b>0,0</b>	<b>19,5</b>	<b>100,0</b>	<b>Median</b>	<b>50,4</b>	<b>15,1</b>	<b>36,3</b>	<b>34,3</b>
<b>St.abw.</b>	<b>24,6</b>	<b>21,1</b>	<b>13,2</b>	<b>0,0</b>	<b>21,7</b>	<b>10,8</b>	<b>Summe</b>	<b>1910</b>	<b>318</b>	<b>1359</b>	<b>1041</b>

Tab. 64. Bewertungsdaten und -differenzen des Test 10

## Anhang E

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4		Diff 4-1	Diff 2-4
1	0,0	60,0	100,0	19,0		19,0	41,0
2	29,0	72,0	100,0	0,0		-29,0	72,0
3	0,0	70,0	100,0	20,0		20,0	50,0
4	0,0	20,9	67,0	100,0		100,0	-79,1
5	0,0	95,9	100,0	71,1		71,1	24,7
6	0,0	78,0	100,0	27,0		27,0	51,0
7	0,0	71,0	100,0	18,0		18,0	53,0
8	0,0	36,0	100,0	15,0		15,0	21,0
9	0,0	60,0	100,0	20,0		20,0	40,0
10	25,0	12,5	100,0	0,0		-25,0	12,5
11	0,0	64,0	100,0	24,0		24,0	40,0
12	0,0	60,0	100,0	19,0		19,0	41,0
13	0,0	52,4	100,0	33,3		33,3	19,0
14	0,0	70,0	100,0	28,0		28,0	42,0
15	0,0	83,9	100,0	16,1		16,1	67,7
16	0,0	68,5	100,0	23,9		23,9	44,6
17	0,0	77,0	100,0	6,0		6,0	71,0
18	0,0	76,5	100,0	3,9		3,9	72,5
19	0,0	98,7	100,0	21,5		21,5	77,2
20	0,0	85,6	95,9	100,0		100,0	-14,4
21	0,0	98,0	100,0	2,0		2,0	96,0
22	0,0	60,0	100,0	37,0		37,0	23,0
23	0,0	61,0	100,0	17,0		17,0	44,0
24	0,0	49,0	91,8	100,0		100,0	-51,0
25	39,0	93,0	100,0	0,0		-39,0	93,0
26	0,0	79,0	100,0	20,0		20,0	59,0
27	19,4	66,1	100,0	0,0		-19,4	66,1
28	20,0	54,0	100,0	0,0		-20,0	54,0
29	0,0	30,0	100,0	9,0		9,0	21,0
30	0,0	68,1	100,0	19,1		19,1	48,9
31	0,0	76,0	100,0	34,0		34,0	42,0
32	0,0	70,4	100,0	32,4		32,4	38,0
33	33,0	66,0	100,0	0,0		-33,0	66,0
34	0,0	25,0	100,0	4,0		4,0	21,0
35	0,0	78,0	100,0	17,0		17,0	61,0
36	10,3	66,7	100,0	0,0		-10,3	66,7
<b>Median</b>	<b>0,0</b>	<b>68,3</b>	<b>100,0</b>	<b>19,0</b>	<b>Median</b>	<b>19,0</b>	<b>44,3</b>
<b>St.abw.</b>	<b>10,8</b>	<b>20,6</b>	<b>5,6</b>	<b>27,4</b>	<b>Summe</b>	<b>682</b>	<b>1496</b>

Tab. 65. Bewertungsdaten und -differenzen des Test 12

## Anhang E

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4	Sample 5	Sample 6		Diff 6-4	Diff 5-4	Diff 5-6	Diff 2-5
1	100,0	100,0	54,0	79,0	92,0	0,0		-79,0	13,0	92,0	8,0
2	100,0	91,0	68,0	0,0	59,0	26,0		26,0	59,0	33,0	32,0
3	60,0	70,0	30,0	80,0	100,0	0,0		-80,0	20,0	100,0	-30,0
4	100,0	75,0	0,0	40,0	81,0	20,0		-20,0	41,0	61,0	-6,0
5	100,0	82,1	39,3	0,0	89,3	35,7		35,7	89,3	53,6	-7,1
6	100,0	89,0	0,0	44,0	85,0	21,0		-23,0	41,0	64,0	4,0
7	100,0	97,0	61,0	0,0	71,0	20,0		20,0	71,0	51,0	26,0
8	100,0	90,0	46,0	14,0	31,0	0,0		-14,0	17,0	31,0	59,0
9	100,0	86,0	28,0	18,0	79,0	0,0		-18,0	61,0	79,0	7,0
10	100,0	90,7	40,2	6,2	38,1	0,0		-6,2	32,0	38,1	52,6
11	100,0	67,0	25,0	33,0	56,0	0,0		-33,0	23,0	56,0	11,0
12	100,0	90,0	40,0	0,0	60,0	60,0		60,0	60,0	0,0	30,0
13	100,0	85,7	72,9	61,4	100,0	0,0		-61,4	38,6	100,0	-14,3
14	85,9	67,7	40,4	20,2	100,0	0,0		-20,2	79,8	100,0	-32,3
15	100,0	71,8	29,6	15,5	57,7	0,0		-15,5	42,3	57,7	14,1
16	100,0	77,5	47,5	47,5	0,0	50,0		2,5	-47,5	-50,0	77,5
17	100,0	79,0	7,0	0,0	91,0	16,0		16,0	91,0	75,0	-12,0
18	96,6	79,3	37,9	0,0	100,0	58,6		58,6	100,0	41,4	-20,7
19	100,0	100,0	96,6	0,0	100,0	1,7		1,7	100,0	98,3	0,0
20	100,0	97,0	12,0	0,0	15,0	3,0		3,0	15,0	12,0	82,0
21	100,0	99,0	96,0	2,0	98,0	0,0		-2,0	96,0	98,0	1,0
22	100,0	92,0	0,0	30,0	60,0	27,0		-3,0	30,0	33,0	32,0
23	79,0	75,0	61,0	55,0	100,0	0,0		-55,0	45,0	100,0	-25,0
24	100,0	89,0	31,0	0,0	63,0	45,0		45,0	63,0	18,0	26,0
25	100,0	91,0	61,0	0,0	94,0	82,0		82,0	94,0	12,0	-3,0
26	100,0	90,0	41,0	0,0	60,0	21,0		21,0	60,0	39,0	30,0
27	100,0	69,0	0,0	6,9	89,7	48,3		41,4	82,8	41,4	-20,7
28	100,0	82,0	37,0	28,0	75,0	0,0		-28,0	47,0	75,0	7,0
29	100,0	92,0	39,0	0,0	69,0	19,0		19,0	69,0	50,0	23,0
30	100,0	92,9	71,4	19,0	92,9	0,0		-19,0	73,8	92,9	0,0
31	100,0	84,0	30,0	0,0	72,0	33,0		33,0	72,0	39,0	12,0
32	100,0	76,7	0,0	0,0	46,7	3,3		3,3	46,7	43,3	30,0
33	100,0	100,0	43,2	50,0	100,0	0,0		-50,0	50,0	100,0	0,0
34	74,0	100,0	32,0	56,0	94,0	0,0		-56,0	38,0	94,0	6,0
35	88,0	100,0	46,0	0,0	29,0	70,0		70,0	29,0	-41,0	71,0
36	75,0	84,4	0,0	40,6	100,0	18,8		-21,9	59,4	81,3	-15,6
<b>Median</b>	<b>100,0</b>	<b>89,0</b>	<b>39,1</b>	<b>10,4</b>	<b>80,0</b>	<b>9,7</b>	<b>Median</b>	<b>-2,5</b>	<b>54,5</b>	<b>54,8</b>	<b>7,0</b>
<b>St.abw.</b>	<b>9,5</b>	<b>10,2</b>	<b>25,6</b>	<b>24,7</b>	<b>26,6</b>	<b>23,4</b>	<b>Summe</b>	<b>-67</b>	<b>1902</b>	<b>1969</b>	<b>454</b>

Tab. 66. Bewertungsdaten und -differenzen des Test 13

## Anhang E

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4		Diff 3-2
1	0,0	60,0	100,0	19,0		40,0
2	0,0	74,0	100,0	40,0		26,0
3	0,0	40,0	100,0	58,0		60,0
4	0,0	100,0	30,0	100,0		-70,0
5	0,0	93,4	100,0	89,0		6,6
6	0,0	59,0	100,0	32,0		41,0
7	0,0	76,0	100,0	58,0		24,0
8	0,0	70,0	100,0	30,0		30,0
9	0,0	59,0	100,0	29,0		41,0
10	14,6	87,5	100,0	0,0		12,5
11	0,0	65,0	100,0	55,0		35,0
12	0,0	100,0	70,0	90,0		-30,0
13	0,0	100,0	55,6	27,8		-44,4
14	0,0	77,0	100,0	28,0		23,0
15	0,0	42,3	100,0	12,7		57,7
16	0,0	63,8	100,0	51,3		36,3
17	0,0	68,0	100,0	17,0		32,0
18	0,0	30,6	100,0	22,2		69,4
19	25,6	100,0	100,0	0,0		0,0
20	0,0	97,0	100,0	6,0		3,0
21	0,0	98,0	100,0	2,0		2,0
22	0,0	63,0	100,0	34,0		37,0
23	0,0	28,0	100,0	21,0		72,0
24	0,0	69,0	22,0	100,0		-47,0
25	0,0	82,0	100,0	58,0		18,0
26	0,0	20,0	100,0	28,0		80,0
27	0,0	57,1	100,0	47,1		42,9
28	0,0	45,0	100,0	45,0		55,0
29	0,0	82,0	100,0	30,0		18,0
30	53,3	100,0	70,0	0,0		-30,0
31	0,0	82,0	100,0	26,0		18,0
32	0,0	93,8	100,0	50,8		6,2
33	0,0	89,8	100,0	81,4		10,2
34	0,0	69,0	100,0	19,0		31,0
35	0,0	43,0	76,0	100,0		33,0
36	0,0	93,0	100,0	20,9		7,0
<b>Median</b>	<b>0,0</b>	<b>72,0</b>	<b>100,0</b>	<b>30,0</b>	<b>Median</b>	<b>25,0</b>
<b>St.abw.</b>	<b>10,0</b>	<b>22,8</b>	<b>19,4</b>	<b>29,6</b>	<b>Summe</b>	<b>746</b>

Tab. 67. Bewertungsdaten und -differenzen des Test 17

## Anhang E

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4		Diff 4-1	Diff 3-2
1	0,0	91,0	100,0	19,0		19,0	9,0
2	32,0	80,0	100,0	0,0		-32,0	20,0
3	0,0	91,0	100,0	19,0		19,0	9,0
4	24,0	72,0	100,0	0,0		-24,0	28,0
5	0,0	95,0	100,0	9,0		9,0	5,0
6	0,0	70,0	100,0	29,0		29,0	30,0
7	0,0	78,0	100,0	46,0		46,0	22,0
8	10,0	62,0	100,0	0,0		-10,0	38,0
9	0,0	82,0	100,0	19,0		19,0	18,0
10	0,0	85,6	100,0	12,4		12,4	14,4
11	0,0	65,0	100,0	32,0		32,0	35,0
12	41,0	90,0	100,0	0,0		-41,0	10,0
13	0,0	95,5	100,0	6,7		6,7	4,5
14	0,0	70,0	100,0	28,0		28,0	30,0
15	0,0	77,8	100,0	10,0		10,0	22,2
16	0,0	71,0	100,0	29,0		29,0	29,0
17	0,0	93,0	100,0	12,0		12,0	7,0
18	0,0	82,0	100,0	14,8		14,8	18,0
19	79,8	93,3	100,0	0,0		-79,8	6,7
20	2,0	96,0	100,0	0,0		-2,0	4,0
21	1,0	99,0	100,0	0,0		-1,0	1,0
22	0,0	79,0	100,0	10,0		10,0	21,0
23	14,0	75,0	100,0	0,0		-14,0	25,0
24	24,0	68,0	100,0	0,0		-24,0	32,0
25	0,0	91,0	100,0	30,0		30,0	9,0
26	0,0	82,0	100,0	19,0		19,0	18,0
27	20,3	94,2	100,0	0,0		-20,3	5,8
28	0,0	77,0	100,0	14,0		14,0	23,0
29	0,0	81,0	100,0	9,0		9,0	19,0
30	48,3	100,0	100,0	0,0		-48,3	0,0
31	0,0	72,0	100,0	30,0		30,0	28,0
32	6,8	75,3	100,0	0,0		-6,8	24,7
33	56,0	90,5	100,0	0,0		-56,0	9,5
34	0,0	71,0	100,0	24,0		24,0	29,0
35	28,0	100,0	94,0	0,0		-28,0	-6,0
36	5,2	76,6	100,0	0,0		-5,2	23,4
<b>Median</b>	<b>0,0</b>	<b>81,5</b>	<b>100,0</b>	<b>9,5</b>	<b>Median</b>	<b>9,5</b>	<b>18,5</b>
<b>St.abw.</b>	<b>19,3</b>	<b>10,8</b>	<b>1,0</b>	<b>12,6</b>	<b>Summe</b>	<b>29</b>	<b>622</b>

Tab. 68. Bewertungsdaten und -differenzen des Test 18

## Anhang E

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4		Diff 2-1	Diff 1-4	Diff 3-1	Diff 2-3
1	9,0	100,0	0,0	9,0		91,0	0,0	-9,0	100,0
2	0,0	100,0	40,0	46,0		100,0	-46,0	40,0	60,0
3	30,0	100,0	0,0	39,0		70,0	-9,0	-30,0	100,0
4	0,0	100,0	75,6	28,9		100,0	-28,9	75,6	24,4
5	9,0	100,0	21,0	0,0		91,0	9,0	12,0	79,0
6	0,0	100,0	50,0	21,0		100,0	-21,0	50,0	50,0
7	0,0	4,9	100,0	24,4		4,9	-24,4	100,0	-95,1
8	0,0	100,0	25,0	0,0		100,0	0,0	25,0	75,0
9	0,0	100,0	49,2	10,2		100,0	-10,2	49,2	50,8
10	1,4	100,0	38,9	0,0		98,6	1,4	37,5	61,1
11	0,0	100,0	12,0	24,0		100,0	-24,0	12,0	88,0
12	0,0	48,0	100,0	53,0		48,0	-53,0	100,0	-52,0
13	100,0	0,0	0,0	0,0		-100,0	100,0	-100,0	0,0
14	28,0	73,0	100,0	0,0		45,0	28,0	72,0	-27,0
15	26,8	100,0	0,0	40,8		73,2	-14,1	-26,8	100,0
16	14,3	100,0	42,9	0,0		85,7	14,3	28,6	57,1
17	0,0	55,0	100,0	2,0		55,0	-2,0	100,0	-45,0
18	80,0	100,0	20,0	0,0		20,0	80,0	-60,0	80,0
19	0,0	43,7	100,0	0,0		43,7	0,0	100,0	-56,3
20	0,0	100,0	6,4	93,6		100,0	-93,6	6,4	93,6
21	0,0	1,0	2,0	100,0		1,0	-100,0	2,0	-1,0
22	100,0	36,0	14,0	0,0		-64,0	100,0	-86,0	22,0
23	29,0	100,0	0,0	33,0		71,0	-4,0	-29,0	100,0
24	0,0	100,0	48,0	4,0		100,0	-4,0	48,0	52,0
25	9,0	100,0	13,0	0,0		91,0	9,0	4,0	87,0
26	0,0	100,0	20,0	10,0		100,0	-10,0	20,0	80,0
27	0,0	72,2	55,6	100,0		72,2	-100,0	55,6	16,7
28	54,0	30,0	0,0	100,0		-24,0	-46,0	-54,0	30,0
29	9,0	100,0	20,0	0,0		91,0	9,0	11,0	80,0
30	20,6	100,0	47,1	0,0		79,4	20,6	26,5	52,9
31	100,0	0,0	1,1	34,4		-100,0	65,6	-98,9	-1,1
32	9,7	100,0	53,2	0,0		90,3	9,7	43,5	46,8
33	0,0	46,7	100,0	73,3		46,7	-73,3	100,0	-53,3
34	100,0	9,0	0,0	17,0		-91,0	83,0	-100,0	9,0
35	25,0	100,0	60,0	0,0		75,0	25,0	35,0	40,0
36	100,0	0,0	18,8	68,8		-100,0	31,3	-81,3	-18,8
<b>Median</b>	<b>9,0</b>	<b>100,0</b>	<b>23,0</b>	<b>10,1</b>	<b>Median</b>	<b>74,1</b>	<b>-1,0</b>	<b>22,5</b>	<b>50,4</b>
<b>St.abw.</b>	<b>35,4</b>	<b>38,4</b>	<b>35,2</b>	<b>33,0</b>	<b>Summe</b>	<b>1765</b>	<b>-78</b>	<b>479</b>	<b>1286</b>

Tab. 69. Bewertungsdaten und –differenzen des Test 19

## Anhang E

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4		Diff 3-1	Diff 4-2
1	100,0	0,0	91,0	20,0		-9,0	20,0
2	66,0	0,0	100,0	26,0		34,0	26,0
3	100,0	9,0	91,0	0,0		-9,0	-9,0
4	100,0	1,4	64,3	0,0		-35,7	-1,4
5	92,0	0,0	100,0	8,0		8,0	8,0
6	89,0	0,0	100,0	15,0		11,0	15,0
7	100,0	0,0	91,9	27,3		-8,1	27,3
8	86,0	15,0	100,0	0,0		14,0	-15,0
9	100,0	0,0	91,0	10,0		-9,0	10,0
10	70,0	11,7	100,0	0,0		30,0	-11,7
11	100,0	0,0	67,0	14,0		-33,0	14,0
12	19,0	0,0	100,0	59,0		81,0	59,0
13	100,0	0,0	91,4	1,2		-8,6	1,2
14	75,0	27,0	100,0	0,0		25,0	-27,0
15	100,0	11,0	78,0	0,0		-22,0	-11,0
16	77,5	27,5	100,0	0,0		22,5	-27,5
17	81,0	0,0	100,0	7,0		19,0	7,0
18	80,0	7,3	100,0	0,0		20,0	-7,3
19	100,0	0,0	96,8	14,5		-3,2	14,5
20	93,0	0,0	100,0	5,0		7,0	5,0
21	99,0	0,0	100,0	1,0		1,0	1,0
22	69,0	32,0	100,0	0,0		31,0	-32,0
23	100,0	0,0	77,0	2,0		-23,0	2,0
24	100,0	28,0	68,0	0,0		-32,0	-28,0
25	90,0	0,0	100,0	30,0		10,0	30,0
26	82,0	0,0	100,0	29,0		18,0	29,0
27	83,3	0,0	100,0	31,7		16,7	31,7
28	71,0	0,0	100,0	0,0		29,0	0,0
29	80,0	0,0	100,0	9,0		20,0	9,0
30	100,0	18,9	73,0	0,0		-27,0	-18,9
31	83,0	0,0	100,0	13,0		17,0	13,0
32	52,6	0,0	100,0	80,7		47,4	80,7
33	80,0	0,0	100,0	33,3		20,0	33,3
34	100,0	0,0	84,0	21,0		-16,0	21,0
35	77,0	24,0	100,0	0,0		23,0	-24,0
36	100,0	0,0	97,7	8,0		-2,3	8,0
<b>Median</b>	<b>89,5</b>	<b>0,0</b>	<b>100,0</b>	<b>7,5</b>	<b>Median</b>	<b>10,5</b>	<b>7,5</b>
<b>St.abw.</b>	<b>17,1</b>	<b>10,1</b>	<b>11,0</b>	<b>17,9</b>	<b>Summe</b>	<b>267</b>	<b>253</b>

Tab. 70. Bewertungsdaten und -differenzen des Test 20

## Anhang E

Proband	Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 4		Diff 4-2	Diff 3-1
1	91,0	0,0	100,0	0,0		0,0	9,0
2	76,0	6,0	100,0	0,0		-6,0	24,0
3	90,0	10,0	100,0	0,0		-10,0	10,0
4	86,8	0,0	100,0	3,9		3,9	13,2
5	91,0	8,0	100,0	0,0		-8,0	9,0
6	86,0	0,0	100,0	14,0		14,0	14,0
7	89,0	0,0	100,0	8,0		8,0	11,0
8	95,0	7,0	100,0	0,0		-7,0	5,0
9	82,0	0,0	100,0	30,0		30,0	18,0
10	71,4	57,1	100,0	0,0		-57,1	28,6
11	77,0	0,0	100,0	24,0		24,0	23,0
12	92,0	0,0	100,0	10,0		10,0	8,0
13	93,3	11,1	100,0	0,0		-11,1	6,7
14	75,0	26,0	100,0	0,0		-26,0	25,0
15	80,0	0,0	100,0	19,0		19,0	20,0
16	89,0	0,0	100,0	23,1		23,1	11,0
17	73,0	0,0	100,0	4,0		4,0	27,0
18	91,4	11,4	100,0	0,0		-11,4	8,6
19	81,8	0,0	100,0	98,9		98,9	18,2
20	95,0	12,0	100,0	0,0		-12,0	5,0
21	99,0	3,0	100,0	0,0		-3,0	1,0
22	90,0	0,0	100,0	11,0		11,0	10,0
23	83,0	0,0	100,0	10,0		10,0	17,0
24	79,0	11,0	100,0	0,0		-11,0	21,0
25	79,0	0,0	100,0	19,0		19,0	21,0
26	80,0	0,0	100,0	9,0		9,0	20,0
27	87,3	0,0	100,0	47,3		47,3	12,7
28	86,0	0,0	100,0	15,0		15,0	14,0
29	91,0	8,0	100,0	0,0		-8,0	9,0
30	82,3	0,0	100,0	24,2		24,2	17,7
31	87,0	0,0	100,0	9,8		9,8	13,0
32	89,4	18,2	100,0	0,0		-18,2	10,6
33	65,1	30,2	100,0	0,0		-30,2	34,9
34	81,0	0,0	100,0	26,0		26,0	19,0
35	100,0	41,0	95,0	0,0		-41,0	-5,0
36	90,1	0,0	100,0	8,5		8,5	9,9
<b>Median</b>	<b>86,9</b>	<b>0,0</b>	<b>100,0</b>	<b>6,0</b>	<b>Median</b>	<b>6,0</b>	<b>13,1</b>
<b>St.abw.</b>	<b>7,9</b>	<b>12,9</b>	<b>0,8</b>	<b>18,8</b>	<b>Summe</b>	<b>155</b>	<b>520</b>

Tab. 71. Bewertungsdaten und -differenzen des Test 21

## Anhang F. Korrelationen aller Parameter mit der Lästigkeit in den 6er- und 4er-Relationen

	6er-Relationen				4er-Relationen							
	Test 6	Test 8	Test 10	Test 13	Test 5	Test 9	Test 12	Test 17	Test 18	Test 19	Test 20	Test 21
<b>Pegel</b>	0,92	0,47	0,76	0,66	0,99	0,83	0,96	0,80	0,99	0,92	0,93	0,98
<b>Lautheit</b>	0,91	0,93	0,92	0,95	0,98	0,91	0,99	0,89	0,98	0,92	0,98	0,97
<b>Rauigkeit</b>	0,90	0,62	0,73	0,65	0,99	0,80	0,96	0,94	0,99	0,10	0,93	0,98
<b>Schärfe</b>	0,64	0,97	0,91	0,65	0,95	0,90	0,80	0,94	0,97	-0,95	0,98	0,98
<b>Tonalität</b>	0,10	-0,58	-0,12	-0,36	-0,90	0,54	-0,86	-0,80	-0,88	0,79	-0,99	-0,71

Tab. 72. Korrelation zwischen bewerteter Lästigkeit und den Parametern der 6er- und 4er-Relationen

Anhang G. Parameter und Lästigkeitsbewertungen der Hörsamples in den 6er-Relationen

Hörproben - Parameter (Durchschnittswerte der 3s-Samples)										Lästigkeit												
Sample Nr.	Parameter -Set	Fahrt	Kilometrierung	Geschw. in km/h	Pegel	Lautheit	Rauhigkeit	Schärfe	Tonalität	Test 5	Test 6	Test 19	Test 10	Test 9	Test 8	Test 13	Test 12	Test 17	Test 18	Test 21	Test 20	
2	1	4	32100	199,50	60,18	14,33	1,78	1,46	0,0298		6,3											
4	1	2	33200	199,49	59,89	14,13	1,80	1,45	0,0389			10,1										
15	2	2	28000	199,00	59,56	13,91	1,79	1,45	0,0240			9,0										
16	2	4	28000	200,00	60,30	14,42	1,82	1,45	0,0375	0,0	9,0						0,0					
21	2	3	28000	229,33	63,50	18,20	2,07	1,57	0,0328						41,6		68,3		9,5			
25	2	5	28000	249,17	63,62	19,20	2,08	1,59	0,0235						68,0		100	100		6,0		
29	3	2	35300	199,01	59,40	13,85	1,73	1,38	0,0323			23,0										
30	3	4	35300	199,00	59,85	14,10	1,75	1,38	0,0351		31,8											
42	4	4	35000	199,00	59,83	13,98	1,78	1,40	0,0289		0,0											
49	5	2	38600	200,50	60,96	14,76	1,79	1,29	0,0474			100						0,0				
50	5	4	38600	200,00	61,52	15,49	1,88	1,33	0,0444	9,0	49,9						19,0					
55	5	3	38600	228,99	63,39	17,95	1,97	1,41	0,0487									30,0	0,0			0,0
59	5	5	38600	250,00	64,09	19,36	2,05	1,43	0,0449									72,0		0,0		7,5
100	8	4	9900	159,96	66,61	21,44	2,42	1,67	0,0218				0,0	0,0	77,5							
101	8	2	10000	98,37	63,97	16,11	2,05	1,41	0,0341						0,0							
107	8	4	37100	199,67	67,96	23,95	2,45	1,69	0,0302	88,0	100		19,5		100							
126	8	3	37100	228,66	69,74	27,80	2,66	1,79	0,0216				63,2	79,1		9,7			81,5			100
144	8	5	37100	250,96	70,98	30,92	2,76	1,88	0,0210				100							86,9		
160	9	4	18200	199,91	70,62	29,17	2,74	1,75	0,0240	100						39,1						
166	9	3	18200	230,67	73,20	34,67	2,98	1,86	0,0221							89,0			100			
172	9	5	18200	249,33	74,82	38,45	3,19	1,93	0,0195							100				100		
202	10	4	2300	157,57	73,12	29,07	3,01	1,86	0,0286				50,4	65,0		10,4						89,5
204	10	2	2400	98,95	66,45	17,98	2,27	1,46	0,0302						9,9							
241	11	4	7800	159,67	77,93	36,70	3,47	1,99	0,0279				98,9	100		80,0						
				MAX	77,93	38,45	3,47	1,99	0,0487			Fahrt 4			schwarz		200	km/h				
				MIN	59,40	13,85	1,73	1,29	0,0195			Fahrt 2			grün		200	km/h				
												Fahrt 3 und 5			blau		230, 250	km/h				

