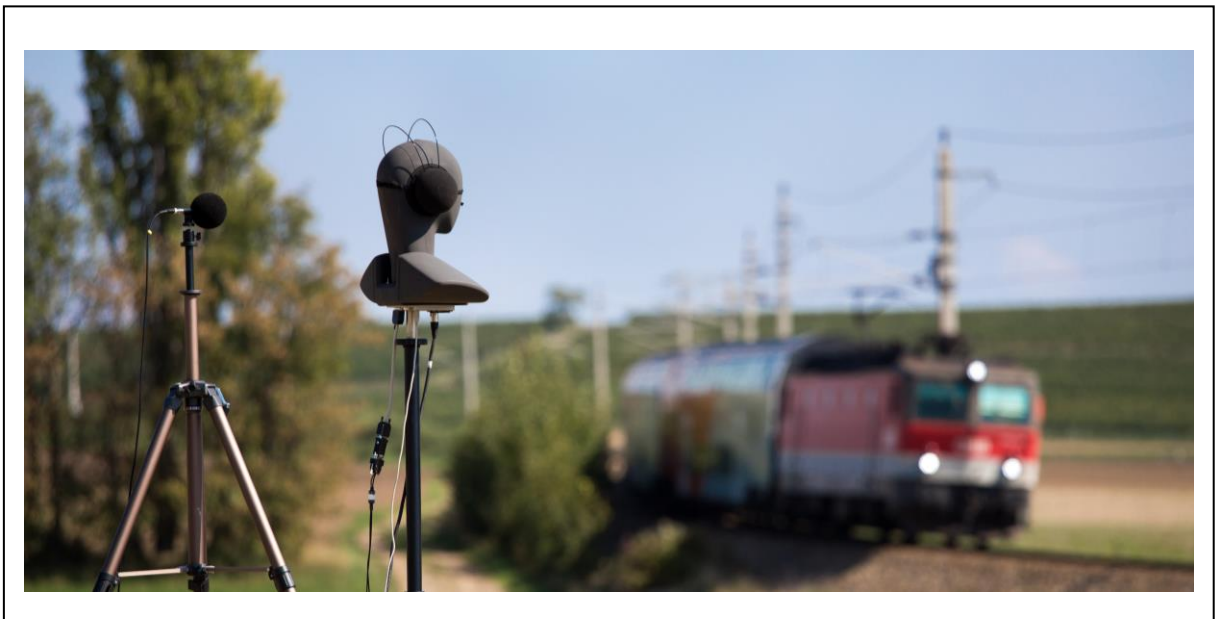


Psychoakustische Analyse auffälliger Bogengeräusche PAAB

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2016
(VIF 2016)

Sept. 2021



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien

 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
1020 Wien

 **ÖBB**
INFRA

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

 **ASFINAG**

Für den Inhalt verantwortlich:

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

 **TU**
WIEN **IEW**

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

 **ÖAW**
ÖSTERREICHISCHE
AKADEMIE DER
WISSENSCHAFTEN **ISF**

Ziviltechnikerbüro Dr. Christian Kirisits
Kolpinggasse 10
7423 Pinkafeld

 **ZT KIRISITS**

psiacoustic Umweltforschung und Engineering GmbH
Donaufelder Straße 55/3/1
A-1220 Wien

 **PSIA**
www.psia.at

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien

 **FFG**
Forschung wirkt.

Psychoakustische Analyse auffälliger Bogengeräusche PAAB

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2016)

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas MALY

Dipl.-Ing. Dr. Christian KASESS

ao.Univ.Prof. Dr. Christian KIRISITS

apl. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Holger WAUBKE

Florian BIEBL, BSc

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert OSTERMANN

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Technische Universität Wien, Institut für Verkehrswissenschaften,

Forschungsbereich für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

INHALTSVERZEICHNIS

0 EXECUTIVE SUMMARY	6
0.1 DEUTSCHE VERSION.....	6
0.2 ENGLISCHE VERSION.....	7
1 EINLEITUNG	9
1.1 PROBLEMSTELLUNG	9
1.2 LÖSUNGSANSATZ	11
1.3 BEGRIFFSDEFINITIONEN.....	12
1.4 STAND DER TECHNIK UND DES WISSENS.....	13
2 MESSUNGEN UND DATENVORAUSWERTUNGEN	19
2.1 MESSSTELLEN.....	19
2.2 MESSKONFIGURATION	24
2.3 MESSUNGEN	26
2.4 ERKENNUNG AUFFÄLLIGER BOGengerÄUSCHE.....	30
2.5 DATENAUFBEREITUNG UND -VORAUSWERTUNG	31
3 STIMULUSMATERIAL.....	35
3.1 FESTLEGUNG DER TESTBEDINGUNGEN	35
3.2 GRUNDGERÄUSCH.....	41
3.3 QUIETSCHEN.....	44
3.4 KREISCHEN.....	51
3.5 KOMBINATION ROLLGERÄUSCH-STÖRGERÄUSCH	61
4 WAHRNEHMUNGSTESTS	66
4.1 TESTDURCHFÜHRUNG.....	66
4.2 LÄSTIGKEITSBEURTEILUNG.....	66
4.3 STIMULUSMATERIAL.....	67
4.4 DATENAUFBEREITUNG	71
5 ERGEBNISSE	73
5.1 VORBEIFAHRTSGERÄUSCHE	73
5.2 KREISCHEN.....	75
5.3 QUIETSCHEN.....	78
6 ANPASSUNGSWERTE FÜR DIE PROGNOSEBERECHNUNG	85
6.1 MODELLBILDUNG.....	85
6.2 ZUGBEZOGENE ANPASSUNGSWERTE	88
6.3 EXEMPLARISCHE ANWENDUNG AUF BESTEHENDE MESSDATEN.....	93
6.4 DISKUSSION EMISSIONSSEITIGER ANPASSUNGSWERTE	110
6.5 EMPFEHLUNGEN.....	113

7	ZUSAMMENFASSUNG.....	117
8	LITERATURVERZEICHNIS	124
	ANHANG A VERGLEICH DER EMISSIONEN AUF BOGENINNEN- UND -AUßENSEITE.....	128
A.1	BREITBANDIGE AUFFÄLLIGKEITEN.....	128
A.2	TONALE AUFFÄLLIGKEITEN.....	131
	ANHANG B AUSWAHL DES ROLLGERÄUSCHES.....	134
	ANHANG C ÜBERSICHT QUIETSCHEREIGNISSE PAAB.....	142
	ANHANG D MODELLEINGANGSPARAMETER FÜR GESAMTANPASSUNGSWERTE.....	151
	ANHANG E VERTEILUNGEN DER ZUGBEZOGENEN GESAMTANPASSUNGSWERTE.....	163
E.1	GÜTERZÜGE (ALLGEMEINE KLASSE UND FÜR DEN KFZ-TRANSPORT).....	163
E.2	REISEZÜGE (ALLGEMEINE KLASSE).....	165
E.3	RAILJET REISEZÜGE	166
E.4	REGIONALZÜGE DER BAUREIHE 80-33	166
E.5	SCHNELLBAHNEN DER BAUREIHE 4020.....	167
E.6	SCHNELLBAHNEN DER BAUREIHE 4024.....	168

0 EXECUTIVE SUMMARY

0.1 Deutsche Version

Auffällige Bogengeräusche stechen aufgrund ihrer hochfrequenten, oft tonalen (Kurvenquietschen) oder auch transienten, breitbandigen Charakteristik (Kurvenkreischen) aus dem üblichen, in Bögen oft erhöhten Vorbeifahrtsgeräusch hervor. Die allgemeinen Entstehungsmechanismen solcher Bogengeräusche sind weitgehend bekannt: der Spurkranzanlauf beim Kurvenkreischen und der laterale Stick-Slip Effekt beim Kurvenquietschen. Die beiden umfangreichen Studien BEGEL und ESB hatten bereits Einflussfaktoren auf Auftrittshäufigkeiten, sowie schalltechnische Anpassungswerte zum Thema, die Frage einer veränderten Belästigungswirkung wurde hingegen nicht beleuchtet. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass Bogengeräusche die Lästigkeit des Vorbeifahrtsgeräusches erhöhen, wie sich aber das veränderte Frequenzspektrum, die Dauer oder zeitliche Variationen bei verschiedenen Rollgeräuschen im Detail auswirken ist unklar.

Die vorliegende Studie untersucht daher akustische Emissionsparameter mittels eines Wahrnehmungstests im Labor mit 30 Versuchspersonen. Hierzu wurden in drei Bögen mit Radien im Bereich von rund 300 – 330 m Vorbeifahrtsgeräusche in verschiedenen Entfernungen (in 7,5 m, 25 m und 50 m Entfernung zur Gleisachse) messtechnisch erfasst. Mit Hilfe sogenannter Frame-Multiplier konnten zeitvariable, akustische Auffälligkeiten gezielt manipuliert und mit unterschiedlichen Grundrollgeräuschen kombiniert werden, um verschiedene Forschungsfragen systematisch abzufragen. Während perzeptive Anpassungswerte nur zum Teil durch akustische Größen beschreibbar waren, konnte ein einfaches Modell für Gesamtanpassungswerte (Summe aus schalltechnischen und perzeptiven Anteilen) entwickelt werden, welches den großen Vorteil besitzt, nicht weiter zwischen Kurvenkreischen und -quietschen unterscheiden zu müssen.

Exemplarisch berechnete Anpassungswerte für die Messdaten aus BEGEL, ESB und PAAB liefern eine Einschätzung der Größenordnung für betrachtete Konstellationen aus Bogenradius und Zugskategorie. Hervorzuheben ist dabei die teilweise unerwartet hohe Variabilität der berechneten Anpassungswerte, die unter anderem auf signifikante, nicht vollständig durch oberbautechnische Einflussgrößen erklärbare Differenzen im Rollgeräusch des mittleren Frequenzbereichs fußen.

Aus dem Entstehungsprozess der Umgebungslärmrichtlinie gehen Indizien hervor, dass die im Europäischen Berechnungsmodell vorgesehenen, pauschalen Zuschläge von 8 dB für enge Bögen und 5 dB für etwas weitere Bögen nicht alleinig schalltechnische Auswirkungen

auffälliger Bogengeräusche adressieren, sondern dass diese Zuschläge ebenfalls als Gesamtanpassungswerte eingeführt wurden und keine weiteren perceptiven Zuschläge mehr erforderlich sind. Vor diesem Hintergrund werden die exemplarischen Gesamtanpassungswerte in Bezug auf bestehende Anpassungswerte der nationalen Implementierung des Berechnungsmodells, der RVE 04.01.02, eingeordnet (exemplarisch berechnete Werte bestätigen die pauschalen Vorgaben der RVE (nur) zum Teil) und Empfehlungen für Verbesserungen gegeben.

0.2 Englische Version

In addition to an often increased noise level, trains passing through a curve frequently have additional salient features in the pass-by noise which are typically tonal (curve squeal) or transient covering a wide frequency range (flanging noise). The main mechanisms behind these two sources of noise are well known: the lateral stick-slip effect which produces squeal and the flange hitting the rail thus producing the typical flanging noise. Recently, two comprehensive studies, BEGEL and ESB, were concerned with influencing factors and the effect on the pass-by level of such curve-specific noise, but effects on the annoyance were not included. Basically, it can be assumed that such salient acoustic features increase the annoyance of the passing noise, but how the frequency spectrum, the duration or temporal variations in relation to the rolling noise or train type affect the annoyance increase in detail is still unclear.

The present study aimed at investigating the influence of such emission parameters on annoyance in a perception test in the laboratory with 30 listeners. For this purpose, passing noise were measured in three narrow curves with radii between approximately 300 - 330 m at different distances (7,5 m, 25 m and 50 m from the center of the track). By the means of so-called frame multipliers, time-variable, salient features could be manipulated and combined with various clean rolling noises in order to address various research questions. Analysed judgements showed, that perceptual adjustment values were difficult to describe by acoustic quantities. In contrast, for overall adjustment values (sum of acoustic and perceptual proportions) a simple model could be developed. The special advantage of this model is, that it has not longer to be distinguished between squeal types (curve squeal and flanging noise). Adjustment values exemplarily calculated based on available measurement data from BEGEL, ESB and PAAB provide an estimation of the magnitude for considered constellations of curve radio and train categories. The variability of the calculated adjustment values is in some cases significantly higher than expected. Reasons for this are, among other things, considerable

differences of the rolling noise, which are not fully explainable by variations in acoustic superstructure properties.

The history of the environmental noise directive provides indications that the adjustment values specified in the European prediction model (8 dB for narrow curves and 5 dB for slightly wider curves) do not only address the acoustic effects of salient features in the pass-by noise, but also comprise perceptive effects. Thus, no further perceptive adjustments will be necessary for values of the European prediction model. Against this background, the exemplary calculated overall adjustment values are classified in relation to existing adjustment values of the national implementation of the prediction model in the RVE 04.01.02 (exemplarily calculated adjustment values confirm the values of the RVE (only) partially), and recommendations for improvements are given.

1 EINLEITUNG

1.1 Problemstellung

Schienenfahrzeuge können bei Bogenfahrten, insbesondere in engen Bögen, Vorbeifahrtgeräusche hervorrufen, die gegenüber den Schallemissionen in der Geraden zusätzlich hochfrequente und zum Teil tonale Anteile mit erhöhten Terzbandpegeln aufweisen. Die Entstehungsmechanismen für derartige, auffällige Bogengeräuschen, wie auch die thematisch eng daran gekoppelten Einflussfaktoren, waren bereits und sind auch weiterhin Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Untersuchungen. Zwar können grundlegende Wirkungszusammenhänge, die zur Schwingungsanregung führen, und wesentliche Einflüsse als Stand des Wissens angesehen werden, jedoch gestalten sich Prognosen aufgrund der Mannigfaltigkeit und der zum Teil bestehenden hohen Variabilität der Einflüsse in der Regel äußerst komplex. Als Folge wird in gängigen Rechenmodellen das Vorhandensein von auffälligen Bogengeräuschen zwar berücksichtigt, jedoch nur in Form von pauschalen Zuschlägen auf die Emissionsstärken von Ersatzschallquellen.

Auf nationaler Ebene wurden zuletzt die beiden umfangreichen, geförderten Studien „BEGEL - Bewertung des akustischen Einflusses von Gleisbögen für die Erstellung von Lärmkarten“ [1] und „ESB - Einflüsse auf Schallemissionen in Bögen“ [2] durchgeführt, welche einerseits Einflussfaktoren wie Bogenradius, Zugkategorie, Geschwindigkeit, Witterung und Schienenkopfkonditionierung auf Basis umfangreicher Messungen analysierten. Andererseits wurde durch Gegenüberstellung der Emissionen von Zügen mit auffälligen Bogengeräuschen und Zügen ohne derartige Komponenten pegelbasierte Korrekturfaktoren für die Lärmprognose abgeleitet. Dabei zeigte sich beispielsweise, dass sich bei jenen Zügen, die auch ohne auffällige Bogengeräusche bereits hohe Schallemissionen aufweisen, die Vorbeifahrtspegel durch das Vorhandensein von Auffälligkeiten in geringerem Ausmaß ändern. So waren beispielsweise bei der Zugskategorie Güterzüge die geringsten Pegelzunahmen zu beobachten (bei den Messungen von BEGEL in den Jahren 2013 und 2014 kann von einem sehr geringen Umrüstungsgrad auf leise Bremssohlen ausgegangen werden).

Allgemein bekannt ist, dass Geräusche mit tonalen Komponenten als lästig empfunden werden und daher auch in Regelwerken oft gesondert berücksichtigt werden (vergleiche beispielsweise den Tonzuschlag zur Beurteilung von Geräuschmissionen aus DIN 45681 [3]). Da auffällige Bogengeräusche häufig tonale Komponenten beinhalten, werden diese die Lästigkeit des Vorbeifahrtsgeräusches erhöhen. Allerdings ist dabei unklar, wie sich der

Frequenzgehalt, die Dauer oder zeitliche Variationen im Detail auswirken. Ähnliches gilt auch für hochfrequente, breitbandigere Geräuschkomponenten, welche den energetischen Schwerpunkt der Emissionen zu höheren Frequenzen verschieben und damit im Allgemeinen schärfer klingen und lästiger empfunden werden [4].

Bei den beiden erwähnten Forschungsarbeiten BEGEL und ESB wurden allerdings ausschließlich Pegelerhöhungen untersucht, welche durch die den Vorbeifahrtsgeräuschen überlagerten, auffälligen Bogengeräusche verursacht werden, etwaige Erhöhungen in der Lästigkeit blieben bei den abgeleiteten Anpassungswerten somit unberücksichtigt. Die vorliegende Studie hatte zum Ziel, genau diese Lücke zu schließen und der Frage nachzugehen, welche Anpassungen zu wählen sind, um nicht nur schalltechnische Auswirkungen, sondern auch subjektive, lästigkeitssteigernde Effekte solcher Bogengeräusche abzubilden. Trotz der hohen Variabilität, sowohl in der zeitlichen, als auch in der Frequenzzusammensetzung, soll dabei ein systematischer Zusammenhang zwischen akustischen Eigenschaften auffälliger Bogengeräusche und den verursachten Änderungen der Lästigkeit und in weiterer Folge Anpassungswerte für die Beaufschlagung der Schallemissionen abgeleitet werden.

Zu beachten ist dabei, dass lästigkeitsbezogene Anpassungswerte nicht direkt mit Korrekturfaktoren zur Bestimmung von Lärmindizes wie dem L_{den} oder L_{night} im Sinne der europäischen Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG [5] oder mit Korrekturfaktoren zur Anpassung der Dosis-Wirkungsbeziehungen gleichzusetzen sind. Auf den ersten Fall beziehen sich beispielsweise die in der EU-Richtlinie 2015/996 [6] (Arbeitstitel CNOSSOS-EU) beschriebenen Anteile, die mit Kurvenkreischen bezeichnet werden und im Wesentlichen schalltechnische Änderungen der Quellstärken beschreiben. Dazu werden Standardfaktoren unabhängig von der Frequenz angegeben, aber es wird gleichzeitig empfohlen, konkrete Schalleistungsspektren für einzelne Arten von Fahrzeugen zu ermitteln. Diese Werte können aus Messungen ermittelt werden, und sind dann entsprechend der Forderung in 2002/49/EG für ein für die Emission ausschlaggebendes und hinsichtlich der Witterungsbedingungen durchschnittliches Jahr entsprechend zu mitteln.

Gänzlich davon zu unterscheiden sind Korrekturfaktoren um die existierenden Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen Lärmindex und Belästigung wenn notwendig anzupassen. Dafür sind nach 2002/49/EG Feldstudien durchzuführen. Diese Anforderung ist gerade für auffällige Bogengeräusche schwierig, da die zusätzliche Belästigungswirkung mit den oft nur sporadisch auftretenden, in ihren akustischen Eigenschaften meist stark variierenden auffälligen Geräuschen schwierig in Zusammenhang zu bringen ist.

1.2 Lösungsansatz

Den Kern der Untersuchungen bilden Wahrnehmungstests im Labor mit 30 Versuchspersonen, bei welchen realitätsnahe Hörproben auffälliger Bogengeräusche wiedergegeben und von den Probanden hinsichtlich der wahrgenommenen Lästigkeit beurteilt wurden. Messungen der Schallemissionen in Bögen wurden bereits in großem Umfang in den Projekten BEGEL [1] und ESB [2] (~34000 Züge) im Standardemissionsmesspunkt (7,5 m von der Gleisachse, 1,2 m über Schienenoberkante) durchgeführt. Allerdings sind diese Aufzeichnungen für Wahrnehmungstests nicht geeignet, da sich durch die Ausbreitung die Geräuschcharakteristik in für Immissionen relevanten Entfernungen stark ändert (Zeitverlauf, spektrale Zusammensetzung).

Für die Erstellung von Hörproben werden daher Immissionsmessungen bei drei Bögen mit Radien im Bereich von rund 300 – 330 m Vorbeifahrtsgeräusche sowohl konventionell in verschiedenen Entfernungen als auch binaural mittels eines Kunstkopfmesssystems in zwei Immissionspunkten (in 25 m und in 50 m Entfernung zur Gleisachse) aufgezeichnet. Zudem wird jeweils auch im Standardemissionsmesspunkt zu Vergleichszwecken gemessen. Aufgrund des nicht wetterfesten Messequipments, welches nur tageweise, beaufsichtigte Messungen erlaubt, musste der Umfang der Messungen mit 3 Messtagen je Bogen begrenzt werden.

Mit Hilfe der aus dem Vorgängerprojekt BEGEL erhobenen Emissionsdaten (Standardemissionsmesspunkt in 7,5 m Entfernung) von Bögen mit vergleichbaren Fahrgeschwindigkeiten erfolgt die Auswahl typischer, zu testender Geräuschsituationen. Aus dem Vergleich mit den Messdaten des vorliegenden Forschungsvorhabens werden einerseits aufgezeichnete, akustisch auffällige Geräusche entsprechend dieser Auswahl, andererseits typische unauffällige Vorbeifahrten für den Wahrnehmungstest selektiert. Letztere werden verwendet, um Bogengeräusche durch Überlagerung mit modifizierten oder künstlich erzeugten auffälligen Geräuschen zu erstellen. Durch die definierte Variation bestimmter Emissionsparameter werden Geräuschsituationen erzeugt, für welche aufgrund der zum Teil sehr geringen Auftrittswahrscheinlichkeit auffälliger Emissionskomponenten keine Aufzeichnungen existieren.

Die Wahrnehmungstests, die auf einer freien Größenschätzung basieren, sollen sowohl dazu dienen, die wesentlichen akustischen und psychoakustischen Deskriptoren für die Lästigkeit von Bogengeräuschen zu identifizieren, als auch in der Praxis anwendbare Anpassungswerte, welche die Belästigungswirkung abbilden, abzuleiten. Darauf aufbauend sollen mit Hilfe der Erkenntnisse über Einflussfaktoren aus den Vorgängerprojekten BEGEL und ESB

Empfehlungen erarbeitet und anhand von exemplarischen Rechnungen illustriert werden, wie diese Korrekturfaktoren in der Praxis angewendet werden können.

1.3 Begriffsdefinitionen

Bereits in den Projekten BEGEL und ESB wurde auf das weitgehende Fehlen einer einheitlichen Bezeichnung für verschiedene Ausprägungen von Kurvengeräuschen in der deutschsprachigen Literatur hingewiesen (vgl. gleichnamiges Kapitel 1.3 im BEGEL-Ergebnisbericht [1] bzw. Kapitel 1.2 im ESB-Ergebnisbericht [2]). Aus diesem Grund werden die folgenden Begriffskonventionen aus den Projekten BEGEL und ESB übernommen:

- *Kurvenquietschen*
tonale Anteile in der Schallemission, welche durch Verspannungen und ruckweise laterales Gleiten (stick-slip) angeregt werden
- *Kurvenkreischen*
breitbandige Schallemissionsanteile, welche durch Spurkranzanlauf hervorgerufen werden und im Vergleich zum Kurvenquietschen höhere Fundamentalfrequenzen aufweisen

Auch die Klassifizierung auffälliger Geräuschkomponenten erfolgt grundsätzlich analog zu der Klassifizierung im Projekt ESB, in welchem aufgrund neuer Erkenntnisse die untere Betrachtungsgrenze tonaler Auffälligkeiten von 1,25 kHz je nach Zugkategorie auf 0,8 kHz oder auf 1 kHz abgesenkt wurde:

- *breitbandige Auffälligkeiten (kennzeichnend für Kurvenkreischen)*
Unter breitbandigen Auffälligkeiten werden Pegelerhöhungen verstanden, welche sich durch erhöhte arithmetische Mittelwerte im Frequenzbereich von 8 bis 12,5 kHz auszeichnen.
- *tonale Auffälligkeiten (kennzeichnend für Kurvenquietschen)*
Unter diesem Begriff werden Auffälligkeiten verstanden, welche im Frequenzbereich von 0,8 kHz bzw. 1 kHz bis 6,3 kHz des Terzspektrums eine markante Erhöhung eines Terzpegels oder zweier benachbarter Terzpegel aufweisen.
- *hochfrequente, tonale Auffälligkeiten*
Hochfrequente, tonale Auffälligkeiten weisen die gleiche Art der Pegelerhöhungen wie tonale Auffälligkeiten auf, jedoch wird bei diesen tonalen Auffälligkeiten der Frequenzbereich von 8 bis 12,5 kHz betrachtet. Die mit steigender Terzmittenfrequenz zunehmenden Terzbandbreiten erschweren jedoch eine Erkennbarkeit von

schmalbandigen Komponenten und damit die Unterscheidbarkeit zu breitbandigen Auffälligkeiten.

1.4 Stand der Technik und des Wissens

Aufbauend auf die grundlegenden Berichte von BEGEL [1] und ESB [2] konzentrieren sich nachfolgende Ausführungen auf Erkenntnissen der jüngeren Vergangenheit, die in thematischem Zusammenhang mit den Forschungsaufgaben des vorliegenden Projektes stehen (Erkennung, Korrekturfaktoren, Regelwerke, etc.).

Entstehung auffällige Bogengeräusche

Im Grundlagenbereich beschäftigen sich in den letzten Jahren zahlreiche Arbeiten mit der Simulation der Entstehung von vorwiegend tonalen Komponenten (Kurvenquietschen) meist in Abhängigkeit der Variationen einzelner Rahmenbedingungen. Beispielsweise beschäftigt sich Zenzerovic et al. [7] mit Kontaktwinkeländerungen zwischen Rad und Schiene aufgrund des Querversatzes des Kontaktpunktes und dem Drehkriechen in der Kontaktfläche. Zenzerovic et al. kommt letztlich zum Schluss, dass beides die Amplituden, wie auch die Auftrittshäufigkeit beeinflusst, wobei die Kontaktwinkeländerung hier dominant ist und zu plötzlichem Verschwinden tonaler Anteile oder Änderungen der Frequenz führen kann, während sich die Drehbewegung vorwiegend auf die Amplituden auswirkt. Zudem zeigen die Simulationen, dass bei hohen Reibwerten und großen Kontaktwinkeln hochfrequente tonale Komponenten mit hohen Amplituden entstehen können. Ding et al. [8] beschäftigt sich hingegen mit den nach wie vor kontroversiell diskutierten Anregungsmechanismen, dem Modell der fallenden Reibwerte und der Modenkopplung. Mittels Simulationen für Straßenbahnräder wird gezeigt, dass am bogeninneren, wie auch am bogenäußeren Rad tonale Komponenten als Folge der Modenkopplung entstehen können, wobei für diese Anregung eine Phasenverschiebung zwischen axialen und radialen Schwingungen des Rades charakteristisch ist. Als weiteres Beispiel solcher Grundlagenarbeiten kann Lai et al. [9] genannt werden, in welchem ein Finite-Elemente Modell für tonale Komponenten weiterentwickelt wurde. Hervorzuheben ist bei dieser Arbeit der Schluss, dass die Schallemissionen dieser Auffälligkeiten klar vom Rad ausgehen und der Schienenanteil (insbesondere der höchste Anteil bei der jeweiligen Fundamentalfrequenz) oftmals vernachlässigt werden kann.

Wie an diesen Beispielen zu erkennen ist, liefern derartige Untersuchungen zwar zum Teil wesentliche Aussagen und Tendenzen, die zu einem besseren Verständnis für des Phänomens Kurvenquietschen beitragen, jedoch sind sie für die Entwicklung von

Anpassungswerten aus Sicht der Autoren nicht von Bedeutung. Zudem sei festgehalten, dass die Grundlagenarbeiten die durch Spurkranzanlauf hervorgerufenen, breitbandigeren Geräusche in der Regel nicht behandeln.

Einflüsse, Bewertung und Prognoseansätze

Abseits der Grundlagenstudien sind vergleichsweise wenige Arbeiten in den letzten Jahren entstanden, die sich bei der europäischen Vollbahn mit der Analyse von Messdaten beschäftigt haben. Eine dieser wenigen Forschungsarbeiten ist das Projekt I-LENA („Initiative Lärmschutz-Erprobung neu und anwendungsorientiert“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur und Deutschen Bahn), bei welchem innovative Lärmschutzmaßnahmen unter Praxisbedingungen erprobt wurden. Venghaus [10] berichtet dabei über die Einführung einer Kenngröße für die objektive Bewertung der Minderungswirkung von Maßnahmen hinsichtlich auffälliger Bogengeräuschen („Squeal Indicator“). Grundlage sind Messungen in mehreren Emissionsmesspunkten (5 m Entfernung zur Gleisachse, 1,2 m über Schienenoberkante) mit Abständen von 20 bis 25 m entlang des betrachteten Bogens. Nach zeitlicher Ausrichtung der Mikrofonsignale zueinander, nach A-Bewertung und nach einer Terzspektrenberechnung für 125 ms lange Zeitabschnitte werden je Terzband und Zeitabschnitt die Maximalwerte gebildet. Für jedes Terzband von 1,6 bis 8 kHz wird eine Bandpegelstatistik mit 1 dB Klassen erzeugt und daraus all jene Werte mit Bandpegeln > 75 dB selektiert. Danach werden die Statistiken über die 8 Terzbänder hinweg aufsummiert und die absoluten Häufigkeiten jeder Pegelklasse exponentiell mit der Pegeldifferenz zum Grenzwert von 75 dB gewichtet addiert, um höhere Pegelspitzen im Squeal Indicator hervorzuheben. Aufgrund dieses Berechnungsansatz ist davon auszugehen, dass sich sowohl tonale als auch breitbandige Auffälligkeiten in höheren Kenngrößenwerten widerspiegeln. Jedoch ist in Hinblick auf vorliegende Anwendung einschränkend festzuhalten, dass der Ansatz keine weitere Unterscheidung zwischen diesen Auffälligkeitsarten erlaubt. Zudem ist auch eine Anwendung in weiteren Bögen bei höheren Geschwindigkeiten mit höherem Rollgeräusch fraglich. Denn beispielsweise traten in BEGEL bei Bögen mit Radien von 310 m und 440 m insbesondere bei Güterzügen in den Terzbändern bei und knapp oberhalb von 1,6 kHz unbewertete Bandpegel in den über mehrere, akustisch unauffällige Fahrten gemittelten Spektren von Messungen in 7,5 m Entfernung auf, welche den Grenzwert von 75 dB übersteigen (zum Teil auch um mehrere Dezibel), wodurch eine Beurteilung mittels dem Squeal Indicator verfälscht werden könnte.

Ostermann [11] beschäftigt sich im Rahmen seiner Dissertation mit Möglichkeiten für die Vorhersage von auffälligen Bogengeräuschen. Als Basis werden die Messungen der beiden Projekte BEGEL und ESB und die in BEGEL entwickelte, automatisierte Erkennung auffälliger

Bögengeräusche herangezogen. Statistische Untersuchungen zeigen, dass aus einer umfangreichen Palette von 190 potentiellen Einflussfaktoren insbesondere die relative Luftfeuchte der Schiene (Maximum zwischen 72 % und 75 %), einzelne Zugtypen, der Radialstellungsindex (RSI, siehe informativen Anhang Q der ÖNORM EN 14363 [12]) und die freie Seitenbeschleunigung, sowie Regen, Tau und Frost als Witterungseinflüsse Abhängigkeiten zu Auftrittshäufigkeiten aufweisen. Die Vorhersagen für Auftrittshäufigkeiten und für mittlere Schallemissionen von Zugvorbeifahrten beruhen auf verschiedenen statistischen Klassifikations- bzw. Regressionsverfahren. Im Hinblick auf den praktischen Einsatz ist zu beachten, dass die besten Prognoseergebnisse von mittleren Emissionen bei Verwendung der messtechnisch erfassten Schienenrauheiten und Gleisabklingraten erzielt werden. Jedoch musste bei den Validierungssets auf Messdaten aus drei Bögen zurückgegriffen werden, bei welchen zwei Bögen deutlich höhere Fahrgeschwindigkeiten und einen hohen Anteil an Güterzügen (~40-50 %) aufweisen und daher akustische Auffälligkeiten die Emissionen in nur geringerem Maß beeinflussen. Und beim dritten Bogen verkehrte das identen Fahrzeugkollektiv wie bei einem Bogen des Trainingssets. Ostermann empfiehlt trotz guter Ergebnisse daher weitere Validierungen mit anderen Messdaten durchzuführen.

Schalltechnische Emissionserhöhungen durch auffällige Bogengeräusche stellen für die in diesem Projekt betrachteten Anpassungswerte aber nur die Grundlage dar, zu denen lästigkeitsbezogene Anpassungswerte hinzuzufügen sind. Hinsichtlich der Unterschiede zwischen tonalen Quietschgeräuschen und breitbandigeren Spurkranzanlaufgeräuschen fasst Anderson et al. [13] zusammen, dass Betroffene üblicherweise größere Besorgnis über die tonalen Geräusche konstatieren - vermutlich wegen des durchdringenden Charakters, der als eine Art Gebrechen des Zugs interpretiert werden kann. Ansonsten wurde die Belästigung von Quietschgeräuschen (neben zahlreicher anderer Geräusche) auch im FP6-geförderten, europäischen Projekt Silence betrachtet. So wurden im Unterprojekt A „Annoyance“ [14] die Quietschgeräusche von 2 verschiedenen Straßenbahntypen mittels Wahrnehmungstests mit 7 Probanden (Alter zwischen 20 und 25 Jahren) untersucht und letztlich eine Pegelerhöhung im Bereich von 2,2 bis 6,6 dB für Vorbeifahrtsgeräusche ohne Kurvenquietschen aber mit gleicher Belästigungswirkung ermittelt. Zudem waren die Pegelerhöhungen stark mit der Schärfe korreliert, während Abhängigkeiten zur Tonalität nicht beobachtet wurden. Darüber hinaus wurden im Unterprojekt G „Rail Infrastructure & Operation“ unter anderem auch Kurvengeräusche, die in Rangierhöfen auftreten, nach gleichem Prozedere analysiert [15] und letztlich Korrekturwerte für derartige Geräusche von 5 dB erhoben, die auf normale Rollgeräusche zu beaufschlagen sind um die gleiche Belästigung zu erzeugen.

Abseits deutschsprachiger Werke wurde auch in internationaler Fachliteratur recherchiert. Konkret ergeben einschlägige Datenbanken (PubMed, Scopus) für den Suchterm „Squeal noise“, „Curve noise“, „Curve squeal“ eine Reihe von Publikationen. Allerdings weist eine detailliertere Suche nach der konkreten Belästigungswirkung, Psychoakustik oder Gesundheitswirkungen einen sehr eingeschränkten Umfang an relevanten Arbeiten aus, die sich zudem meist auf Straßenbahnen beziehen. So beschränkt sich Panulinova et al. [16] auf messtechnisch ermittelte Kurvengeräusche von Straßenbahnen in engen Bögen und präsentiert die Erhöhung von Immissionspegeln im Falle auffälliger Vorbeifahrten. Die Ergebnisse beinhalten allerdings keine Analyse der perceptiven Wirkung. Trollé et al. [17] befasst sich ebenfalls mit der Belästigungswirkung von Straßenbahnemissionen in Bögen. Mittels einer Multiregressionsanalyse wird letztlich ein akustischer Indikator entwickelt, der auf der mittleren Lautstärke, der Varianz des zeitveränderlichen A-bewerteten Schalldrucks (normalisiert auf den Effektivwert des A-bewerteten Schalldrucks) und einem psychoakustischen Index zur Berücksichtigung des Quietschens (Gesamtenergie der tonalen Komponenten innerhalb kritischer Bänder von 12 bis 24 Barks) beruht. Ji et al. [18] vergleicht mittels Wahrnehmungstest (53 Probanden, 28 männlich) die Emissionen bei gerader Strecke und in Bögen einer Stadtbahn in Seoul. Dabei zeigte sich, dass die Schallemissionen in Gleisbögen erheblich lauter empfunden wurden, als es die tatsächlichen Schalldruckpegel vermitteln würden. Als Grund gaben die Probanden die Schärfe des Geräusches an, welches sie sinngemäß als grauenvoll einstufen. Ji et al. sah Quietschgeräusche als Hauptursache für diese Bewertungen an und leitete daraus das Erfordernis ab, dass Betroffene durch derartige Kurvengeräusche sich deutlich gestresster fühlen und daher hinsichtlich der Emissionen oder der Lärmschutzmaßnahmen strikter zu behandeln sind, als gerade Streckenabschnitte. Weitere, ähnlich gelagerte Werke, wie beispielsweise [19] oder [20], sind nicht online zugänglich und damit für die Autoren nicht verfügbar. Darüber hinaus wurden auch einzelne Arbeiten über die Belästigungswirkung von Quietschgeräuschen auf Passagiere gesichtet, allerdings eignen sich diese nicht als Vergleich zum gegenständlichen Forschungsprojekt.

Berücksichtigung in der Prognoserechnung

Nationale und internationale Richtlinien berücksichtigen die Geräuschcharakteristik von Zugvorbeifahrten in Bögen uneinheitlich. Die österreichische ONR 305011 [21] beinhaltet einen Schalleistungspegel für Kurvenquietschen bei Verschubbetrieb. Für den Zugverkehr selbst wird in der Richtlinie dezidiert keine Pegelanhebung berücksichtigt. Erst im Abschnitt zum Beurteilungspegel wird ein „Anpassungswert für Geräuschanteile durch Kurvenquietschen = 5 dB“ definiert, wobei klargestellt wird, dass sich Anpassungswerte aus

der jeweiligen Geräuschcharakteristik ergeben. Damit berücksichtigt die Richtlinie konkret die Geräuschcharakteristik bzgl. ihrer belästigenden (perzeptiven) Eigenschaften ohne jedoch eine Anhebung für den Schalleistungspegel selbst anzunehmen. Undefiniert bleibt auch die Angabe „Geräuschanteile“, welche einen konkreten Schallpegel nur für das Quietschgeräusch alleine oder einen Anteil an „auffälligen“ Geräuscheinwirkungen voraussetzen.

Das Schweizer Regelwerk sonRAIL [22] beschreibt den Einfluss von Gleisbögen durch äquivalente Rauheiten (Radrauheiten) auf die emittierte Schalleistung. Damit beschränkt sich die Berücksichtigung auf den rein schalltechnischen Parameter der Emission und verzichtet auf die Berücksichtigung einer Belästigungsbeurteilung.

Die aktuelle deutsche Schall 03 [23] ähnelt der österreichischen ONR 305011 bzgl. der Kurvengeräusche bei Vershubbetrieb. Für das Kurvenfahrgeräusch in Rangier- und Umschlagbahnhöfen (bezeichnet als „Stick-slip, Anlaufen der Radspurkränze am Schienenkopf“) wird ein konkreter Schalleistungspegel definiert. Für den freien Zugverkehr unterbleibt eine Anpassung der Schalleistung, allerdings erfolgt eine Pegelkorrektur (gleichzusetzen einem österreichischen Anpassungswert) für die Auffälligkeit von Geräuschen. Dezidiert werden damit Ton-, impuls- oder informationshaltige Geräusche von Teilstrecken mit einem frequenzunabhängigen Zuschlag K_L zum Schalleistungspegel versehen. Dieser beträgt bei einem Kurvenradius < 300 m 8 dB, und bei einem Kurvenradius von 300 m bis < 500 m 3 dB. Damit wäre dies ein perzeptiver Zuschlag, wobei dieser pauschal und ohne explizite Berücksichtigung der Auftrittswahrscheinlichkeit zur Anwendung kommt.

Auf europäischer Ebene versuchte das Projekt CNOSSOS-EU ein einheitliches Verfahren zur Ermittlung von Schienenverkehrslärm zu ermitteln. Im Forschungsbericht aus 2010 [24] wurde die Ermittlung eines Schalleistungspegels nach

$$L_{W,0} = L_{W,0}(R_0) - 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{R_f}{R_0} \right)$$

in Aussicht gestellt. Im selben Bericht weiter verfolgt wurde jedoch eine „simplified version“, welche „8 dB for $R < 300$ m and 5 dB for $300 \text{ m} < R < 700 \text{ m}$ “ vorsah.

Im Jahr 2012 wurde im CNOSSOS-EU Projekt die Regelung „Taking a simple approach, squeal noise should be considered by adding 8 dB for $R < 300$ m and 5 dB for $300 \text{ m} < R < 500$ m to the rolling noise sound power spectra for all frequencies. Squeal contribution should be applied on railway track sections where the radius is within the ranges mentioned above for at least a 50 m length of track.“ vorgeschlagen, welche sich letztlich auch leicht redaktionell modifiziert in der nun vorliegenden Version des Anhangs II zur europäischen Umgebungslärmrichtlinie wiederfindet.

Offen bleibt in dieser Richtlinie, ob diese Zuschläge nun die Anhebung der Schalleistung bei der Bogenfahrt oder/und die belastigende Geräuschqualität berücksichtigen. Ein Vergleich der Pegelzuschläge zur Schall 03 deutet daraufhin, dass diese analog zu Lästigkeitszuschlägen bzw. Anpassungswerten definiert wurden.

2 MESSUNGEN UND DATENVORAUSWERTUNGEN

Messungen von Schallemission- und -immissionen von Zugsvorbeifahrten in engen Bögen waren im Rahmen von PAAB erforderlich, um einerseits Hörproben für die Wahrnehmungstests in ausgewählten Immissionspositionen ableiten und andererseits einen Bezug zu Emissionsmessdaten aus den vorangegangenen Projekten BEGEL [1] und ESB [2] herstellen zu können. Im Folgenden werden die gewählten Messtellen und die verwendete Messkonfiguration beschrieben, ein Überblick über die erfassten Züge gegeben und auf die eingesetzte, automatische Erkennung auffälliger Bogengeräusche in den Schallemissionen, sowie die weitere Datenvorauswertung eingegangen.

2.1 Messstellen

Der Auswahl von drei geeigneten Messbögen lagen folgende, allgemeine Anforderungen zu Grunde:

- freie Schallausbreitung und geeignete Topographie (hinreichend ebenes Gelände über eine Länge von mindestens 50 m in zumindest einer Richtung)
- vernachlässigbar geringe Störgeräusche (beispielsweise durch Straßen- oder Flugverkehr)
- mittleres bis hohes Verkehrsaufkommen für hohe Anzahl an Vorbeifahrten
- verkehrende Zugtypen und Oberbaueigenschaften ähnlich wie bei den vorangegangenen Projekten BEGEL und ESB, um erhobenen Messdaten abgleichen zu können
- Bögen vorzugsweise im Großraum Wien, Niederösterreich, Burgenland und der Nordsteiermark, da die Witterungsabhängigkeit der Messungen zeitliche Flexibilität und überschaubare Anreisezeiten erfordert
- abwechselnde Messseite, sodass zumindest bei einem Bogen die Immissionen auf der Bogeninnen- und bei einem Bogen auf der Bogenaußenseite erfasst werden
- ausreichend gute Zugänglichkeit für raschen Zu- und Abtransport des Messequipments bei tageweisen Messungen

Nachdem anhand von Luftbildern zunächst 17 potentiell geeignete Bögen identifiziert wurden, konnte mit Hilfe von Experteneinschätzungen über den jeweils vorhandenen, groben Verkehrsmix die Auswahl auf 12 Bögen reduziert werden. In einem nächsten Schritt wurde jeder dieser Bögen hinsichtlich der topographischen Gegebenheiten besichtigt und der tatsächliche Verkehrsmix, sowie die Neigung der vorbeifahrenden Züge auffällige Bogengeräusche zu erzeugen, durch Beobachtungen über einen Zeitraum von jeweils

mehreren Stunden abgeschätzt. Es zeigte sich, dass keiner der vorausgewählten Bögen ideale Rahmenbedingungen in Bezug auf die freie Schallausbreitung (selbst bei geringem Anstieg oder Abfall des Geländes bis zum 50 m Messpunkt) und hinsichtlich vergleichbarer Oberbaueigenschaften und vergleichbarem Verkehrsmix gegenüber den Messstellen der vorangegangenen Projekte BEGEL und ESB bot. Mit Hilfe einer Prioritätenreihung, bei welcher ein hohes Verkehrsaufkommen und eine Vergleichbarkeit mit den vorangegangenen Projekten niedriger gewichtet wurde, wurden die drei bestgeeignetsten, engen Bögen mit Radien von rund 300 m bis 330 m gewählt: Der Messbogen an der zweigleisigen Südbahn in Peugen bietet dabei das höchste Verkehrsaufkommen. Demgegenüber besteht bei beiden weiteren Bögen nahe Platt und nahe Zellerndorf zwar ein geringeres Verkehrsaufkommen ohne Fernverkehrszüge. Jedoch liegen diese beiden Bögen an der gleichen, eingleisigen Strecke (Nordwestbahn), weshalb ein vergleichbarer Verkehrsmix bzw. hinsichtlich der Personenzüge gleiches Wagenmaterial zu erwarten war und ggf. direkte Vergleiche gezogen werden können. Eine Zusammenstellung der wesentlichen Oberbaueigenschaften der Messbögen und der Position der Messquerschnitte finden sich in Tab. 2-1.

Innerhalb eines geringen zeitlichen Abstands von ≤ 3 Monaten zu den Schallemissions- und -immissionsmessungen wurden die akustischen Oberbauparameter Schienenrauheit und Gleisabklingrate (track decay rate, TDR) an den Messquerschnitten durch den Projektpartner psiacoustic messtechnisch erhoben. Für ersteres wurde ein mobiles

Messstelle	Peugen	Platt	Zellerndorf
Strecke	Südbahn	Nordwestbahn	Nordwestbahn
Position (Messquerschnitt)	km 179,7	km 68,9	km 75,1
Breitengrad (Messquerschnitt)	47,285713	48,669906	48,707597
Längengrad (Messquerschnitt)	15,312763	15,986950	15,964147
Messgleis / Gleisanzahl	1 / 2	1 / 1	1 / 1
Bogentyp	Linksbogen	Rechtsbogen	Rechtsbogen
Immissionsmessungen	Bogeninnenseite	Bogenaußenseite	Bogenaußenseite
Bogenradius	331,7 m	298,7 m	304,0 m
Überhöhung	140 mm	153 mm	146 mm
Neigung (Fahrtrichtung)	-4 ‰ (Graz)	-8,96 ‰ (Retz)	6,74 ‰ (Retz)
Oberbautyp	Schotterbett	Schotterbett	Schotterbett
Schwellentyp	Beton, L2-besohlt	Beton, 19	Beton, L1
Schiene	60E1	49E1	54E2
zulässige Geschwindigkeit	80 km/h	80 km/h	80 km/h

Tab. 2-1: Überblick über gewählte Messbögen und deren Eigenschaften

Schienenrauheitsmessgerät des Typs ODS TRM-04 (Seriennummer 131) eingesetzt, welches über die Länge von 1,2 m das Höhenprofil der Schienen tastend erfasst. Entsprechend der Messnorm ÖNORM EN 15610:2019 [25] wurden zur Bestimmung der Schienenrauheit je Messspur 6 Einzelmessungen innerhalb von 15 m durchgeführt und deren berechnete Rauheitsspektren energetisch gemittelt. Als Folge der Referenzbreite wurden je Schiene drei Messspuren aufgenommen, wobei durch die Sehnenstellung des Messgeräts ein Versatz in Querrichtung von rund 0,6 mm auftritt. Die Schienenrauheiten der Messspuren, sowie die je Schiene energetische gemittelten Rauheitsspektren sind in den oberen drei Diagrammen der Abb. 2-1 dargestellt (da bei der Außenschiene im Messbogen Platt eine Messspur außerhalb des Fahrspiegels lag und signifikant niedrigere Rauheitsbandpegel aufweist, werden bei dieser Schiene nur zwei Messspuren betrachtet). Im untersten Diagramm der Abb. 2-1 sind zudem alle energetisch gemittelten Schienenrauheitsspektren einander gegenübergestellt. Bei den Messstellen Peugen und Zellerndorf liegen die Rauheiten der Innenschiene im mittleren und langwelligen Bereich deutlich über jenen der Außenschiene, während bei der Messstelle Platt auch die Außenschiene partiell die höheren Rauheitspegel zeigt. Bei allen drei Messstellen wird in diesem Wellenlängenbereich das obere Grenzspektrum der ÖNORM EN ISO 3095:2014 [26] – meist deutlich – überschritten. Im kurzwelligen Bereich liegen die Rauheitsspektren hingegen durchwegs unterhalb dieses Grenzspektrums und unterscheiden sich zwischen den Schienen und zwischen den Messstellen nur marginal. Wird davon ausgegangen, dass für das Rollgeräusch vor allem die höhere der beiden Schienenrauheiten maßgebend ist, so ist die Messstelle Zellerndorf hervorzuheben. Denn sie weist im Wellenlängenbereich zwischen 16 mm und 160 mm durchgehend die höchsten Rauheitspegel auf, die zum Teil um mehr als 10 dB über den Rauheiten der anderen Bögen liegen. Eine solche Rauheitserhöhung führt bei Fahrzeugen mit glatten Rädern üblicherweise dazu, dass das Rollgeräusch im unteren und mittleren Frequenzbereich (bei 80 km/h rund 100 Hz bis 1 kHz) über dem Rollgeräusch der anderen Bögen liegen wird.

Die Schienenabklingrate wurde mittels Impulshammermethode bestimmt. Konkret kamen folgende Komponenten zum Einsatz:

- ein Impulshammer 086D05 der Firma PCB (Seriennr. 31723, Medium Impact Cap / Metal),
- ein Beschleunigungsaufnehmer 624B61 der Firma PCB, (Seriennr. 8084),
- ein 8-Kanal Analysesystem MEDA der Fa. Wölfel (Seriennummer 08/695-2, Softwareversion 8.102) und
- ein Schwingungskalibrator VC10 der Firma Metra Meß- und Frequenztechnik in Radebeul e.K. (MMF, Seriennummer 960202)

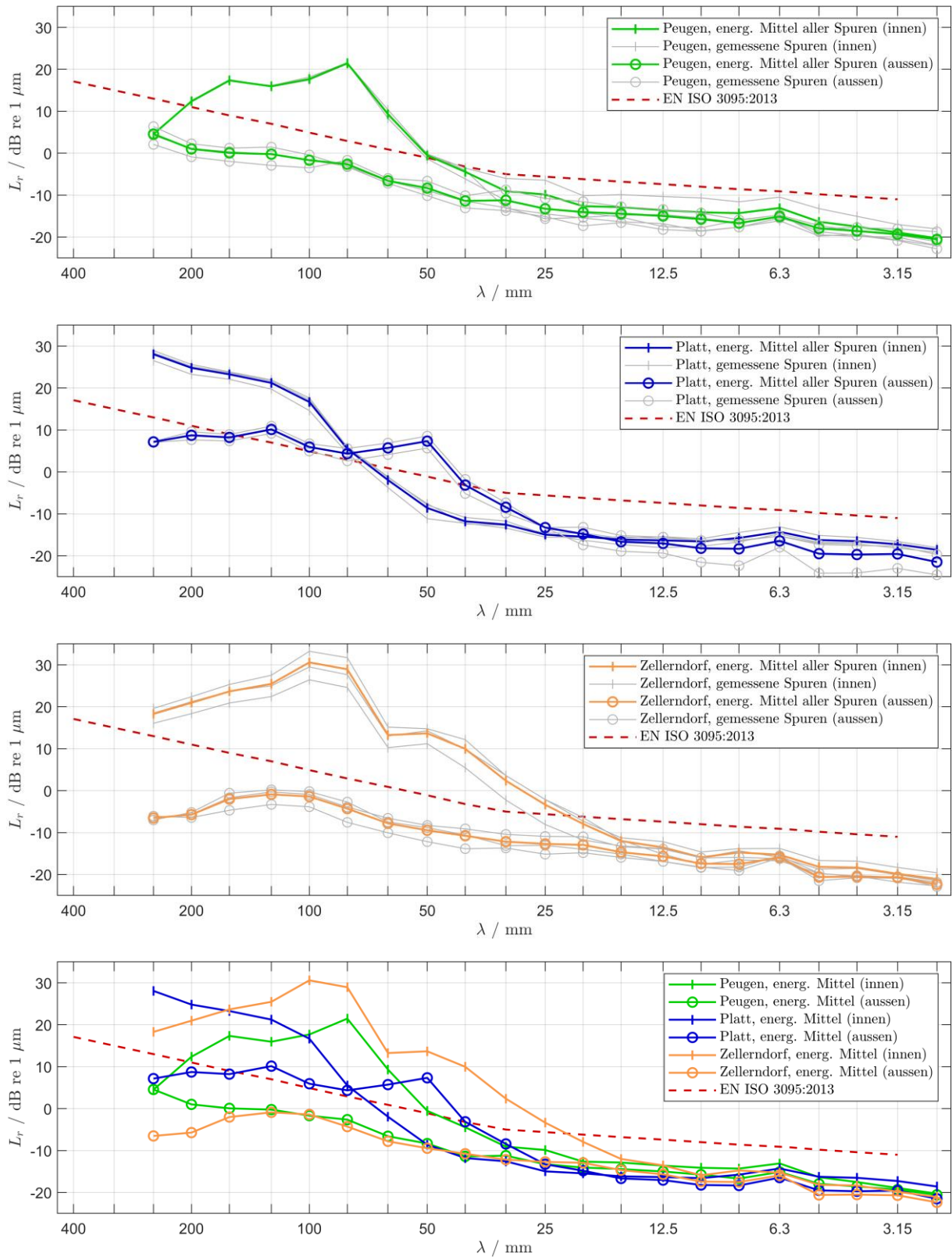


Abb. 2-1: Überblick der akustischen Schienenrauheiten von Innen- und Außenschienen für die Messstellen (von oben nach unten) Peugen, Platt und Zellerndorf, sowie einer Gegenüberstellung der Rauheiten aller Messstellen

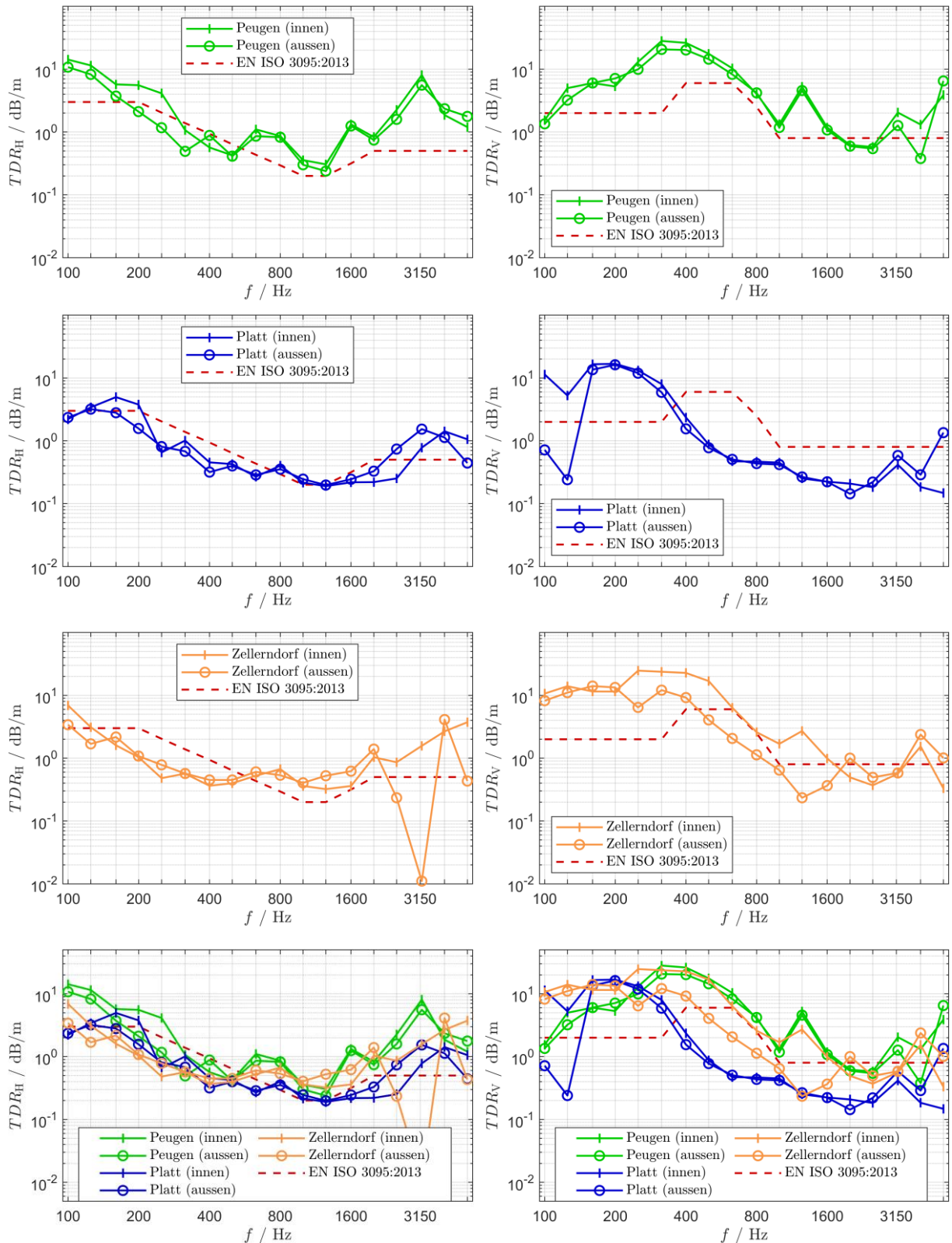


Abb. 2-2: Überblick der horizontalen Gleisabklingraten (linke Spalte) und der vertikalen Gleisabklingraten (rechte Spalte), jeweils von Innen- und Außenschienen für die Messstellen (von oben nach unten) Peugen, Platt und Zellerndorf, sowie einer Gegenüberstellung der Abklingraten aller Messstellen

Die aus den Beschleunigungsmessdaten berechneten Gleisabklingraten an den drei Messstellen sind in den oberen drei Diagrammzeilen der Abb. 2-2 dargestellt (horizontale Abklingraten in der linken und vertikale Abklingraten in der rechten Spalte). Anhand der Gegenüberstellung der Abklingraten in der untersten Diagrammzeile wird ersichtlich, dass die horizontalen Abklingraten der Messstellen einander ähneln und im unteren Frequenzbereich (≤ 500 Hz) das untere Grenzspektrum der ÖNORM EN ISO 3095:2014 [26] zum Teil geringfügig unterschreiten. Bei den vertikalen Gleisabklingraten ergeben sich indessen im mittleren und oberen Frequenzbereich zwischen den Messstellen klare Unterschiede: während Peugen das Grenzspektrum noch weitgehend erfüllt, wird es in Zellerndorf bereits mäßig und in Platt deutlich unterschritten. Anders als bei der Schienenrauheit kann daraus aber kaum (qualitativ) auf dadurch begründete Unterschiede in den Rollgeräuschen geschlossen werden.

2.2 Messkonfiguration

Primäres Ziel der Messungen war die Geräuschsituation von Zugsfahrten in engen Bögen in nahegelegenen Immissionspunkte zu erfassen, um daraus Hörsamples für Wahrnehmungstests zu erstellen. Wie in der Überblicksdarstellung in Abb. 2-3 zu erkennen ist, wurden als Entfernungen für die Mikrofonmessungen 25 m (M3) und 50 m (M4) zur

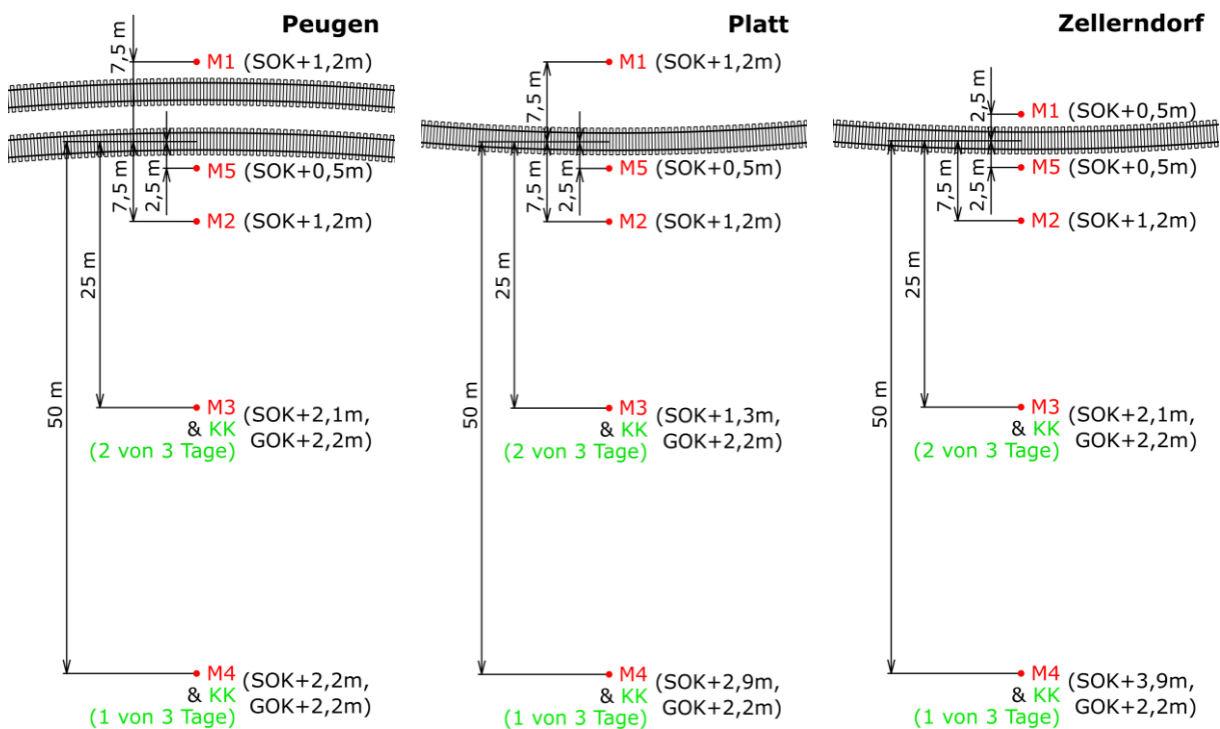


Abb. 2-3: Überblick über die Abstände der Mikrofonmesspunkte M1 bis M5 und des Kunstkopfs KK zur Gleisachse in den drei Messbögen Peugen, Platt und Zellerndorf (von links nach rechts), inkl. Angabe der jeweiligen Höhen über der Schienenoberkante (SOK) bzw. bei den Immissionsmesspunkten M3 und M4 über der Geländeoberkante (GOK)

Gleisachse gewählt, um die Situation von Anrainern von Bahnstrecken nachzubilden. Für einen Vergleich zu den in den Projekten BEGEL und ESB aufgetretenen, auffälligen Bogengeräuschen wurden zusätzlich Messungen im Standardemissionsmesspunkt in 7,5 m Entfernung (M2) und für etwaige, genauere Zuordnung auffälliger Geräusche zu den Fahrzeugachsen Messungen nahe dem Gleis in 2,5 m Entfernung (M5) durchgeführt. Um Emissionsunterschiede zwischen der Bogeninnen- und -außenseite beurteilen zu können, waren die Messungen im Standardemissionsmesspunkt in 7,5 m grundsätzlich auf beiden Seiten der Bögen (M1 und M2) vorgesehen. Jedoch ließ der Bewuchs beim Messbogen Zellerndorf an der Bogeninnenseite eine Messung in diesem Punkt nicht zu, weshalb hier der Messabstand verkürzt werden musste: um zumindest einem Vergleich mit M5 zu erlauben, wurde in Zellerndorf für M1 daher ein Abstand von 2,5 m gewählt. Aufgrund eines Fehlers wurde am 1. Messtag in Peugen das Mikrofon M1 um 80 cm zu Nahe und damit in einer Entfernung von lediglich 6,7 m angeordnet, weshalb dieser Messtag bei Vergleichen mit M2 ausgeklammert wird. Die Messhöhen betragen bei den Standardmesspunkten M1 und M2 1,2 m und beim gleisnahen Messpunkt M5 0,5 m über der Schienenoberkante (SOK). Die Messhöhen der Immissionsmesspunkte M3 und M4 orientieren sich hingegen an dem umliegenden Gelände und wurden mit 2,2 m über der Geländeoberkante (GOK) vergleichsweise groß gewählt, um akustische Beeinflussungen durch den Boden gering zu halten. Aufgrund unterschiedlicher Geländeneigungen zwischen den drei Messbögen ergeben sich verschiedene Höhen der Mikrofone M3 und M4 gegenüber der Schienenoberkante. Neben den Mikrofonmessungen wurden die Schallimmissionen auch durch ein Kunstkopfmesssystem KK binaural erfasst, um später möglichst gehörgerechte Hörproben erzeugen zu können. Da nur ein Kunstkopfmesssystem zur Verfügung stand, wurde es tageweise bei den Messpunkten M3 und M4 eingesetzt: bei jedem Messbogen wurde es an zwei der drei Messtage mit einem Abstand von rund 1 m neben Messpunkt M3 und an einem Messtag neben dem Messpunkt M4 platziert. Die Höhe der Mikrofone in den Ohren des Kunstkopfs wurde ident zu den Mikrofonhöhen (2,2 m über GOK) gewählt. Die Detektion der Zeitpunkte, an welchen die Achsen der Fahrzeuge den Messquerschnitt passieren, erfolgte mit einer Laserlichtschranke, die unmittelbar über den Schienen quer zur Fahrtrichtung angeordnet war. Mit Hilfe einer zweiten Laserlichtschranke, die sich in einem definierten Abstand zur ersten Lichtschranke befand, konnten zudem Achsabstände und Achsgeschwindigkeiten bestimmt werden. Des Weiteren wurden von den Zugvorbeifahrten Videoaufnahmen angefertigt, um neben der manuellen Protokollierung der Zugkategorien oder Fahrzeugtypen eine zusätzliche Prüfmöglichkeit zur Verfügung zu haben.

Das akkubetriebene Gesamtmesssystem setzte sich somit im Wesentlichen aus folgenden Komponenten zusammen:

- 1/2" CCP Freifeld-Mikrofon-Sets mit TEDS (G.R.A.S), jeweils bestehend aus Mikrofon 40AE und Vorverstärker 26CA (Seriennummern M1: 181735, M2: 195125, M3: 216621, M4: 319662 und M5: 319463)
- 24-Kanal ICP[®]-Modul DIC24 (HEAD acoustics)
- Kunstkopf HMS IV (HEAD acoustics)
- HD-Videokamera V727 (Panasonic)
- akustischer Kalibrator SV 30A der Firma Svantek (Seriennummer 29132)

Alle akustischen Aufnahmen erfolgten mit einer Abtastfrequenz von 48 kHz. Bei den Kunstkopfaufnahmen wurde zur Verringerung etwaiger Windgeräusche der Windschutz HMS II verwendet und der integrierte 22 Hz Hochpassfilter 3. Ordnung aktiviert. Da bei Zugvorbeifahrten im Allgemeinen zahlreiche Schallquellen vorhanden sind und sich diese aus Sicht der Immissionsmesspunkte in unterschiedlichen Raumrichtungen befinden, wurde bei Kunstkopfaufnahmen der richtungsunabhängige Entzerrfilter „ID“ verwendet.

2.3 Messungen

Bei jedem der drei Messbögen wurden akustische Messungen an drei Tagen mit trockenen Witterungsbedingungen und geringem Wind durchgeführt. Aufgrund der Zeiten für Auf- und Abbau des Messequipments betrug die aktive Messzeit je Tag meist zwischen 8 und 10 Stunden. So konnten in jedem der Bögen in Summe die Emissionen von jeweils über 60 Zugvorbeifahrten gemessen werden. Ein Überblick über die Eckdaten der Messungen wird in Tab. 2-2 gegeben.

Eine Aufschlüsselung der gesamten Züge nach Zugkategorien und den jeweiligen, mittleren Geschwindigkeiten ist getrennt für die Messbögen in Abb. 2-4 dargestellt. Da die Messbögen nahe Platt und Zellerndorf Abschnitte der gleichen Strecke sind, ist auch bei beiden die Doppelstockzüge (80-33) mit Abstand die häufigsten, verkehrende Zugskategorie. Güterzüge (GZ) verkehren hier bereits deutlich seltener ($\lesssim 20$ % der Doppelstockzüge), wobei sie in Zellerndorf mit einer mittleren Geschwindigkeit v_{mean} von 68,7 km/h im Mittel 10 % langsamer den Messquerschnitt passierten als im Bogen bei Platt. Im Messbogen in Peugen verkehrten am Häufigsten hingegen Cityjets des Typs Desiro Mainline (CJ), sowie mit etwa der halben Häufigkeit Railjets-Reisezüge (RJ), Güterzüge (GZ) und Reisezüge der allgemeinen Klasse (RZ-mx), welche verschiedene Fahrzeugtypen bzw. Personenzugtypen (CityShuttle, Nightjet, etc.) umfassen können.

		Peugen	Platt	Zellerndorf
1. Messtag (KK in 25 m)	Datum	28. Aug. 2018	6. Sept. 2018	19. Sept. 2018
	Messdauer	8,5 h	8,9 h	4,6h
	Züge	17	24	13
	$v_{\text{mean}} (\sigma)$	79,5 km/h (1,3 km/h)	77,5 km/h (5,7 km/h)	75,3 km/h (8,0 km/h)
2. Messtag (KK in 50 m)	Datum	10. Sept. 2018	13. Sept. 2018	20. Sept. 2018
	Messdauer	8,3 h	9,9 h	10,2 h
	Züge	22	26	29
	$v_{\text{mean}} (\sigma)$	77,5 km/h (2,2 km/h)	78,3 km/h (3,3 km/h)	76,4 km/h (7,0 km/h)
3. Messtag (KK in 25 m)	Datum	11. Sept. 2018	17. Sept. 2018	27. Sept. 2018
	Messdauer	7,3 h	10,3 h	9,1 h
	Züge	27	30	26
	$v_{\text{mean}} (\sigma)$	77,3 km/h (5,5 km/h)	77,1 km/h (2,5 km/h)	75,0 km/h (5,3 km/h)
Summe	Messdauer	24 h	29,2 h	23,9 h
	Züge	66	80	68
	$v_{\text{mean}} (\sigma)$	77,9 km/h (3,9 km/h)	77,6 km/h (3,9 km/h)	75,6 km/h (6,5 km/h)

Tab. 2-2: Überblick über Messzeiten, sowie Anzahl und mittlere Geschwindigkeiten der erfassten Züge (aufgeschlüsselt nach Messtage und als Summe über alle drei Messtage)

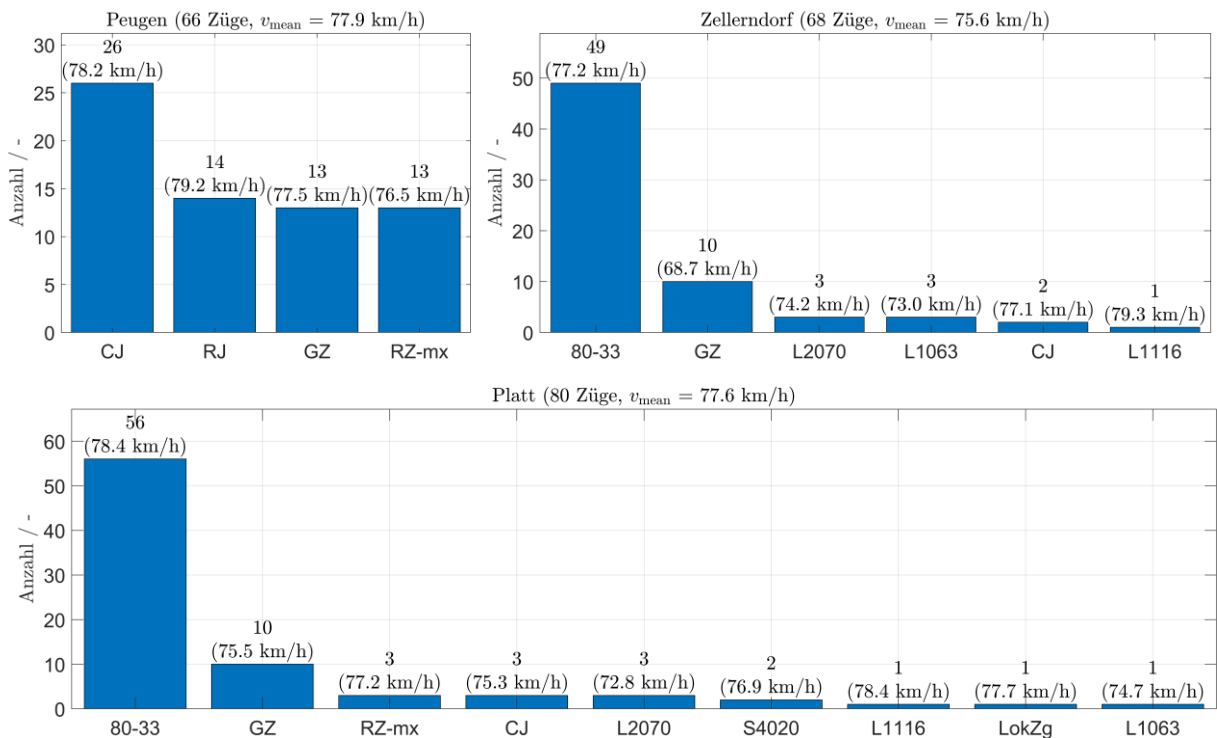


Abb. 2-4: Aufschlüsselung der erfassten Züge nach Zugkategorien und deren mittlere Geschwindigkeiten für den Messbogen in Peugen (oben, links), Platt (unten) und Zellerndorf (oben, rechts)

In Abb. 2-5, Abb. 2-6 und Abb. 2-7 sind das Gelände in den Messquerschnitten (jeweils obere Bilder), Detailausschnitte der Emissionsmessungen (jeweils unten, links) und verschiedene Messdetails (jeweils unten, rechts) dargestellt. Der Messquerschnitt in Peugen befindet sich, mit Ausnahme eines Grabens auf der Bogeninnenseite (siehe Abb. 2-5 unten, links) in ebenem Gelände mit niedrigem Bewuchs (Bewuchshöhe unter 1 m). Die beiden Bögen nahe Platt und Zellerndorf sind hingegen in leichter Dammlage und das Gelände steigt in beiden Querschnitten geringfügig hin zum entferntesten Messpunkt M4 kontinuierlich an. So liegt das Gelände beim Bogen Platt bei Messpunkt M4 rund 0,7 m und beim Messbogen Zellerndorf rund 1,7 m über der Schienenoberkante (vgl. Abb. 2-3). In beiden Querschnitten waren die an der Bahnstrecke angrenzenden Felder geackert und damit nahezu frei von Bewuchs.

Das Messequipment wurde in allen Querschnitten von einem Messplatz bedient, der in einem Abstand von mehreren Metern hinter dem entferntesten Messpunkt M4 angeordnet war und damit die freie Schallausbreitung zwischen Bahnstrecke und Messpunkten nicht

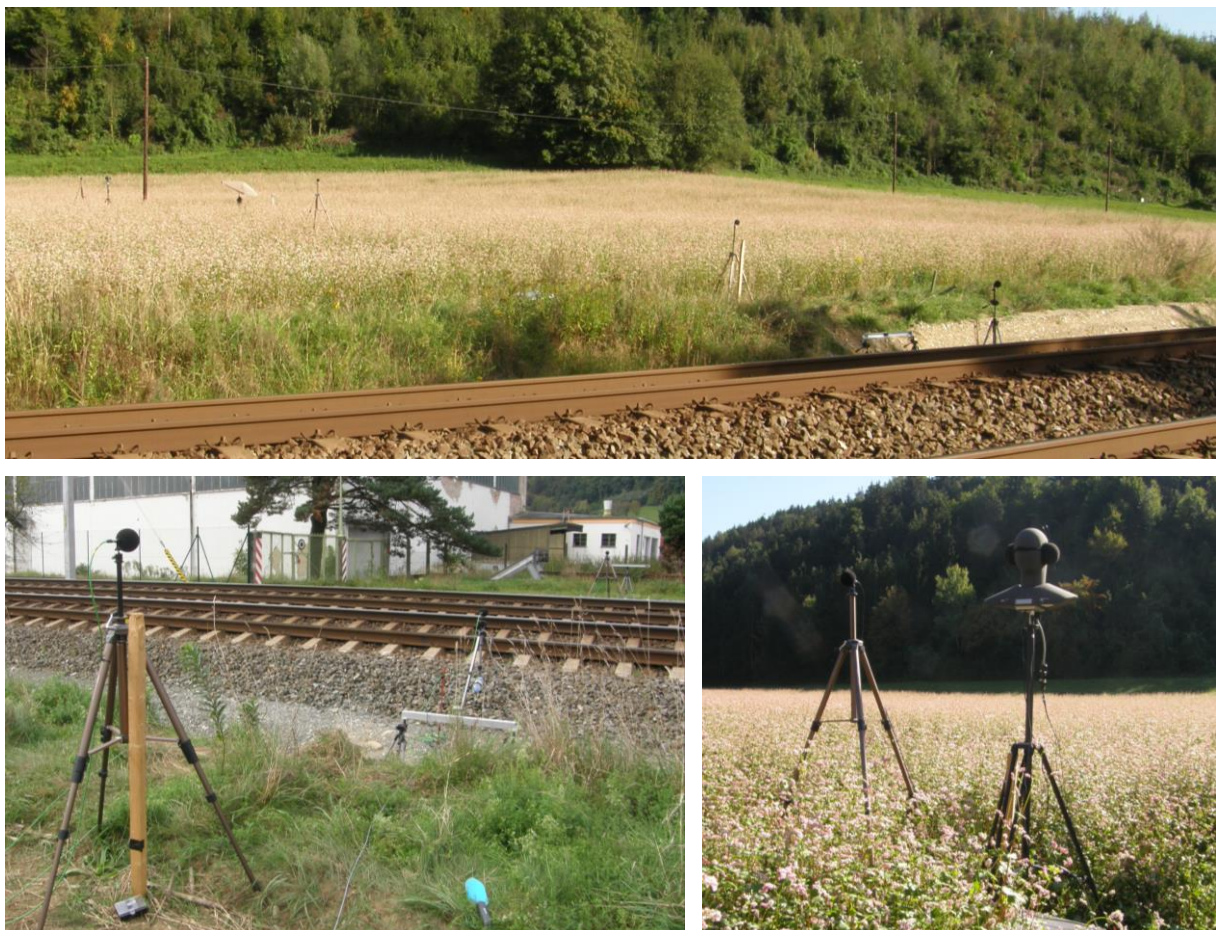


Abb. 2-5: Messbogen Peugen – ebenes Gelände mit niedrigem Bewuchs (< 1 m) im Bereich der akustischen Messungen (oben), Emissionsmessungen und Doppellaserlichtschranke mit Graben neben dem Messgleis (unten links) und Immissionsmessungen mittels Messmikrofon und Kunstkopf (unten rechts)



Abb. 2-6: Messbogen Platt – Dammlage der eingleisigen Strecke und hin zu entfernteren Messpunkten leichter Geländeanstieg ohne Bewuchs im Bereich der akustischen Messungen (oben), Emissionsmessungen und Doppellaserlichtschranke (unten links) und Messplatz hinter entferntestem Messpunkt mit Videokamera (unten rechts)



Abb. 2-7: Messbogen Zellerndorf – Dammlage der eingleisigen Strecke und hin zu entfernteren Messpunkten mäßiger Geländeanstieg ohne Bewuchs im Bereich der akustischen Messungen (oben), gleisnahe Emissionsmessungen und Doppellaserlichtschranke (unten links) und Reflektoren der Lichtschranken mit Laserpunkt auf rechtem Reflektor (unten rechts)

beeinträchtigte. Zudem wurde darauf geachtet, dass beim Messplatz keine Flächen vorhanden waren, die nennenswerte akustische Reflexionen zu den Messpunkten hervorrufen hätten können.

2.4 Erkennung auffälliger Bogengeräusche

Die Gesamtanzahl der im vorliegenden Projekt erfassten 214 Züge würde zwar eine manuelle Beurteilung über das Vorliegen von akustischen Auffälligkeiten in den Schallemissionen zulassen. Um jedoch eine Vergleichbarkeit der Eigenschaften der Schallemissionen zu den Vorprojekten BEGEL und ESB gewährleisten zu können, wurde der in BEGEL entwickelte und in ESB adaptierte Erkennungsansatz für auffällige Bogengeräusche grundsätzlich verwendet. Im Wesentlichen sind dabei folgende Eckpunkte und Anpassungen zu nennen (für Details des Erkennungsalgorithmus wird auf die Ergebnisberichte der beiden Projekte BEGEL [1] und ESB [2] verwiesen), mit der für die vorliegenden Messdaten aus BEGEL, ESB und PAAB die Erkennung erneut durchgeführt wurde:

- Die Erkennung von akustischen Auffälligkeiten erfolgt anhand der Aufzeichnungen im Standardemissionsmesspunkt M2 (7,5 m Entfernung und 1,2 m über SOK).
- Die Bewertung basiert auf Kurzzeitspektren, die mittels einer Fast Fourier Transformation (Fensterlängen von 4096 Punkten, 50 % Überlappung, Fensterfunktion Hanning) berechnet wurden und damit, abhängig von der Abtastrate f_s alle 64 ms (BEGEL mit $f_s = 32$ kHz) bzw. 41 ms (ESB mit $f_s = 50$ kHz und PAAB mit $f_s = 48$ kHz resampelt auf 50 kHz) zur Verfügung standen.
- Zur Beurteilung breitbandiger Auffälligkeiten wird der arithmetische Mittelwert der Bandpegel für die Terzbänder von 8 kHz bis 12,5 kHz herangezogen. Für binäre Entscheidungen liegt der Grenzwert bei 70 dB.
- Das Vorhandensein tonaler Auffälligkeiten im Frequenzbereich von 0,8 kHz (bzw. 1 kHz für Schnellbahnen der Baureiche 4020) bis 6,3 kHz und hochfrequent tonaler Auffälligkeiten von 8 kHz bis 12,5 kHz wird grundsätzlich anhand der Bandpegel einzelner oder zweier benachbarter Terzbänder und der mittleren Pegeldifferenz zu den Nachbarbänder bewertet (Grenzwert für Pegelwert 80 dB und für mittlere Pegeldifferenzen 10 dB). Im Gegensatz zu BEGEL und ESB wird bei zwei erhöhten, benachbarten Terzen nicht der energetische Mittelwert, sondern die energetische Summe beider Bandpegel betrachtet, da dadurch eine gleichbleibende Sensitivität der Erkennung für tonalen Komponenten mit unterschiedlichen Frequenzen über den gesamten, betrachteten Frequenzbereich sichergestellt ist. Gleichzeitig fällt allerdings die Immunität

gegenüber Fehlerkennungen von schmalbandigen, über zwei benachbarte Terzen verteilten Geräuschkomponenten geringfügig ab. Ein Vergleich der Erkennungen bei BEGEL und ESB zeigt, dass der Anteil tonal auffälliger Züge bezogen auf die Gesamtanzahl an Zügen in der Regel um $\leq 0,6\%$ steigt bzw. der Anteil von auffälligen Zügen (tonal, tonal hochfrequent oder breitbandig auffällig) sich nicht signifikant ändert (0,0 %). Nur bei der Messstelle in Eichgraben ist ein Plus von 1,4 % tonal auffälliger Züge bzw. ein Plus von 1,3 % auffälliger Züge zu verzeichnen. Bei einem Teil dieser zusätzlichen Erkennungen wird als Ursache eine schmalbandige Erhöhung der Schienenrauheiten bei einer Wellenlänge von 25 mm vermutet. Da es sich jedoch in absoluten Zahlen ausgedrückt um weniger als 10 der 16 zusätzlich erkannten Züge handelt, wurde von einer gesonderten Behandlung dieser Züge für die nachfolgenden Auswertungen abgesehen.

2.5 Datenaufbereitung und -vorauswertung

Im Gegensatz zu den vorangegangenen Projekten wird in vorliegendem Projekt nicht zwischen Regenphasen und trockenen Phasen unterschieden. Hintergrund dieser Differenzierung war bei den Projekten BEGEL und ESB, dass einerseits den Analysen verschiedener Einflüsse möglichst konstante Rahmenbedingungen zugrunde liegen sollten. Andererseits erlauben ermittelte schalltechnische Anpassungswerte für trockene Phasen – die Kenntnis der mittleren, reduzierenden Wirkung durch Regen vorausgesetzt – eine Anpassung auf unterschiedliche, durchschnittliche Niederschlagsverhältnisse. Da vorliegendes Projekt keine Analyse von Einflüssen umfasst und für die die Auswahl und Erstellung von Stimuli der Wahrnehmungstests, aber auch für exemplarische Abschätzungen von Anpassungswerten möglichst realitätsnahe Ergebnisse vorteilhaft erscheinen, wurde dieser Paradigmenwechsel gewählt.

Des Weiteren stützen sich die nachfolgenden Auswertungen von Messdaten nicht auf eine zugsbasierte Erkennung akustischer Auffälligkeiten, sondern es werden primär die im Unterkapitel 2.4 erwähnten Beurteilungen der Zeitpunkte aller Kurzzeitspektren im Standardemissionsmesspunkt in 7,5 m Entfernung herangezogen. Gemeinsam mit den akustischen Eigenschaften der Kurzzeitspektren bilden sie die Datengrundlage, aus welchen folgende Vorauswertungen für alle Zugsvorbeifahrten einheitlich durchgeführt wurden.

2.5.1 Bestimmung von Ereignissen

Zur Charakterisierung der mittleren Eigenschaften von akustischen Auffälligkeiten wird in den Zeitverläufen, die sich aus den Beurteilungen der Kurzzeitspektren ergeben, zwischen

Einzelereignissen differenziert. Dieser Ansatz zielt daher vor allem auf tendenziell kontinuierlich auftretende Auffälligkeiten ab. Als Separationskriterium zwischen Ereignissen eines Zuges wird ein Zeitabstand gewählt, der einem örtlichen Abstand von 10 m entspricht und der somit in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit variiert. Treten mehrere akustisch auffällige Kurzzeitspektren im Zeitverlauf – auch mit Unterbrechungen – hintereinander auf, so werden diese einem Ereignis zugeordnet, sofern die Unterbrechungen unterhalb des Separationskriteriums liegen.

Die Ereignisse werden ausschließlich bei Zugsvorbeifahrt definiert, welche 13 m vor der ersten Achse beginnt und 13 m nach der letzten Achse endet. Der Wert von 13 m (entlang des Gleises) wurde gewählt, da sich daraus ein Abstand zum Standardemissionsmesspunkt von 15 m und damit eine Verdopplung des Normalabstandes zum Gleis ergibt. Weisen die Aufzeichnungen keine ausreichenden, zeitlichen Überhänge vor dem Detektionszeitpunkt der ersten Achse oder nach dem Detektionszeitpunkt der letzten Achse auf, wird die Zugsvorbeifahrt lediglich vom Aufzeichnungsbeginn oder bis zum Aufzeichnungsende definiert (beispielsweise wurden die Messungen im Projekt BEGEL erst unmittelbar vor dem Passieren der ersten Zugachse gestartet, weshalb es hier zu Verkürzungen der betrachteten Zeitbereichen im Bereich von rund 0,5 s bis 1 s kommt).

Nach der Ereignisseparation werden innerhalb der Einzelereignisse Kenngrößen anhand der dem Ereignis jeweils zugeordneten, auffälligen Kurzzeitspektren berechnet. Da Kurvenquietschen gegenüber dem Kurvenkreischen in der Literatur weniger intermittierend beschrieben wird und sich dies mit den Erfahrungen der Autoren deckt, werden vor allem tonale Auffälligkeiten anhand solcher Ereigniskenngrößen (Median und 95 % Perzentile der erhöhten Bandpegeln und deren mittlere Frequenz innerhalb eines Ereignisses), sowie der jeweiligen Gesamtdauer der Auffälligkeiten bewertet.

2.5.2 Betrachtung von Ausschnitten konstanter Länge

Die für den Spurkranzanlauf kennzeichnenden, breitbandigen akustischen Auffälligkeiten zeichnen sich durch vergleichsweise hohe, zeitliche Fluktuationen aus, weshalb eine Separation in Einzelereignisse nicht zielführend ist. Für die Bewertung wird daher für jeden Zeitpunkt eines Kurzzeitspektrums der Zugsvorbeifahrt eine 4 s Umgebung (± 2 s) definiert. Innerhalb dieser 4 s Samples werden kurze Lücken mit einer Dauer < 100 ms zwischen breitbandigen Auffälligkeiten ebenfalls den auffälligen Zeitbereichen zugeordnet. Diese Zeitdauer dieses „Lückenschlusses“ wurde in Anlehnung an die Zeitkonstante der Zeitbewertung fast (125 ms) gewählt.

Für alle Segmente werden einerseits die energetisch gemittelten Terzbandspektren berechnet. Andererseits werden die Anzahl an zusammenhängenden, breitbandigen Auffälligkeiten, sowie die Anteile an zusammenhängenden unauffälligen Bereichen (jeweils nach Lückenschluss) ermittelt.

2.5.3 Vergleich auffälliger Bogengeräusche auf Bogeninnen- und -außenseite

Zur Untersuchung etwaiger Unterschiede zwischen den akustischen Auffälligkeiten an der Bogeninnen- und -außenseite, werden jeweils die symmetrisch angeordneten Mikrofone M1 und M2 (Peugen und Platt) bzw. M1 und M5 (Zellerndorf) betrachtet. Messungen am ersten Messtag in Peugen, bei welchen, wie in Kap. 2.3 erwähnt, das Mikrofon M1 um rund 80 cm zu nahe zum Messgleis angeordnet war, sowie die ersten 8 Zugsvorbeifahrten am ersten Messtag in Platt, bei welchen das Signal des Mikrofons M1 nicht aufgezeichnet wurde, werden von den Vergleichen ausgenommen.

Zur Bewertung der Unterschiede wird die Menge an Kurzzeitspektren während der Zugsvorbeifahrten, jeweils definiert als Bereich beginnend bei 2,5 m vor der ersten Achse bis 2,5 m nach der letzten Achse, herangezogen. Breitbandige und tonale Auffälligkeiten in diesen Spektren werden grundsätzlich mit der in Unterkapitel 2.4 beschriebenen Erkennung für beide Bogenseiten getrennt identifiziert. Dem reduzierten Abstand der Mikrofone in Zellerndorf wird durch eine Adaption der absoluten Grenzwerte von 70 dB für die Bewertungsgröße der breitbandige Auffälligkeiten und von 80 dB für die Beurteilung erhöhter Bandpegel von tonalen Auffälligkeiten Rechnung getragen, indem als grobe Näherung von einer Punktquelle ausgegangen und der Grenzwert entsprechend der Pegeländerung bei Abstandsänderung um folgenden Wert erhöht wird.

$$\Delta L_{\text{thresh}} = 20 \cdot \lg\left(\frac{7,5 \text{ m}}{2,5 \text{ m}}\right) = 9,5 \text{ dB}$$

Kurzzeitspektren beider Bogenseiten werden zum Vergleich von breitbandigen oder von tonalen Auffälligkeiten ausgewählt, wenn zumindest in einem der beiden Spektren die jeweilige Auffälligkeit erkannt wurde. Für jedes dieser Spektrenpaare wird die Differenz der jeweils betrachteten Bewertungsgröße unabhängig von der Messpunktbezeichnung stets als Subtraktion der Bewertungsgröße der Bogeninnenseite von der Bewertungsgröße der Bogenaußenseite gebildet:

- breitbandige Auffälligkeiten: Differenz $\Delta \bar{L}_{8-12\text{kHz, aussen-innen}}$ der arithmetischen Bandpegelmittelwerte für Terzbänder von 8 kHz bis 12,5 kHz.

- tonale Auffälligkeiten: Differenz $\Delta L_{i,\text{ausseu-innen}}$ der erhöhten Bandpegel, wobei im Falle von erkannten Auffälligkeiten auf beiden Bogenseiten, jeweils jenes Terzband (bzw. jene benachbarten Terzbänder) verwendet wird, in welchem die tonale Auffälligkeit vorhanden ist. Die in solchen Fällen möglichen Frequenzunterschiede der Auffälligkeiten auf beiden Bogenseiten beschränken sich in betrachtetem Datensatz auf höchstens eine Terz.

Die Verteilung der Differenzen werden in Anhang A.1 für breitbandige Auffälligkeiten (siehe Abb. A-1, Abb. A-3 und Abb. A-5) und in Anhang A.2 für tonale Auffälligkeiten (siehe Abb. A-7, Abb. A-9 und Abb. A-11) in Histogrammform dargestellt. Neben dem Überblick der Differenzen aller auffälliger Zeitpunkte während Zugsvorbeifahrten werden jeweils auch die Histogramme getrennt nach Bogenfahrtrichtung (links oder rechts) und getrennt nach Erkennungsseite (Bogeninnen- oder -außenseite) angeführt.

Zum Vergleich werden die Differenzen auch für die restlichen Zeitpunkte ohne eine identifizierte Auffälligkeit auf beiden Bogenseiten berechnet. Während bei breitbandigen Auffälligkeiten direkt die Bewertungsgröße $\Delta \bar{L}_{8-12\text{kHz},\text{ausseu-innen}}$ herangezogen werden kann, ist dies bei tonalen Auffälligkeiten ob der zwischen den Auffälligkeiten variierenden Frequenz nicht zielführend. Aus diesem Grund wird die Differenz $\Delta L_{0,8-6,3\text{kHz},\text{ausseu-innen}}$ der Pegel des gesamten Frequenzbereichs von 800 Hz bis 6,3 kHz, in welchem tonalen Auffälligkeiten betrachtet werden, dargestellt.

Tonale Auffälligkeiten wurden vergleichsweise selten erkannt, wodurch die statistische Aussagekraft der zugehörigen Histogramme stark beeinträchtigt ist. Zwar sind in Peugen zumindest noch rund 3,1 % der Zeitpunkte der Zugsvorbeifahrten tonal auffällig, in Platt und Zellerndorf sinkt dieser Wert auf 0,3 % bzw. 0,7 % ab. Der Vollständigkeit halber sind aber die Histogramme aller Messstellen im Anhang angeführt.

3 STIMULUSMATERIAL

3.1 Festlegung der Testbedingungen

In diesem Kapitel wird im Detail ausgeführt, welche Daten aus den Messungen in PAAB für den Wahrnehmungstest geeignet sind und welche Bedingungen, basierend auf bisherigen Untersuchungen und dem vorhandenen Datenmaterial, sinnvoll und möglich sind, um Aussagen über die Wahrnehmung von auffälligen Bogengeräuschen zu treffen. Folgende Punkte sind hierbei von besonderer Relevanz:

- Vorbeifahrten welcher Zugtypen sind in ausreichender Menge vorhanden
- Unterschiede zwischen den Messstellen Peugen, Platt und Zellerndorf
- Auswahl repräsentativer Referenzsamples für das reine Rollgeräusch
- Analyse der vorhandenen auffälligen Bogengeräusche
- Methoden um eine systematische Untersuchung der Auffälligkeiten zu ermöglichen

3.1.1 Messungen

An den drei Messstellen, welche im Zuge des Projektes PAAB gemessen wurden, ergaben sich folgende Zusammensetzung des Wagenmaterials:

- Peugen (Bruck-Graz)
 - Bogeninnenseite
 - Güterzüge (11/13), Railjet (14/14), Desiro (26/26), RZ-Mix (10/13)
- Platt (Hollabrunn-Retz)
 - Bogenaußenseite
 - Güterzüge (8/10), 80-33 (45/56), Desiro (2/3), RZ-Mix (2/3)
- Zellerndorf (Hollabrunn-Retz)
 - Bogenaußenseite
 - Güterzüge (4/10), 80-33 (36/49), Desiro (2/2)

Die Zahlen zeigen die Anzahl der Züge zwischen 75 und 82 km/h und die Gesamtanzahl. Die Einschränkung der Geschwindigkeit erfolgte aufgrund der Verteilungen in Abb. 3-1.

Der Vergleich mit dem Vorgängerprojekt BEGEL zeigt auch, dass in diesem Bereich auch Vorbeifahrten vorhanden sind (ausgenommen die Messstelle BEGEL-01) wobei die Geschwindigkeiten teilweise etwas höher sind. Daher wurden für spätere Vergleiche die Daten aus BEGEL in einem etwas größeren Geschwindigkeitsbereich (60 - 88 km/h) untersucht.

Die Fallzahlen beim Desiro sind außer in Peugen sehr gering. Beim Desiro müssen aber auch andere Dinge betrachtet werden. Einerseits gibt es hier die Unterscheidung von Einfach- und

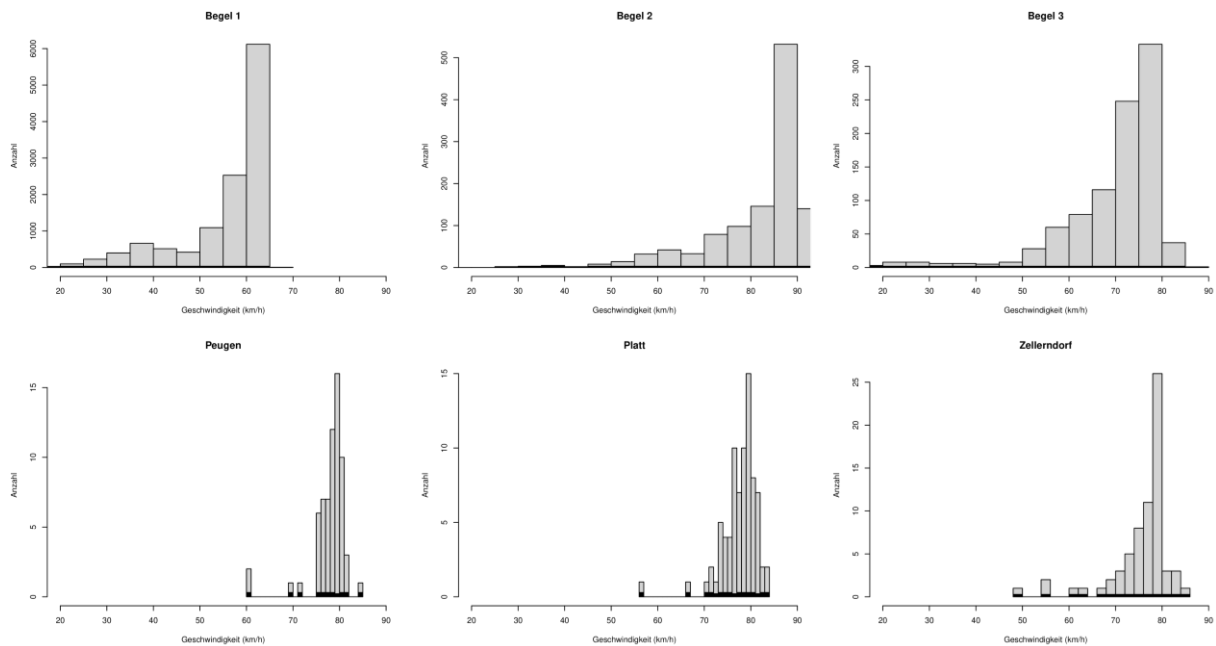


Abb. 3-1: Geschwindigkeitsverteilung der Vorbeifahrten nach Messstelle aus PAAB und BEGEL

Doppelgarnitur. Die Vorbeifahrtsdauer bei einer Einfachgarnitur beträgt nur ca. 3 Sekunden, einer Doppelgarnitur 6,5 Sekunden. Die unterschiedliche Länge führt dazu, dass diese beiden Varianten in einem Test als eigene Kategorien geführt werden müssten. Dadurch sind noch weitere Einschränkungen vorhanden:

- In Peugen waren nur 2 der 26 Vorbeifahrten doppelte Desiro-Garnituren.
- In Platt und Zellerndorf waren nur Doppelgarnituren vorhanden.
- In Zellerndorf hatten alle Vorbeifahrten einen Kreischanteil, wogegen Platt und Peugen kein Kreischen aufwiesen.
- Es gibt keine Vergleichsdaten aus BEGEL oder ESB.

Diese Punkte, aber auch der eingeschränkte Umfang an Stimuli, der in einem Wahrnehmungstest abgefragt werden kann, haben letztendlich dazu geführt, dass der Desiro in der weiteren Untersuchung nicht berücksichtigt wurde.

3.1.2 Effekt der Messstelle

Die Messquerschnitte wurden nach der Topographie ausgewählt. Ziel war es, Messstellen zu finden, die ein Gelände mit möglichst freier Schallausbreitung bis zur 50 m Position aufweisen, aber möglichst weit von anderen Störquellen (Straße etc.) entfernt sind. Die Messstellen Peugen, Platt und Zellerndorf erfüllen diese Bedingungen. Trotzdem ergeben sich gewisse Unterschiede aufgrund der Höhe des Bahndamms und des Bewuchses.

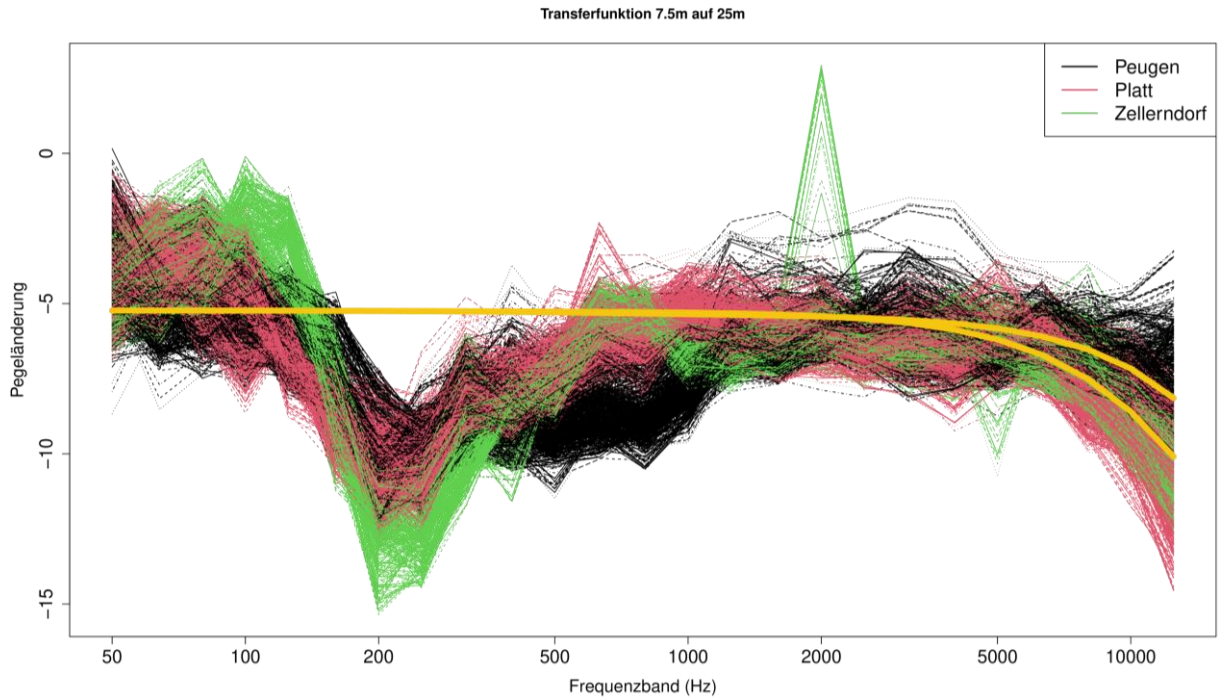


Abb. 3-2: Auf Basis von 4 Sekunden langen Segmenten aus den Messungen bestimmte Übertragungsfunktion von 7,5 auf 25 m. Die gelben Linien zeigt die geometrische Abschwächung inklusive Luftdämpfung nach 9613-1 für 15 und 30°C.

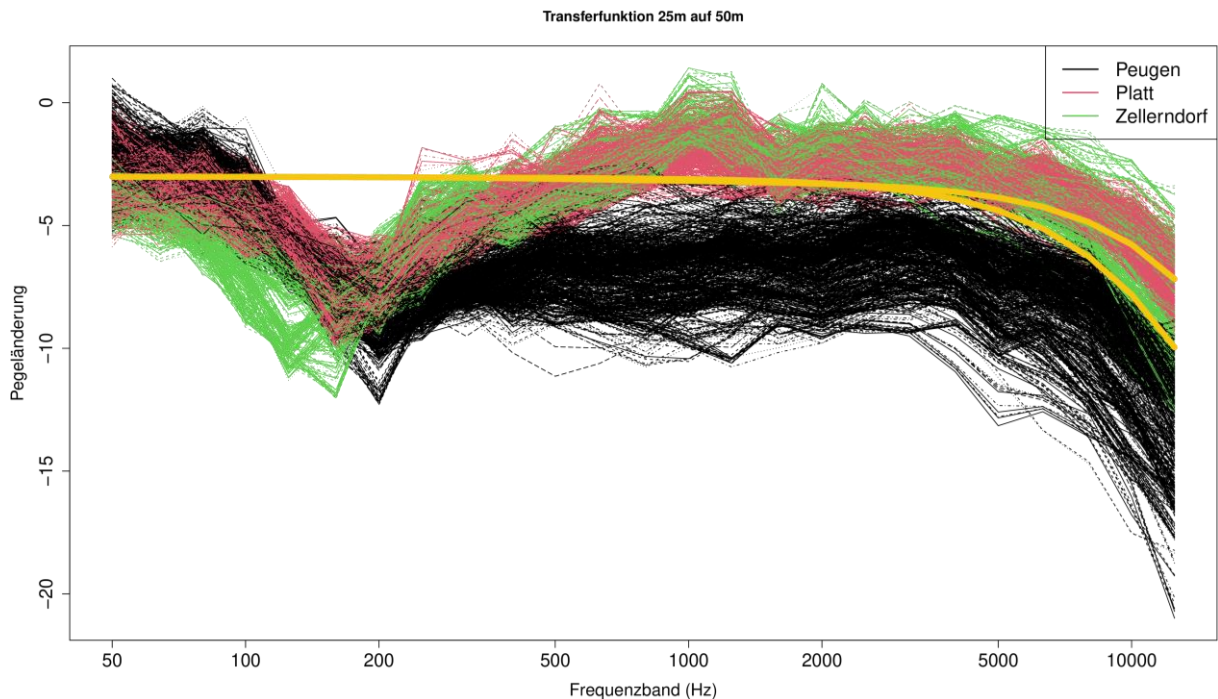


Abb. 3-3: Auf Basis von 4 Sekunden langen Segmenten aus den Messungen bestimmte Übertragungsfunktion von 25 auf 50 m. Die gelben Linien zeigt die geometrische Abschwächung inklusive Luftdämpfung nach 9613-1 für 15 und 30°C.

Abb. 3-2 und Abb. 3-3 zeigen die spektralen Unterschiede für 4 Sekunden lange Segmente über jeweils 1000 zufällig ausgewählte Vorbeifahrten der drei ausgewählten Zugskategorien mit und ohne Kreischen. Es wurde ein Welch-Schätzer (Hamming Fenster 4096 Samples, also 85 ms, Überlappung 50 %) verwendet aus dem Terzbänder berechnet wurden. Tonale Auffälligkeiten wurden davon ausgenommen, da diese aufgrund der entfernungsabhängigen Frequenzverschiebungen große schmalbandige Unterschiede erzeugen können, welche die eigentlichen Ausbreitungsbedingung überlagern. Da die automatische Detektion der tonalen Auffälligkeiten in 7,5 m durchgeführt wird, wurden diese Segmente auch für die weitere Verarbeitung teilweise mittels der Daten aus 25 m und 50 m händisch erweitert, da sich in größeren Entfernungen diese tonalen Komponenten typischerweise über längere Zeiträume erstrecken. Die schmalbandige Komponente in Abb. 3-2 entsteht dadurch, dass Quietschen (dieses kurze und eher tiefe Ereignis wurde nicht markiert, da gleichzeitig Kreischen auftrat) an verschiedenen Stellen am Zug auftreten kann und in 7,5 m nicht unbedingt messbar ist, aber in größerer Entfernung durch den größeren abgedeckten Bereich durchaus hörbar sein kann (für 25 m siehe Abb. 3-4).

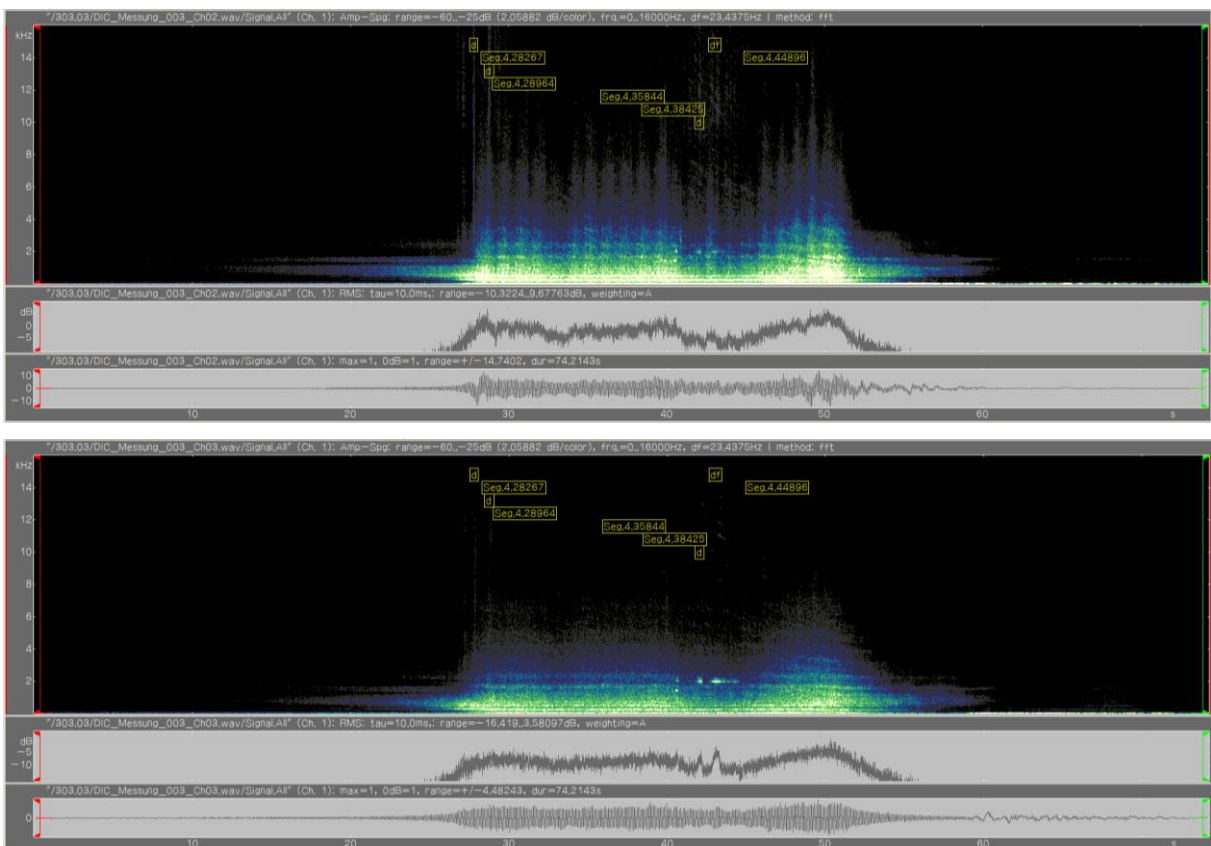


Abb. 3-4: Quietschen bei ca. 44 Sekunden in 25 m deutlich (unten) aber in 7,5 m (oben) nur schwach vorhanden und daher nicht detektiert

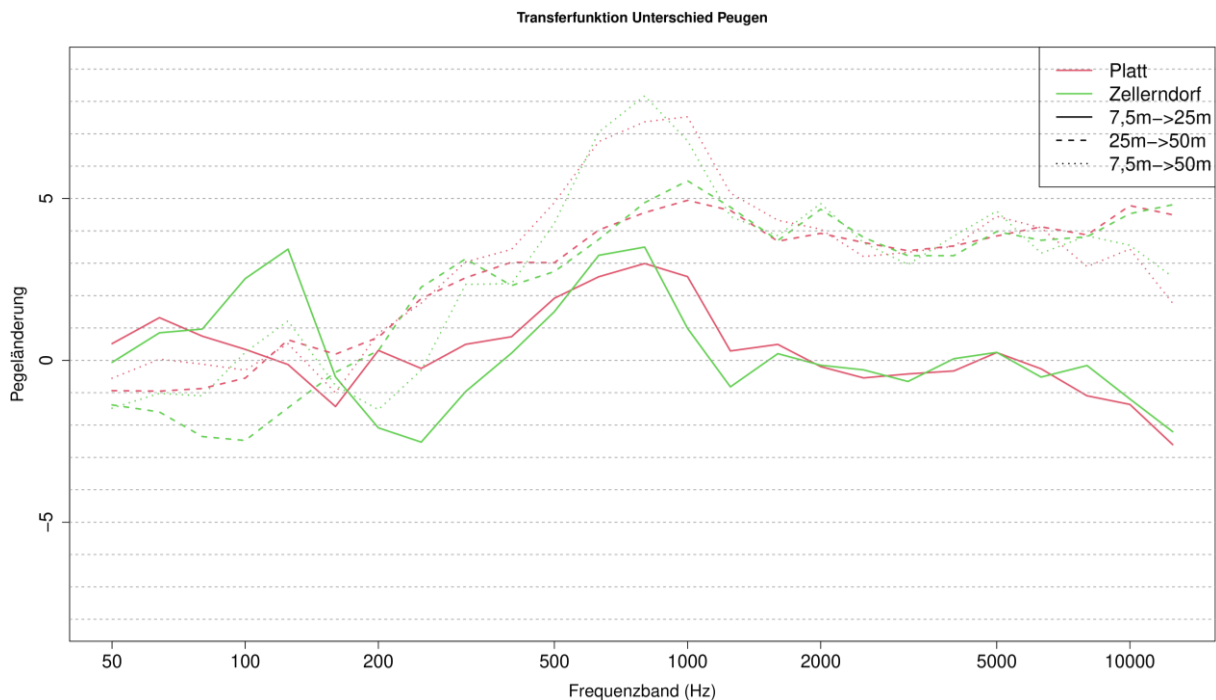


Abb. 3-5: Mediane Unterschiede der Übertragungsfunktion im Vergleich zu Peugen

Die gelben Linien zeigen die Kombination aus geometrischer Abschwächung (Linienquelle, -3 dB pro Verdoppelung des Abstandes) und Luftdämpfung, welcher mittels der Formel in der ISO 9613-1 [27] berechnet wurde (15°C und 30°C für 50 % Luftfeuchte und Normaldruck). Platt und Zellerndorf stimmen gut mit diesem sehr einfachen Modell überein, wobei der Unterschied im Bereich 100 bis 1000 Hz höchstwahrscheinlich auf Bodeneffekte zurückzuführen ist (vgl. [28]). In Peugen ist der Unterschied bei 50 m deutlich größer. Dies ist vermutlich durch den hohen Bewuchs und die dadurch verursachte zusätzliche Absorption zu erklären. Abb. 3-5 zeigt dies nochmals anhand der medianen Unterschiede von Platt und Zellerndorf im Vergleich zu Peugen sehr deutlich. Die Unterschiede entstehen überwiegend zwischen 25 m und 50 m.

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass der Distanzeffekt für einzelne Schallquellen (z.B. Räder) natürlich positionsabhängig ist. Da der Zug aber näherungsweise eine (relativ lange) linienförmige Quelle ist, sollten sich diese Effekte über die Zeit größtenteils wieder herausmitteln. Daher wird ein mittlerer Effekt angenommen.

3.1.3 Kunstkopf

Ein entscheidender, zu klärender Punkt war, ob die Kunstkopfdaten oder die Mikrofonmessungen verwendet werden sollten. Die Vorteile des Kunstkopfes sind eine echte binaurale Präsentation und das dadurch resultierende räumlichere und realistischere Hör-“Erlebnis“ [29].

Das Messkonzept wurde entwickelt, um zwei Entfernungen abzubilden und damit Informationen über den Unterschied zwischen verschiedenen Distanzen zu erfassen. Bei den Mikrofonen war eine parallele Messung möglich, da aber nur ein Kunstkopfsystem vorhanden war, fanden diese Messungen in allen drei Querschnitten jeweils abwechselnd in 25 m und 50 m Abstand statt (2 Tage 25 m, 1 Tag 50 m). Dadurch ergibt sich die Einschränkung, dass Grundgeräusche aber auch Kreischgeräusche in beiden Entfernungen nie von der gleichen Vorbeifahrt stammen können. Diese Einschränkung war natürlich bereits in der Antragsphase klar, es wurde aber davon ausgegangen, dass Querschnitte mit ausreichend hohem Verkehrsaufkommen vorhanden sind, um trotzdem genügend Daten zu akquirieren.

Die Datenlage ist allerdings problematisch, da nicht viele Samples zur Auswahl stehen. Hier sind naturgemäß Güterzüge aufgrund ihrer Heterogenität das größere Problem und hier gibt es teils massive Einschränkungen, vor allem in Zellerndorf:

- Zellerndorf
 - 6 von 10 Zügen sind langsamer als 75 km/h, davon 4 langsamer als 70 km/h, 1 kürzer als 4 s, 1 mit tonalen Geräuschen
 - KK in 50 m: alle 3 Züge langsamer als 75 km/h, kein einziger geeigneter Zug
 - KK in 25 m: 7 Züge, 3 Züge langsamer als 75 km/h, 2 ohne Geräusch
- Platt
 - 2 von 10 Zügen sind langsamer als 75 km/h, davon 1 langsamer als 70 km/h
 - KK in 50 m: 4 Züge, 1 Zug langsamer als 75 km/h, 2 ohne Geräusch
 - KK in 25 m: 6 Züge, 1 Zug langsamer als 75 km/h, 2 ohne Geräusch
- Peugen
 - 1 von 13 Zügen sind langsamer als 75 km/h, 1 schneller (85 km/h), 1 kürzer als 4 s
 - KK in 50 m: 3 Züge, 2 ohne Geräusch
 - KK in 25 m: 10 Züge, 3 Züge ausgeschlossen, 5 ohne Geräusch

Wie sich zeigt, erfüllt in Zellerndorf kein einziger Güterzug bei der KK-Messung in 50 m die Bedingungen. Weiters gab es auch noch beim Railjet in 50 m das Problem, dass bei den beiden Vorbeifahrten ohne detektierte Kurvengeräusche sehr starke Nebengeräusche beim Rollgeräusch vorhanden waren, welche in 25 m nur teilweise auftraten und eher auf einen Fahrzeugeffekt hindeuten (z.B. Zustand Rad). Es scheint nicht sinnvoll ein Fahrzeug mit undefiniertem Nebengeräusch als typisches Beispiel für ein Referenzgeräusch zu verwenden. Ein Effekt, der durch die räumliche Darbietung entstehen kann, ist, dass die Position der Kreischereignisse variieren kann. Da die Studie aber darauf abzielt, die Effekte der Geräuschcharakteristika auf die Wahrnehmung und nicht die Lokalisierung zu untersuchen,

könnten solche Effekte ein Störfaktor sein. Aus der Gesamtheit der dargelegten Gründe wurde davon abgesehen, die KK-Aufnahmen für die Tests zu verwenden.

3.2 Grundgeräusch

Unter Verwendung von Güterzügen, Railjet und 80-33 ergeben sich 6 Grundgeräusche und 2 Entfernungen, also insgesamt 12 Grundgeräusche:

- 3 Güterzüge (Peugen, Platt, Zellerndorf)
- 1 Railjet Peugen
- 2 80-33 Doppelstock mit 1144 (Platt, Zellerndorf)

Ziel der Untersuchung war es, Korrekturwerte für Bogengeräusche im Vergleich zu unauffälligen Vorbeifahrten im Bogen zu bekommen. Um diese zu erhalten, war ein Vergleich zu reinen Pegelerhöhungen notwendig. Daher sollten die für beiden Entfernungen jeweils mehrere zusätzliche Pegel vorgespielt werden, aus welchen Referenzkurven abgeleitet werden können. Die Details dafür sind in Abschnitt 4.3 beschrieben.

Abb. 3-6 zeigt die Verteilung der Spektren von 4 s langen Samples ohne auffällige Bogengeräusche (Kreischen, Quietschen). Dies bedeutet, dass detektierte Ereignisse ausgeschlossen wurden. Natürlich können Auffälligkeiten unterhalb der Detektionsschwelle auftreten welche auch wahrnehmbar sind. Leichte Tendenzen diesbezüglich sind teilweise bei sehr hohen Frequenzen über 10 kHz vorhanden. Die Züge wurden durch die erste und letzte

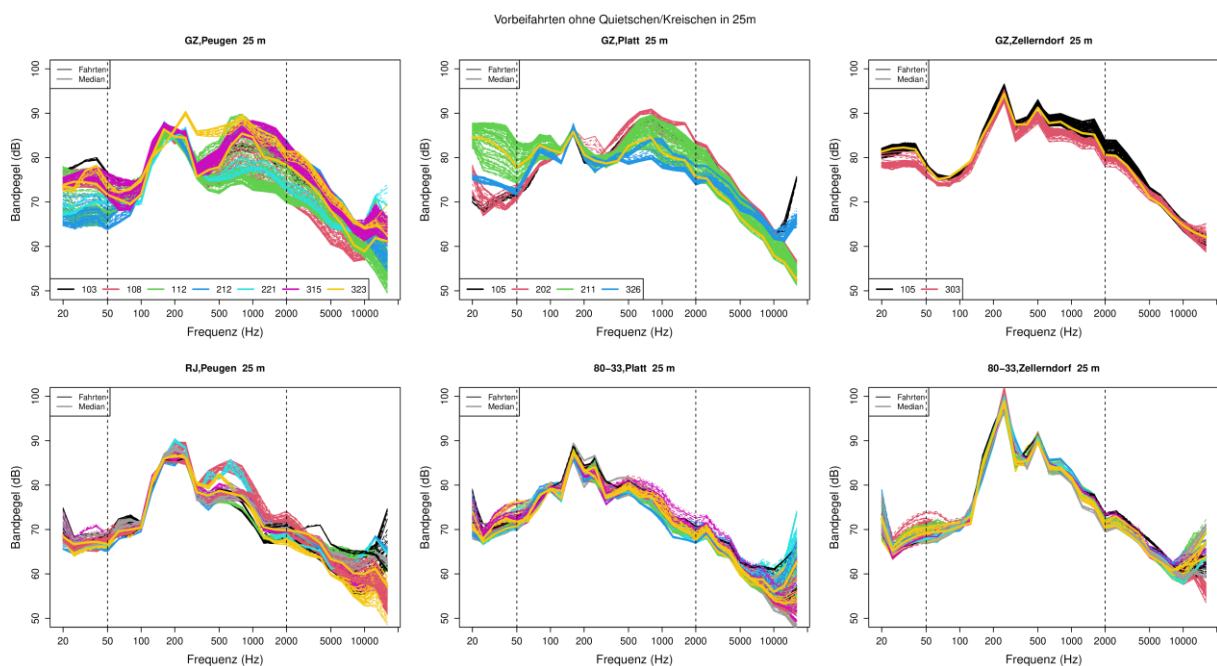


Abb. 3-6: Spektren der Samples ohne detektierte Kurvengeräusche in 7,5 m. Die gelbe dicke Linie zeigt den Median.

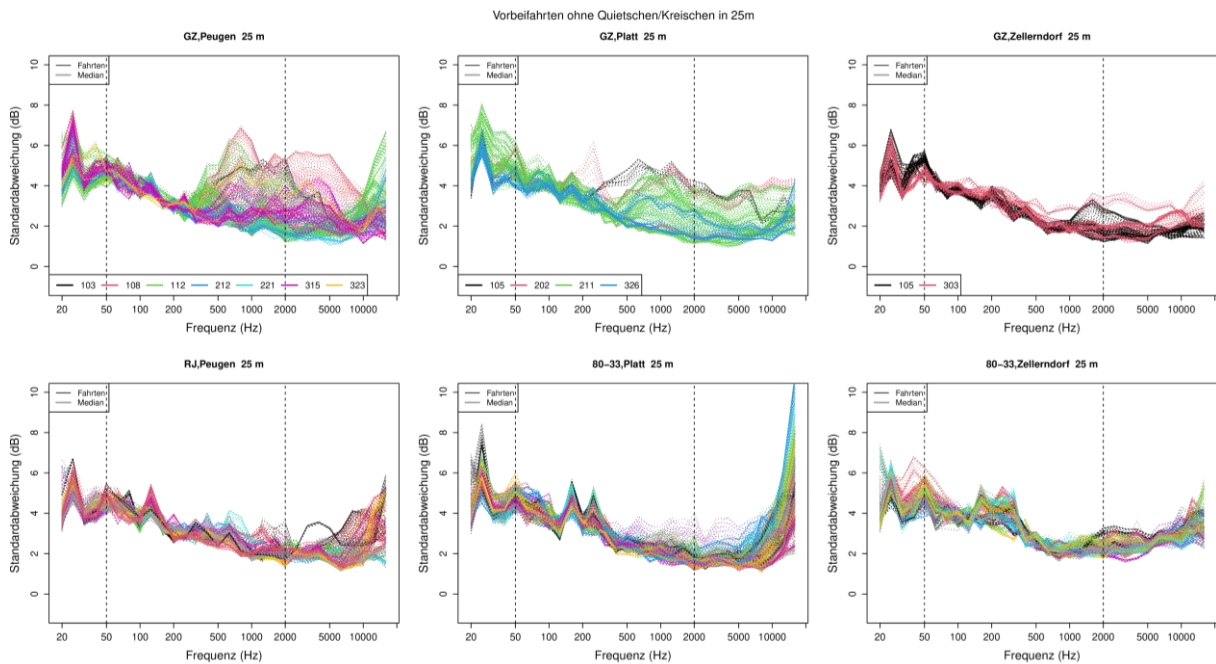


Abb. 3-7: Standardabweichung innerhalb der 4 s Samples ohne detektierte Kurvengeräusche in 7,5 m. Die gelbe dicke Linie zeigt den Median.

Achse im Messquerschnitt abgegrenzt, wobei Loks des Typs 1144 ausgenommen wurden, da diese vor allem bei Personenzügen (80-33 Doppelstock) zu dominanten Geräuschen führen und hier zusätzliche Varianz erzeugen können.

Wie zu erwarten sind die Güterzüge sehr heterogen. Vor allem in Peugen zeigen sich teilweise große Unterschiede zwischen den Zügen, aber auch innerhalb eines Zuges (Zug Nr. 112). Dieser Effekt entsteht, da sich immer wieder laute und leise Waggons abwechseln können und zeigt sich durch eine erhöhte Standardabweichung der Spektren innerhalb eines 4 s Segments (Abb. 3-7). Beim Railjet gibt es ebenfalls relativ große Unterschiede, allerdings über die Züge und nicht so sehr innerhalb einer Vorbeifahrt. Die Doppelstock-Garnituren hingegen sind sehr homogen.

Sampleauswahl

Die Auswahl der Referenzbeispiele aufgrund des Vorbeifahrtsspektrums kann nur teilweise automatisiert erfolgen. Einerseits können Störgeräusche vorhanden sein, welche sich im Spektrum wenig auswirken aber doch wahrnehmbar sind oder nur in 25 m oder/und 50 m auftauchen (vgl. Abb. 3-4). Andererseits können Samples sehr instationär sein, aber im Mittel ein dem Median ähnliches Spektrum aufweisen. Da diese Samples die Basis für den gesamten Test bilden und daher andauernd im Original oder modifiziert vorgespielt werden, müssen Geräusche oder Effekte, welche die Aufmerksamkeit auf sich ziehen aber mit dem Zweck der Studie nichts zu tun haben, so gut es geht vermieden werden.

Daher wurde folgender Ansatz (teils in Anlehnung an das Projekt PASS [30]) gewählt:

- Bestimmung des Medians der Terzbandspektren über alle Segmente aller unauffälligen Vorbeifahrten pro Messstelle und Zugtyp (gelbe Linien Abb. 3-6)
- Auswahl der 6 Samples mit dem geringsten L2-Abstand (mittlerer quadratischer Abstand) zum Median mit folgenden Einschränkungen:
 - Verwendung des Spektrums von 50 Hz bis 2 kHz, da höhere Frequenzen später manipuliert werden.
 - Keine benachbarten Samples, d.h. 50 % maximale Überlappung der Segmente, um zu vermeiden, dass lauter benachbarte Samples aus der gleichen Vorbeifahrt in die engere Auswahl kommen.
- Manuelle Auswahl eines geeigneten Samples: keine auffälligen Störgeräusche oder zu großen Schwankungen
- Mögliche kleinere zeitliche Korrekturen (wenige zehntel Sekunden) im Falle kurzer Störgeräusche am Beginn oder Ende
 - Beim Railjet wurden die Segmentgrenzen um 0,25 s nach hinten geschoben, um ein hochfrequentes tonales und ein leicht ratterndes Geräusch herauszuschneiden.

Aus den jeweils sechs automatisch selektierten Segmenten in 7,5 m wurden mit der manuellen Selektion auf Basis der Aufnahmen in 25 m und 50 m eine Vorbeifahrt wie oben beschrieben selektiert, d.h. die für den Test verwendeten reinen Rollgeräusche in 25 m und 50 m für eine Messstelle und einen Zugtyp stammen von derselben Vorbeifahrt und die Segmentgrenzen wurden nur um die Laufzeit zwischen jeweils 7,5 m und 25 m oder 50 m korrigiert. Die genaue Aufstellung der manuellen Selektion sind in Anhang B angeführt.

Abb. 3-8 zeigt zum Vergleich die aus BEGEL gewonnenen Rollgeräusche ohne detektierte Auffälligkeiten. Es sind 10 % der vorhandenen 4 s Segmente dargestellt. Die rote Linie zeigt den Median aller Segmente als Funktion der Bandfrequenz. Die gelben Linien zeigen zum Vergleich die Spektren der Segmente aus PAAB welche dem dortigen Median am nächsten sind. Vergleicht man die Mediane der Vorbeifahrten mit den Messungen aus BEGEL wird klar, dass die Daten aus dem Vorgängerprojekt nicht als Basis für Referenzsamples zur Auswahl von typischen "sauberen" Vorbeifahrtsgeräuschen verwendet werden können. Es wird aber auch klar, dass auch in BEGEL z.B. beim 80-33 ein deutlicher Unterschied zwischen den Messstellen erkennbar ist und dass die Streuung bei Güterzügen sehr hoch ist.

Die nach obigem Schema ausgewählten Referenzsegmente bilden die Basis für den Wahrnehmungstest. Im Weiteren wird nun beschrieben, wie die Auswahl geeigneter auffälliger

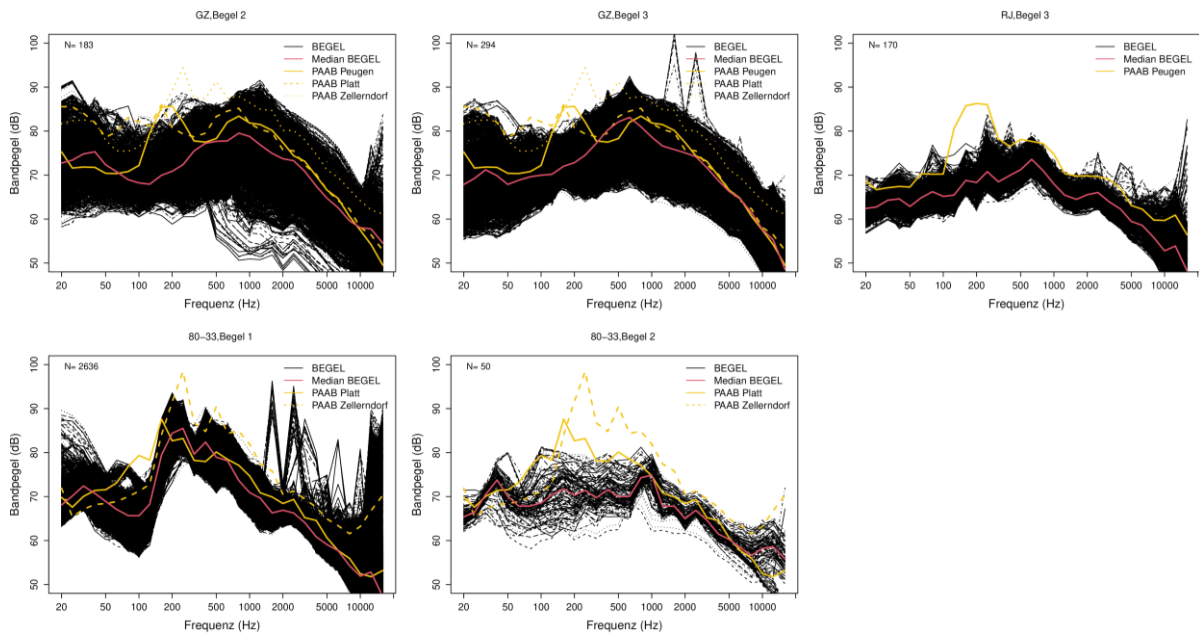


Abb. 3-8: Vergleich von Spektren aus BEGEL und repräsentativer Vorbeifahrtsspektren der gleichen Kategorie bei PAAB in 7,5 m.

Vorbeifahrten erfolgte, und wie diese Daten modifiziert wurden, um systematisch Bogengeräusche untersuchen zu können.

3.3 Quietschen

Quietschen (hier definiert als schmalbandiges Geräusch im Frequenzbereich 800 - 6300 Hz trat im Zuge der Messkampagne relativ selten auf (19 detektierte Ereignisse in 14 tonal auffälligen von insgesamt 214 Vorbeifahrten). Die wichtigsten Parameter sind hierbei sicherlich Frequenz, Pegel und Dauer. Es ist davon auszugehen, dass eine längere Dauer auch eine größere Belästigung darstellt. Um ein worst-case aber gleichzeitiges auch realistisches Szenario abzubilden, wird daher Quietschen verwendet, welches möglichst lange dauert. Abb. 3-9 zeigt vorhandenen Quietschfrequenzen.

3.3.1 Synthese

Ein erster Ansatz um kontrollierte Quietschgeräusche für den Wahrnehmungstest zu erhalten war, diese mittels Simulation künstlich zu erzeugen. Grundsätzlich war die Idee, ein schmalbandiges Quellsignal mittel Ausbreitungsrechnung (bewegte Punktquelle für erste Tests, später dann mittels Randelementmethode wie in [31] beschrieben) zum Empfängerpunkt hinauszurechnen. Es wurden zwei verschiedene Anregungssignale getestet: monofrequenter Sinus und schmalbandig gefiltertes Rauschen. Zweites ergab etwas „realistischer“ klingende Signale, allerdings klangen diese noch immer zu künstlich. Um ein

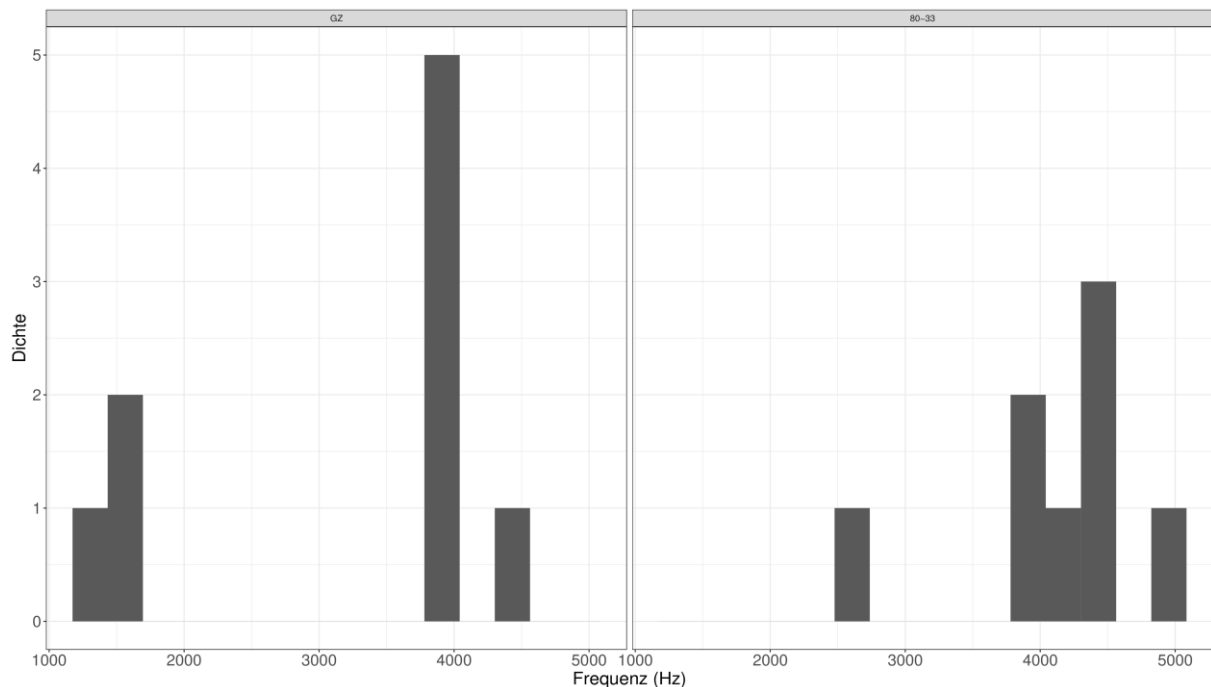


Abb. 3-9: Häufigkeit der Quietschfrequenzen bei PAAB als Funktion des Zugtyps

komplexeres Signal zu erzeugen, wurden auch zwei nahe beieinanderliegende Moden untersucht. Der Ausgangspunkt waren hier die Simulationen in [32] (siehe Kapitel 6 - Sound Radiation from Wheels and Track) die zeigen, dass beim rotierenden Rad durch die im Rad vor- und rücklaufenden Wellen zwei verschiedene Moden entstehen. Auch diese Signale wurden hierfür als unzureichend erachtet. Es wurden auch verschiedene Quellhöhen untersucht, aber zusammenfassend lässt sich sagen, dass die verschiedenen Ansätze kein zufriedenstellendes Ergebnis lieferten, da die klangliche Charakteristik bei echtem Quietschen komplexer ist als diese Simulationen zuließen.

3.3.2 Signalmanipulation

Aufgrund des unzureichend realistischen Klanges bei synthetischen Geräuschen wurde daher ein anderer Ansatz gewählt. Die Grundidee bestand darin, echtes Quietschen aus einer Aufnahme zu isolieren, danach zu manipulieren und mit unauffälligen Rollgeräuschen zu kombinieren. Somit ergibt sich ein definiertes Quietschen kombiniert mit einem definierten Rollgeräusch, d.h. das Referenzsignal und das Quietschsignal unterscheiden sich ausschließlich durch das Quietschen. Hierfür wurden die Mikrofonaufnahmen in 25 m und 50 m getrennt bearbeitet, da diese aufgrund der unterschiedlichen Zeitverläufe unterschiedliche Masken benötigten.

Es wurden sogenannte Frames und Frame-Multiplier verwendet. Die Grundlagen und Details sind in [33] beschreiben. Grundsätzlich basiert die Methode auf einer Zeit-Frequenzdarstellung

des Signals, einem sogenannten Frame. Es wurde ein Gabor-Frame verwendet, welcher sehr eng mit der Kurzzeit-Fourier-Transformation verwandt ist. Die Zeit-Frequenzdarstellung ist notwendig, da sich der spektrale Inhalt im Zuge der Vorbeifahrt verändert. Beim tonalen Ereignis, das in der Regel durch ein einzelnes quietschendes Rad erzeugt wird, bewegt sich die Quelle an der Messstelle vorbei, daher entsteht unter anderem auch eine Dopplerverschiebung. Daher würden konventionelle Filteransätze zur Extraktion des Ereignisses nicht ausreichen. Um das Geräusch zu isolieren wird ein sogenannter Multiplier, eine Art Maske, verwendet. Mit dieser Maske kann ein passendes Quietschen in der Zeit-Frequenz-Ebene isoliert werden. Diese Methode kann als eine Art zeitvarianter Filterung angesehen werden. Verwendet wurde hier die Large Time Frequency Analysis Toolbox (LTFAT, [34]). Zur Definition wurde das Programm MULACLAB, das Teil der LTFAT ist, verwendet.

Der erste Schritt ist die Auswahl eines geeigneten Quietschereignisses welches als Referenztemplate verwendet werden kann.

3.3.3 Template

Um ein solches Template zu finden, mussten alle Ereignisse genauer untersucht werden. Nach dem Durchhören aller Quietschereignisse in 7,5 m, 25 m und 50 m wurde ein Quietschen bei einem Güterzug ausgewählt, welches durchgängig vorhanden war und sich durch einen hohen Pegel auszeichnet, sich also gut vom Hintergrund abhebt und damit die Extraktion erleichtert. Auf die Frequenz wurde in diesem Schritt nicht im speziellen geachtet, da diese später sowieso verändert werden sollte. Hier sind einige Punkte zu beachten. In Anhang C sind alle detektierten Quietschereignisse nach der Zeit-Frequenz-Transformation dargestellt. Hier zeigt sich, dass doch eine deutliche Variabilität existiert. Teilweise ist das Signal intermittierend, teilweise setzt es erst kurz vor der Messstelle ein oder endet kurz danach. Die konstantesten Ereignisse traten in Peugen auf. Diese haben eine Auffälligkeit, nämlich dass, obwohl in 7,5 m das Signal relativ symmetrisch um die Messstelle herum auftritt, in 25 m und vor allem in 50 m das Signal relativ schnell "abreißt". In 7,5 m ist dies nicht zu beobachten, da vmtl. die gerichtete Abstrahlcharakteristik die seitliche Schallabstrahlung stark reduziert. Daher ist es auch nicht sinnvoll möglich Daten aus BEGEL oder auch ESB für diesen Zweck zu untersuchen, da diese nur in 7,5 m gemessen wurden. Ob dieser Effekt in großen Entfernungen häufig auftritt kann daher aus den vorliegenden Daten nicht beantwortet werden. Abb. 3-10 zeigt das ausgewählte Quietschereignis in verschiedenen Entfernungen. Im nächsten Schritt wurden die Masken definiert, um das Quietschen zu extrahieren. In Abb. 3-11 sind die Masken für das Quietschen in 25 m und 50 m abgebildet. Bei ca. 4 s ist das

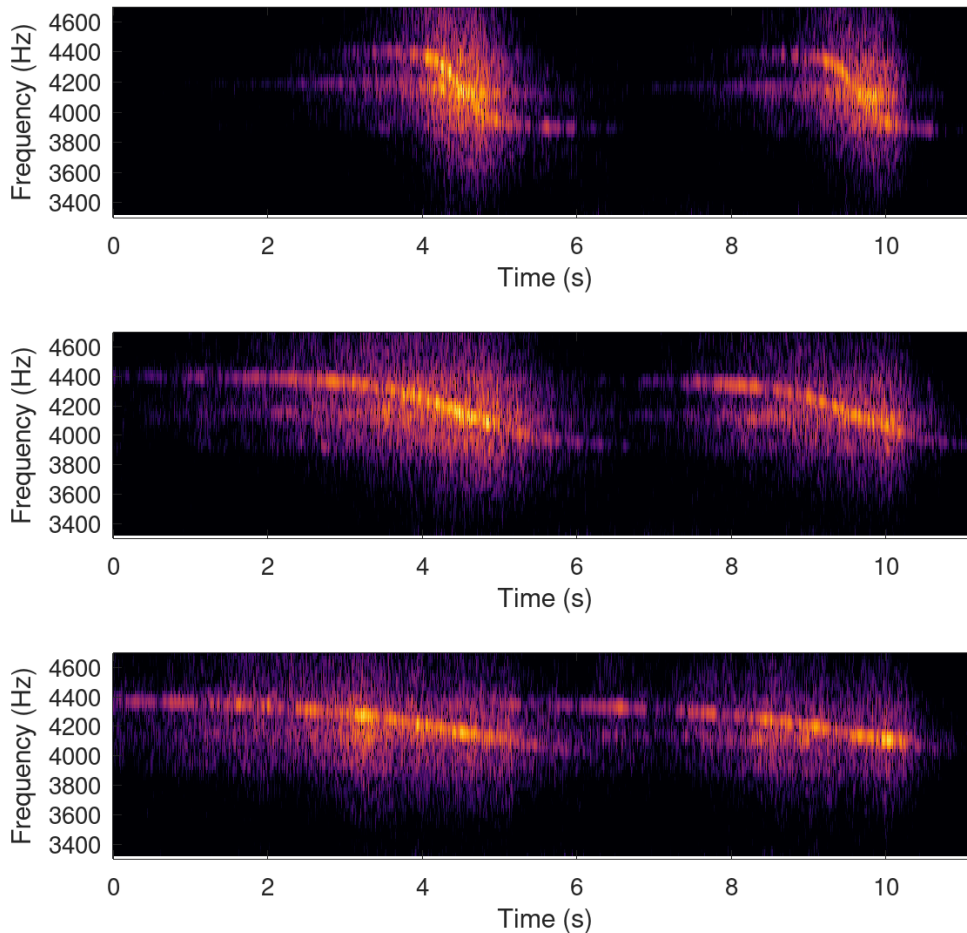


Abb. 3-10: Zeit-Frequenzverläufe für ausgewähltes Quietschereignis in Peugen (Zug 311, ca. bei Sekunde 4) in verschiedenen Abständen (von oben nach unten: 7,5 m, 25 m und 50 m)

betreffende Rad im Messquerschnitt (Laufzeit in Bezug auf 7,5 m korrigiert). Hier sieht man wieder die starke Asymmetrie, weshalb das 4 s Segment nicht zentriert um diesen Zeitpunkt genommen wird (siehe oben). Die Masken wurden mittels des "wand-tools" in MULACLAB extrahiert. Dabei wird ein Punkt in der Zeitfrequenzebene gewählt und ein Schwellwert für die Differenz zu diesem Punkt, unter den der Pegel nicht fallen darf. Dies wurde teilweise mehrfach gemacht, um eine möglichst umfassende Maske zu produzieren.

Es gibt nun mehrere mögliche Ansätze, wo das Quietschen am besten geschnitten wird: (a) mittig um den MQ, (b) leicht nach vorne versetzt, also zu einem etwas früheren Zeitpunkt, oder (c) jedes für sich um einen möglichst konstanten Pegelverlauf zu erhalten. Bei (a) tritt das Problem auf, das in 50 m am Segmentende wohl für 0,5 s oder mehr kein Quietschen zu hören ist. Dafür erweckt der Frequenzverlauf den Eindruck, dass der Zug in etwa in der Mitte des Segments am Hörer vorbeifährt. Bei (b) kann man durch leichtes Versetzen das vorzeitige Ende vermeiden. Die beiden Samples wären aber immer noch so als ob man den gleichen Zeitabschnitt in 25 m oder 50 m hört. Variante (c) lässt eine freie Wahl zu, daher kann man

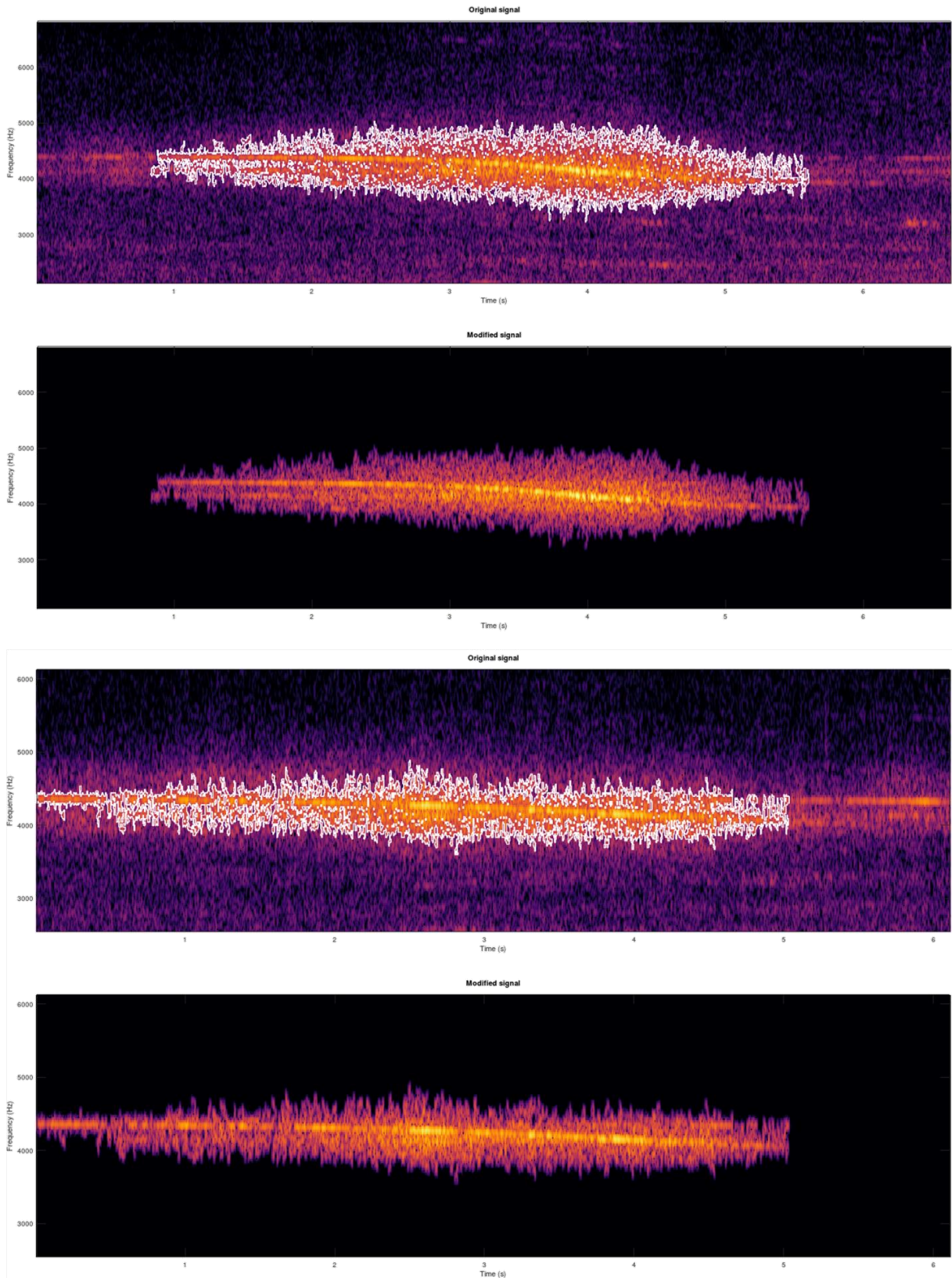


Abb. 3-11: Masken und ausgeschnittene Quietschsignale in 25 m (oben) und 50 m (unten)

einen möglichst konstanten Abschnitt wählen, aber die Daten in 25 m und 50 m wären nicht mehr "synchron". Allerdings besteht in 50 m die größte Unschärfe bzgl. der Mitte des Zuges, daher wäre ein leichter Versatz vermutlich nicht wahrnehmbar (0,2 s in 50 m entsprechen ca. 5°).

Letztendlich wurde Variante (b) genommen, d.h. der Schnitzeitpunkt wurde so gewählt, dass das Quietschen möglichst lange im Segment zu hören ist, ohne aber die einzelnen Entfernungen gesondert anzupassen.

Durch die Anwendung der Maske (Multiplier) und die Resynthese der modifizierten Zeit-Frequenzdarstellung kann nun ein isoliertes Quietschen erzeugt werden, bei dem das Hintergrundgeräusch (Rollgeräusch) weitestgehend ausgeblendet ist. Dieses Signal kann nun z.B. amplitudenskaliert werden. Mittels eines Phasenvocoders [35] kann im Weiteren noch die Grundfrequenz des Quietschens variiert werden. Damit ergibt sich die Möglichkeit, sowohl die Quietsch-Frequenz als auch die Amplitude relativ unabhängig zu variieren, sodass diese beiden Faktoren untersucht werden können.

Theoretisch wäre hier auch eine Anpassung an Kunstkopfsignale möglich gewesen, indem eine Kopfübertragungsfunktion angewendet wird, um positionsabhängige Signale für linkes und rechtes Ohr zu produzieren. Diese Möglichkeit wurde auch mittels der SOFA-Toolbox [36] implementiert. Da aber im Zuge der Sampleauswahl die Verwendung der Daten des Kunstkopfes aus bereits ausgeführten Gründen ausgeschlossen wurde, wurden diese Daten nicht verwendet.

Wie Rollgeräusch und Quietschen im Detail kombiniert wurden, wird im Abschnitt 3.5 beschrieben.

3.3.4 Frequenzen

Wie in Abb. 3-12 zu erkennen ist, treten die meisten Ereignisse zwischen 2000 Hz und 5000 Hz auf, wobei hier beim 80-33 die Ergebnisse sehr stark von einzelnen Garnituren dominiert werden. Grob gesagt liegen die Frequenzen bei ca. 4000 Hz beim Güterzug, 4500 Hz beim Railjet und 2500 Hz und 3200 Hz beim 80-33. Beim Güterzug sind auch Frequenzen über 6000 Hz und 5000 Hz relativ häufig. Bei PAAB (Abb. 3-9) sind zu wenig Daten vorhanden, um Aussagen zu treffen. Ein Vergleich mit BEGEL und ESB-02 (unkonditionierter Querschnitt) zeigt, dass auch dort das 4 kHz Terzband am häufigsten tonal auffällig war, während im unteren Frequenzbereich von 1,25 bis 1,6 kHz bei BEGEL kaum Auffälligkeiten detektiert wurden und nur ESB auch hier eine lokale Häufung zeigt.

Wie sich in Abb. 3-13 bezüglich der Amplitude der betroffenen Terz(en) zeigt, ist das ausgewählte Quietschen vergleichsweise laut und der Spitzenpegel in 7,5 m liegt am oberen

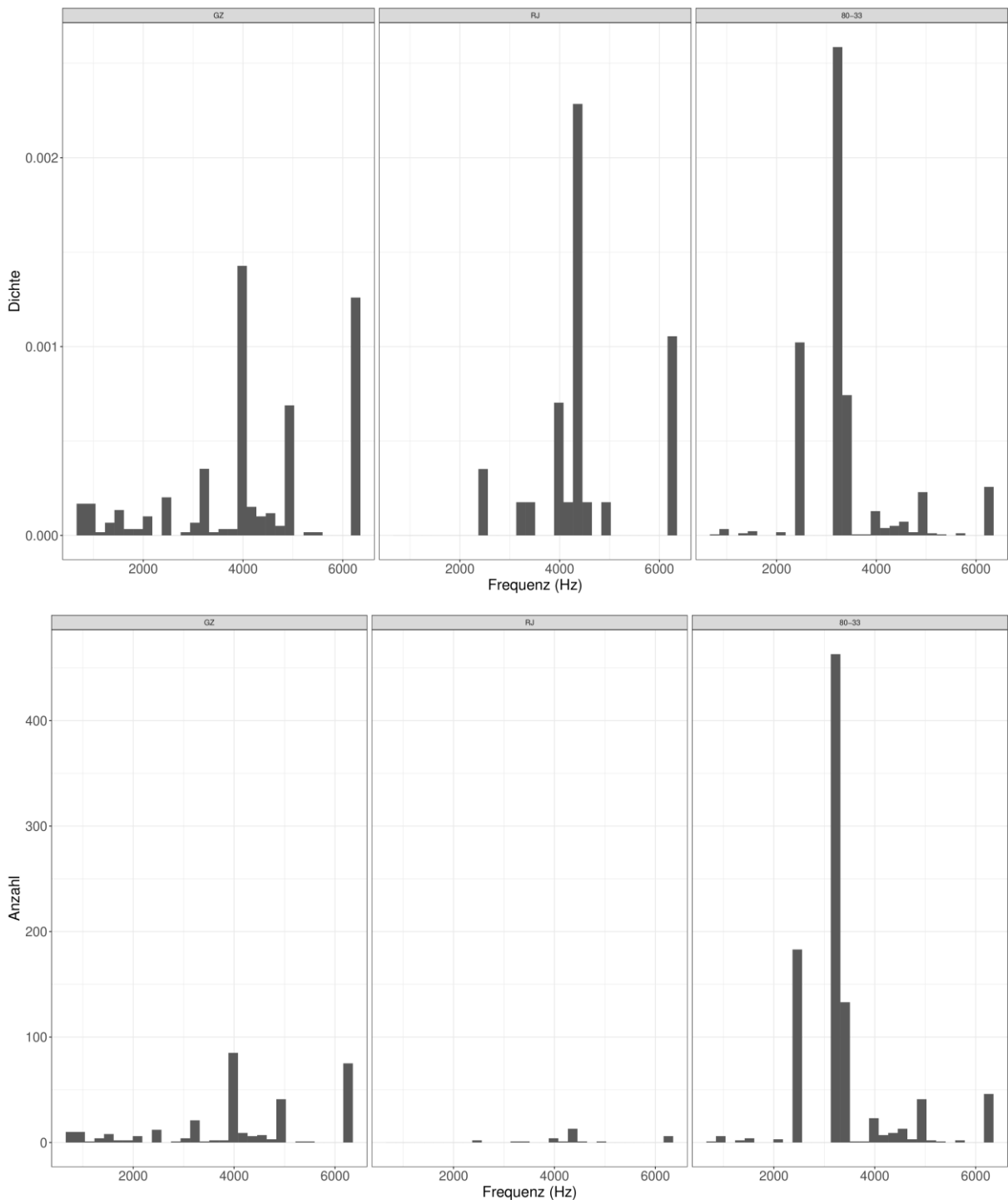


Abb. 3-12: Relative (oben) und absolute (unten) Häufigkeit der Quietschfrequenzen bei BEGEL als Funktion des Zugtyps

Ende der auftretenden Pegel (Abb. 3-13, unten), wogegen der mediane Pegel im Vergleich etwas niedriger liegt (Abb. 3-13, oben). Bei 10 dB Absenkung liegen die Werte im Mittelfeld bzw. am unteren Ende.

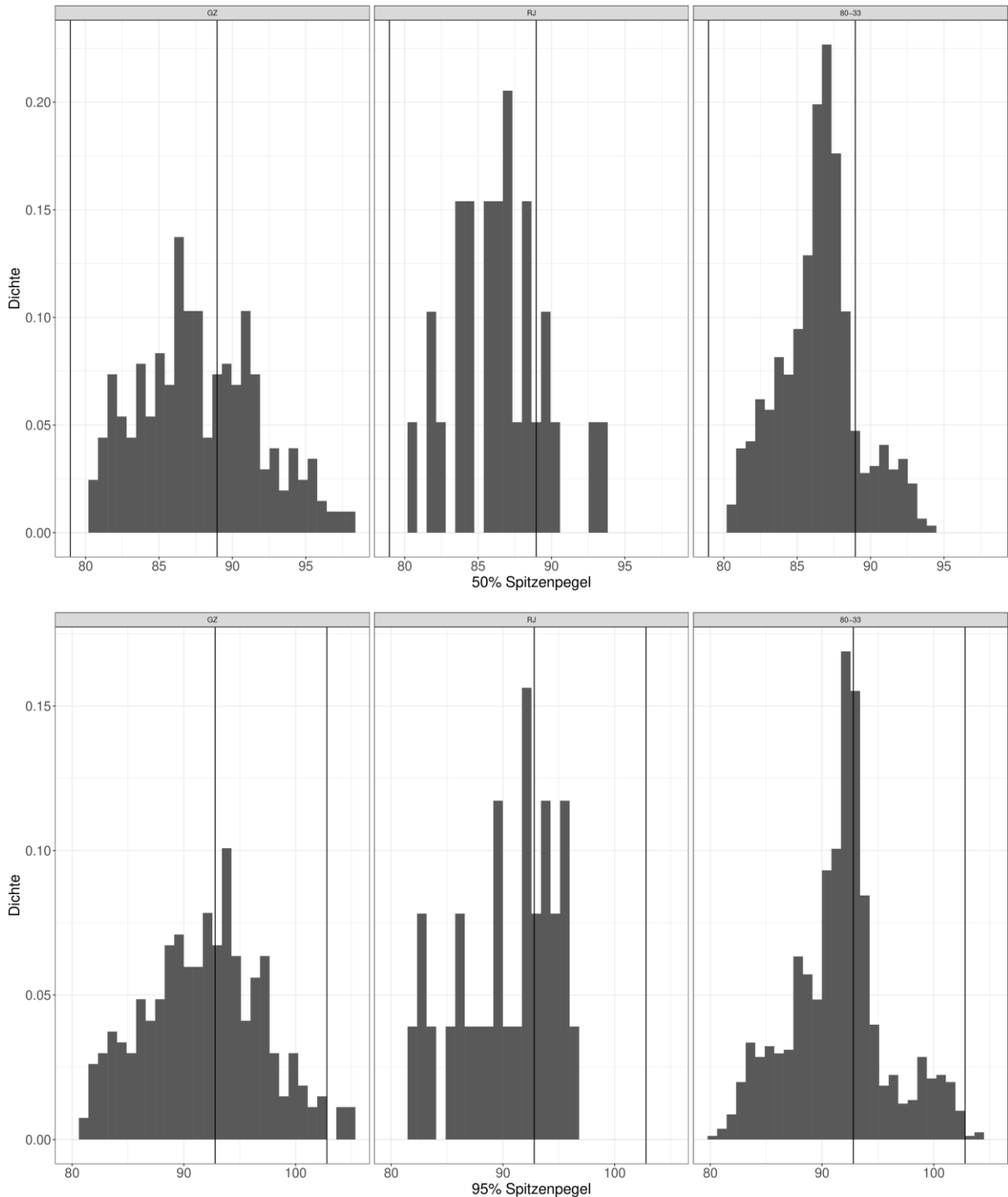


Abb. 3-13: Häufigkeit der maximalen Bandamplituden bei BEGEL, welche 95 % und 50 % der Zeit überschritten werden. Die vertikalen Linien zeigen den Wert für das in PAAB ausgewählte Quietschen im Original und um 10 dB abgesenkt.

3.4 Kreischen

Kreischen (hier definiert als breitbandige Geräusche bei denen in den Terzen 8, 10 und 12,5 kHz ein mittlerer Pegel von über 70 dB in 7,5 m auftritt) ist eine Geräuschkategorie, die

sehr viele unterschiedliche Facetten hat. Die Auffälligkeiten können kurz oder durchgängig sein. Weiters können Auffälligkeiten zeitlich variierend oder relativ konstant sein und unterschiedliche spektrale Form haben (Abb. 3-14). Hier werden unterschiedlich lange Ereignisse (Anteil am 4 s Segment farblich kodiert) und eine unterschiedliche Anzahl von Ereignissen (mehr als 0,1 s Abstand) dargestellt. Hier werden nur Spektren dargestellt, die bei 1-2 kHz (2-4 kHz beim Güterzug) um maximal 10 dB vom Median abweichen (die gelben

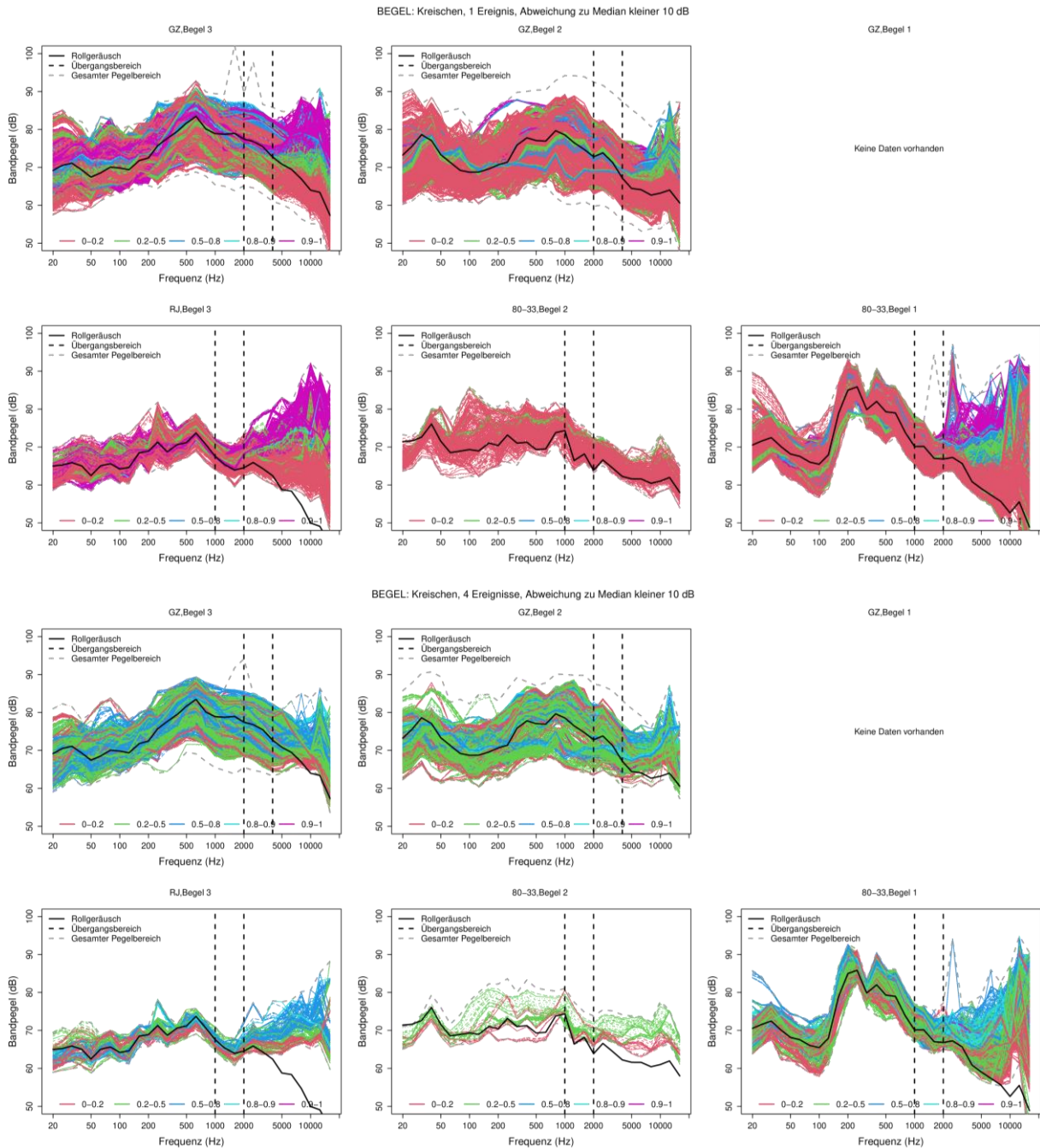


Abb. 3-14: BEGEL - Spektren von unterschiedlich langem Kreischen (Farbe) mit einem (oben) oder mehreren Ereignissen (unten) für Güterzüge und den Railjet. Maximale Abweichung 10dB.

Punkte stellen Segmente dar, die größere Abweichungen haben. In der Abbildung ist klar zu sehen, dass die Abweichungen vom Median des normalen Rollgeräusches (schwarze Linie) beim Railjet bei deutlich niedrigeren Frequenzen beginnen. Bei lauterer Güterzügen tritt aufgrund des erhöhten Rollgeräusches die Auffälligkeit im Spektrum eher erst bei höheren Frequenzen auf als bei leisen Zügen (Abb. 3-14). Aber dies ist schwer zu quantifizieren, da das eigentliche Rollgeräusch nicht isoliert betrachtet werden kann. Schränkt man die

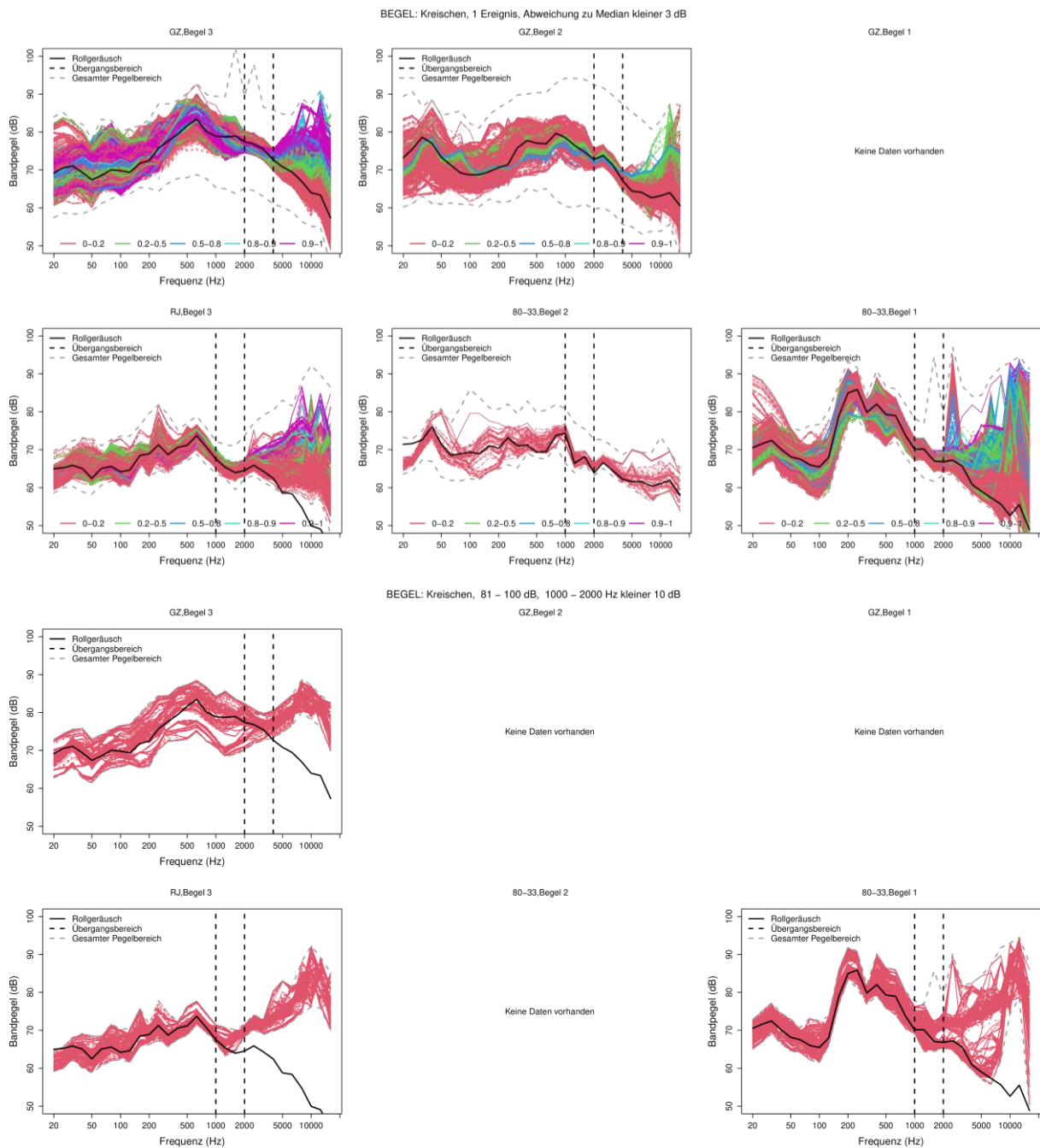


Abb. 3-15: BEGEL - Spektren von unterschiedlich langem Kreischen (Farbe), 3 dB maximale Abweichung (oben). Unten sieht man durchgängiges Kreischen mit max. 10 dB Abweichung.

Segmente auf diejenigen ein, die zwischen 2 und 4 kHz nur maximal 3 dB abweichen (Abb. 3-15), sieht man, dass das Kreischen für solche Segmente einen deutlichen Anstieg der Energie in den darüberliegenden Bändern verursacht. Allerdings ist hier Vorsicht geboten, da vor allem beim Güterzug die spektrale Vorselektion in Kombination mit dem Detektionskriterium einen gewissen Einfluss auf das Ergebnis hat und bei Güterzügen mit höherem Rollgeräusch dieser Anstieg geringer ausfällt.

Was in diesen Grafiken weiters auffällt, ist dass das Kreischen im 1. MQ (BEGEL-01) beim 80-33 teilweise deutlich anders aussieht als beim Railjet bei BEGEL-03. Die spektrale Form

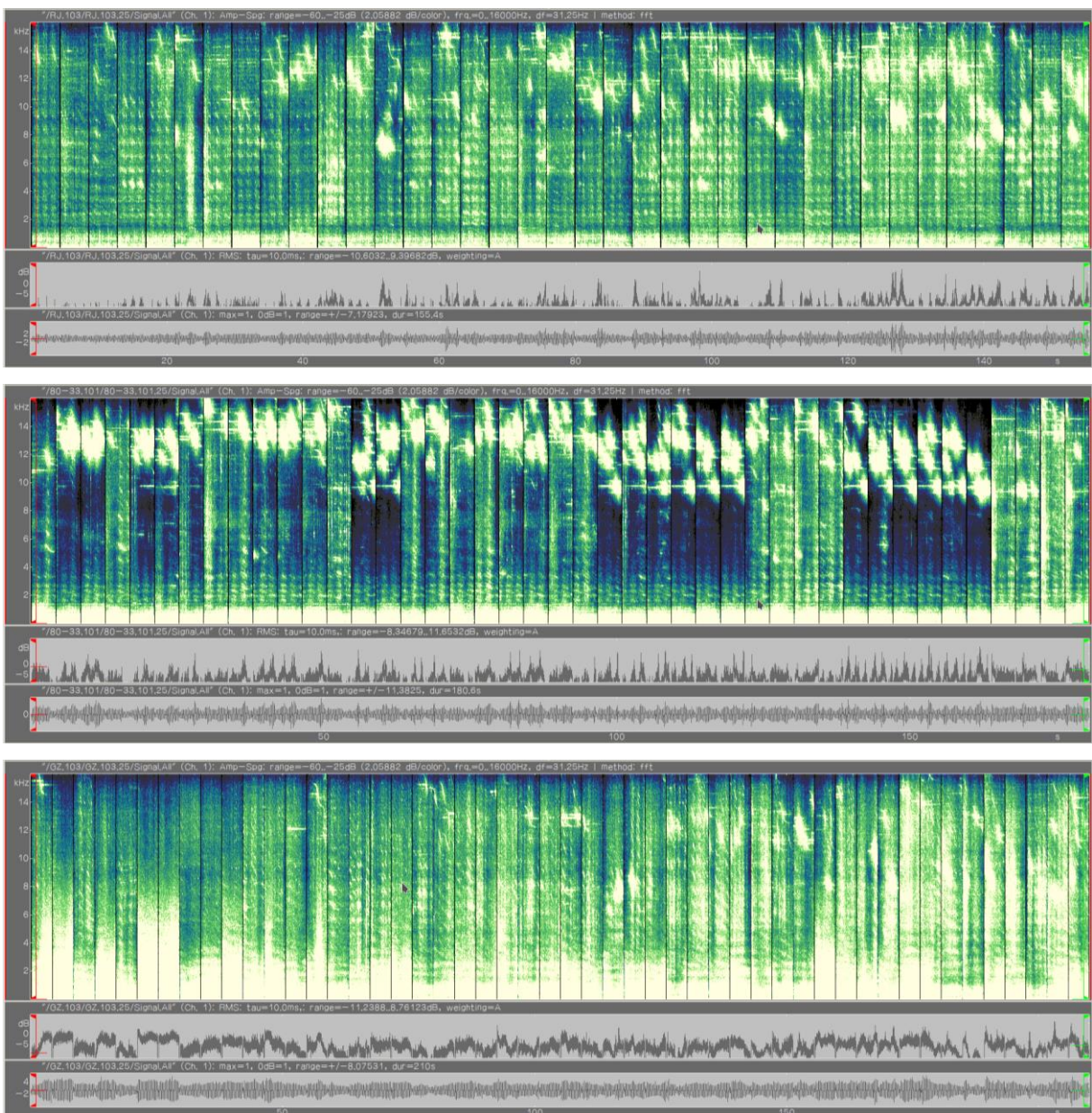


Abb. 3-16: BEGEL - Kreischen mit steigender Intensität beim Railjet (BEGEL 3, oben) und 80-33 (BEGEL-01, mittig) und Güterzüge (BEGEL-03, unten)

deutet darauf hin, dass zwei Kategorien existieren. Einmal ein breitbandiger Effekt ähnlich zum Railjet, und weiters ein eher schmalbandiger Effekt im sehr hohen Frequenzbereich bei 10 und 12,5 kHz.

In Abb. 3-16 zeigt sich dieser Effekt sehr gut. Beim 80-33 sind immer wieder breitbandigere Effekte zu sehen, aber hochfrequente tonale Ereignisse sind dominanter. Beim Railjet treten diese zwar auch auf, jedoch seltener und weniger stark. Bei den Güterzügen treten ebenfalls eher breitbandige Effekte auf.

Klar ersichtlich ist auch die starke Variabilität des Kreischens. Nachdem mittels Synthese schon beim deutlich klarer definierten Quietschen keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden konnten, wurde dieser Ansatz für das Kreischen nicht weiter verfolgt.

Um trotzdem kontrollierte Kreischgeräusche mit ausgewählten Rollgeräuschen kombinieren zu können wurden folgende Ansätze ausgearbeitet.

Auswahl verschiedener tatsächlich in PAAB aufgetretener Kreischgeräusche auf Basis eines bestimmten Auswahlkriteriums

- Herausforderung: Auswahl geeigneter Geräusche auf Basis bestehender Daten aus BEGEL
- Vorteil: Geräusche traten tatsächlich auf
- Nachteile
 - typischerweise ändert sich nicht nur ein Faktor
 - Ursache für Effekte auf Belästigung schwerer nachzuvollziehen
 - starke Unterschiede auch aufgrund der Messstelle und des Zugtyps

Modifikation eines oder mehrerer Referenzkreischgeräusche

- Herausforderung: Kreischen tritt bei Güterzügen im Vergleich zu Personenzügen erst bei höheren Frequenzen aus dem Hintergrund hervor
 - Güterzug-Kreischen kann in vorliegender Studie aufgrund der Datenlage nicht auf Personenzug angewendet werden
 - Trennung nach Zugskategorie oder
 - Anwendung Personenzug-Kreischen auch für Güterzüge
- Vorteile
 - kontrollierbare und definierte Veränderungen
 - klarere Beziehung zwischen Belästigung und Geräuscheigenschaften
- Nachteil: keine "echten" Geräusche

Wie ausgeführt, hat der erste Ansatz viele Schwächen. Vor allem waren später große Schwierigkeiten bei der Interpretation und Anwendung der Ergebnisse zu erwarten. Sinnvoll erscheint daher nur die Modifikation eines oder mehrerer Referenzkreischgeräusche, um den spektralen Verlauf z.B. der BEGEL-Daten nachzubilden oder auch andere Faktoren getrennt und systematisch variieren zu können.

3.4.1 Modifikation eines oder mehrerer Referenzkreischgeräusche

Für eine automatisierte Vorauswahl möglicher Referenzsamples wurden folgende Kriterien definiert:

- nur Personenzüge aus Platt und Peugen
- durchgängiges Kreischen, mind. 85 % des 4 Sekunden dauernden Segments als Kreischen detektiert
- Frequenzbereich 1-2 kHz: weniger als 10 dB maximale Abweichung in diesen Bändern zu Referenzrollgeräusch
- Pooling der Kreischgeräusche von PZ (80-33, Railjet) für alle Zugtypen und Messstellen

Aufgrund des Gleiszustandes in Zellerndorf und der damit verbundenen hohen Emissionen bei Personenzügen, wurden diese in der Auswahl nicht berücksichtigt. Durchgängiges Kreischen (d.h. ein langes Ereignis ohne Unterbrechung) wurde deshalb genommen, da es einfacher ist, homogenes Kreischen zeitlich zu variieren als eine vorhandene starke Variation zu glätten. Der Frequenzbereich für die Einschränkung ergab sich aus den vorhandenen Daten und sollte verhindern, dass hier Samples mit deutlich erhöhtem Rollgeräusch als Basis ausgewählt werden, welche später bei der Zusammenführung von Rollgeräusch und auffälligen Geräuschen Probleme bereiten könnten. Diese Einschränkung hatte allerdings nur wenig Effekt, da die Personenzugtypen in sich sehr homogen waren. Das Pooling war notwendig, um letztendlich wirklich die gleichen Geräusche für alle Situationen (Messstelle, Zugtyp) als Basis zu haben. Die unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen (Abschnitt 3.1.2) wurden berücksichtigt.

In Abb. 3-17 sind die so detektierten Kreischgeräusche im Vergleich zum jeweiligen Rollgeräusch dargestellt. Die farbliche Kodierung zeigt unterschiedlich hohe Bewertungsparameter (mittlerer Bandpegel 8-12 kHz).

Manche der Geräusche mit einem spektral flachen Kreischanteil fallen in eine höhere Bewertung aufgrund des Auftretens von HF-Quietschen. Es ist in der Abbildung auch das Problem des Güterzugkreischens klar ersichtlich. Das normale Rollgeräusch der Güterzüge (und auch des 80-33 in Zellerndorf) liegt ab ca. 500 Hz bis mindestens 2000 Hz typischerweise

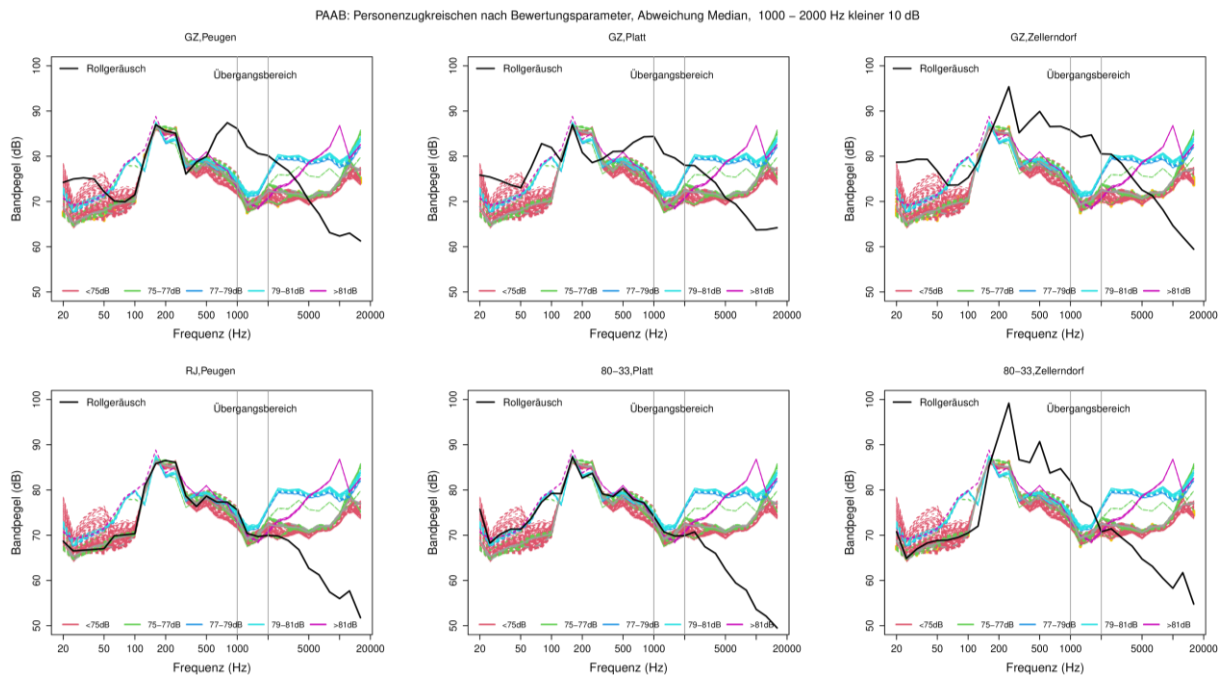


Abb. 3-17: PAAB - Vergleich der Spektren der Rollgeräuschbeispiele (schwarz) und bei durchgängigem Kreischen von Personenzügen (nur aus Peugen und Platt) mit unterschiedlich hohen Bewertungsparametern (farblich kodiert). Die dargestellten Kreischereignisse bildeten die Basis für die spätere Manipulation der Rollgeräusche.

deutlich über dem Geräusch des Personenzuges sogar mit Kreischen. Daher wären Kreischgeräusche von Güterzügen typischerweise nicht für Personenzüge anwendbar, da große Teile des Rollgeräusches des Güterzuges immer mitgenommen würden, welche für einen typischen Personenzug aber deutlich zu hoch sind.

Abb. 3-18 zeigt dies verschiedenen Kreischgeräusche nochmals als Spektrogramm. Insgesamt sind es nur 6 verschiedene Ereignisse, die Segmente sind teilweise zeitversetzte Abschnitte, um den Verlauf besser zu zeigen. Hier wurde das Grundgeräusch vom Railjet mittels einfacher Filterung dazu gemischt. Man sieht hier gut die dadurch entstehende Linie geringer Energie bei ca. 1500 Hz. Bei manchen Kreischsamples sieht man gut, dass die Erhöhung bei 8 bis 10 kHz durch hochfrequente tonale Ereignisse hervorgerufen wird (ab Sample 12 im Vergleich zu 11). Sample 18 zeigt eine hohe Variabilität innerhalb der 4 s. Das intensivste Kreischen in dieser Auswahl zeigt ebenfalls keinen konstanten Verlauf, mit einem gut definierten Maximum. Hier sieht man auch eher viele schmalbandige Komponenten, die sich zu einem breitbandigen Signal überlagern. Bei 10 kHz ist hier auch eine dominante Komponente zu erkennen (vgl. Abb. 3-17, magentafarbene Linie). Als Basis für eine spektrale Modifikation eignen sich Samples mit wenig bis gar keinen tonalen Anteilen, da diese später noch kontrolliert hinzugefügt werden können (siehe Kap. 3.3 über Quietschen). Abb. 3-19 zeigt den Vergleich des Rollgeräusches des Segments, welches am nächsten zum Median der

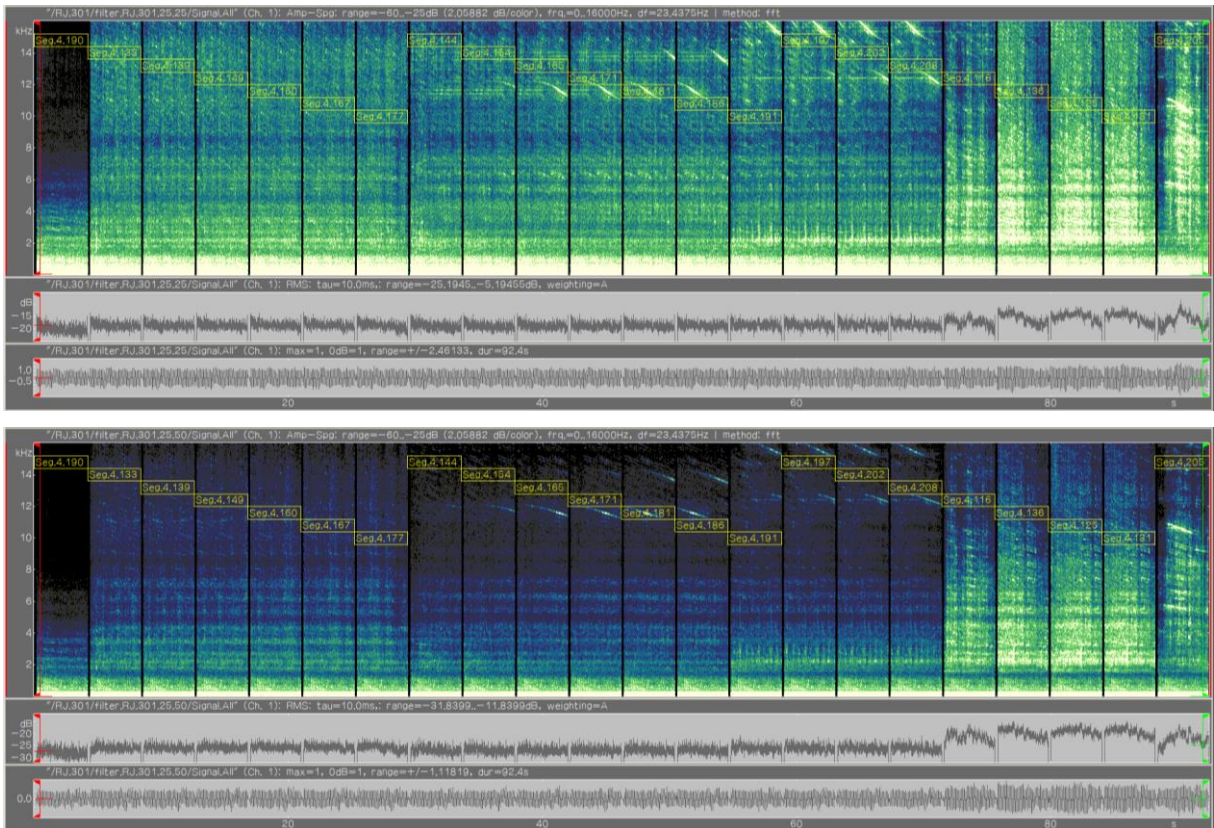


Abb. 3-18: PAAB - Kreis samples mit unterschiedlichem Bewertungsparameter. Das Rollgeräusch vom Railjet wurde durch mittels herkömmlicher Filter dazugegeben. 1: Rollgeräusch; 2–11: <75 dB; 12–18: 75–77 dB; 19: 77–79 dB; 20–21: 79–81 dB; 22: >81 dB. Die obere Abbildung zeigt Daten in 25 m, die untere in 50 m.

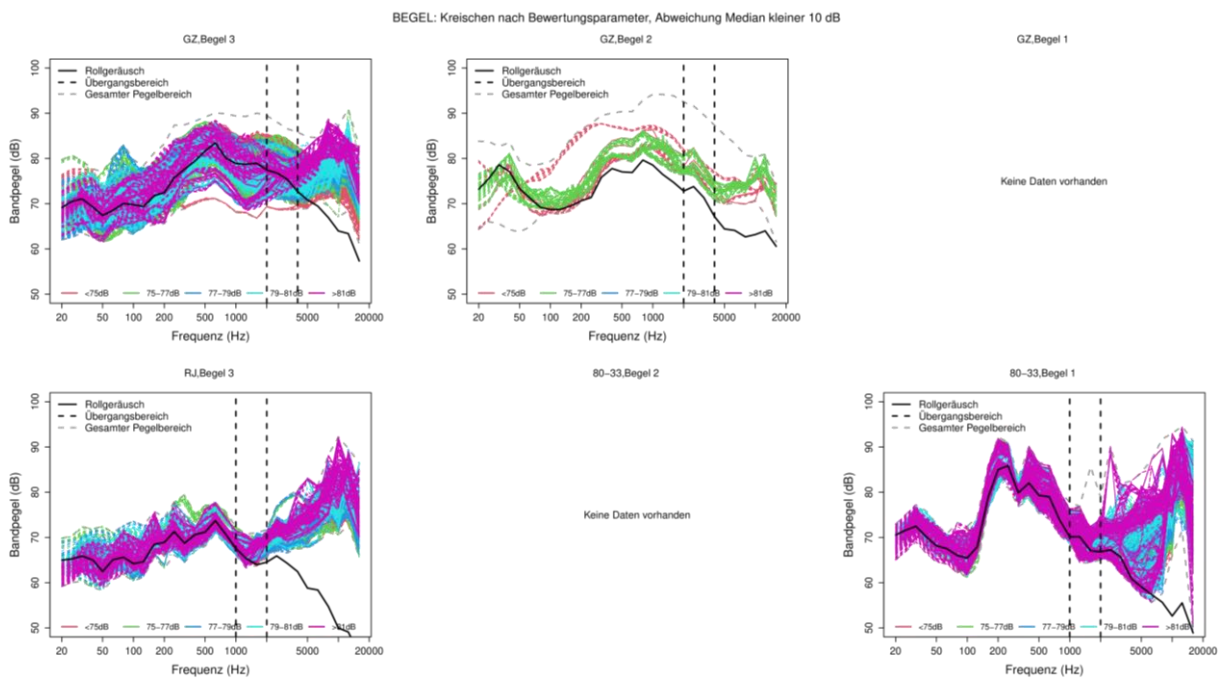


Abb. 3-19: Spektren von durchgängigem Kreischen in BEGEL im Vergleich zum Rollgeräusch. Die Farbe gibt den Bewertungsparameter an

Messstelle und des Zugtyps liegt und durchgängigem Kreischen, farblich kodiert nach dem Bewertungsparameter. Im jeweiligen Übergangsbereich (unterschiedlich für Güter- und Personenzüge) wurde definiert, dass Rollgeräusch und Kreischen maximal 10 dB voneinander abweichen dürfen.

3.4.2 Spektrale Modifikation

Um die Personenzug-Kreischgeräusche auf die verschiedenen Zugtypen anzuwenden, können ebenfalls Multiplier verwendet werden. Für jedes Kreisch- und Referenzsignal wird eine Zeit-Frequenz-Transformation gemacht (Gabor-Frame, d.h. Kurzzeit-Fourier-Transformation) und das Kreischen modifiziert, um ein gewünschtes Terzbandspektrum im relevanten Frequenzbereich zu erhalten. Der Hauptunterschied zum Quietschen besteht darin, dass es beim Kreischen deutlich schwieriger ist, eine Maske in der Zeit-Frequenz-Ebene zu definieren. Daher wird das Kreischsignal nur spektral gefiltert und danach die Koeffizienten des Referenz- und des Zeitsignals verglichen. Es werden hierfür die Teile des Kreischens oberhalb 1500 Hz bestimmt, welche einen höheren Pegel haben als das Rollgeräusch. Im Übergangsbereich kann das variieren, im höheren Frequenzbereich ist das Kreischen im Allgemeinen immer höher außer bei starker zeitlicher Variation. Unterhalb 1500 Hz wird das Geräusch mit 24 dB/Oktave abgeschwächt, sodass hier das Rollgeräusch nicht beeinflusst wird. Durch das höhere Rollgeräusch bei Güterzügen wird das Kreischen trotzdem erst ab ca. 3-4 kHz "aktiv". Oberhalb der 12,5 kHz Terz wird das Signal ebenfalls abgeschwächt (36 dB/Oktave) um keine unnötigen Komponenten im Signal zu haben.

Dann werden die jeweiligen Anteile in der Zeit-Frequenz-Ebene kombiniert und danach aus der Summe mittels Rücktransformation ein neues Signal generiert, welches die beiden Geräusche kombiniert. Der Vorteil ist, dass im Übergangsbereich das Rollgeräusch besser erhalten bleibt und die Samples dadurch "natürlicher" klingen.

Die Modifikation des Kreischens erfolgt im Zuge dieser Filterung, indem das Kreischsignal vor der Kombination mit dem Grundrollgeräusch spektral modifiziert wird. Hierzu werden die Daten aus BEGEL als Referenz herangezogen. Um eine möglichst kontrollierte Variation zu erzeugen, mussten einige Annahmen und Einschränkungen getroffen werden.

Wie erwähnt, sind die Güterzüge nicht gut zu verwenden, da das Rollgeräusch bis zu relativ hohen Frequenzen dominiert. Weiters, wie in Abb. 3-14 ersichtlich, wird das Kreischen beim 80-33 in BEGEL-01 teilweise stark durch hochfrequente tonale Ereignisse definiert. Als Basis für den breitbandigen Effekt werden daher die Daten vom Railjet aus BEGEL verwendet. Um den Effekt der auftretenden tonalen HF-Ereignisse etwas abzumildern, wurden die Terzbandspektren mit einem Median-Filter über 3 Terzen geglättet. Dadurch sollten starke

Erhöhungen einzelner Terzen herausgefiltert werden, und ein homogeneres Bild der breitbandigen Effekte entstehen. Alle Analysen wurden an den berechneten Parameter der 4 s Stimuli durchgeführt. Aus den Daten für durchgängiges Kreischen (mehr als 85 %) wurden jene Geräusche ausgewählt, die in den Terzen von 1 kHz bis 2 kHz eine Abweichung von maximal 10 dB hatten vom Median des jeweiligen Schienenfahrzeuges. In Abb. 3-20 sind die Daten vor der Median-Filterung abgebildet (graue Linien). Von diesen Ereignissen wurden dann die 5. und 95. Perzentile der geglätteten Terzbänder über die Vorbeifahrten berechnet, um eventuelle extreme Ausreißer zu vermeiden (schwarze durchgezogene Linien). Zum Vergleich sind auch die Perzentilen der ungeglätteten Terzbänder dargestellt (schwarz gepunktet). Aus diesen beiden Spektren wurden lineare Modelle mit dem Terzbandindex als Regressor angepasst. Der Frequenzbereich wurde auf 1,25 kHz bis 12,5 kHz eingeschränkt, da niedrigere Frequenzen definitiv dem Rollgeräusch zugeordnet werden können und die 16 kHz Terz aufgrund der Samplingfrequenz von 32 kHz in BEGEL nicht vollständig abgebildet war. Es wurden zu den beiden Modellen noch zwei weitere erzeugt, indem die Parameter (Achsenabschnitt und Steigung) auf dem Intervall, das durch die beiden Extrema vorgegeben war, gleichmäßig aufgeteilt wurden (rote Linien). Die dadurch entstandenen 4 Spektren dienten als Zielspektren für die Modifikation der Kreischtemplates aus PAAB. Für den Bereich oberhalb der 12,5 kHz Terz wurden die Werte ebenjener Terz einfach fortgeführt. Die bisherigen Varianten von Kreischen, Quietschen und Amplitudenskalierung werden systematisch durchgeführt. Spezielle Situationen welche jetzt folgen, werden nur an einem Subset der Geräusche (Güterzug und 80-33 in Platt) durchgeführt, da ansonsten das Experiment zu lange dauern und es für die Probanden schwierig machen würde, konzentriert die Geräusche zu beurteilen.

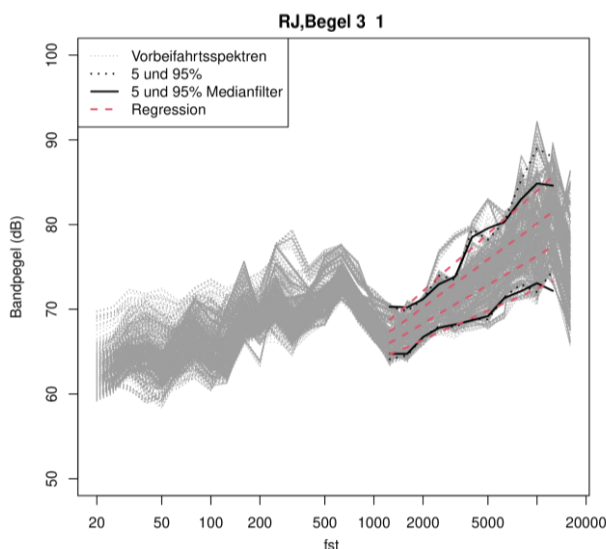


Abb. 3-20: BEGEL - Kreischen beim Railjet und abgeleitete Spektren und Anpassungskurven

3.4.3 Sonderformen

Hochfrequente tonale Geräusche

In BEGEL zeigen sich viele hochfrequente tonale Ereignisse. Um den Effekt solcher Geräusche abzuschätzen, wird auch ein solch hochfrequentes, tonales Geräusch extrahiert und zu einem Kreischen mittlerer Intensität dazugegeben. Konkret wurde ein HF-Quietschen bei ca. 8 kHz bei 25 m und 50 m ausgeschnitten (Abb. 3-21). Dieses wurde auf 10 kHz, also auf die mittlere Terz der für die Detektion von Kreischen relevanten Terzen, transponiert. Die Amplitude wurde so gewählt, dass der Terzbandpegel in etwa dem Pegel der intensiveren Kreischgeräusche bei BEGEL bei 10 kHz entspricht.

Kreischdauer

Eine Frage die sich stellt ist, wie sich die Dauer innerhalb des Segmentes auf die Wahrnehmung auswirkt. Um verschiedene Dauern zu simulieren, wurde ein Fenster definiert (Blackmann-Harris, in Anlehnung an das Adrienne-Fenster, [37]) das den On- und Offset eines zeitlich gut definierten Kreischereignisses modelliert (Abb. 3-22). Der spektrale Bereich wurde von 3150 - 12000 Hz eingeschränkt, da sich das Kreischen hier deutlich abhebt (blaue Linie). Die orange Linie stellt die Subtraktion eines im gleichen Frequenzbereich geschätzten Rollgeräusches dar, um die Modellkurve besser anpassen zu können. Wenn das mittlere Rollgeräusch mehr Energie als das momentane Geräusch hat, wurde die Energie auf 0 gesetzt. Im Experiment wurde der Onset aber vermieden, indem das Kreischen mit der Vorbeifahrt beginnt. Dies soll das Hauptaugenmerk auf die Dauer, nicht den Onset-Effekt lenken.

Spezielles Kreischen

Zwei weitere der insgesamt vier Kreischereignisse wurden ebenfalls verwendet: Kreischen mit Schwankungen und das intensivste (höchster Bewertungsparameter) Kreischen. Diese wurden im Original und spektral modifiziert (zweit-intensivste Variante) verwendet.

Quietschen und Kreischen

Eine Kombination aus Quietschen und Kreischen wird ebenfalls verwendet, und zwar mit dem 3,5 kHz-Quietschen.

3.5 Kombination Rollgeräusch-Störgeräusch

Abb. 3-23 zeigt den prinzipiellen Ablauf für die Kombination von Roll- und modifizierten Bogengeräuschen. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte nochmals im Detail beschrieben.

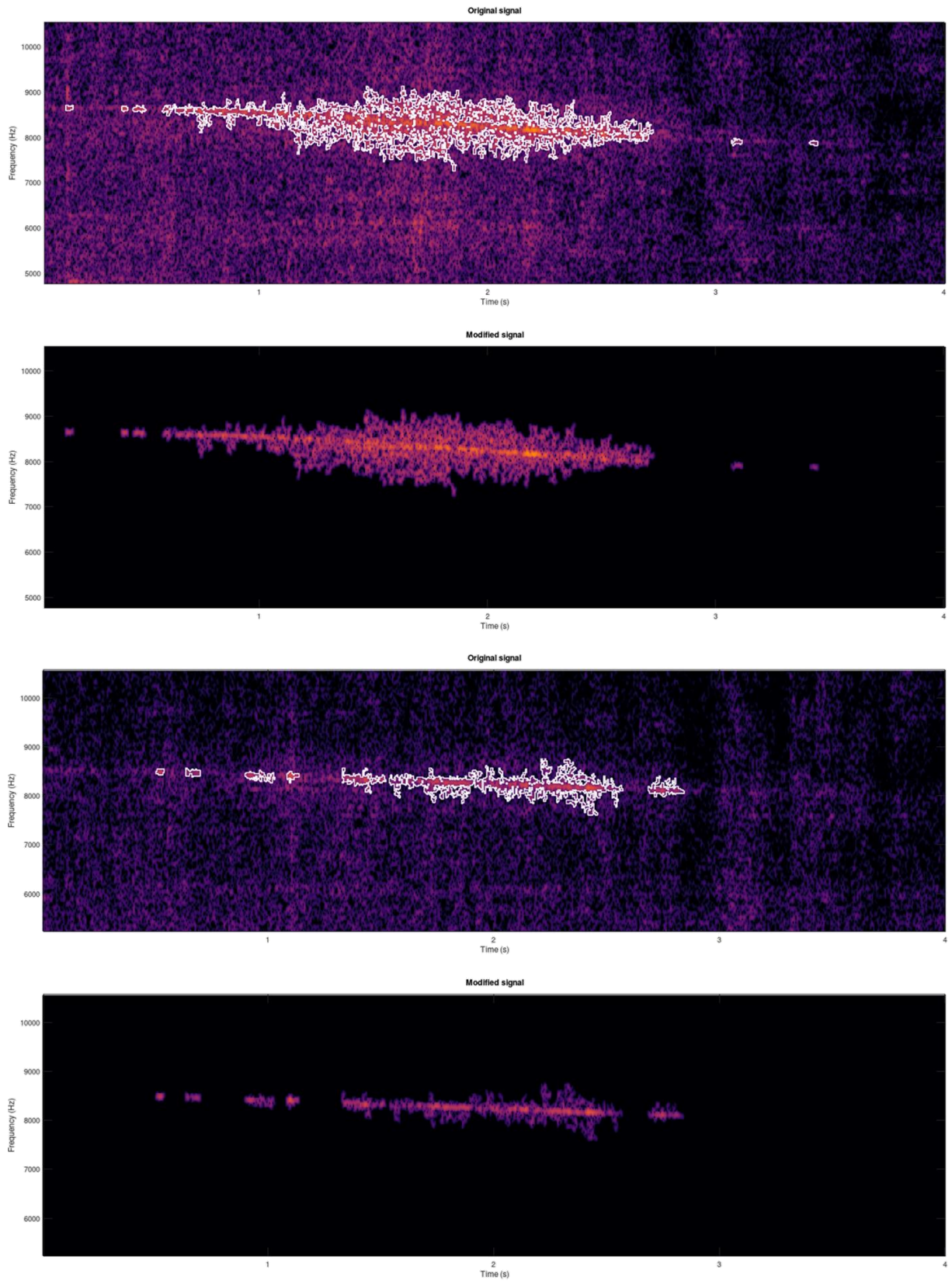


Abb. 3-21: Maske für hochfrequentes Quietschen in 25 m (oben) und 50 m (unten)

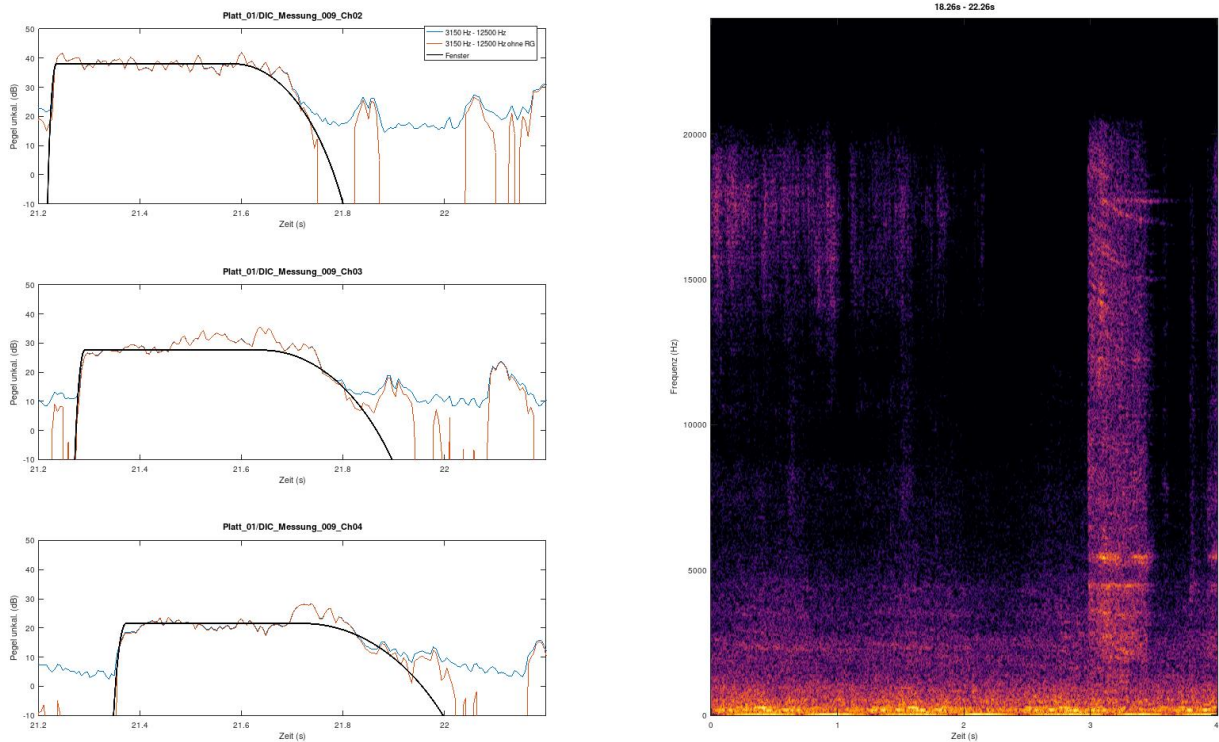


Abb. 3-22: Anpassung des Fensters (schwarze Linie), um die An- und Abklingrate eines impulshaften Kreischereignisses (blau und orange ohne geschätztem Rollgeräusch) zu modellieren

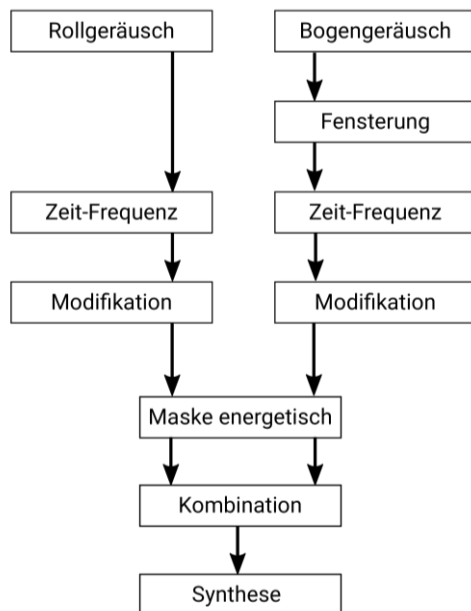


Abb. 3-23: Allgemeiner Ablauf für die Kombination von Roll- und Bogengeräuschen

Der Ausgangspunkt sind das jeweilige Rollgeräusch und Bogengeräusch. Bei Quietschgeräuschen werden als Ausgangssignale die bereits ausgeschnittenen und modifizierten Signale verwendet. Beim Kreischen wird das gemessene Signal verwendet.

Fensterung

Soll eine zeitliche Fensterung erfolgen (Variation der Kreisdauer), wird diese in diesem ersten Schritt angewendet.

Zeit-Frequenz-Transformation

Beide Signale werden mittels einer diskreten Gabor-Transformation in die Zeit-Frequenz-Ebene gebracht.

Modifikation der Geräusche

In diesem Schritt werden verschiedene spektrale und zeitliche Modifikationen angewendet. Für beide Geräusche wird eine spektrale Modifikation angewendet, um die unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen der Messstellen der betreffenden Geräusche an die Messstelle in Platt anzugleichen. Das Bogengeräusch wird im Weiteren je nach gewünschten Parametern modifiziert:

- Anpassung des Kreischspektrums mittels Referenzspektren
- Anpassung der Amplitude beim Quietschen

In diesem Schritt können im Allgemeinen natürlich auch weitere Modifikationen erfolgen.

Maske für Kombination erstellen

Die modifizierten Zeit-Frequenz-Darstellungen werden nun verglichen. Dazu wird die Energie (quadrierter Absolutwert der Gabor-Koeffizienten) verglichen und daraus eine binäre Maske erzeugt. Dadurch entsteht eine teilweise verrauschte Maske, d.h. einzelne Punkte die zufällig dem ein oder anderen Signal zugeordnet sind. Um potenzielle Artefakte im rücktransformierten Signal zu vermeiden, werden kleinere Inseln (kleine Bereiche mit dem Wert 1 umgeben von 0) oder Löcher (kleine Bereiche mit 0 umgeben von 1) mittels morphologischer Operation (open und close) beseitigt.

Kombination der Signale

In diesem Schritt werden die Maske und die inverse Maske auf das jeweilige Signal angewendet und die beiden daraus entstandenen Matrizen addiert.

Synthese

Mittels des dualen Frames wird die entstandene Zeit-Frequenz-Repräsentation des modifizierten Signals in den Zeitbereich rücktransformiert.

Sollen Kombinationen aus verschiedenen Bogengeräuschen, z.B. Kombination Kreischen und Quietschen, erstellt werden, wird zuerst das Kreischen, dann das meist deutlich dominanter Quietschen in der Zeitfrequenzebene hinzugefügt. Erst nachdem alle Geräusche kombiniert wurden wird die Synthese durchgeführt.

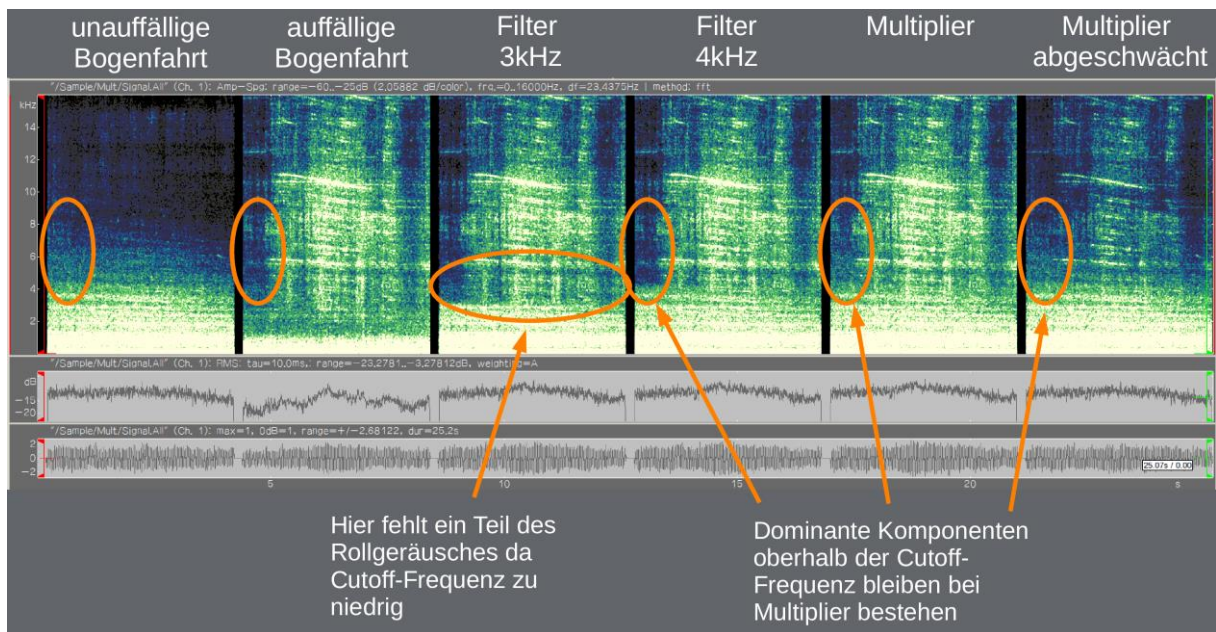


Abb. 3-24: Vergleich der Signalmodifikation mittels Multiplier und konventionellen Filter

Abb. 3-24 zeigt anhand eines Beispiels den Unterschied zwischen herkömmlicher spektraler Filterung und dem Multiplier-Ansatz. Die beiden ersten Bilder zeigen das Rollgeräusch und ein Beispiel mit Kreischen. Würde nun ein Hochpass mit 3 kHz Grenzfrequenz auf das Kreischen und ein Tiefpass mit der gleichen Grenzfrequenz auf das Rollgeräusch angewendet, so entsteht eine recht klar erkennbare Trennlinie und Komponenten des Rollgeräusches die am Anfang, wo das Kreischen schwach bis nicht vorhanden ist, auftreten, werden weggefiltert. Bei 4 kHz sieht es besser aus, das grundlegende Problem ist aber nicht gelöst. Verwendet man nun einen Multiplier wird nur der Teil des Kreischsamples verwendet, der mehr Energie aufweist (eine initiale Hochpass-Filterung bei 1 kHz soll verhindern, dass eventuelle dominante tieffrequente Ereignisse beim Kreischsample ins Rollgeräusch kopiert werden). Wird z.B. das Kreischen nun abgeschwächt, zeigt sich der Vorteil noch deutlicher. Weiters ist keine Anpassung der Filterfrequenz notwendig, was bei verschiedenen Kreischsamples und Modifikationen bei normaler Filterung der Fall wäre. Dadurch verringert sich der Aufwand beim Erzeugen der Stimuli deutlich und es müssen weniger Annahmen getroffen werden.

4 WAHRNEHMUNGSTESTS

4.1 Testdurchführung

Für die Wahrnehmungstests wurden größtenteils Personen aus dem Probandenpool des Projektpartners ISF kontaktiert. Es standen in Summe 30 normalhörende Probanden zur Verfügung (16 weiblich, Alter $27,5 \pm 3,7$ Jahre). Falls keine Daten vorhanden waren wurde die Hörschwelle mittels eines Hörtests im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 12500 Hz ermittelt. Alle Versuchspersonen hatten am besseren Ohr für alle Frequenzen eine Erhöhung der Hörschwelle von weniger als 20 dB [38]. Insgesamt hatte nur eine Versuchsperson bei einer Frequenz (12500 Hz) an einem Ohr eine Erhöhung von etwas mehr als 20 dB (23 dB am einen und 8 dB am anderen Ohr) gegenüber der Referenzhörschwelle.

4.2 Lästigkeitsbeurteilung

Für die Lästigkeitsbeurteilung wurde eine freie Größenschätzung durchgeführt [39], [40]. Diese unterscheidet sich von anderen Größenschätzungen dadurch, dass keine Referenzskala vorgegeben ist (z.B. von gar nicht bis sehr lästig). Dadurch lässt sich keine absolute Lästigkeit ableiten, sondern die Änderung der Lästigkeit als Funktion experimenteller Parameter. Dies ist keine problematische Einschränkung, da das Hauptinteresse der Studie der Veränderung der Empfindung bei Veränderung der akustischen Parameter gilt. Weiters ist die Angabe einer absoluten Lästigkeit im Labor an sich problematisch, da Lästigkeit sehr stark kontextabhängig ist [41]. Bei der freien Größenschätzung können die Probanden den Zahlenbereich frei wählen, einzige Vorgabe ist, dass eine doppelt empfundene Lästigkeit als doppelt so hoher Zahlenwert abgebildet werden soll und dass Zahlen kleiner gleich 0 nicht zulässig sind. Es ist daher immer möglich, eine größere Lästigkeit anzugeben, falls ein Stimulus lästiger ist als alle bisherigen. Im Testdesign wurden alle in Tab. 4-1 dargestellten 234 Bedingungen verwendet, wobei die mittels Kreises markierten Bedingungen nur für die zweite Hälfte der Probanden erhoben wurde. Der Grund dafür wird später im Kapitel 5.3.1 genauer ausgeführt. Das Experiment war in sechs Durchgänge aufgeteilt, wobei jeder Durchgang die Hälfte des Stimulusmaterials enthielt. Jedes Geräusch wurde also insgesamt dreimal beurteilt. Zwischen den Durchläufen mussten die Probanden mindestens 5 Minuten Pause machen. Vor Beginn des Experiments mussten die Versuchspersonen eine Einverständniserklärung unterschreiben und erhielten schriftliche Instruktionen zum Testablauf. Danach wurde ein Trainingslauf durchgeführt der 12 Geräusche enthielt, die den zu erwartenden Lästigkeitsbereich gut abgebildet haben. Danach hatten die Versuchspersonen noch einmal die Gelegenheit, eventuelle Unklarheiten anzusprechen. Insgesamt dauerte das Experiment ca. 2 bis 2,5 Stunden.

4.3 Stimulusmaterial

Tab. 4-1 zeigt einen Überblick über die 234 Testbedingungen, welche nun nochmals kurz beschrieben werden sollen. Die Methoden und die zugrunde liegenden Modelle zur Erstellung dieser Daten wurden bereits in Kapitel 3.5 beschrieben.

Es gibt 3 Messtellen mit jeweils 2 Zugtypen. Um einen äquivalenten Pegelunterschied für Vorbeifahrten mit Auffälligkeiten ableiten zu können, wurden für die leiseren Zugtypen auch Samples erzeugt, die bis zu 20 dB höhere Pegel hatten. Bei den lauterer Zügen wurde um bis zu 12 dB hinaufskaliert (80-33 in Zellerndorf gilt aufgrund des schlechten Gleiszustandes als laut).

	Variante	skaliert/ gefenstert	Peugen				Platt				Zellerndorf			
			GZ		Railjet		GZ		80-33		GZ		80-33	
			25m	50m	25m	50m	25m	50m	25m	50m	25m	50m	25m	50m
Rollgeräusch		0 dB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		4 dB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		8 dB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		12 dB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		16 dB			x	x			x	x				
		20 dB			x	x			x	x				
Quietschen 2,5 kHz		0 dB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		-10 dB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Quietschen 3,5 kHz		0 dB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		-10 dB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		-18 dB			o	o	o	o	o	o				
Quietschen 5,0 kHz		0 dB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		-10 dB	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Kreischen durchgängig	wenig		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	mittel		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	stark		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	extrem		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Kreischen konstant	stark	0,5 s					x	x	x	x				
	stark	1 s					x	x	x	x				
	stark	2 s					x	x	x	x				
	stark	3 s					x	x	x	x				
Kreischen variierend	stark					x	x	x	x					
Kreischen tonal	stark					x	x	x	x					
Kreischen + Quietschen	stark	0 dB					x	x	x	x				
Kreischen + Quietschen HF	stark	0 dB					x	x	x	x				
Kreischen + Quietschen	stark	-10 dB					x	x	x	x				
Kreischen + Quietschen HF	stark	-10 dB					x	x	x	x				
Kreischen konstant	orig						x	x	x	x				
Kreischen variierend	orig						x	x	x	x				
Kreischen tonal	orig						x	x	x	x				

Tab. 4-1: Übersicht über Testbedingungen

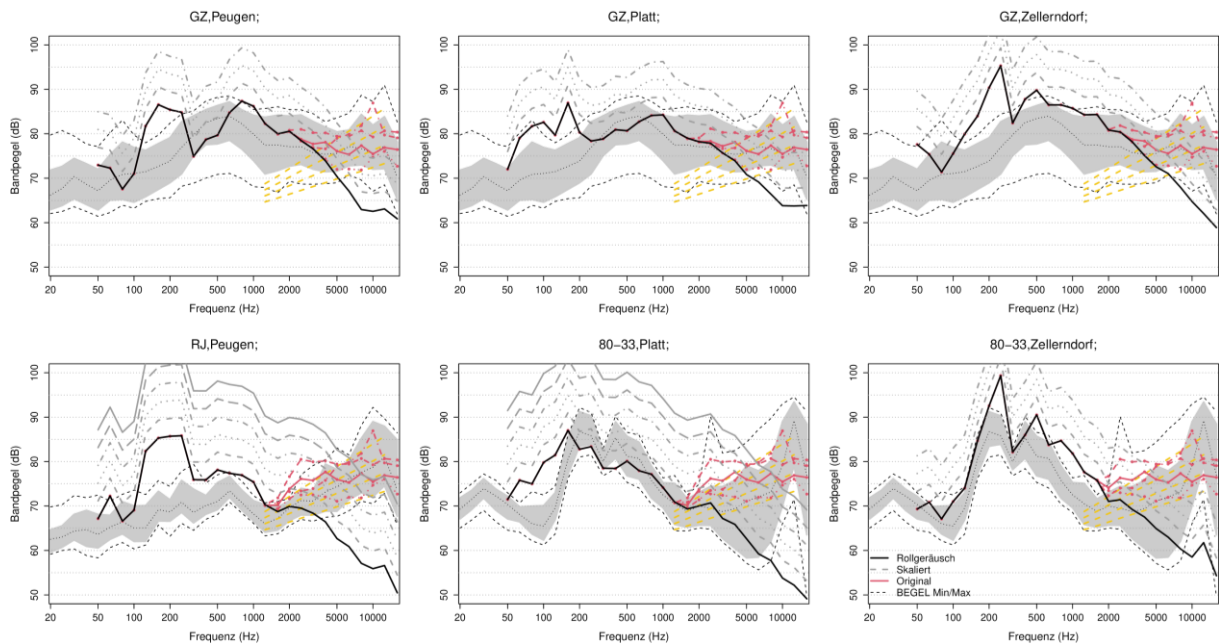


Abb. 4-1: Spektren des unmodifizierten Kreischens kombiniert mit den jeweiligen Vorbeifahrtsgeräuschen. Diese Bedingungen wurden nur für Platt getestet. Strichlierte Linie: konstantes Kreischen. Durchgezogene Linie: variierendes Kreischen. Strich-punktierte Linie: teilweise tonal (Komponente bei ca. 10 kHz). Das Kreischen mit den kleinsten Bandpegeln (punktiert) wurde in der Studie nicht verwendet. Grau unterlegt sind Daten aus BEGEL vom jeweiligen Zugtyp (5 und 95 Perzentil). Dünne Linien zeigen das Minimum, Median und Maximum. Dicke graue Linien zeigen die skalierten sauberen Vorbeifahrten.

In Abb. 4-1 sind die Emissionsspektren (gemessen in 7,5 m Abstand) dargestellt. Die dicke schwarze Linie stellt die unmodifizierten Vorbeifahrtsspektren dar, während die grauen Linien die Pegelerhöhungen darstellen. Grau unterlegt sind Daten für durchgängiges Kreischen aus BEGEL vom jeweiligen Zugtyp (5 und 95 Perzentil) in einem vergleichbaren Geschwindigkeitsbereich. Da nur teilweise geeignete Daten vorhanden waren, wurde für die Güterzüge nur BEGEL-03 für den Vergleich herangezogen. Bei den Personenzügen war es die Messtelle BEGEL-03 für den Railjet und BEGEL-01 für den 80-33 (vgl. Abb. 3-19). Diese Daten werden auch in den weiteren 4 Abbildungen dargestellt.

Beim Kreischen wurden 3 verschiedene Arten als Basis für den Versuch herangezogen: ein über die Dauer des Segments relativ konstantes Kreischen (durchgezogen), ein zeitlich variierendes (strichliert) und eines mit einem stärkeren tonalen Anteil (strichpunktiert). Alle 3 Grundvarianten des Kreischens (konstant, variierend und teilweise tonal) wurden im Original verwendet (rote Linien in Abb. 4-1). Das vierte dargestellte Kreischen (punktiert) wurde aufgrund der eingeschränkten Dauer des Experiments nicht verwendet.

Da die Testdauer nicht beliebig lang gewählt werden konnte, mussten Einschränkungen getroffen werden. Nur beim konstanten Kreischen wurden alle 4 aus BEGEL abgeleiteten Zielspektren (gelbe Linien) verwendet und das so erhaltene Kreischen in Kombination mit allen

Zugtypen und Messstellen kombiniert (Abb. 4-2). Alle anderen Varianten inklusive der unmodifizierten Kreischereignisse wurden, wie Tab. 4-1 dargestellt, eingeschränkt verwendet, indem nur Rollgeräusche aus Platt als Basis verwendet wurden. Für die beiden anderen Kreischvarianten wurde auch nur ein Zielspektrum (die Variante mit der zweithöchsten Energie im hochfrequenten Bereich, in der Tabelle als starkes Kreischen bezeichnet) verwendet.

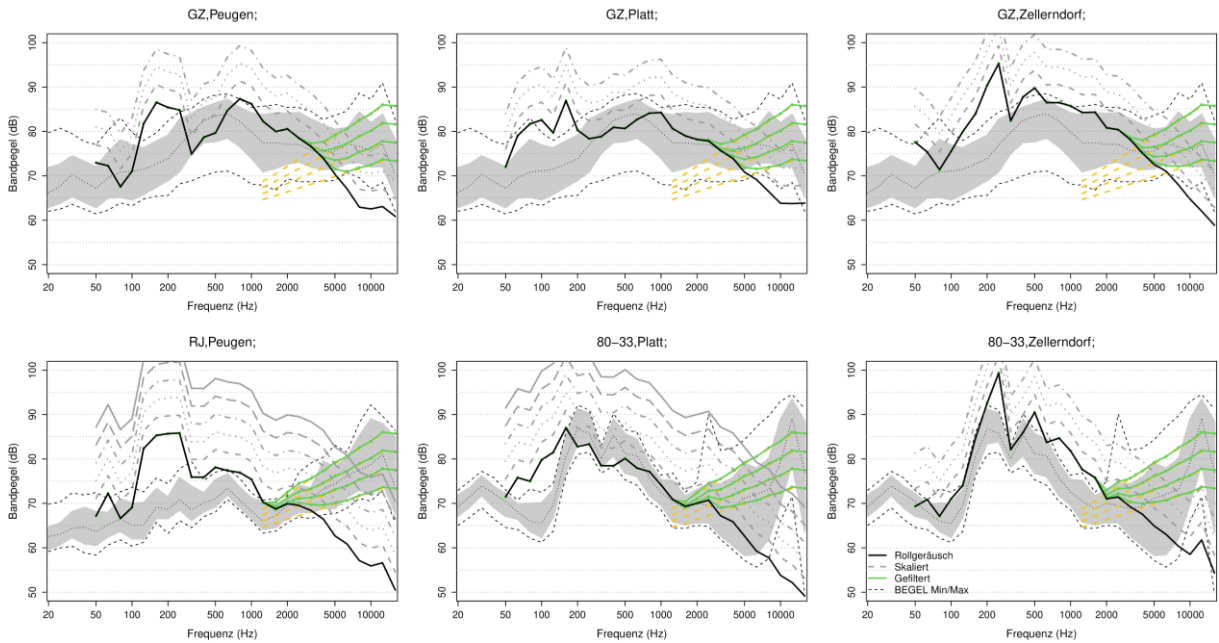


Abb. 4-2: Spektren des spektral modifizierten Kreischens kombiniert mit den jeweiligen Vorbeifahrtsgeräuschen. Gelbe Linien geben das Zielspektrum vor. Grau unterlegt sind Daten aus BEGEL vom jeweiligen Zugtyp.

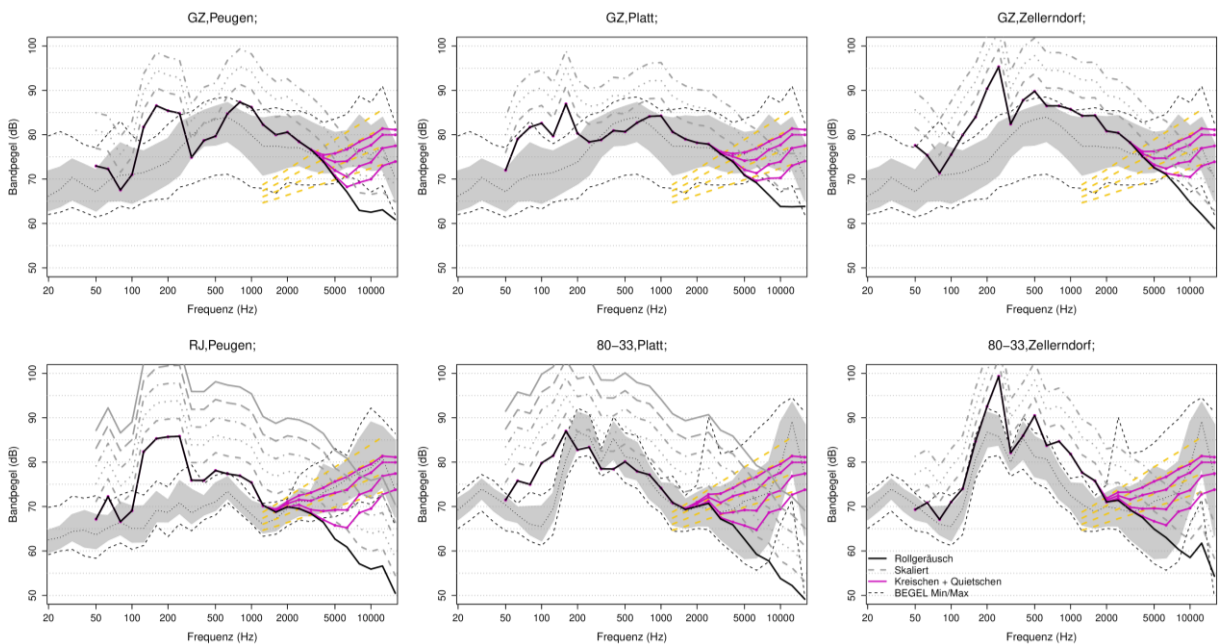


Abb. 4-3: Spektren durch zeitlich begrenztes Kreischen. Von oben nach unten: 3 s, 2 s, 1 s und 0,5 s. Grau unterlegt sind Daten aus BEGEL vom jeweiligen Zugtyp.

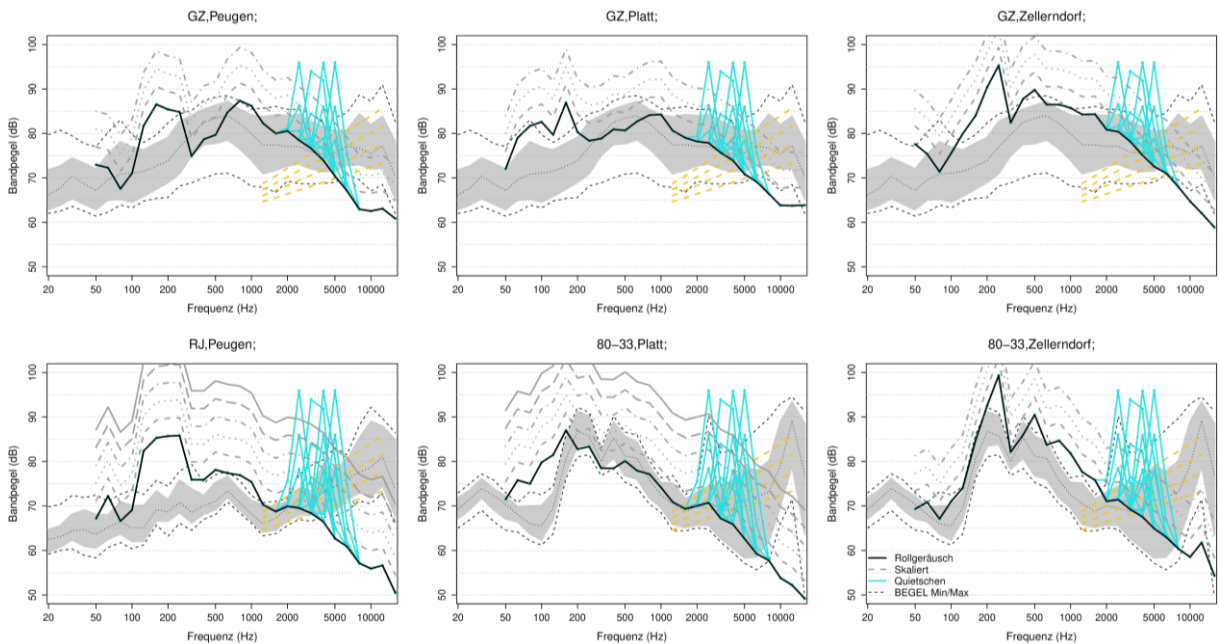


Abb. 4-4: Spektren mit tonalen Komponenten. Gezeigt werden vier Frequenzen. Die dritte Frequenz von unten ist die Originalfrequenz (ca. 4 kHz) und wurde nicht verwendet. Grau unterlegt sind Daten aus BEGEL vom jeweiligen Zugtyp.

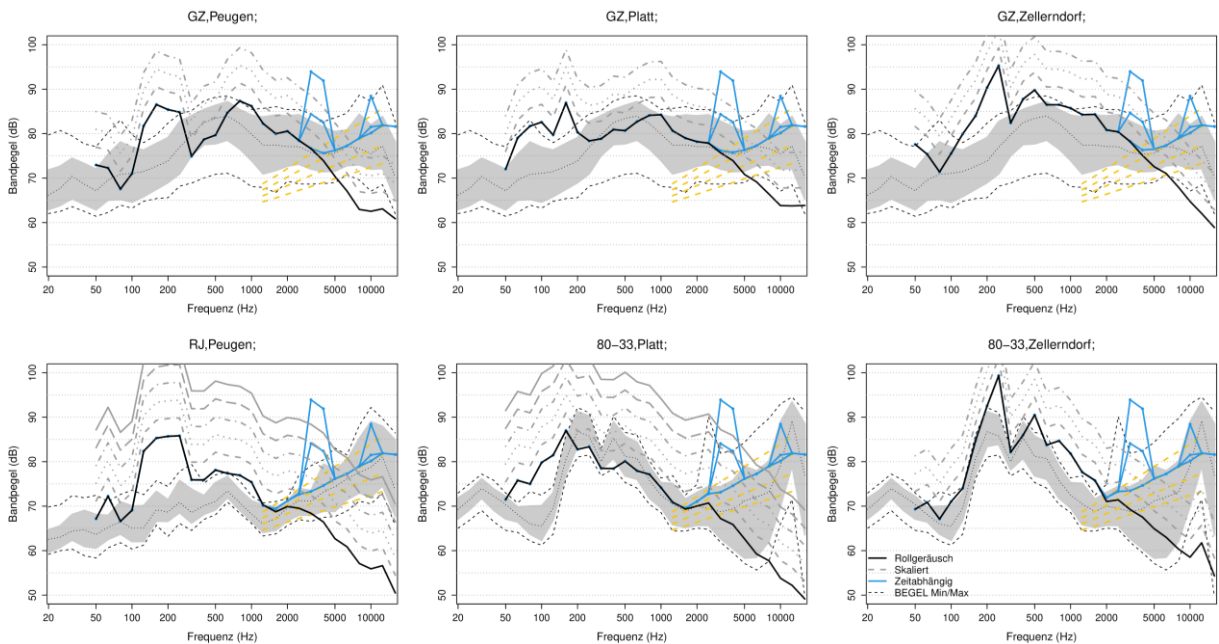


Abb. 4-5: Spektren mit Kombination von starkem Kreischen und tonalen Komponenten. Grau unterlegt sind Daten aus BEGEL vom jeweiligen Zugtyp.

Diese Einschränkung gilt auch für das durch eine Fensterfunktion zeitlich künstlich begrenzte Kreischen (Abb. 4-3).

Für das schmalbandige Quietschen wurden 3 Frequenzen definiert (2500 Hz, 3500 Hz und 5000 Hz, das entspricht Sprüngen von ca. einer halben Oktave), Abb. 4-4 zeigt die Spektren für die zwei verschiedenen Quietschamplituden welche im Test verwendet wurden. Einerseits

wurde der Originalpegel beibehalten, andererseits ein Quietschen mit um 10 dB abgesenkter Amplitude verwendet. In Abb. 4-4 ist auch die Originalfrequenz des Quietschens dargestellt, diese wurde im Test aber nicht verwendet.

Abschließend wurden auch Kombinationen von breitbandigen und tonalen Komponenten definiert (diese aber wiederum nur für Platt). Es wurde hier starkes Kreischen mit Quietschen bei 3500 Hz und bei 10 kHz kombiniert (Abb. 4-5).

Alle Stimuli mussten um 21 dB im Pegel reduziert werden, um einen L_{Aeq} von 80 dB nicht zu überschreiten.

4.4 Datenaufbereitung

Bei diesem Test kam es vor, dass Probanden sich vertippten. Wenn solche Fehler gemeldet wurden (insgesamt 36 über 14 Probanden verteilt), und diese eindeutig nachvollziehbar waren (26 Fälle), wurde eine Korrektur der Daten vorgenommen und protokolliert. In 7 Fällen wurde der Wert exkludiert, da nicht mehr klar war, welcher Wert beabsichtigt war aber auf Nachfrage eindeutig war, dass es sich um eine falsche Eingabe gehandelt hat (extrem große Werte oder 0). Ein Wert wurde belassen, da dieser nicht eindeutig als Ausreißer erkennbar war. Insgesamt war der Anteil an den 20790 Urteilen sehr gering.

Die Urteile wurden zur Basis 2 logarithmiert, d.h. eine Steigerung der log-Lästigkeit um 1 bedeutet eine Verdoppelung.

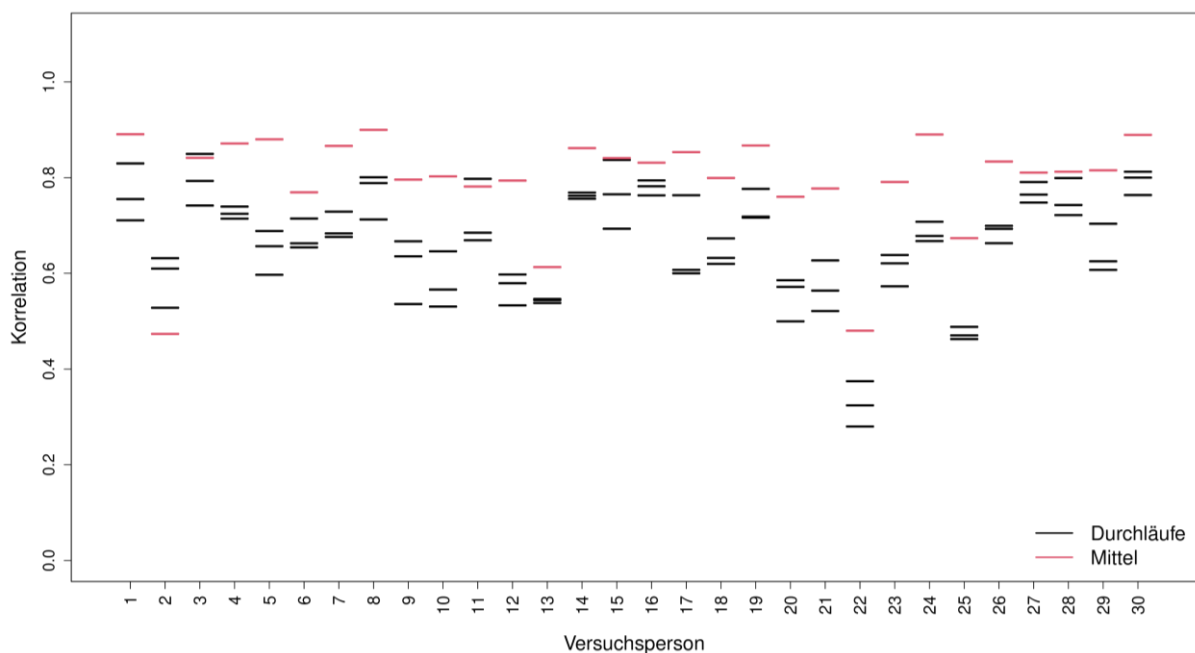


Abb. 4-6: Korrelation der Probandenurteile zwischen den Durchläufen und mit dem Gesamtmittelwert (rot)

Abb. 4-6 zeigt die Korrelationen über die drei Durchgänge (alle 3 möglichen Kombinationen) pro Probanden, wobei hier die zwei Wiederholungen pro Bedingung und Durchgang gemittelt wurden. Insgesamt sind die Urteile der meisten Versuchspersonen über die Wiederholungen relativ konsistent und korrelieren auch mit dem Populationsmittelwert. Trotzdem einige Versuchspersonen vergleichsweise niedrige Korrelationen aufweisen, werden diese nicht herausgenommen, da kein Hinweis darauf besteht, dass die Aufgabe nicht verstanden bzw. falsch durchgeführt wurde. Für die weitere Analyse wurde, um den Einfluss möglicher Extremwerte zu minimieren, pro Person und Bedingung der Median berechnet und der Mittelwert über alle mittleren Urteile pro Person abgezogen um die Daten zu normalisieren [40], [42]. Für den Gruppenmittelwert wurden diese probandenspezifischen Urteile pro Bedingung über die Probanden gemittelt.

5 ERGEBNISSE

5.1 Vorbeifahrtsgeräusche

Als erstes werden die unauffälligen Vorbeifahrtsgeräusche analysiert, da diese die Basis für potentielle Anpassungswerte bilden. Der Ansatz ist, für Vorbeifahrten mit auffälligen Geräuschen ein Pegelzuschlag mittels eines Modells zu bestimmen. Hier gibt es prinzipiell aber zwei unterschiedliche Zuschläge: einen akustischen und einen perzeptiven.

Abb. 5-1 illustriert die beiden Werte. Die grüne Linie stellt den als linear angenommenen Anstieg der Lästigkeit in Abhängigkeit des Pegels dar, wenn keine auffälligen Bogengeräusche vorhanden sind. Der grüne Punkt stellt exemplarisch das Rollgeräusch ohne Auffälligkeiten dar und der rote Punkt wenn eine Auffälligkeit vorhanden ist. Dieses zusätzliche Geräusch verursacht einen gewissen akustisch begründeten Pegelanstieg, welcher z.B. im Projekt BEGEL genau untersucht wurde. Darüber hinaus ergibt sich aber noch ein weiterer Wert der rein durch die veränderte Wahrnehmung entsteht, bezogen auf den A-bewerteten Pegel. Hierzu betrachtet man einfach die Differenz zwischen dem tatsächlichen Pegel und dem hypothetischen Pegel den das reine Rollgeräusch bei gleicher Lästigkeit haben müsste. Die Summe der beiden kann dann als der gesamte Anpassungswert aufgefasst werden, also der Zuschlag den die Auffälligkeit vom reinen Rollgeräusch erhält. In diesem Abschnitt wird auf Basis des Rollgeräusches untersucht, wie dieses Modell aussieht. In den nächsten Abschnitten wird gezeigt, wie diese Zuschläge in den hier erhobenen Wahrnehmungsdaten aussehen und wie sie mit akustischen Merkmalen zusammenhängen. Wie diese Zuschläge dann in ein Regelwerk integriert werden können, wird in Kapitel 6.4 diskutiert.

Abb. 5-2 zeigt ein lineares Modell (links) für den L_{Aeq} für alle Vorbeifahrtsgeräusche (Entfernungen und Skalierungen). Dieses Modell erklärt ca. 96 % der Varianz und passt sehr

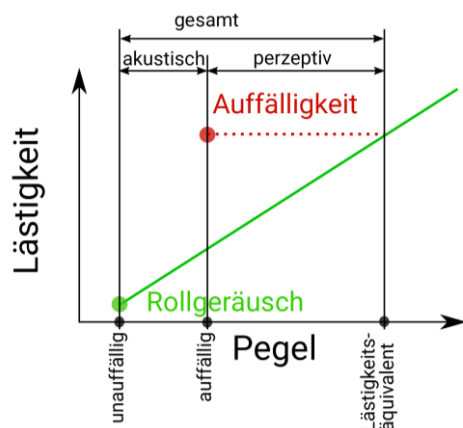


Abb. 5-1: Akustischer und perzeptiver Anpassungswert

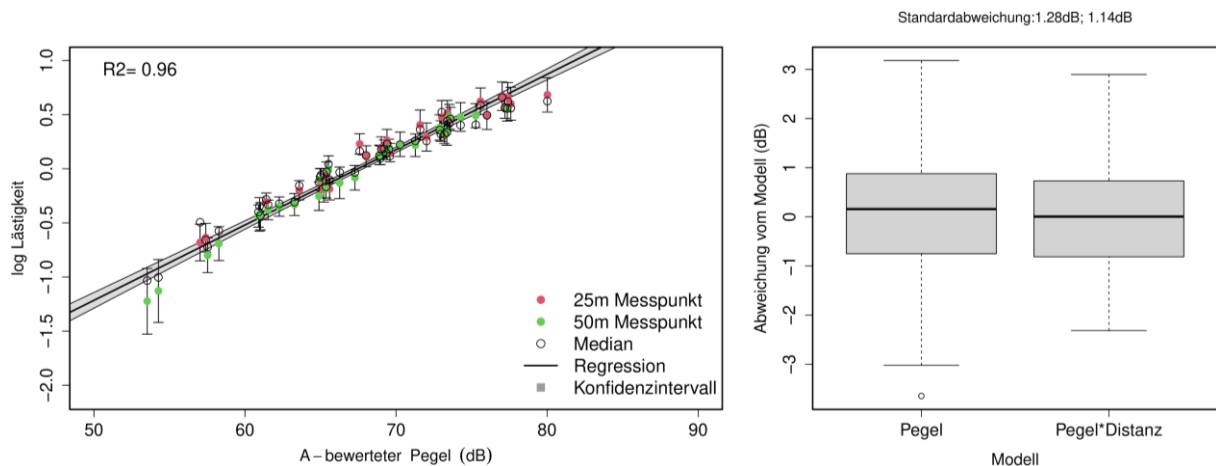


Abb. 5-2: Regressionsmodell Lästigkeit als Funktion des L_{Aeq} für unauffällige Vorbeifahrten. Das linke Bild zeigt das lineare Modell, das rechte die Verteilung der horizontalen Abweichungen für das Modell nur mit L_{Aeq} und wenn die beiden Messabstände getrennt modelliert werden.

gut mit den Daten zusammen. Die rechte Abbildung zeigt die mittels einer inversen Schätzung [43] bestimmten horizontalen Abstände zum Modell. Dies entspricht sozusagen den perceptiven Anpassungswerten, hier aber nur für Rollgeräusche, und die Streuung ist daher ein Maß für die Güte dieses Modells. Wird die Messposition mitberücksichtigt, ergibt sich zwar ein signifikanter Einfluss, die Verteilung der Abweichungen ist im Schnitt aber sehr ähnlich weswegen das Modell nur mit dem L_{Aeq} als Basis genommen wird.

Bei einigen Datenpunkten ergibt sich eine größere Abweichung zwischen Mittelwert und Median (graue Symbole). Dies tritt bei leisen Zügen ohne Pegelveränderung auf. Es scheinen hier zum Teil die Urteile einiger weniger Probanden verantwortlich, welche diese als überproportional weniger lästig beurteilen (Abb. 5-3). Der Mittelwert ist daher für diese beiden Bedingungen etwas niedriger verglichen zum Median. Trotzdem werden auch diese Daten berücksichtigt, da kein anderes objektives Kriterium besteht (z.B. Task nicht verstanden oder ähnliches) um die Daten oder Versuchspersonen auszuschließen.

Alle Analysen die nun folgen basieren auf diesen Gruppenmittelwerten, d.h. pro Bedingung wurde für jede Versuchsperson zuerst der Median über die Wiederholungen und danach der Mittelwert über die Probanden berechnet. Das aus den unauffälligen Rollgeräuschen abgeleitete lineare Modell (Abb. 5-2) wurde für die Berechnung der Anpassungswerte verwendet. Hierzu wurde mittels inverser Schätzung (Funktion invest im R-Paket investr [43]) aus den mittleren Lästigkeitsurteilen und dem Rollgeräuschmodell der Lästigkeitsäquivalente Pegel bestimmt und die Differenz zum tatsächlichen Pegel berechnet (perzeptiver Anpassungswert). Bei diesem Modell beträgt die Steigung der Lästigkeit 0,0696 pro dB Pegelsteigerung was ca. 14 dB pro Verdoppelung der Lästigkeit entspricht.

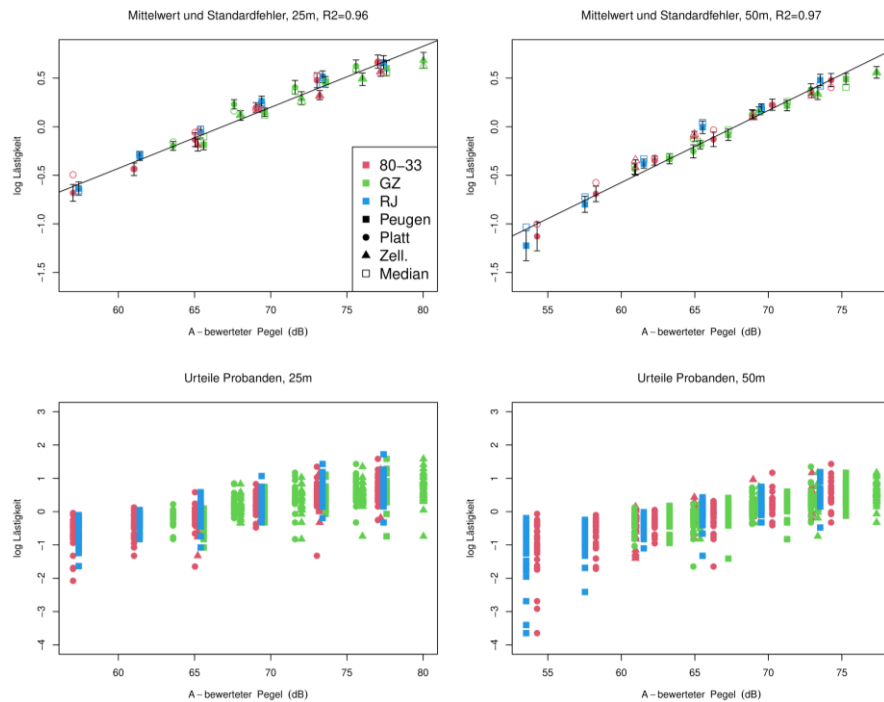


Abb. 5-3: Verhältnis Lästigkeit zu L_{Aeq} für unauffällige Vorbeifahrten. Gezeigt werden Mittelwert (volle Symbole), Standardfehler und Median (leere Symbole, oben) sowie die einzelnen mittleren Urteile der Probanden (unten). Der Zugtyp ist farblich kodiert, die Messstelle durch Symbole.

5.2 Kreischen

Als Kreischen werden hier die breitbandigen Auffälligkeiten bezeichnet, welche vorwiegend im hohen Frequenzbereich auftreten (Spurkranzanlauf). Das Hinzufügen des definierten konstanten Kreischens resultiert im Allgemeinen in einem relativ geringen Unterschied im A-Pegel (akustischer Anpassungswert, farbige Symbole in Abb. 5-4). Allerdings sind bei leiseren Zügen (Platt und Peugen, linke und mittlere Grafik in der unteren Reihe) und starkem Kreischen die Pegelunterschiede (akustischer Anpassungswert) ausgeprägter und können bis zu 5 dB betragen, was auf den geringeren Pegel des Rollgeräusches und des daraus resultierenden größeren Einflusses des hochfrequenten Bereichs zurückzuführen ist.

Bei der Lästigkeitsbewertung zeigen sich allerdings große Unterschiede, wie in Abb. 5-4 gut zu sehen ist. Der Zusammenhang zwischen L_{Aeq} und Lästigkeit ist bei den Kreischsamples eindeutig nicht-linear und die Lästigkeitsbeurteilungen sind deutlich über dem Rollgeräusch bei gleichem A-Pegel. Der perzeptive Anpassungswert, d.h. der horizontale Abstand zum Modell für das Rollgeräusch (strichlierte Linie), beträgt hier bis zu etwas unter 10 dB.

Abb. 5-5 zeigt die perzeptiven Anpassungswerte als Funktion des Unterschiedes im mittleren Bandpegel der 8 kHz, 10 kHz und 12,5 kHz Terz zwischen der Vorbeifahrt mit und ohne Kreischen (hier auch bezeichnet als Kreischparameter). Dieser mittleren Bandpegel der 8 kHz,

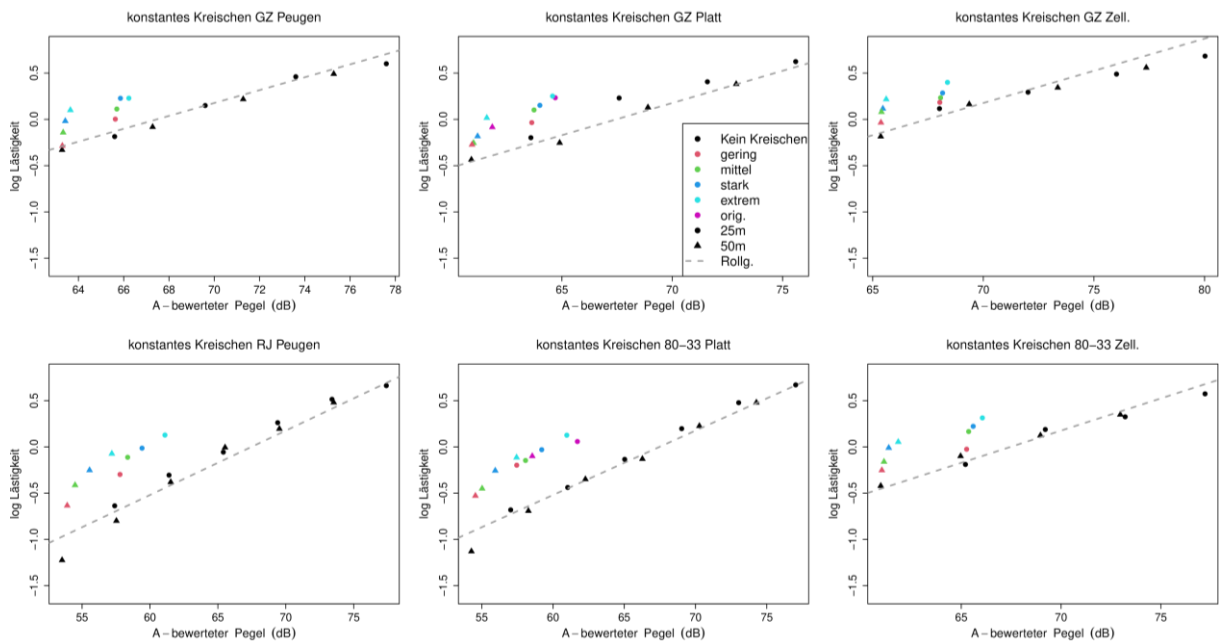


Abb. 5-4: Modifiziertes und unmodifiziertes konstantes Kreischen als Funktion des A-Pegels und Vergleich mit reinem Rollgeräusch

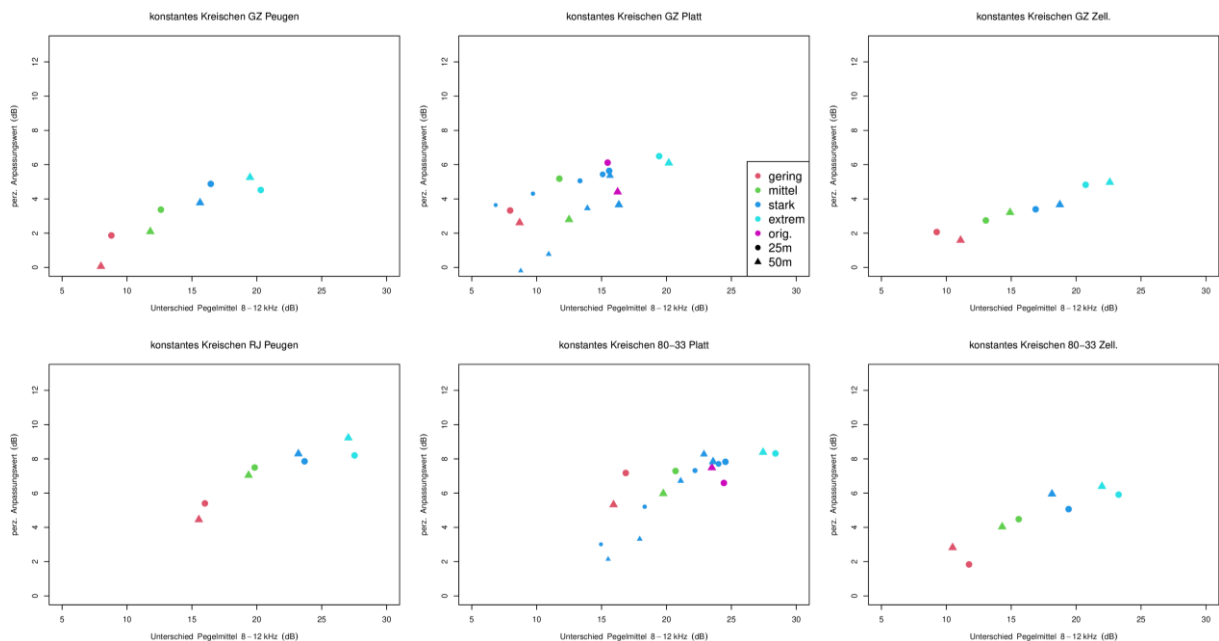


Abb. 5-5: Modifiziertes und unmodifiziertes Kreischen als Funktion des Unterschiedes im Bewertungsparameter. Die kleineren Symbole bei Mesststelle Platt sind Kreischgeräusche mit kürzerer Dauer (3 s, 2 s, 1 s und 0,5 s).

10 kHz und 12,5 kHz Terz wird in der Detektion von Kreischereignissen als Kennwert herangezogen. Es scheint bei den leiseren Zügen hier einen gewissen Sättigungseffekt bei sehr starkem Kreischen (hoher Unterschied im hochfrequenten Bereich) zu geben. Das Verhalten bei noch extremerem Kreischen kann hier nicht extrapoliert werden, allerdings wurde schon ein sehr weiter Bereich im Experiment verwendet, und deutlich extremere

Kreischereignisse würden vermutlich, wenn überhaupt, nur extrem selten auftreten. Bei den Güterzügen und beim 80-33 in Zellerndorf (ähnliche Pegel wie Güterzüge) sind die Unterschiede geringer und in diesem Bereich nimmt die Lästigkeit linear mit dem Pegelunterschied zu. Die kleineren Symbole (nur mittlere Spalte, Messtelle Platt) zeigen das starke Kreischen mit Dauern von 0,5 s bis 3 s anstatt den vollen 4 s. Es zeigt sich, dass die zusätzlichen Kreischvarianten erwartungsgemäß zu höherer Varianz führen aber tendenziell ein ähnliches Verhalten haben.

Werden alle Kreischergebnisse (Messtellen, Entfernungen, Zugtypen) kombiniert ergibt sich ein interessantes Bild (Abb. 5-6): Für konstantes Kreischen (obere Reihe, inklusiver kürzerer Kreischereignisse) ergibt sich ein klarer linearer Zusammenhang zwischen perceptiven Anpassungswert und dem Kreischparameter. Auch die kürzeren Ereignisse passen gut in das Gesamtbild (kleinere Symbole). Werden alle Entfernungen kombiniert (dritte Spalte), ergibt sich eine minimale Erhöhung der Streuung der Abweichungen der perceptiven Anpassungswerte (Bildüberschriften und rechte obere Abbildung). Gibt man auch die anderen Kreischvarianten dazu (untere Reihe), erhöht sich die Streuung ein wenig, aber das Bild bleibt sehr ähnlich.

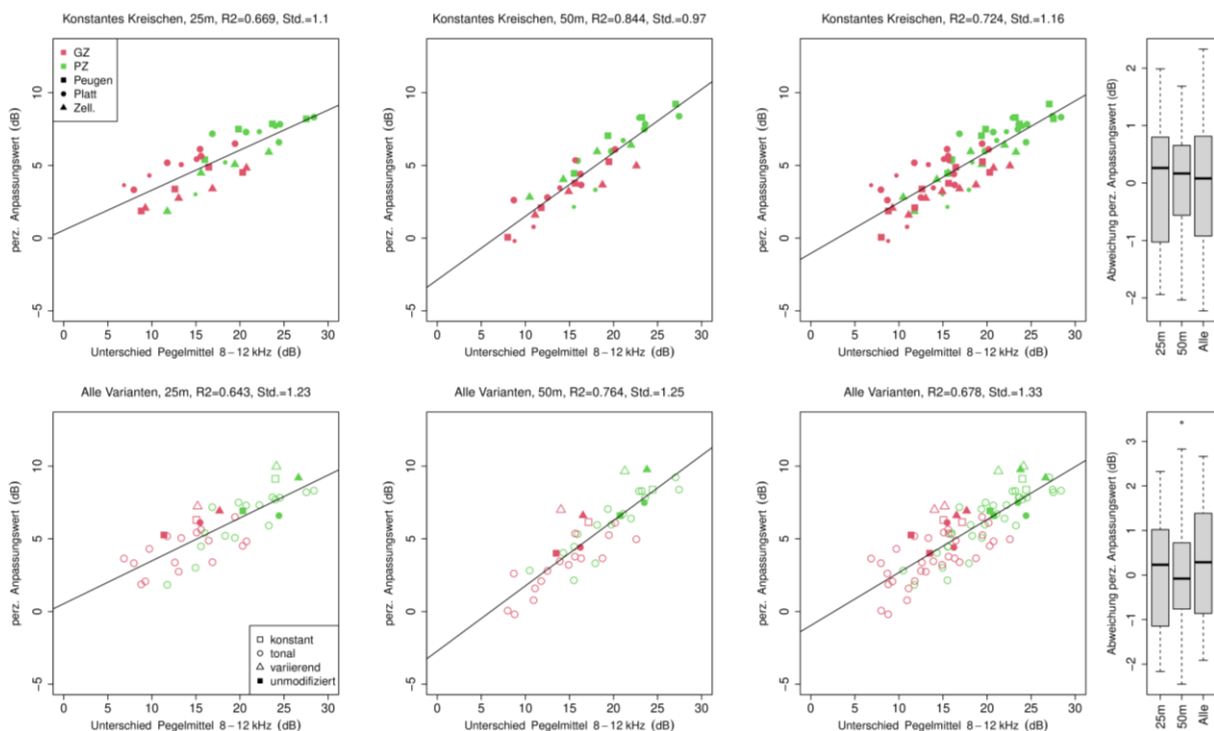


Abb. 5-6: Reines Kreischen als Funktion des Unterschiedes des mittleren Pegels im HF-Bereich. Die obere Reihe zeigt die Ergebnisse für alle Varianten des konstanten Kreischens. Von links nach rechts: 25 m, 50 m, beide Entfernungen und die jeweiligen Fehler in Bezug auf das lineare Modell. Symbole notieren die Messstelle, Farben den Zugtyp. Untere Reihe: alle Varianten vom Kreischen ohne zusätzliche tonale Signale. Symbole zeigen das Kreischsample. Gefüllte Symbole zeigen das unmodifizierte Kreischen.

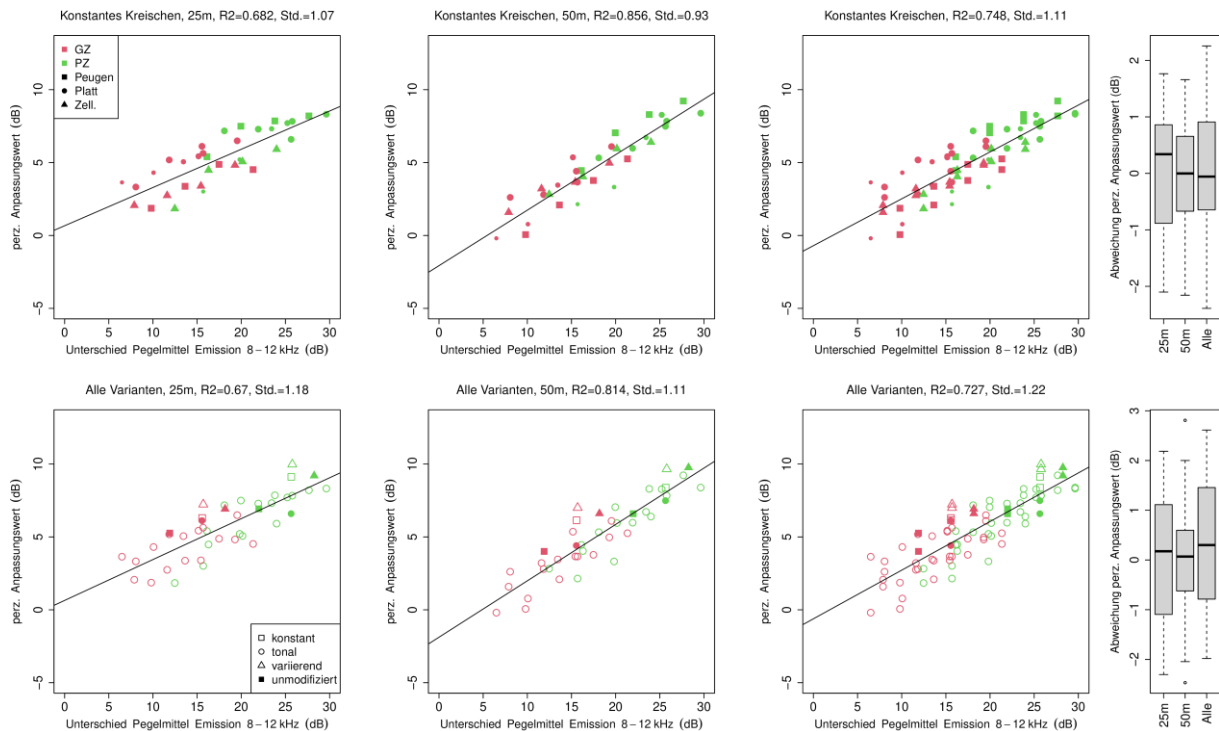


Abb. 5-7: Reines Kreischen als Funktion des Unterschiedes des mittleren Pegels im HF-Bereich bei 7,5 m. Die obere Reihe zeigt die Ergebnisse für alle Varianten des konstanten Kreischens. Von links nach rechts: 25 m, 50 m, beide Entfernungen und die jeweiligen Fehler in Bezug auf das lineare Modell. Symbole notieren die Messstelle, Farben den Zugtyp. Untere Reihe: alle Varianten vom Kreischen ohne zusätzliche tonale Signale. Symbole zeigen das Kreischsample. Gefüllte Symbole zeigen das unmodifizierte Kreischen.

Diese Analyse basiert auf den Daten in 25 m und 50 m und ist in der Praxis eher schwierig anzuwenden, da solche Daten de-facto nicht in ausreichender Menge vorhanden sind. Stellt man die gleiche Information als Funktion des Unterschiedes in 7,5 m dar, ändert sich aber wenig (Abb. 5-7). Tatsächlich verringert sich der Modellfehler sogar etwas mit einer Standardabweichung im Bereich von 1,1 bis 1,2 dB.

5.3 Quietschen

Abb. 5-8 zeigt die Lästigkeit in Abhängigkeit des Quietschens. Wie schon beim Kreischen ist die Beurteilung erwartungsgemäß deutlich unterschiedlich im Vergleich zu reinen Vorbeifahrtsgeräuschen. Die verschiedenen Quietschpegel schlagen sich aber weit deutlicher im L_{Aeq} nieder als das beim Kreischen der Fall ist (d.h. höherer akustischer Anpassungswert). Das liegt an den extrem hohen Bandpegeln die hier auftreten können und zusätzlich daran, dass die Frequenzen im durch die A-Gewichtung am stärksten betonten Frequenzbereich liegen. Bei den lauterer Zügen ist aber wie zu erwarten der Pegelunterschied, der durch das Quietschen verursacht wird, geringer.

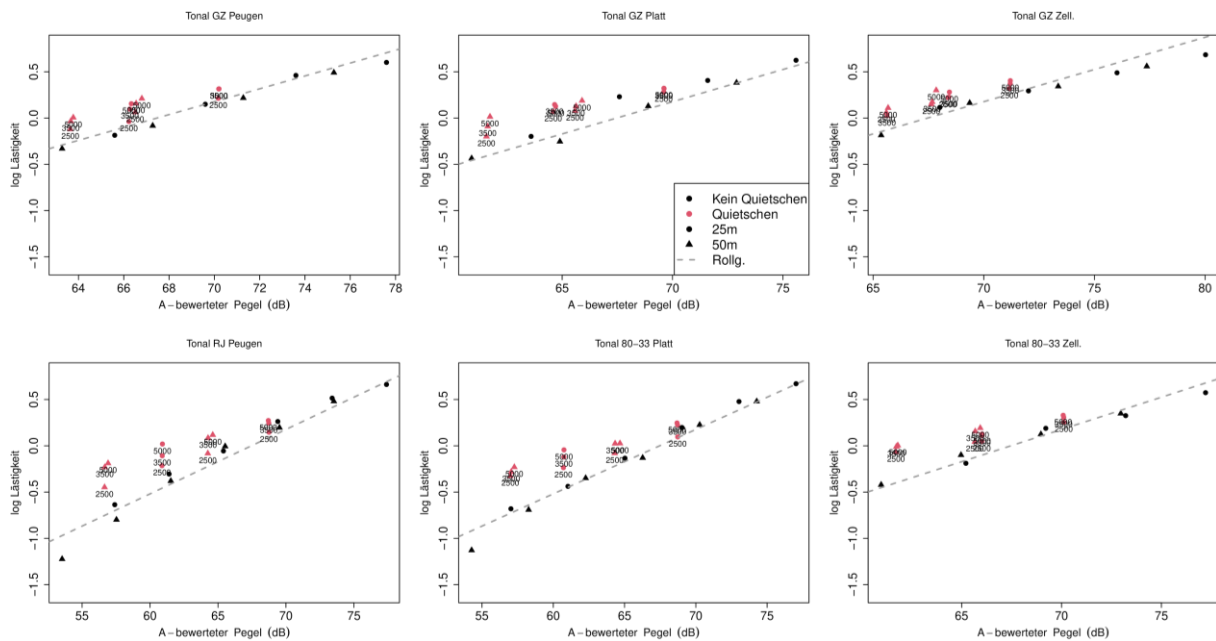


Abb. 5-8: Lästigkeit beim Quietschen in Abhängigkeit des L_{Aeq} . Jede Grafik zeigt eine Messtelle und einen Zugtyp. Symbole zeigen die Entfernung. Rote Symbole sind Geräusche mit Quietschen, schwarze normale (skalierte) Vorbeifahrtsgeräusche. Die Quietschfrequenz ist jeweils angegeben.

Ähnlich zum Kreischparameter wird auch hier als erstes der für die Detektion von Quietschgeräuschen verwendete Kennwert als akustisches Maß herangezogen. Beim Quietschen wurde für die Erkennung der Unterschied zwischen der Terzbandenergie im betroffenen Band und dem Mittelwert der beiden benachbarten Bänder verwendet [1]. Die benachbarten Terzen stellen hier einen Schätzer für den Rollgeräuschpegel der betroffenen Terz dar. Wenn zwei Terzen durch das Quietschen erhöht sind, wird für den Quietschpegel die energetische Summe der beiden genommen und für das Rollgeräusch wiederum die an die erhöhten Terzen angrenzenden Bänder. Für den Test trifft dies auf 3500 Hz zu, da diese Frequenz fast genau mittig zwischen den Terzbändern mit 3150 Hz und 4000 Hz liegt. Im Falle der im Test verwendeten Daten sind hier mehrere Dinge wichtig zu erwähnen. Erstens lässt sich hier die tatsächliche Erhöhung des Terzbandes (oder der Terzbänder) einfach bestimmen, da das zugrunde liegende Rollgeräusch bekannt ist. Bei Messdaten ist dies typischerweise nicht möglich, daher der Ansatz mit den Nachbarterzen. Das Quietschen wurde von einem Güterzug extrahiert, d.h. trotz des Versuches, das Quietschen möglichst gut zu isolieren, können hier Reste des erhöhte Rollgeräusches erhalten bleiben. Bei genauer Betrachtung sieht man in den Spektren, dass hier die Nachbarterzen der Grundfrequenz und hier vor allem die obere sich vom Rollgeräusch abhebt. Um eventuelle residuale Effekte des Schneidens zu minimieren, wurden daher die Nachbarterzen aus dem Rollgeräusch extrahiert, was bei Messdaten im Allgemeinen nicht möglich ist.

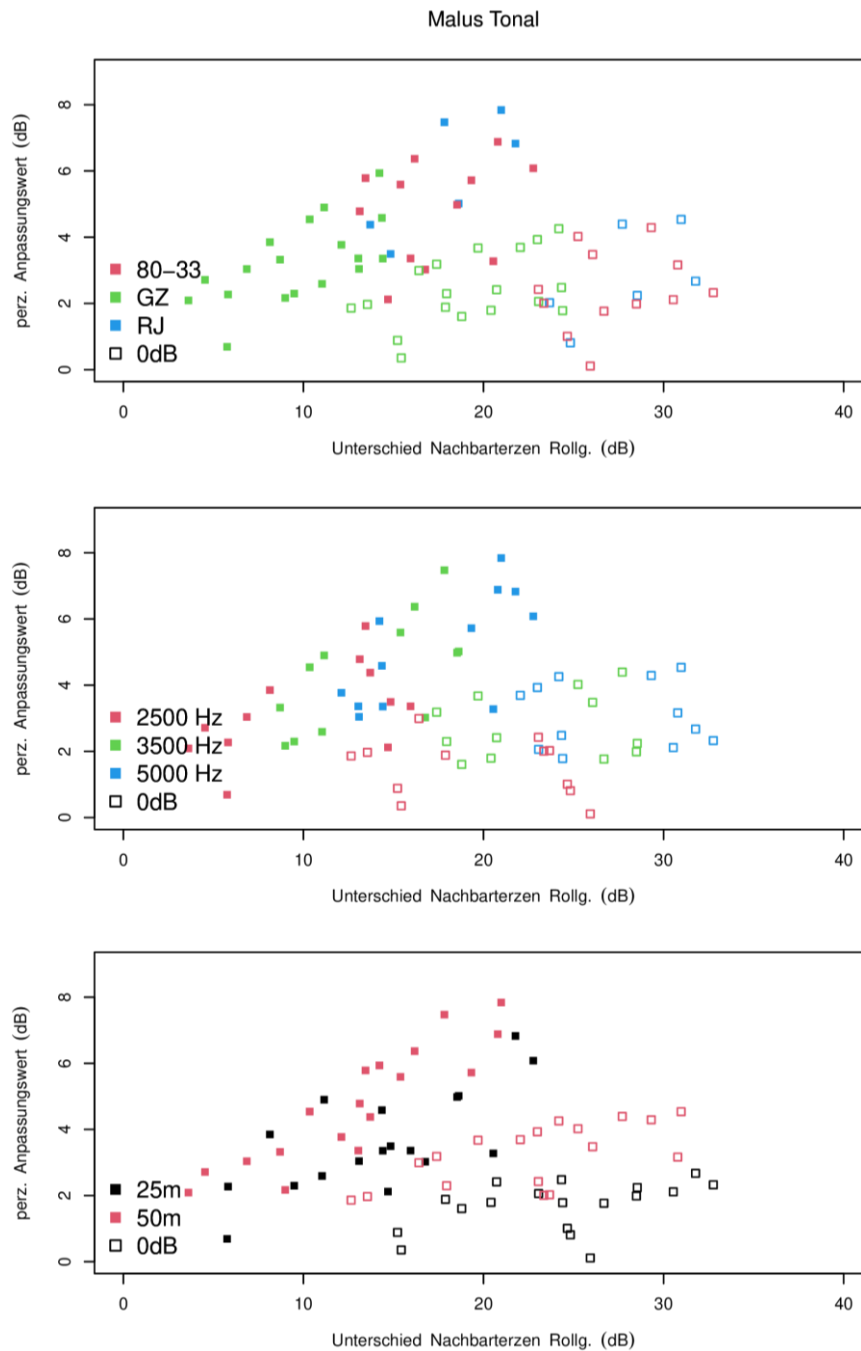


Abb. 5-9: Perzeptiver Anpassungswert in Abhängigkeit des Bandpegelunterschieds bei der Quietschfrequenz. Symbole kodieren den vorgegebenen Pegel des Quietschens. Farben kodieren den Zugtyp (oben), die Frequenz (Mitte) und die Entfernung (unten).

Stellt man den perzeptiven Anpassungswert in Abhängigkeit vom verursachten Pegelunterschied im relevanten Terzband dar, sieht man, dass der Anpassungswert gegen 0 geht, wenn der Terzbandunterschied kleiner wird (Abb. 5-9). Allerdings zeigt sich hier ein deutlicher Unterschied zwischen dem Quietschen mit Originalpegel (leere Symbole) und dem um 10 dB abgeschwächten Quietschen (volle Symbole). Es ist deutlich ersichtlich, dass das

schwächere Quietschen bei leiseren Zügen höhere perzeptive Anpassungswerte verursachen kann (bei gleichzeitig deutlich niedrigeren Pegelveränderungen). Bei Zügen mit erhöhtem Grundrollgeräusch (zumindest im mittleren Frequenzbereich, siehe Kap. 6.1) ist das Quietschen nicht so dominant und daher werden hier auch die Anpassungswerte geringer (oberes Diagramm in Abb. 5-9). Bei den Frequenzen ist erkennbar, dass sowohl der Terzpegelunterschied als auch der Anpassungswert mit der Frequenz steigt und die verschiedenen Frequenzen hier einem gemeinsamen Trend folgen. Bei 25 m und Originalpegel fallen die 2,5 kHz etwas aus dem Trend heraus. Insgesamt sind hier die perzeptiven Anpassungswerte aber schon relativ gering. Die Entfernung selbst scheint eine gewisse Rolle zu spielen. Die Anpassungswerte sind bei Geräuschen in 50 m tendenziell höher als bei 25 m mit einem Unterschied von ca. 1,5 dB, wobei der Unterschied bei den abgeschwächten Quietschereignissen etwas geringer ist (ca. 1 dB).

Vergleicht man diese Darstellung mit jener für den Bewertungsparameter beim Kreischen (Abb. 5-7), wo ein klarer linearer Trend sichtbar ist, wird klar, dass Quietschen schwieriger zu beschreiben ist. Weiters ist nicht eindeutig klar, wie sich andere Quietschpegel auswirken. Würde z.B. das Quietschen um weitere 10 dB abgeschwächt werden, wird der Differenzpegelbereich kleiner werden und vmtl. die Kurve etwas steiler. Irgendwann müssen auch die Anpassungswerte wieder geringer werden, quantitativ lässt sich dies aus den vorhandenen Daten aber nicht sicher bestimmen. Hier ist aber anzumerken, dass der abgedeckte Bereich durchaus den üblichen Pegeln entspricht, weswegen die Pegel so gewählt wurden. Diese "Lücke" in den Daten wurde bei einer Zwischenanalyse nach der Hälfte der Probanden festgestellt und eine kleine Änderung bei den Stimuli vorgenommen.

5.3.1 Interpolation

Eine Zwischenanalyse nach der Hälfte der Versuchspersonen warf bezüglich der Daten mehrere Fragen auf. Eine Frage war, ob durch geeignete Wahl der Darstellung eine Interpolation möglich ist. Es wurden daher verschiedene Darstellungsweisen getestet. Abb. 5-10 zeigt verschiedene Ansätze um die logarithmierten Lästigkeitswerte zu erklären, wobei der zweite Ansatz (tatsächlicher Terzbandunterschied zwischen Quietschen und Vorbeifahrt) am vielversprechendsten scheint, da es teilweise nur geringe Abweichungen von einer Geraden gibt. Die grauen Linien zeigen hier auch eine Spline-Interpolation. Zur Erinnerung: im Experiment wurde Quietschen mit Originalpegel und um 10 dB abgeschwächt verwendet. Es wurden nun weitere Geräusche auf gleiche Weise erzeugt mit Abschwächungen von 5 dB, 15 dB, 20 dB, 25 dB und 30 dB. Für diese wurden die relevanten akustischen Parameter berechnet.

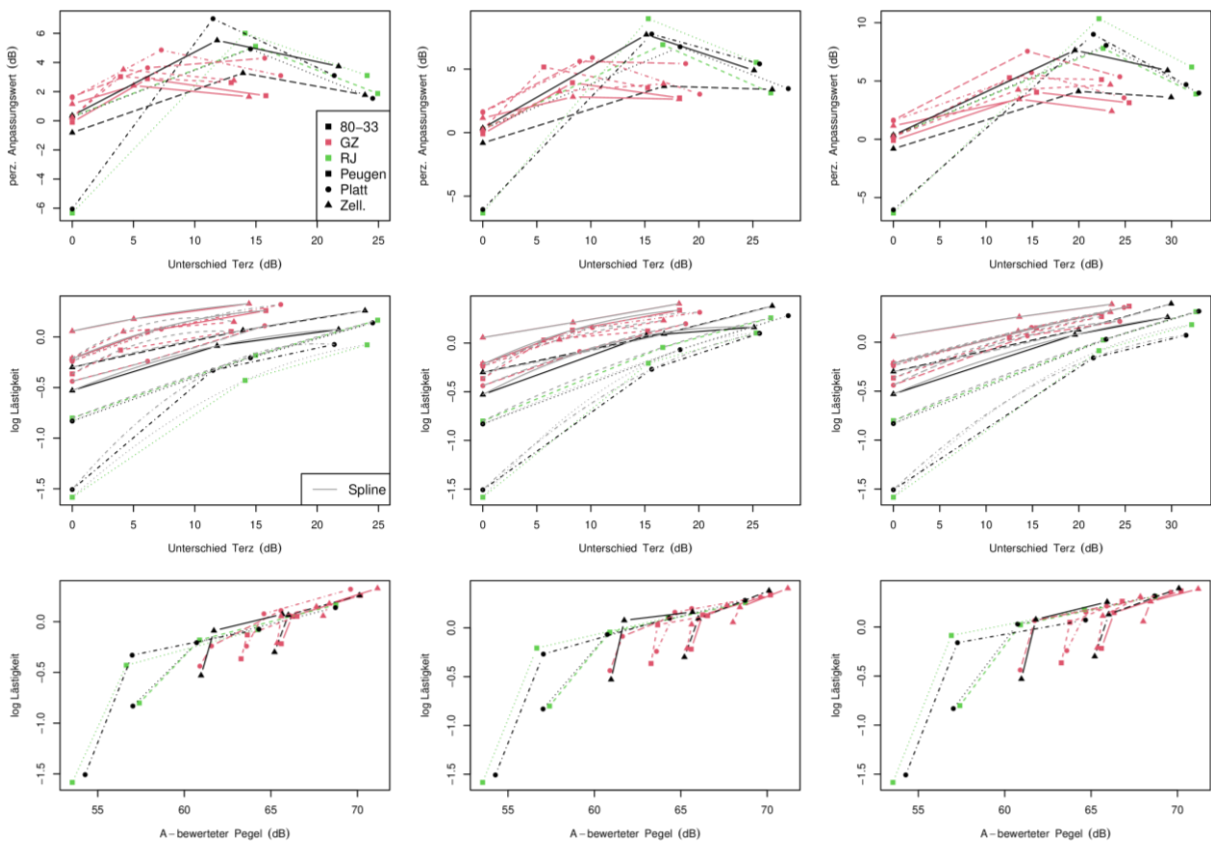


Abb. 5-10: Abhängigkeit der Urteile der ersten 15 Versuchspersonen von verschiedenen Parametern. Die obere Reihe zeigt den Malus als Funktion des Bandunterschiedes. Jede Spalte ist eine Quietschfrequenz. Farben stellen den Zugtyp dar, Symbole die Messstelle. Der Nullpunkt in x-Richtung ist das Referenzsignal. Die beiden anderen Punkte jedes Linienzuges sind -10 und 0 dB Quietschpegel. Die mittlere Zeile zeigt die Urteile als Funktion der Terzunterschied und die unterste Zeile zeigt die Urteile als Funktion des L_{Aeq} . In der mittleren Zeile ist auch eine Spline-Interpolation in grau dargestellt.

Dann wurden auf Basis einer linearen und auch einer Spline-Interpolation, wie in Abb. 5-10 (mittlere Reihe) dargestellt, hypothetische mittlere Beurteilungen und daraus perzeptive Anpassungswerte berechnet. Es ergaben sich hier Abweichungen zwischen den beiden Methoden von meist unter 0,5 dB. Bei den beiden leisen Personenzügen in 50 m betrug der Unterschied aber bis zu 2 dB.

Um zu untersuchen, welche Methode besser geeignet ist, wurden für die zweite Hälfte des Experiments 6 weitere Bedingungen eingeführt, nämlich eine Abschwächung von 18 dB beim Quietschen bei 3500 Hz beim Railjet und den beiden Zügen der Messstelle Platt.

Abb. 5-11 zeigt die interpolierten Werte zusammen mit den tatsächlichen (schwarz umrandet) für 3500 Hz für die Versuchspersonen 16-30, da nur diese die weitere Quietschbedingung im Experiment beurteilen mussten. Die Daten für 2500 Hz und 5000 Hz sind sehr ähnlich. Die Spline-Interpolation und die lineare Interpolation unterscheiden sich in manchen Bedingungen etwas voneinander. Die Abweichung zwischen linearer und Spline-Interpolation ist hier

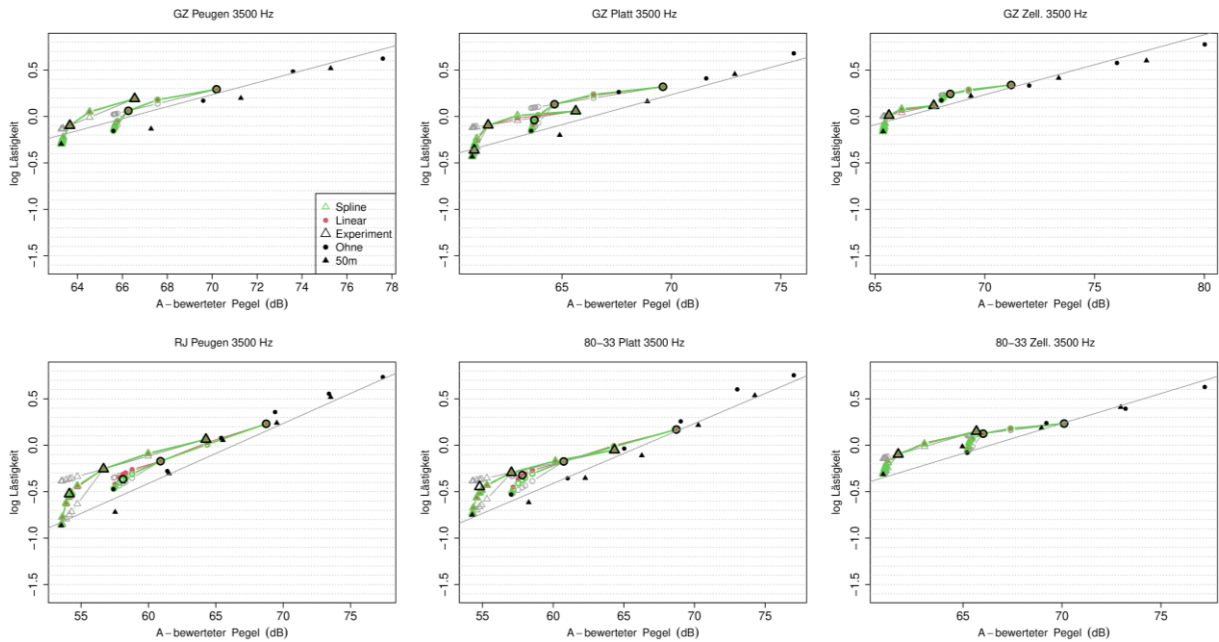


Abb. 5-11: Interpolation der Lästigkeit als Funktion des L_{Aeq} der Versuchspersonen 16-30. Schwarze gefüllte Symbole zeigen unauffällige Fahrten. Grüne und rote Symbole zeigen mittels Spline und linear interpolierte Daten. Die offenen schwarzen Symbole sind die Werte aus dem Experiment.

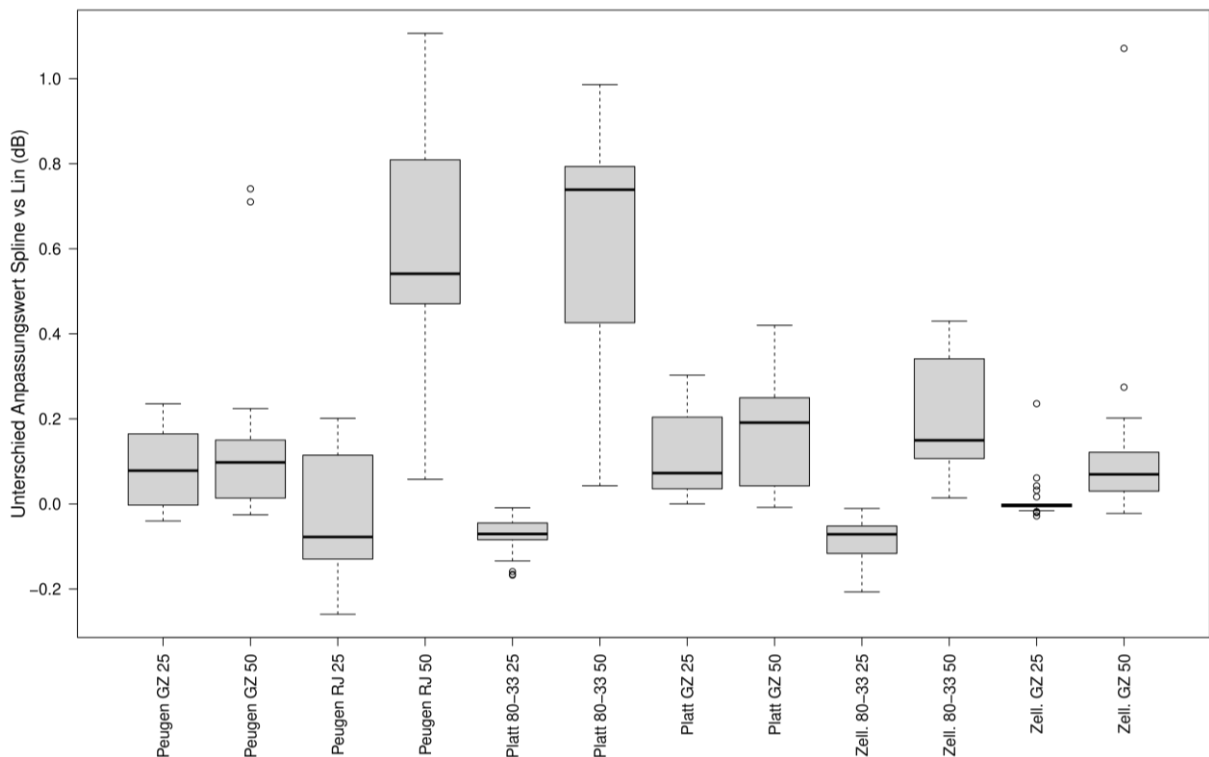


Abb. 5-12: Unterschied im Malus zwischen Spline und linearer Interpolation für die gesamte Studienpopulation

geringer als bei der ersten Hälfte des Experiments, was daher kommen könnte, dass die Probanden mit sehr niedrigen Urteilen in 50 m hauptsächlich eher in der ersten Hälfte des Experiments vorkamen. Die zusätzlichen Datenpunkte passen hier sehr gut mit den interpolierten Daten zusammen.

Abb. 5-12 zeigt den Unterschied im Anpassungswert der beiden Interpolationsmethoden für alle Versuchspersonen. Im Großen und Ganzen ist der Unterschied normalerweise deutlich unter 1 dB, aber einige wenige Werte unterscheiden sich im Bereich von 1 dB (nur einzelne Zugtypen, diese aber ausschließlich in 50 m Abstand).

6 ANPASSUNGSWERTE FÜR DIE PROGNOSEBERECHNUNG

Die Ergebnisse der Wahrnehmungstests zeigen auf, dass sich perzeptive Anpassungswerte zum Teil nur unzureichend durch akustische Eigenschaften der Auffälligkeiten erklären lassen. Für die Prognoseberechnung wurde daher ein alternatives Modell für Anpassungswerte entwickelt, welches diese Nachteile nicht aufweist.

Im Folgenden wird auf dieses Modell näher eingegangen und zur Illustration auf bisherige Messdaten angewandt. Dabei wird zunächst der Berechnungsansatz für zugbezogene Anpassungswerte erklärt. Danach wird näher auf die Modellcharakteristik eingegangen, indem die beiden Eingangsparameter des Modells analysiert werden, und es werden Anpassungswerte aus bestehenden Emissionsmessdaten abgeleitet. Abschließend werden die Verwendung emissionsseitiger Anpassungswerte diskutiert und Empfehlungen für die zu verwendenden Anpassungswerte gegeben.

6.1 Modellbildung

Bisher wurde der perzeptive Anpassungswert betrachtet. Beim Kreischen lassen sich die Ergebnisse sehr einfach durch den Pegelunterschied im hochfrequenten Bereich beschreiben. Wie sich auch zeigte, ist beim Quietschen der Ansatz mit den Unterschieden in den Terzbändern nicht ganz so erfolgreich und es gibt Zusatzfaktoren zu berücksichtigen (Entfernung, Quietschpegel).

Eine andere Variante wäre, den gesamten Anpassungswert, also die Summe aus akustischem und perzeptivem Wert zu bestimmen. Abb. 6-1 zeigt den Zusammenhang zwischen dem gesamten Anpassungswert und der für die Detektion des jeweiligen Geräusches verwendete Größe. Links ist das Kreischen dargestellt und rechts das Quietschen. Volle Symbole zeigen die Stimuli mit beiden Auffälligkeiten. Diese sind in beiden Abbildungen vorhanden.

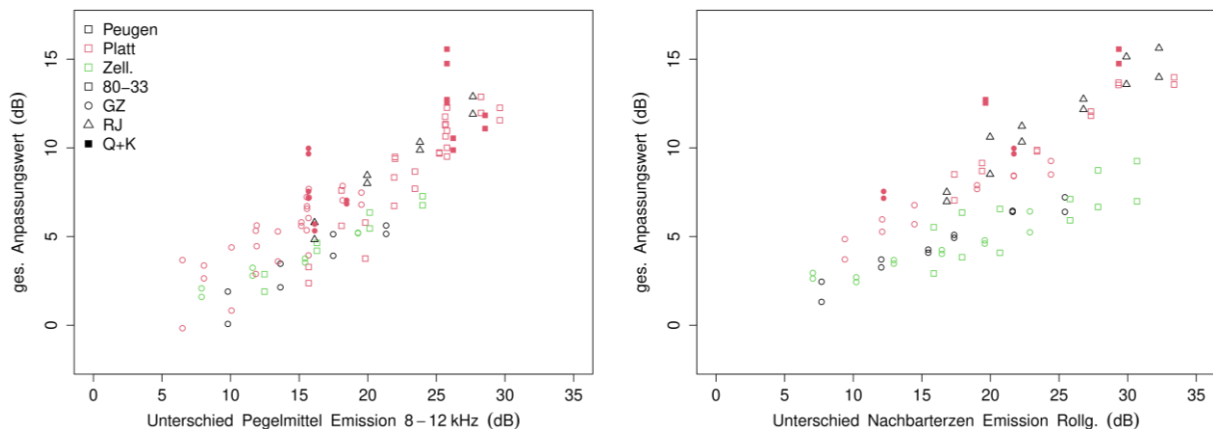


Abb. 6-1: Gesamter Anpassungswert für Kreischen (links) und Quietschen (rechts). Volle Symbole zeigen Urteile, wenn beide Komponenten gleichzeitig auftreten.

Beim Kreischen wird auch der gesamte Anpassungswert gut beschrieben (Standardabweichung des Fehlers 1,5 dB ohne kombinierte Signale, 1,7 dB mit kombinierten Signalen). Bei tonalen Geräuschen war die Standardabweichung etwas höher (2 dB ohne und 2,2 dB mit kombinierten Signalen). Es ist klar, dass kombinierte Signale (also mit Quietschen und Kreischen) durch beide verwendeten Kenngrößen nur bedingt beschrieben werden. Bei den tonalen Stimuli ergeben sich auch gewisse Unterschiede zwischen lauten und leisen Zügen. Die leisen Züge (Railjet und 80-33 in Platt) verursachen einen etwas steileren Anstieg des gesamten Anpassungswert bei steigendem Terzbandunterschied. Ein weiteres Problem ist hier, dass beim Kreischen zur Bestimmung des akustischen Parameters der Unterschied der Signale zum normalen Rollgeräusch bestimmt werden muss und beim Quietschen von vornherein die Art des Signals eine Rolle spielt. Kombinierte Störsignale werden auch nur bedingt abgebildet. Daher wurde auch ein alternativer Ansatz versucht, in dem der Unterschied höherfrequenter und tieferfrequenter Anteile verglichen wird.

Der typische Bereich der tonalen und breitbandigen Signale beginnt im Bereich um 2 kHz, wobei es auch gewisse Signale mit geringer Frequenz bis zu 800 Hz geben kann, welche aber vergleichsweise selten auftreten. Daher wurde der Bereich 1,6 kHz bis 12,5 kHz verwendet, um den Pegel der hochfrequenten Anteile zu berechnen. Um das Rollgeräusch zu beschreiben wurden 3 Terzen (eine Oktave) verwendet. Hier wurden Kombinationen bis zur 1 kHz Oktave verwendet und die Korrelation der Bogengeräusche mit den Oktavpegeln berechnet. Dies wurde für die Emissionswerte durchgeführt. Es zeigte sich, dass die höchsten Korrelationen im Bereich von 1 kHz auftraten ($\approx 0,9$, Abb. 6-2). Daher wurden die Terzen 0,8-1,25 kHz verwendet, um eine Beziehung zum Rollgeräusch herzustellen.

In Abb. 6-3 ist einerseits die Beziehung zum perzeptiven Anpassungswert (oben) und zum gesamten Anpassungswert dargestellt. Der perzeptive Anpassungswert wird nur schlecht durch diese akustische Größe beschrieben (obere Grafiken in Abb. 6-3), wogegen der gesamte Anpassungswert sehr gut beschrieben wird (Standardabweichung des Fehlers 1,6 dB, untere Grafiken in Abb. 6-3). Wird noch ein Indikator für Kreischen hinzugefügt, sinkt der Fehler auf 1,3 dB (gelbe Linie mit, violette Linie ohne Kreischen). Die Berücksichtigung von Quietschereignissen zeigt nur noch wenig Änderung. Wichtig zu erwähnen ist, dass die Daten für Rollgeräusche (schwarze Symbole) nur dargestellt sind und nicht in die Modellbildung eingeflossen sind. Aufgrund der Schwankungen in den Beurteilungen zeigen auch diese Daten Anpassungswerte unterschiedlich von 0 dB.

Werden auch die interpolierten Datenpunkte hinzugefügt, ergibt sich ein sehr ähnliches Bild (Abb. 6-4). Die Ausreißer in den negativen Bereich entstehen durch die beiden Datenpunkte

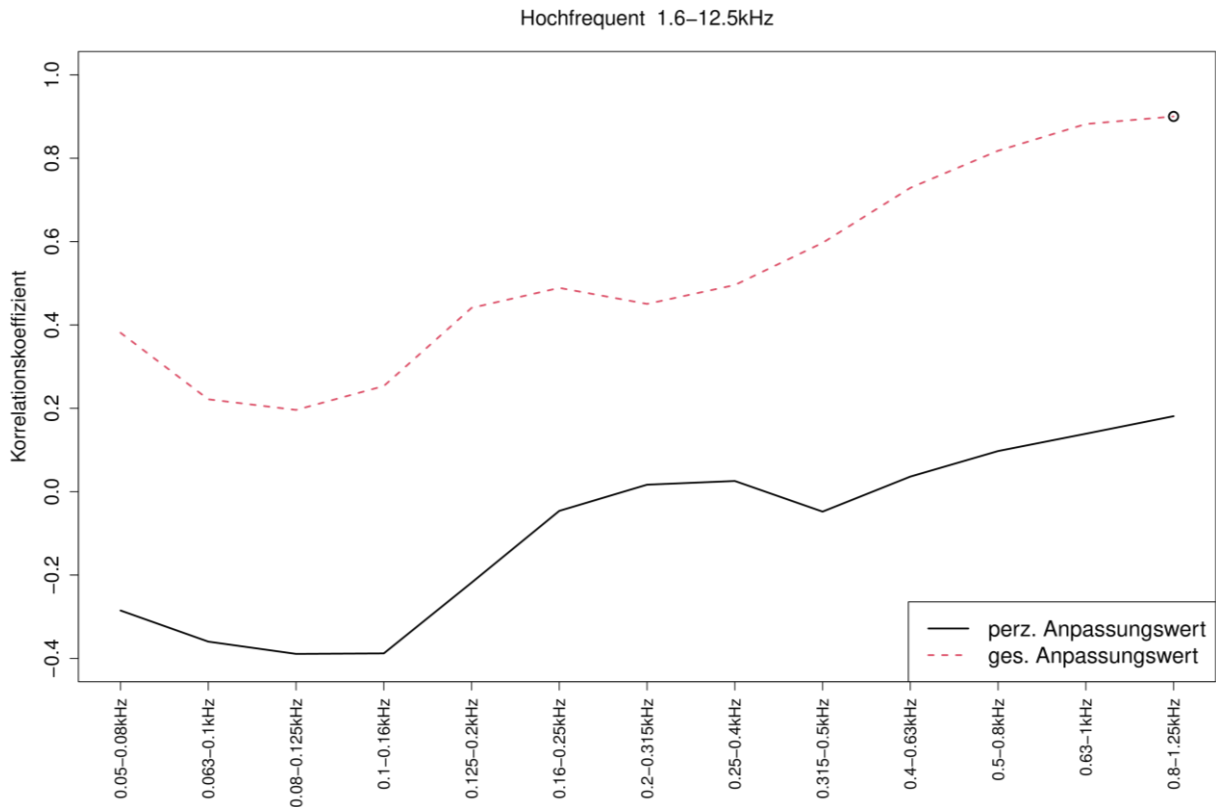


Abb. 6-2: Korrelation zwischen tief- bis mittelfrequenten Oktavbändern und dem Frequenzbereich von 1,6 kHz - 12,5 kHz

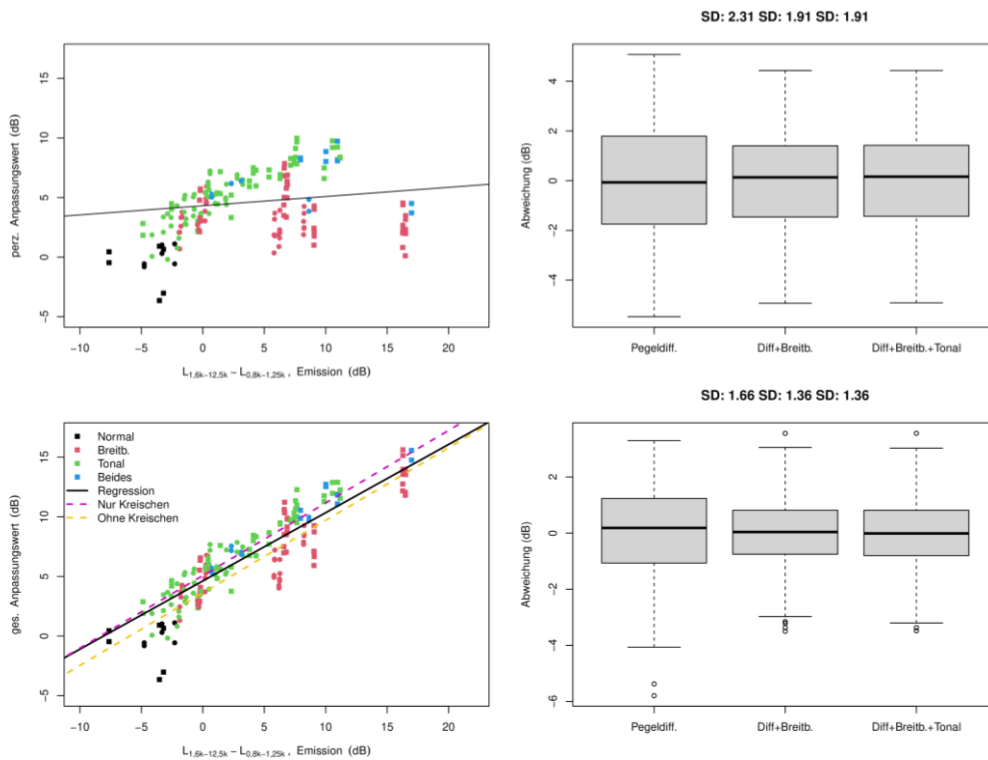


Abb. 6-3: Perzeptiver und gesamter Anpassungswert für auffällige und unauffällige Vorbeifahrten als Funktion des Unterschieds zwischen hochfrequenten und mittelfrequenten Bändern

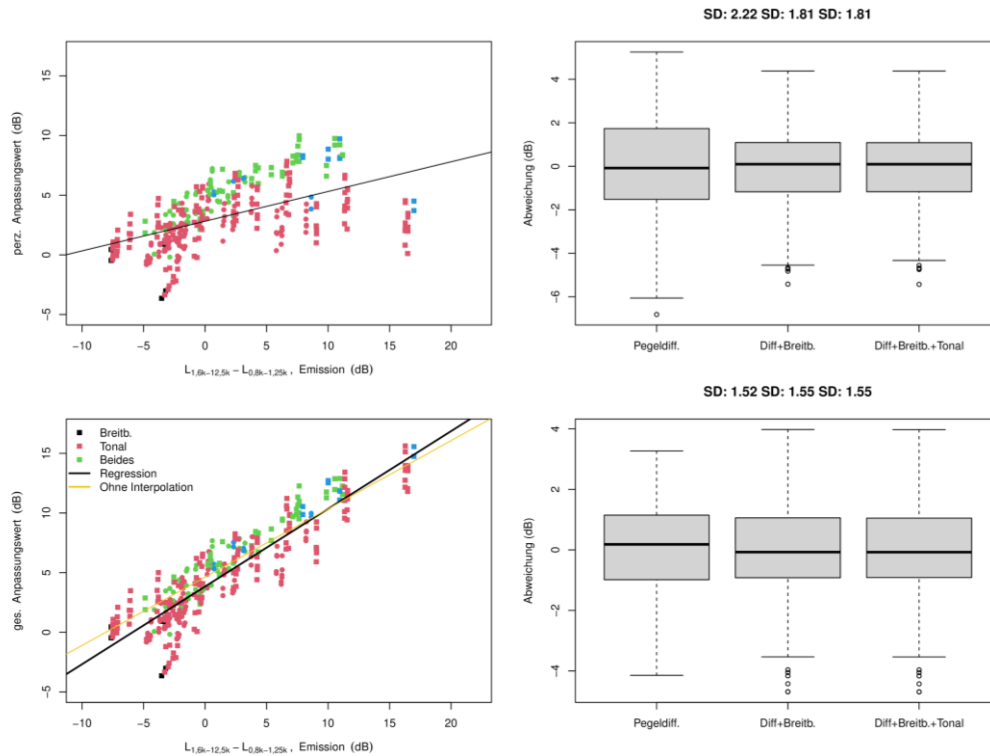


Abb. 6-4: Perzeptiver und gesamter Anpassungswert für auffällige und unauffällige Vorbeifahrten als Funktion des Unterschieds zwischen hochfrequenten und mittelfrequenten Bändern für experimentelle und interpolierte Daten

der unauffälligen Vorbeifahrten von RJ und 80-33 in 50 m. Wenn die Quietschpegel sehr niedrig werden, muss sowohl der akustische Parameter als auch der Anpassungswert gegen den Wert der Vorbeifahrt konvergieren. Die gelbe Linie stellt das Modell ohne Interpolation dar. Aus Abb. 6-4 ist eine grundsätzlich gute Übereinstimmung zu den Ergebnissen ohne interpolierte Daten zu erkennen. Aufgrund der erwähnten Ausreißer wird allerdings das ursprüngliche Modell ohne interpolierte Daten bevorzugt:

$$\Delta L_{\Sigma} = 4,6223 + 0,5725 \cdot (L_{1,6k-12,5k} - L_{0,8k-1,25k}) \dots \text{für akustisch auffällige Segmente}$$

$$\Delta L_{\Sigma} = 0 \text{ dB} \dots \text{für akustisch unauffällige Segmente}$$

Der Vorteil dieses Modells für den Gesamtanpassungswert ΔL_{Σ} ist, dass der Anpassungswert aus dem jeweiligen Signalsegment bestimmt werden kann, ohne das hypothetische Rollgeräusch zu kennen. Natürlich muss der Anpassungswert wiederum auf das Rollgeräusch aufgeschlagen werden.

6.2 Zugbezogene Anpassungswerte

Das Modell für gesamte Anpassungswerte basiert auf Signalsegmenten mit einer Länge von 4 s. Bei der Prognoserechnung sind hingegen stets mittlere Eigenschaften über den

Beurteilungszeitraum gefordert, weshalb hier nur Anpassungswerte mit einem deutlich höheren Aggregationsgrad praktikabel sind, die auf einigen wenigen, ausgewählten Parametern beruhen. Ein Zwischenschritt stellen zugbezogene Anpassungswerte dar, welche allerdings nicht exakt ermittelbar sind.

Im Folgenden werden zunächst verschiedene Ansätze für die Ermittlung dieser zugbezogenen Anpassungswerte aus Messdaten diskutiert und jener ausgewählt, welcher am geeignetsten erscheint. Danach wird auf die Bildung einer Beurteilungsgröße für eine größere Anzahl an Vorbeifahrten eingegangen, welche auf der Verteilung zugbezogener Gesamtanpassungswerte beruht.

6.2.1 Auswahl des Berechnungsansatzes

Zwischen einzelnen Fahrzeugen im Zugverband können hinsichtlich der Grundschallemmissionen (Schallemmissionen ohne auffällige Komponenten) markante Unterschiede von 10 dB und mehr bestehen. Als Beispiele hierfür sind Güterzugverbände mit grauguss- und K/LL-sohlengebremsten Fahrzeugen oder lokbespannte Personenzüge mit scheibengebremsten Personenwagen und separater (älterer) Lokomotive zu nennen. In solchen Situationen werden Emissionen der gesamten Zugvorbeifahrt im Allgemeinen von den lautesten Fahrzeugen bestimmt. Treten akustische Auffälligkeiten in leiseren Bereichen des Zugverbands auf, so ist davon auszugehen, dass sich diese nur unzureichend in den Emissionsspektren der gesamten Zugvorbeifahrt wiederfinden. Aus diesem Grund sind Gesamtspektren von Zugvorbeifahrten für die Abschätzung der Gesamtanpassungswerte nachteilig.

Ausgehend von Fahrgeschwindigkeiten bis rund 90 km/h in Bögen mit Radien ≤ 500 m können Vorbeifahrtsdauern einzelner Fahrzeuge die Sekundengrenze (auch deutlich) unterschreiten. Um Unterschiede ausreichend auflösen zu können, werden die in Kap. 2.4 beschriebenen Kurzzeitspektren der Erkennung von akustischen Auffälligkeiten verwendet, um zeitlich fein aufgelöste Anpassungswerte abzuschätzen.

Sollen aus einem solchen Zeitverlauf von Gesamtanpassungswerten zugbezogene Werte berechnet werden, sind folgende drei Ansätze grundsätzlich denkbar:

- a) separate Abschätzung von perzeptiven oder schalltechnischen Anpassungswerten und Rückrechnung auf die Emissionszeitverläufe ohne akustische Auffälligkeiten
- b) Mittelung der Anpassungswerte auffälliger Kurzzeitspektren über die Dauer der Auffälligkeiten
- c) Mittelung der Anpassungswerte auffälliger Kurzzeitspektren über die Dauer der Zugvorbeifahrt

Gegen Ansatz a) spricht einerseits die deutlich schlechtere Beschreibbarkeit perceptiver Anpassungswerte durch akustische Größen (vgl. Kap. 6.1). Zum anderen liegen schalltechnische Korrekturfaktoren (beispielsweise aus den vorangegangenen Projekten) nur für gesamte Vorbeifahrten vor, sodass von einer deutlichen Unterschätzung dieser Werte bei Verwendung für Gesamtanpassungswerte von Kurzzeitspektren ausgegangen werden muss. Bei Ansatz b) würden sich die zugbezogenen Anpassungswerte ausschließlich auf die Bereiche von akustischen Auffälligkeiten beziehen. Werden diese dann auf ganze Zugsvorbeifahrten angewandt, wäre eine deutliche Überschätzung die Folge (insbesondere bei kürzeren Auffälligkeiten). Um dem entgegenzuwirken, müssten bei der Prognose mittlere Anteile akustischer Auffälligkeiten je Zugsvorbeifahrt (oder äquivalent je Zuglänge) festgelegt und anschließend eine Mittelung durchgeführt werden. Da dies im wesentlichen Ansatz c) entspricht, würde Ansatz b) nur eine Verschiebung der Berücksichtigung der Anteile von auffälligen und unauffälligen Bereichen von der Anpassungswertbestimmung hin zur Prognoserechnung bedeuten und letztere komplexer machen.

Für eine exakte Bestimmung von zugbezogenen Anpassungswerten durch Mittelung der Anpassungswerte nach Ansatz b) oder c) wären die Vorbeifahrtspegeln ohne akustische Auffälligkeiten (Grundschallemission) den Vorbeifahrtspegeln gegenüber zu stellen, die sich aus den mit Gesamtanpassungswerten beaufschlagten Kurzzeitspektren ergeben. Im Falle vorhandener Auffälligkeiten sind jedoch ohne zusätzliche Kenntnis von perceptiven oder schalltechnischen Anteilen der Kurzzeitanpassungswerte aus Messdaten weder der Vorbeifahrtspegel der Grundschallemission, noch der beaufschlagte Vorbeifahrtspegel ermittelbar.

Jedoch ist eine Abschätzung von zugbezogenen Anpassungswerten möglich, indem die Gesamtanpassungswerte der Kurzzeitspektren über die Zugsvorbeifahrt unabhängig von den Grundschallemissionen energetisch gemittelt werden. Diese liefert jedoch nur exakte Werte bei konstanten Grundschallemissionen während der gesamten Zugsvorbeifahrt. Bei variierenden Grundschallemissionen kommt es hingegen im Allgemeinen zu Über- oder Unterschätzungen: treten beispielsweise akustische Auffälligkeiten in leisen Bereichen der Vorbeifahrt auf, so würden Anpassungswerte bei exakter Rechnung abgeschwächt in den Gesamtvorbeifahrtspegel einfließen und die energetische Mittelung der Anpassungswerte überschätzt den exakten, zugbezogenen Wert. Sind umgekehrt akustische Auffälligkeiten in den lauten Bereichen der Vorbeifahrt vorhanden, so drücken sich Anpassungswerte dieser Bereiche in einem Gesamtvorbeifahrtspegel vergleichsweise stark aus und die energetische Mittelung unterschätzt den exakten, zugbezogenen Anpassungswert.

Grundschallemissionsaufteilung und Auffälligkeitsanteile	Position akustischer Auffälligkeiten	$\Delta L_{\text{laut-leise}} = 15 \text{ dB}$	$\Delta L_{\text{laut-leise}} = 10 \text{ dB}$	$\Delta L_{\text{laut-leise}} = 5 \text{ dB}$
50 % : 50 % (leise : laut), 50 % auffällig	im leisen Bereich	6,3 dB	4,8 dB	2,4 dB
	im lauten Bereich	-2,5 dB	-2,2 dB	-1,5 dB
	zur Hälfte aufgeteilt	0,0 dB	0,0 dB	0,0 dB
87,5 % : 12,5 % (leise : laut), 12,5 % auffällig	im leisen Bereich	2,4 dB	1,4 dB	0,5 dB
	im lauten Bereich	-6,0 dB	-4,7 dB	-2,5 dB
	zur Hälfte aufgeteilt	-3,5 dB	-2,7 dB	-1,3 dB

Tab. 6-1: Illustration der Abweichungen bei energetischer Mittelung des Verlaufs von Gesamtanpassungswerten über die Zugsvorbeifahrt anhand von ausgewählten Beispielen von Grundschallemissionsunterschieden (5 dB, 10 dB und 15 dB) und -anteilen (50 % und 12,5 % der Vorbeifahrt laut) bei Gesamtanpassungswerten von 10 dB mit unterschiedlicher Dauer (50 % und 12,5 % der Zugsvorbeifahrt)

Zur Illustration dieser Abweichungen bei energetischer Mittelung sind in Tab. 6-1 für ausgewählte Beispiele von Unterschieden in den Grundschallemissionen (15 dB, 10 dB und 5 dB, jeweils 50 % oder 12,5 % der Vorbeifahrt laut) und einem Gesamtanpassungswert von 10 dB (50 % oder 12,5 % der Vorbeifahrt auffällig) berechnet. Hintergrund für die gewählte Aufteilung der Grundschallemissionen waren dabei gemischte Zusammensetzungen von Güterzügen mit lauten und leisen Fahrzeugen, sowie Personenzüge mit lauter Lokomotive. Bei realitätsnahen Grundschallemissionsunterschieden von ≤ 10 dB treten je nach Wahl der exemplarischen Auffälligkeiten Abweichungen ≤ 5 dB auf. Zudem ist zu erkennen, dass Auffälligkeiten in lauten und leisen Bereichen grundsätzlich gegenläufige Abweichungen zur Folge haben und sich im Besten Fall aufheben können. Wird davon ausgegangen, dass betrachtete Extremfälle (Auffälligkeiten ausschließlich in leisen oder lauten Bereichen) sehr selten zu beobachten sind, so kann von Abweichungen bei energetischer Mittelung der Gesamtanpassungswerte bis zu wenigen Dezibel ausgegangen werden. Und im Fall von sehr heterogenen Grundschallemissionen tendieren die Abweichungen gegen 0 dB, sodass die energetische Mittelung als ausreichend genau für die nachfolgenden Betrachtungen erachtet wird.

6.2.2 Mittlerer, zugsbezogener Gesamtanpassungswert als Beurteilungsgröße

Für die Berücksichtigung von Anpassungswerten in Rechenmodellen bedarf es letztlich mittlerer, zugbezogener Gesamtanpassungswerte. Mit Hilfe von Emissionsmessdaten in Bögen können hierfür Verteilungen von zugsbezogenen Gesamtanpassungswerte gebildet werden. Jedoch bedarf es einer Festlegung über die zeitlichen Grenzen von Zugsvorbeifahrten, in welchen Gesamtanpassungswerte der Kurzzeitspektren betrachtet

werden, sowie einer geeigneten Mittelungsgröße. Bei ersterem wären grundsätzlich verschiedene Grenzen denkbar, wie beispielsweise Folgende:

- Betrachtung des Zeitbereichs, in dem der Zug, dessen Länge von Puffer zu Puffer definiert ist, den Messquerschnitt passiert, sodass nur von geringen Pegelabfällen bei Zugsbeginn und -ende ausgegangen werden kann (vergleichbar zur Messdauer für nichttrennbare Einheiten der ÖNORM EN ISO 3095 [26]).
- Erweiterung des Bereichs bis sich erste bzw. letzte Achse als bewegende Schallquellen 15 m und damit doppelt so weit vom Standardemissionsmesspunkt entfernt haben, wie zum Zeitpunkt der Messquerschnittsdurchfahrt (7,5 m). Dieser 15 m Abstand ist gegeben, sobald sich erste bzw. letzte Achse 13 m vor bzw. nach dem Messquerschnitt befinden. Durch die Bereichserweiterung sind bereits größere Pegelabfälle von einigen Dezibel am Beginn und am Ende zu erwarten.
- Erweiterung des Bereichs, bis der Schalldruckpegel um rund 10 dB gegenüber dem Pegelniveau abfällt, bei dem der Zug in den Messquerschnitt einfährt bzw. diesen wieder verlässt. Durch die Bereichserweiterung kann davon ausgegangen werden, dass annähernd der gesamte Energieinhalt der Schallemissionen der Zugsvorbeifahrt umfasst wird.

Für die Beurteilung von Häufigkeitsverteilungen stehen allgemein verschiedene Mittelungsgrößen zur Verfügung:

- Median $\Delta\tilde{L}$
- arithmetischer Mittelwert $\Delta\bar{L}$
- energetischer Mittelwert ΔL_{eg}

Zur Veranschaulichung der Unterschiede wurden in Abb. 6-5 die Verteilungen für alle Zugsvorbeifahrten der Messungen in Peugen, Platt und Zellerndorf für die erwähnten Möglichkeiten der Betrachtungsgrenzen dargestellt und jeweils die drei Mittelungsgrößen in der Legende angeführt. Eine Ausdehnung auf Messung vorangegangener Projekte BEGEL und ESB ist für diese Gegenüberstellung nicht möglich, da nicht ausreichend Vorlauf vor der Zugsvorbeifahrt vorhanden ist, um den gesamten Bereich bis 10 dB Abfall abzudecken.

Anhand von Abb. 6-5 zeigt sich der (erwartbare) Effekt, dass mit Ausdehnung der Betrachtungsgrenzen des Zuges tendenziell eine Abnahme der Mittelungsgrößen einhergeht (eine Ausnahme stellt lediglich der arithmetischer Mittelwert dar, welcher bei Übergang von „Puffer“ zu „13 m“ einen leichten Anstieg verzeichnet, welcher vermutlich der Streuung als Folge geringer Zugzahlen geschuldet ist). Denn durch die zunehmende Betrachtungsgrenzen

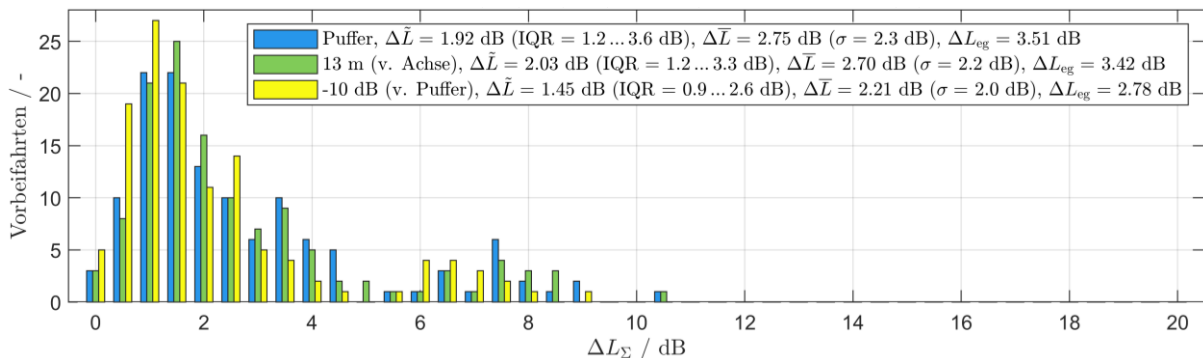


Abb. 6-5: Exemplarischer Vergleich verschiedener Betrachtungsdauern von Zugvorbeifahrten und verschiedener Mittelungsgrößen für alle erfassten Vorbeifahrten der Messungen im Peugen, Platt und Zellerndorf mit akustischen Auffälligkeiten (125 Züge mit Geschwindigkeiten von 50 km/h bis 86 km/h)

wird auch die Mittelungsdauer bei Berechnung zugbezogener Gesamtanpassungswerte vergrößert, während die Erkennung zusätzlicher Auffälligkeiten in den Randbereichen mit zunehmendem Abstand unwahrscheinlicher wird, da sowohl tonale, wie auch breitbandige Auffälligkeiten mittels absoluter Grenzwerte identifiziert werden. Aufgrund dessen wird nachfolgend der Betrachtungsbereich auf die Zuglänge über Puffer festgelegt.

Der Vergleich der Mittelungsgrößen verdeutlicht die sich ergebenden Unterschiede, welche wiederum stark von der konkreten Verteilung abhängig sind. Letztlich wird die energetische Mittelung als Bewertungsgröße für die weiteren Betrachtungen gewählt, da diese Form der Mittelungen im akustischen Bereich als Wirkungsäquivalent gilt. Aufgrund der stärkeren Gewichtung höherer Werte liefert sie durchwegs die höchsten Ergebnisse.

6.3 Exemplarische Anwendung auf bestehende Messdaten

Bevor auf die Verteilung von zugbezogenen Gesamtanpassungswerte bei vorliegenden Messdaten eingegangen wird, wird als Grundlage zunächst das allgemeine Verhalten bei vorhandenen Messdaten betrachtet. Darauf aufbauend werden zur Illustration ausgewählte Verteilungen miteinander verglichen und im Anschluss ein Überblick über exemplarisch ermittelte Gesamtanpassungswerte gezeigt und diskutiert.

6.3.1 Modellcharakteristik

Wie in Kap. 6.1 beschrieben, nutzt das lineare Modell für den gesamten Anpassungswert ΔL_{Σ} als unabhängige Variable die Differenz zwischen dem Pegel im Frequenzbereich von 1,6 bis 12,5 kHz (10 Terzen) zur Beurteilung vorhandener akustische Auffälligkeiten und dem Pegel von 0,8 bis 1,25 kHz (3 Terzen bzw. 1 kHz Oktavbandpegel) zur Beurteilung des Rollgeräusches. Diese Differenz fließt in den Anpassungswert mit einer Gewichtung von 0,57 ein.

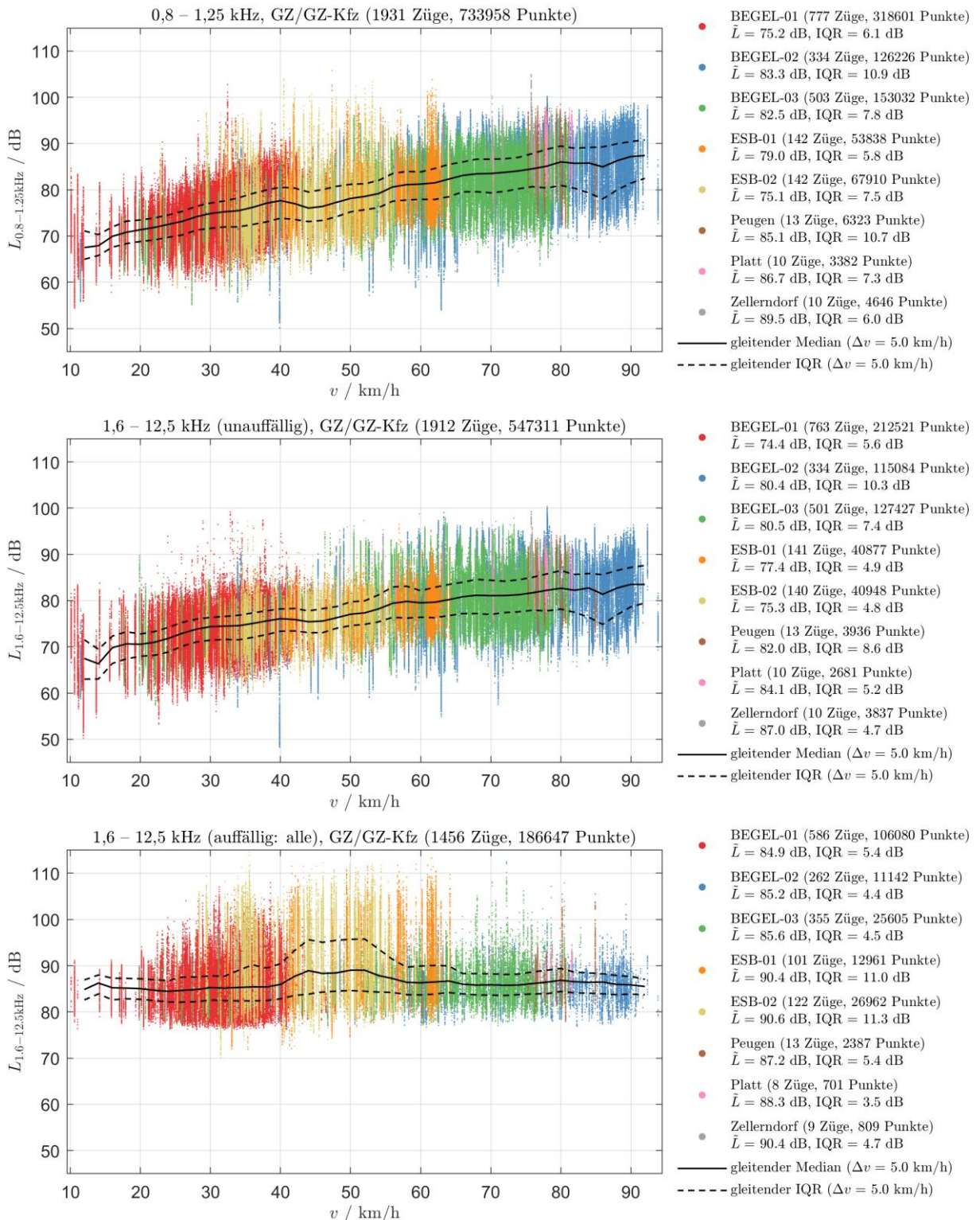


Abb. 6-6: Modelleingangsparameter für Güterzüge der allgemeinen Klasse und Güterzüge für den KFZ-Transport: $L_{0,8-1,25\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte der Vorbeifahrten von Puffer-zu-Puffer (oben) und $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte ohne (Mitte) und mit (unten) akustischen Auffälligkeiten über der Geschwindigkeit v , inkl. gleitendem Median (schwarz-durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarz-strichlierte Linien)

Zu Veranschaulichung des Modellverhaltens bei realen Messdaten werden diese beiden Pegel von den Kurzzeitspektren der Zugvorbeifahrten (Puffer-Puffer) getrennt für verschiedene Zugskategorien betrachtet. Abb. 6-6 zeigt exemplarisch für die Gruppe von Güterzügen (der allgemeine Klasse und für den KFZ-Transport) die beiden Pegel über der mittleren Zugsgeschwindigkeit v . Im oberen Diagramm ist die Punktwolke von $L_{0,8-1,25\text{kHz}}$ für alle Vorbeifahrten dargestellt, während die beiden weiteren Diagramme die Punktwolken von $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für unauffällige Zeitpunkte (mittleres Diagramm) und für auffällige – das bedeutet breitbandig, tonal oder hochfrequent tonal auffällige – Zeitpunkte (unteres Diagramm) enthalten. Die zugrunde liegenden Messdaten umfassen die Messungen aus dem vorliegenden Projekt, wie auch der Projekte BEGEL (drei Messstellen [1]) und ESB (zwei Messstellen [2]). Zur groben Unterscheidung der Messstellen sind deren Daten in verschiedenen Farben dargestellt. In allen Diagrammen sind zudem ein gleitender Median (Betrachtungsbreite $\Delta v = 5 \text{ km/h}$) als schwarze Linie und die gleitenden, oberen und unteren Quartilen als schwarz-strichlierte Linie eingezeichnet, sowie die Mediane \tilde{L} und Interquartabstände IQR für die einzelnen Messstellen in der Legende eingetragen. Anhang D enthält analoge Grafiken für alle Zugskategorien, sowie differenzierte Darstellungen der Pegel $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für die drei verschiedenen Arten von akustischen Auffälligkeiten.

1 kHz Oktavbandpegel $L_{0,8-1,25\text{kHz}}$ aller Vorbeifahrten

Das obere Diagramme in Abb. 6-6 verdeutlicht, dass der 1 kHz Oktavbandpegel bei Güterzügen mit der Geschwindigkeit im Mittel um wenige Dezibel je 10 km/h Geschwindigkeitszunahme ansteigt. Ein solcher Trend ist auch bei anderen Zugskategorien zu erkennen, wenngleich Unterschiede in den Steigungen, aber auch ein Abweichen des vergleichsweise linearen Trends bei den Güterzügen – vor allem zwischen verschiedenen Messstellen – zu verzeichnen sind. Bei Letzterem kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass dies den unterschiedlichen akustischen Eigenschaften des Oberbaus und der Fahrzeuge geschuldet ist. Beispielsweise variieren bei betrachteten Messbögen die Schienenrauheiten in dem für das 1 kHz Oktavband bei Geschwindigkeiten von 60 bis 90 km/h maßgebenden Wellenlängenbereich von rund 10 bis 40 mm um mehr als 10 dB (vgl. Abb. 6-7). Zu beachten ist dabei, dass dieser Wellenlängenbereich die typischen Wellenlängen von Riffel (30 bis 80 mm) und von Schlupfwellen (80 bis 300 mm), bei welchen es zu deutlichen Überschreitungen des Grenzspektrums der EN ISO 3095 kommen kann, nur am Rande bzw. gar nicht überdeckt.

Eine Abschätzung der Auswirkung dieser Rauheitsunterschiede auf Basis der Radrauheiten der Europäischen Richtlinie 2015/996 [6] ergab, dass bei rauen Rädern die 1 kHz

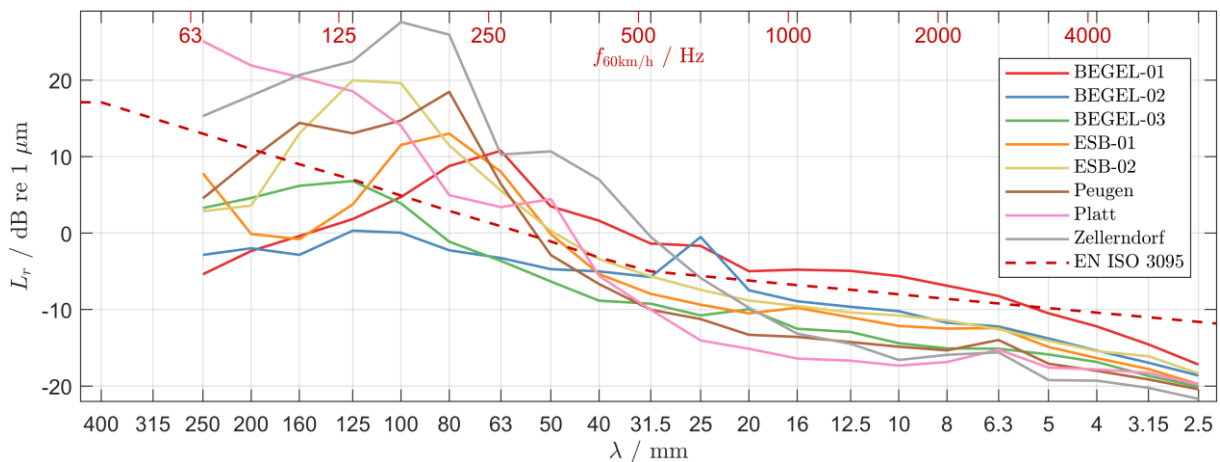


Abb. 6-7: energetische Mittelwerte der Schienenrauheiten aller Messspuren beider Schienen der Messstellen aus BEGEL, ESB und dem vorliegenden Projekt, sowie das Grenzspektrum der EN ISO 3095 – zur leichteren Orientierung wurde zusätzlich eine Frequenzskala für eine exemplarische Geschwindigkeit von 60 km/h eingetragen

Oktafbandpegeln kaum beeinflusst werden, während sich bei glatten Rädern Unterschiede von rund 4-5 dB einstellen können. Dies deckt sich allerdings nur zum Teil mit den Beobachtungen: zwar setzt sich bei Güterzügen der Anstieg des Medians über die Messstellen hinweg einigermaßen linear fort, während bei anderen Zugkategorien meist größere Linearitätsabweichungen zu bemerken sind. Allerdings unterschieden sich beispielsweise nicht nur die Mediane der Messungen BEGEL-01 (raue Schienen) und ESB-01 und ESB-02 (glatte Schienen) von Schnellbahnen der Baureihen 4020 bzw. 4024 um einige Dezibel (zB. in bei der 60 km/h Geschwindigkeitsklasse im erwarteten Bereich von 4,0 bis 5,9 dB), sondern auch bei Güterzügen treten bei BEGEL-01 trotz rauer Räder um 2,5 bzw. 3,7 dB höhere Mediane (in der einzig vergleichbaren 40 km/h Geschwindigkeitsklasse) auf. Oder aber der Median bei Railjet-Reisezügen bei der Messstelle Peugen: dieser ist gegenüber BEGEL-03 in der 80 km/h Klasse um 5,5 dB größer, obwohl bei beiden Messstellen ähnlich glatte Schienen vorhanden sind (vgl. Abb. 6-7) .

Auch die Gleisabklingraten liefern bei derartigen Unterschieden keine klare Begründung: so zeigen diese bei Vergleich von BEGEL-01 und ESB-01 bzw. ESB-02 ebenso wie bei Vergleich von BEGEL-03 und Peugen im Bereich rund um 1 kHz keinen klaren Trend (beispielsweise wechseln in den betroffenen Terzen die Differenzen ihr Vorzeichen). Erschwerend kommt hinzu, dass zum Teil zwischen horizontalen und vertikalen Abklingraten gegenläufige Differenzen zwischen den Messstellen und/oder Schienen bestehen und somit eine direkte Interpretation der Spektren verhindert wird.

Hinsichtlich des Modells für die Anpassungswerte bedeutet dies, dass einerseits für den 1 kHz Oktafbandpegel eine Geschwindigkeitsabhängigkeit besteht, die – wenn der erwähnte

Gewichtungsfaktor von 0,57 berücksichtigt wird – Anpassungswerte um bis zu ca. 1-2 dB je 10 km/h Geschwindigkeitsdifferenz beeinflussen kann. Hinzu kommen jedoch noch weitere Einflussparameter, von denen die Schienenrauheiten zwar messtechnisch zugänglich und deren Wirkung anhand des Prognosemodells der Richtlinie 2015/996 für die betrachteten Messdaten mit bis zu ~2,5 dB abschätzbar sind. Jedoch sind dadurch nur teilweise die beobachteten Unterschiede im 1 kHz Oktavbandpegels $L_{0,8-1,25\text{kHz}}$ erklärbar. Unbekannte Einflussgrößen wie die Radrauheiten, aber auch die faktisch nicht interpretierbaren Unterschiede in den Gleisabklingraten dürften zu den beobachteten (von den Schienenrauheitswerten unabhängigen) Variationen von bis zu rund 5 dB führen, die im Modell Unsicherheiten von ebenfalls rund 2 bis 3 dB hervorrufen.

Energetischer Summenpegel $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ des Frequenzbereichs von 1,6 bis 12,5 kHz

Der im mittleren Diagramm der Abb. 6-6 dargestellte, energetische Summenpegel $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ bei akustisch unauffälligen Zeitpunkten nimmt ähnlich wie der 1 kHz Oktavpegel mit der Geschwindigkeit im Mittel zu, wenngleich mit etwas geringerer Steigung. Dieses Verhalten ist auch bei den anderen Zugskategorien (siehe Anhang D) durchwegs zu beobachten. Dass dabei kaum hohe Ausreißer ohne entsprechende Pendanten im 1 kHz Oktavband vorhanden sind, kann als Indiz für eine effektive Erkennung akustischer Auffälligkeiten gewertet werden. In die Bildung von zugbezogenen Gesamtanpassungswerten fließen jedoch nur energetische Summenpegel $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ von jenen Zeitpunkten ein, bei welchen Auffälligkeiten erkannt wurden. Für die Gruppe der Güterzüge sind diese im unteren Diagramm von Abb. 6-6 dargestellt. Diese Punktwolke zeigt weitgehend ein von der Geschwindigkeit unabhängiges und auffallend konstantes Verhalten. Auch bei den weiteren Zugskategorien ist entweder eine ähnliche Charakteristik oder ein mit der Geschwindigkeit leichter Abfall zu bemerken (siehe Anhang D).

Bei genauerem Vergleich der Summenpegel $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für auffällige Zeitpunkte aller Zugskategorien besteht der Eindruck, dass die erwähnten, geringen Abnahmen in den Medianen oder den Spitzenwerten weniger durch die Geschwindigkeit, sondern besser durch den Bogenradius erklärbar sind. Zwar steigen bei höheren Bogenradien auch die zulässigen und damit meist auch die mittleren Fahrgeschwindigkeiten. Bei der Gruppe der Güterzüge treten jedoch die geringsten Geschwindigkeiten bei BEGEL-01 mit einem Radius von 256 m auf (Mittelwert $\bar{v} = 33,0$ km/h bzw. 91,9 % der Züge mit $v \leq 40$ km/h), während in ESB bei engeren Bogenradien von 226 m bzw. 230 m höhere Fahrgeschwindigkeiten vorhanden waren (ESB-01 / ESB-02: Mittelwert $\bar{v} = 53,6 / 43,4$ km/h bzw. 95,8 / 62,7 % der Züge mit $v > 40$ km/h). Insofern wären in Abb. 6-6 die höheren Summenpegel $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ im

Geschwindigkeitsbereich von 45 bis 65 km/h durch eine Bogenradienabhängigkeit besser erklärbar.

Im Hinblick auf die weitgehend gleichbleibende Untergrenze der Punktwolken ist anzumerken, dass die Erkennung von tonalen oder breitbandigen Auffälligkeiten an absolute Grenzwerte geknüpft ist (bei tonalen Auffälligkeiten ist eine Kombination mit einer relativen Bewertungskomponente enthalten). Bei der Entwicklung des Erkennungsalgorithmus im Rahmen des Projekts BEGEL wurde der Grundsatz verfolgt, dass die Bewertung der Geräusche weitestgehend unabhängig von ihrer Grundschallemmission erfolgen soll, um Auftretshäufigkeiten auch zwischen Zügen unterschiedlicher Kategorien und zwischen verschiedenen Bögen vergleichen, sowie Effekte verschiedener Einflussfaktoren beurteilen zu können. Auch im Hinblick auf die Ableitung von schalltechnischen Anpassungswerten, die in den Projekten BEGEL und ESB vorgenommen wurde, ist diese Art der Erkennung grundsätzlich geeignet, da der mittlere Anteil an erkannten bzw. zukünftig erwarteten auffälligen Zügen und deren mittlere Anpassungswerte sich gegenläufig beeinflussen. Im Fall einer stärkeren Abhängigkeit der Detektion vom Grundrollgeräusch würden beispielsweise bei leisen Zügen mehr Auffälligkeiten detektiert werden, gleichzeitig aber der mittlere Anpassungswert sinken.

Ob eine Erkennung in ihrer bisherigen Form mit absoluten Grenzwerten auch für Gesamtanpassungswerte mit perzeptivem Anteil weiterhin anwendbar bleibt, ist zu hinterfragen. Denn entsprechend des entwickelten Modells ist die Differenz zwischen dem Summenpegel $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ und dem Grundrollgeräusch im Bereich von 1 kHz entscheidend. Davon ausgehend, dass die absoluten Grenzwerte auch Erkennungen bei lauten Rollgeräuschen erlauben, müssten sich etwaige Anpassungen in der Erkennung insbesondere auf leisere Rollgeräusche konzentrieren. Als Konsequenz einer Sensitivitätserhöhung in der Erkennung ist zu erwarten, dass sich die Punktwolke vor allem bei langsamen Geschwindigkeiten und bei leiseren Zügen erweitert, sodass neue Zeitpunkte mit geringeren Differenzen zum 1 kHz Oktavbandpegel als bei bisherigen Erkennungen hinzukommen. Dadurch würde zwar die Anzahl Erkennungen auffälliger Zeitpunkte erhöht werden, die anschließende, energetische Mittelung für die Bildung zugbezogener Anpassungswerte würde bei Vorhandensein der ursprünglichen, höheren Werte von diesen weiterhin dominiert werden. Waren bisher keine Erkennungen vorhanden, so würden neuen Züge mit geringen zugbezogenen Anpassungswerten auffällig, wodurch ähnlich gegenläufige Effekte entstehen, wie bei den obigen Ausführungen über rein schalltechnisch Anpassungswerte. Daher wird davon ausgegangen, dass der bisherige, zum Teil auf absoluten Grenzwerten beruhende

Erkennungsansatz auch für Gesamtanpassungswerte mit nur geringen Abstrichen in der Genauigkeit herangezogen werden kann. Zudem sei darauf hingewiesen, dass eine vom Grundrollgeräusch abhängige Erkennung ihrerseits zusätzliche Unsicherheiten für eine „korrekte“ Festlegung des im Allgemeinen nur sehr grob prognostizierbaren Grundrollgeräusches enthält.

Werden die Summenpegel $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für auffällige Zeitpunkte wie nach der Art der Auffälligkeit (breitbandig, tonal und hochfrequent tonal) getrennt dargestellt (Anhang D), so liefern in der Regel breitbandige Auffälligkeiten geringere Werte als tonale Auffälligkeiten. Hervorzuheben ist dabei, dass zumindest bei der Gruppe von Güterzügen in den engsten Bögen aus ESB die breitbandigen und die entstehungstechnisch vermutlich eng gekoppelten, hochfrequenten tonalen Auffälligkeiten höhere Summenpegel ergeben, während sich bei tonalen Auffälligkeiten kaum Änderungen gegenüber weiteren Bögen zeigen. Bei den in ESB ebenfalls vertretenen, sehr häufig verkehrenden Schnellbahnen ist dieses Verhalten hingegen nicht zu erkennen, weshalb unklar bleibt, ob der Bogenradius hier ausschlaggebend ist oder/und das unterschiedliche Güterzugskollektiv zwischen den Messungen in ESB und den anderen Bögen.

Als Folge des geringeren Niveaus der Summenpegel bei breitbandigen Auffälligkeiten werden diese bei den vorliegenden Messdaten im Mittel geringere Gesamtanpassungswerte für die Kurzzeitspektren liefern. Aber auch hier bestehen hinsichtlich zugbezogener Werte gegenläufige Tendenzen, da breitbandige Auffälligkeiten deutlich häufiger auftreten als tonale. In der Prognoserechnung wird allerdings nicht zwischen den verschiedenen Arten von Bogengeräuschen unterschieden, weshalb auf diesen Aspekt nicht weiter eingegangen und nachfolgend nur mehr der Summenpegel $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ unabhängig von der Auffälligkeitsart betrachtet wird.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die gezeigten, grundlegenden Tendenzen der beiden Pegel $L_{0,8-1,25\text{kHz}}$ (mit der Geschwindigkeit steigend) und $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ (weitgehende Geschwindigkeitsunabhängigkeit bzw. durch eine etwaige Radianabhängigkeit mit der Geschwindigkeit leicht fallende Tendenzen) bewirken mit der Geschwindigkeit abnehmende Gesamtanpassungswerte L_{Σ} . Für die betrachteten Daten liegt diese Abhängigkeit bei rund 1-2 dB je 10 km/h Geschwindigkeitssteigerung. Somit sind Berechnungen von Gesamtanpassungswerten stets nur für Zugskollektive mit vergleichbaren Geschwindigkeiten sinnvoll, weshalb nachfolgend stets Geschwindigkeitsklassen mit einer Spannweite von ± 5 km/h betrachtet werden. Da das Rollgeräusch auch von weiteren Rahmenbedingungen abseits der Geschwindigkeit

beeinflusst wird und sich bei vorliegenden Messdaten selbst bei gleicher Zugskategorie und gleicher Geschwindigkeitsklasse Unterschiede von mehreren Dezibel ergeben, sind Anpassungswerte für die einzelnen Messbögen getrennt zu ermitteln, um resultierende Variationen beurteilen zu können.

Die sich in Bögen häufig ausbildenden Riffel und Schlupfwellen fallen kaum in den Wellenlängenbereich, der für die Berechnung des 1 kHz Oktavbandpegels $L_{0,8-1,2,5\text{kHz}}$ bei üblichen Geschwindigkeiten in Bögen mit Radien <500 m relevant ist. Insofern beeinflussen die oft sehr hohen Rauheitspegel von Riffeln und Schlupfwellen die Gesamtanpassungswerte in der Regel nicht. Etwaige vorhanden Rauheitsunterschiede im relevanten Wellenlängenbereich von 10 bis 40 mm können – sofern sie das Grenzspektrum der EN ISO 3095 nur mäßig überschreiten – bei Zügen mit glatten Rädern (Klotzbremsen mit K/LL-Bremssohlen oder Scheibenbremsen) Unterschiede von wenigen Dezibel in den Gesamtanpassungswerten bewirken, während sie bei Fahrzeugen mit rauen Rädern vernachlässigt werden können.

6.3.2 Mittlere, zugbezogene Gesamtanpassungswerte

Entsprechend der Schlussforderungen aus dem vorigen Abschnitt werden die energetischen Mittelwerte der zugbezogenen Gesamtanpassungswerte $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}}$ für die zur Verfügung stehenden Messdaten für jede Zugskategorie getrennt nach Messbogen und Geschwindigkeitsklasse ermittelt. Dabei werden nur jene Kombinationen betrachtet, bei welchen bei mindestens 10 Zügen eine akustische Auffälligkeit erkannt wurde.

Die Ergebnisse sind für die Güterzüge (der allgemeinen Klasse und für den KFZ-Transport) in Tab. 6-2 und für die verschiedenen Personenzugskategorien in Tab. 6-3 dargestellt. Neben allgemeinen Daten (Messstellen, Radius und Geschwindigkeitsklasse) geben die Tabellen auch Aufschluss über Anzahl und Anteile akustisch auffälliger Züge und Zeitpunkte, womit die Neigung einzelner Konstellationen für Auffälligkeiten, aber auch die mittlere Auftrittsdauer bei den auffälligen Zügen abgeschätzt werden kann (sind beispielsweise 40 % der Züge und 10 % der Kurzzeitspektren akustisch auffällig, so wäre die Auffälligkeit im Mittel bei $10/40 = 25$ %). Des Weiteren werden in den beiden Tabellen die Mediane des 1 kHz Oktavbandpegels $\tilde{L}_{0,8-1,2,5\text{kHz}}$ aller Züge, sowie des Summenpegels $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ getrennt für unauffällige und für auffällige Zeitpunkte dargestellt. Dies erlaubt einen einfachen (aber groben) Vergleich der Modelleingangparameter für das Rollgeräusche und für die akustischen Auffälligkeiten. In der vorletzten Spalte sind die mittleren, zugbezogenen Gesamtanpassungswerte für die Gruppe der auffälligen Züge angeführt, für die die jeweiligen Verteilungen in Anhang E zu finden sind. Anhand dieser Werte lassen sich dann die Gesamtanpassungswerte für alle Züge der letzten

Messstelle	Bogenradius	Geschwindigkeitsklasse	Anzahl erfasster Züge	Anzahl auffälliger Züge	Anteil auffälliger Züge	Anzahl erfasster Zeitpunkte	Anzahl auffälliger Zeitpunkte	Anteil auffälliger Zeitpunkte	$\bar{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$ aller Zeitpunkte	$\bar{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ unauffälliger Zeitpunkte	$\bar{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ auffälliger Zeitpunkte	$\Delta L_{z, \text{eg}, 100\%}$ auffälliger Züge	$\Delta L_{z, \text{eg}}$ aller Züge
-	m	km/h	-	-	%	-	-	%	dB	dB	dB	dB	dB
Güterzüge (allgemeine Klasse und für den KFZ Transport)													
BEGEL-01	256	20	60	39	65,0	35224	10080	28,6	71,7	70,9	84,8	9,0	7,4
BEGEL-01	256	30	387	294	76,0	178037	67451	37,9	75,0	74,2	85,0	8,7	7,7
BEGEL-01	256	40	319	208	65,2	100610	27790	27,6	77,7	76,0	84,6	7,3	5,8
BEGEL-02	440	60	45	25	55,6	21723	1814	8,4	80,1	77,8	84,2	2,2	1,4
BEGEL-02	440	70	61	40	65,6	23251	1689	7,3	83,9	81,1	85,2	1,5	1,0
BEGEL-02	440	80	88	58	65,9	30193	2659	8,8	85,6	82,2	85,5	1,3	0,9
BEGEL-02	440	90	119	68	57,1	37437	3768	10,1	86,3	82,7	85,9	1,7	1,1
BEGEL-03	310	50	30	27	90,0	11220	2935	26,2	79,9	79,2	85,1	4,0	3,7
BEGEL-03	310	60	111	77	69,4	36693	7326	20,0	82,1	81,0	85,8	3,8	2,9
BEGEL-03	310	70	237	141	59,5	69391	10482	15,1	83,5	81,0	85,8	3,1	2,1
BEGEL-03	310	80	95	47	49,5	25092	3175	12,7	84,0	81,3	85,7	3,3	1,9
ESB-01*	226	40	20	(12)	(60,0)	9386	(2687)	(28,6)	75,2	74,5	92,0	11,9	(9,9)
ESB-01*	226	50	48	(29)	(60,4)	17200	(3427)	(19,9)	78,1	76,4	90,9	8,4	(6,6)
ESB-01*	226	60	70	(40)	(57,1)	24793	(6127)	(24,7)	81,1	79,4	89,8	8,9	(6,9)
ESB-02	230	30	16	16	100,0	10174	4787	47,1	70,8	72,2	91,2	13,0	13,0
ESB-02	230	40	63	47	74,6	31976	10924	34,2	74,0	74,9	89,8	12,0	10,9
ESB-02	230	50	57	50	87,7	23720	10427	44,0	77,4	76,7	91,7	11,7	11,1
Peugen	332	80	12	12	100,0	5771	1918	33,2	86,4	82,3	88,1	3,2	3,2

Geschwindigkeitsklassen, die dem VzG entsprechen, sind rot gekennzeichnet

* aktivierte Schienenkopfkonditionierung bei 78,7 % der Vorbeifahrten, weshalb jene Werte, die den Anteil an akustischen Auffälligkeiten berücksichtigen, nicht repräsentativ sind

Tab. 6-2: Übersicht über Gesamtanpassungswerte $\Delta L_{z, \text{eg}}$ von Güterzügen (inkl. zugrunde liegender Daten), die sich aus sämtlichen Messdaten der Projekte BEGEL und ESB, sowie dem vorliegenden Projekt PAAB ergeben, separiert nach Zugskategorie, Messbogen und Geschwindigkeitsklasse (Mindestzahl von 10 akustisch auffälligen Zügen)

Spalte, die letzten Endes ausschlaggebend für die Prognoserechnung sind, durch Berücksichtigung des Anteils an auffälligen Zügen ableiten.

Für eine bessere Lesbarkeit der Tabellen sind Konstellationen mit Geschwindigkeitsklassen, die der Geschwindigkeit des Verzeichnisses zulässiger Geschwindigkeiten (VzG) entsprechen, rot gekennzeichnet. Zudem werden Bögen mit Radien ≤ 300 m durch einen hellorange und alle weiteren Bögen durch einen hellgrünen Hintergrund farblich unterschieden. In diesem Bezug sei allerdings darauf hingewiesen, dass durch diese, an der RVE 04.01.02 orientierte Radiengrenze, der Messbogen in Platt mit einem Radius von 299 m der Gruppe der engeren Bögen und Zellerndorf mit einem Radius von 304 m der

Messstelle	Bogenradius	Geschwindigkeitsklasse	Anzahl erfasster Züge	Anzahl auffälliger Züge	Anteil auffälliger Züge	Anzahl erfasster Zeitpunkte	Anzahl auffälliger Zeitpunkte	Anteil auffälliger Zeitpunkte	$\bar{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$ aller Zeitpunkte	$\bar{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ unauffälliger Zeitpunkte	$\bar{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ auffälliger Zeitpunkte	$\Delta L_{\Sigma, \text{eg}, 100\%}$ auffälliger Züge	$\Delta L_{\Sigma, \text{eg}}$ aller Züge
-	m	km/h	-	-	%	-	-	%	dB	dB	dB	dB	dB
Reisezüge (allgemeine Klasse)													
BEGEL-02	440	90	83	47	56,6	7399	1117	15,1	80,7	76,5	81,9	2,6	1,7
BEGEL-03	310	80	57	20	35,1	9373	1237	13,2	74,7	73,6	86,6	8,7	5,1
Railjet Reisezüge													
BEGEL-03	310	70	70	23	32,9	11086	1834	16,5	72,7	72,7	85,1	10,0	5,9
BEGEL-03	310	80	134	54	40,3	20231	3605	17,8	73,5	73,4	84,0	8,6	5,5
Regionalzüge der Baureihe 80-33													
BEGEL-01	256	40	116	47	40,5	16192	2337	14,4	69,1	68,8	87,0	12,5	8,9
BEGEL-01	256	50	174	76	43,7	19574	3371	17,2	72,5	71,3	87,3	10,4	7,3
BEGEL-01	256	60	4128	1682	40,7	388729	62961	16,2	75,8	73,3	86,9	8,5	5,4
BEGEL-02	440	90	176	48	27,3	14977	946	6,3	78,5	74,5	84,3	1,8	0,6
Platt	299	80	49	20	40,8	8162	1192	14,6	79,5	76,3	85,8	5,2	2,9
Zellerndorf	304	80	39	31	79,5	6530	1621	24,8	86,4	79,5	86,8	2,5	2,1
Schnellbahnen der Baureihe 4020													
BEGEL-01	256	40	249	171	68,7	44225	10310	23,3	72,9	71,8	84,1	7,4	6,1
BEGEL-01	256	50	1086	732	67,4	146390	40167	27,4	76,4	73,5	84,7	6,7	5,4
BEGEL-01	256	60	3268	2252	68,9	390852	112217	28,7	78,4	74,7	84,4	5,9	4,7
ESB-01*	226	40	996	(146)	(14,7)	146791	(7905)	(5,4)	69,9	68,8	83,9	9,2	(3,2)
ESB-01*	226	50	1982	(372)	(18,8)	248705	(16543)	(6,7)	72,6	70,5	83,4	8,1	(3,1)
ESB-01*	226	60	118	(25)	(21,2)	12851	(945)	(7,4)	74,4	72,0	82,5	6,4	(2,3)
ESB-02	230	40	94	37	39,4	14290	2541	17,8	68,8	67,6	86,5	10,6	7,1
ESB-02	230	50	1065	485	45,5	128625	28852	22,4	71,8	70,6	84,9	10,1	7,2
ESB-02	230	60	1963	991	50,5	207353	51604	24,9	73,8	72,1	84,2	9,1	6,6
Schnellbahnen der Baureihe 4024													
BEGEL-01	256	50	66	11	16,7	8580	676	7,9	73,5	68,2	85,3	8,8	3,2
BEGEL-01	256	60	225	45	20,0	26722	2006	7,5	75,5	69,9	83,8	7,2	2,7
ESB-01*	226	40	5627	(548)	(9,7)	796641	(34810)	(4,4)	67,4	65,3	84,6	10,7	(3,1)
ESB-01*	226	50	10667	(1601)	(15,0)	1288429	(94956)	(7,4)	68,7	66,3	83,9	10,2	(3,9)
ESB-01*	226	60	614	(102)	(16,6)	64460	(5707)	(8,9)	69,7	67,3	82,7	9,6	(3,7)
ESB-02	230	40	1407	349	24,8	213988	26371	12,3	64,4	61,6	85,6	12,1	6,8
ESB-02	230	50	5114	1376	26,9	593319	84268	14,2	67,9	64,8	84,2	11,4	6,5
ESB-02	230	60	10557	3158	29,9	1072710	175565	16,4	69,6	66,5	83,6	10,7	6,2
Geschwindigkeitsklassen, die dem VzG entsprechen, sind rot gekennzeichnet													
* aktivierte Schienenkopfkonditionierung bei 78,7 % der Vorbeifahrten, weshalb jene Werte, die den Anteil an akustischen Auffälligkeiten berücksichtigen, nicht repräsentativ sind													

Tab. 6-3: Übersicht über Gesamtanpassungswerte $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}}$ von Personenzügen (inkl. zugrunde liegender Daten), die sich aus sämtlichen Messdaten der Projekte BEGEL und ESB, sowie dem vorliegenden Projekt PAAB ergeben, separiert nach Zugskategorie, Messbogen und Geschwindigkeitsklasse (Mindestzahl von 10 akustisch auffälligen Zügen)

Gruppe der weiteren Bögen zugeordnet wird, die VzG-Geschwindigkeit in beiden Bögen jedoch gleichermaßen bei 80 km/h liegt. Des Weiteren ist zu beachten, dass vor der Messstelle ESB-01 eine Schienenkopfkonditionierung installiert war, die bei 78,7 % der Vorbeifahrten in Betrieb war. Die dargestellten Werte beziehen sich allerdings auf den gesamten Messzeitraum, weshalb jene Werte, in welche der Anteil an akustischen Auffälligkeiten einfließt, nicht repräsentativ sind und daher in Klammer gesetzt wurden.

Güterzüge

Die Gruppe der Güterzüge in Tab. 6-2 hat zwar für die Auswertung den Vorteil, dass Güterzüge bei fast allen Messbögen verkehrten, jedoch sind innerhalb dieser Gruppe hinsichtlich der akustischen Eigenschaften der Fahrzeuge die größten Unterschiede zu erwarten. In den drei weiteren Bögen zeigt sich trotz dessen ein sehr einheitliches Bild geringer Gesamtanpassungswerte bis zu rund 3 dB bei VzG-Geschwindigkeit trotz hoher Anteile auffälliger Züge. Einen wesentlichen Grund stellen hier die durchwegs ähnlich hohen Rollgeräusche dar: So variiert der Median $\tilde{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$ auf konstant hohem Niveau von 84 bis 86,3 dB und damit im Bereich des Medians $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für den oberen Frequenzbereich (85,7 bis 88,1 dB).

Bei engen Bögen ist zunächst festzustellen, dass bei VzG-Geschwindigkeit keine Anpassungswerte $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}}$ vorliegen. Beim sehr engen Bogen ESB-02 sind bei den Geschwindigkeitsklassen direkt unterhalb der VzG-Geschwindigkeit (30, 40 und 50 km/h) sehr hohe Anpassungswerte $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}, 100\%}$ von 11,7 bis 13,0 dB zu beobachten, die durch die hohen Anteile von auffälligen Zügen (74,6 bis 100 %) sich in ähnlich hohen Anpassungswerten für alle Züge von 10,9 bis 13,0 dB umsetzen. Erstere Werte liegen bei BEGEL-01 für die vorhandenen, geringeren Geschwindigkeitsklassen 20, 30 und 40 km/h hingegen zwischen 7,3 und 9,0 dB, wobei bei beiden Bögen die Werte mit der Geschwindigkeit aufgrund der Zunahme des Rollgeräusches sukzessive abnehmen. Die Anteile auffälliger Züge sind bei BEGEL-01 mit rund 65-75 % ebenfalls geringer als bei ESB-02, wodurch sich die Unterschiede in den Endergebnissen $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}}$ weiter vergrößern: beispielsweise beträgt der Unterschied bei 40 km/h 5,1 dB. Im Hinblick auf die VzG-Geschwindigkeit von 60 km/h kann aufgrund der Tendenzen bei geringeren Geschwindigkeiten vermutet werden, dass die Abstände gleichbleiben oder sich etwas vergrößern, die Werte an sich aber abnehmen. Unter dieser Annahme würden sich bei BEGEL-01 Werte im Bereich von 3 bis 5 dB und bei ESB-02 knapp unter 10 dB ergeben. Die Gesamtanpassungswerte von BEGEL-01 erscheinen – auch wenn ein direkter Vergleich aufgrund der unterschiedlichen Zugänge beispielsweise bei der Berücksichtigung von Regenphasen nicht möglich ist – mit den in BEGEL abgeschätzten,

geringen, rein schalltechnischen Anpassungswerte für laute Güterzüge verträglich, während hinsichtlich der hohen Werte bei ESB folgende Aspekte und Erklärungsansätze zu bedenken sind.

- Die Rollgeräusche $\tilde{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$ unterscheiden sich bei den, bei beiden Messstellen erfassten Geschwindigkeitsklassen 30 und 40 km/h um rund 4 dB, wodurch eine Differenz von knapp 2 dB in $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}, 100\%}$ erklärt werden kann. Informationen darüber, ob in ESB der Anteil an leisen Güterzügen höher war, liegen nicht vor. Da die Messungen 2013/2014 (BEGEL) bzw. 2016 (ESB) stattfanden, wird bei beiden Bögen von einem vernachlässigbar geringen Anteil an leisen Güterfahrzeugen ausgegangen. Zwar bestehen die bereits gezeigten Unterschiede in den Schienenrauheitsspektren im relevanten Wellenlängenbereich, allerdings ergeben Abschätzungen für graugußgebremste Räder nach dem Rechenmodell der RVE 04.01.02 Emissionsänderungen im 1 kHz Oktavband im Zehntel-Dezibel Bereich. Bei ESB bestand der Güterzugsmix zu rund 2/3 aus Güterzügen für den KFZ-Transport und zu 1/3 aus Güterzügen der allgemeinen Klasse, wohingegen bei BEGEL ausschließlich Güterzüge der allgemeinen Klasse den Messbogen durchfuhren. Jedoch haben differenzierte Auswertungen der Zugskategorien in ESB nahezu idente Rollgeräusche $\tilde{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$ für beide Güterzugsklassen ergeben (max. Abweichungen in den einzelnen Geschwindigkeitsklassen beträgt 0,5 dB). Folglich ist ein Einfluss durch Güterzüge für den KFZ-Transport defacto auszuschließen. Die vertikale Gleisabklingrate einer der beiden Schienen und die horizontale Abklingrate beider Schienen liegen insbesondere im 0,8 kHz und 1 kHz Terzband etwas höher beim Bogen ESB-02, wengleich auch in BEGEL in den drei Terzen des 1 kHz Oktavbandes die Grenzkurve der EN ISO 3095 nicht unterschritten wurde. Diese Differenzen können somit begünstigend für leisere Rollgeräusche in ESB-02 wirken, insbesondere da im betrachteten Frequenzbereich der Schienen- bzw. Oberbauanteil in den Gesamtemissionen bei Standardwerten der RVE 04.01.02 laut Rechenmodell überwiegen. Eine Beurteilung, ob diese Differenzen in den Gleisabklingraten letztlich (alleinig) dafür verantwortlich sind, ob auch Unterschiede in den mittleren Radrauheiten bestehen, oder ob auch weitere Einflüsse signifikant mitwirken ist anhand der vorliegenden Messdaten nicht möglich.
- Im Messbogen ESB-01 sind gegenüber ESB-02 um rund 1 dB höhere Rollgeräusche $\tilde{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$, bei minimal geringeren Schienenrauheiten (< 2 dB im relevanten Wellenlängenbereich) und etwas höheren vertikalen und zum Teil höheren, zum Teil (auch deutlich) niedrigeren horizontalen Gleisabklingraten im Bereich von 0,8 bis 1,25 kHz

zu beobachten. Da aufgrund der zeitlich parallelen Messungen am gleichen Streckengleis das gleiche Wagenmaterial die Messquerschnitte in beiden Bögen passierte, unterstreicht dies, dass bei gleichen mittleren Radrauheiten und ähnlichen Oberbaueigenschaften auch die betrachteten Rollgeräusche vergleichbar sind. Inwiefern dies als schwaches Indiz dafür gewertet werden, dass auch Radrauheitsunterschiede zwischen BEGEL-01 und ESB-02 für die oben beschriebenen Unterschiede (mit)verantwortlich sind, bleibt aufgrund der Datenlage aber unklar.

- Werden die Mediane $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ der Summenpegel der oberen Terzbänder für auffällige Zeitpunkte der Messstellen BEGEL-01 und ESB-02 (oder auch ESB-01) einander gegenübergestellt, so sind diese im engeren Bogen, trotz rund 4 dB leiseren Rollgeräusches und trotz um ähnliche Beträge (rund 2 bis 3 dB) niedrigere Mediane $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für unauffällige Zeitpunkte um rund 4 bis 6 dB höher. Die in Abb. D-2 in Anhang D dargestellte Aufspaltung in die unterschiedlichen Arten auffälliger Bogengeräusche deutet darauf hin, dass in ESB gerade die breitbandigeren, sowie die hochfrequent tonalen Auffälligkeiten gegenüber den tonalen Auffälligkeiten im Vergleich zu den Verhältnissen in BEGEL-01 an Gewicht gewinnen. Die mittleren, zeitlichen Anteile während der Zugvorbeifahrt befinden sich hingegen in allen drei Messbögen (mit Ausnahme eines einzelnen Ausreißers von 33 %) auf einem ähnlichen Niveau von 40 bis 50 %, weshalb von höheren Bandpegeln bei ESB auszugehen ist. Ein naheliegender Grund wäre, dass die um rund 10 % engeren Bogenradien in ESB zu intensiveren Spurkranzanläufen führen. Allerdings sind bei den größeren Bogenradien der anderen Messstellen kaum mehr weitere Verringerungen des Medians $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ auffälliger Zeitpunkte gegenüber BEGEL-01 zu erkennen: selbst bei BEGEL-02 mit 440 m Bogenradius ist bei 60 km/h gegenüber BEGEL-01 bei 40 km/h nur eine Differenz von 0,4 dB vorhanden bzw. kehrt sich das Vorzeichen bei BEGEL-03 mit 310 m Bogenradius sogar um (0,5 dB höher bei 50 km/h). Dass hier dann tonale Auffälligkeiten den Summenpegel $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ im Wesentlichen bestimmen, kann anhand von Abb. D-2 ausgeschlossen werden. Zwar ist in BEGEL-02 der Median $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für tonale Auffälligkeiten um rund 3 dB höher als für breitbandige Auffälligkeiten, jedoch treten letztere rund 20-fach häufiger auf. Insofern kann letztlich keine Aussage darüber getroffen werden, ob die sehr engen Bogenradien bei ESB die höheren Mediane $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ auffälliger Zeitpunkte bedingen.

Zusammenfassend kann damit für die Gruppe von Güterzügen in engen Bögen festgehalten werden, dass kein Messbogen einen Gesamtanpassungswert $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}}$ bei der Geschwindigkeit

von 60 km/h gemäß VzG liefert. Grobe Abschätzungen auf Basis der Werte bei geringeren Geschwindigkeiten führen zu stark divergierenden Ergebnissen (BEGEL-01 ~3-5 dB, ESB-02 knapp unter 10 dB), die sich aus gegenläufigen Unterschieden im Rollgeräusch im 1 kHz Oktavband und den Erhöhungen in den Terzbändern bei höheren Frequenzen ergeben. Die konkreten Ursachen dieser Differenzen sind anhand vorliegender Daten nicht ermittelbar, sodass für Anpassungswerte der Prognoserechnung letztlich entsprechende Unsicherheiten zu beachten sind (siehe Kap. 6.5).

Reisezüge (allgemeine Klasse)

Für diese Zugskategorie liegen nur ausreichend Messdaten für weitere Bögen mit Radien von 310 m (BEGEL-03) und von 440 m (BEGEL-02) für die jeweiligen Geschwindigkeiten gemäß VzG vor (BEGEL-03 mit 80 km/h und BEGEL-02 mit 90 km/h). Allerdings unterscheiden sich auch hier die Ergebnisse, insbesondere bei dem Gesamtanpassungswert $\Delta L_{\Sigma, eg, 100\%}$ für ausschließlich auffällige Vorbeifahrten. Denn dieser Wert ist bei BEGEL-03 rund 6 dB höher, als bei BEGEL-02. Verantwortlich ist hierfür die Kombination aus rund 6 dB leiserem Rollgeräuschmedian $\tilde{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$ und rund 4 dB höherem Median $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ auffälliger Zeitpunkte. Der Rollgeräuschunterschied ist aufgrund glatter Räder vermutlich großteils auf Unterschiede in den Schienenrauheiten zurückzuführen, da bei BEGEL-02 die Rauheiten zwischen 16 und 40 mm generell um einige Dezibel höher liegen und darüber hinaus noch eine Spitze im Spektrum bei 25 mm Wellenlänge von rund 10 dB über den Rauheiten von BEGEL-03 besteht. Zudem ist diese Zugskategorie eine Sammelklasse verschiedener Reisezüge, weshalb neben Variationen in den mittleren Radrauheiten auch Unterschiede in den die Messstellen passierenden Fahrzeugtypen bestanden haben könnten. Die Differenz im Median $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ auffälliger Zeitpunkte von rund 4 dB wird zum Teil durch den etwas engeren Radius, ebenso wie die höhere mittlere Auftrittsdauer (38 % vs. 27 %) in BEGEL-02 relativiert. Auch übersteigen die Summenpegel $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ der tonalen Auffälligkeiten in BEGEL-03 die breitbandigen Pegel klar und dürften daher zu dem höheren Median $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ beitragen, während in BEGEL-02 die deutlich niedrigeren Pegelwerte bei tonalen Auffälligkeiten kaum von Relevanz sein dürften und die breitbandigen Auffälligkeiten auf niedrigerem Pegelniveau den Median $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ bestimmen.

Der erwähnte Unterschied von 6 dB in den Gesamtanpassungswerten $\Delta L_{\Sigma, eg, 100\%}$ für auffällige Züge schlägt sich in der den Gesamtanpassungswerten $\Delta L_{\Sigma, eg}$ mit 3,4 dB etwas vermindert nieder, da bei BEGEL-03 der Anteil an auffälligen Zügen mit 35 % um rund 22 % niedriger als bei BEGEL-02 ist. Trotz dessen verbleiben für die Zugskategorie Reisezüge der allgemeinen

Klasse bei den beiden Mesststellen BEGEL-02 und BEGEL-03 zwei sich doch deutlich voneinander unterscheidende Gesamtanpassungswerten $\Delta L_{\Sigma, eg}$ von 1,7 dB und 5,1 dB.

Railjet Reisezüge

In Tab. 6-3 sind für Railjets nur Ergebnisse von BEGEL-03 (Radius 310 m) für die beiden Geschwindigkeiten 70 km/h und 80 km/h (entspricht dem VzG) gelistet, die beide konsistent Gesamtanpassungswerte $\Delta L_{\Sigma, eg}$ von 5,5 und 5,9 dB ausweisen. Zieht man die hier nicht weiter dokumentierten Ergebnisse der Messungen in Peugen mit geringfügig größerem Radius von 332 m hinzu, bei welchen bei der VzG-Geschwindigkeit von ebenfalls 80 km/h zumindest 8 Vorbeifahrten erfasst wurden, so ergeben sich auch hier Unterschiede. Denn in Peugen liegt Gesamtanpassungswerten $\Delta L_{\Sigma, eg}$ lediglich bei 3,2 dB. Zwar ist die statistische Aussagekraft bei so niedrigen Zugzahlen gemindert, jedoch fällt bei Vergleich vor allem der in Peugen deutlich höhere Rollgeräuschmedian $\tilde{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$ von 79,0 dB auf, was einem Plus von 5,5 dB entspricht (vgl. Abb. D-5 in Anhang D). Die Schienenrauheiten sind bei Peugen marginal geringer als bei BEGEL-03, während bei der horizontalen Gleisabklingrate in Peugen zum Teil (zwei der drei Terzen des 1 kHz Oktavbandes) etwas schlechtere und bei der vertikalen Gleisabklingrate von der jeweils betrachteten Schiene abhängig entweder bessere oder frequenzabhängig bessere und schlechtere Werte zeigt. Mit Ausnahme eines einzelnen Terzbandwertes in BEGEL-03 liegen jedoch alle Gleisabklingraten über den Grenzspektren der EN ISO 3095. Es ist daher fraglich, ob diese Unterschiede der Gleisabklingraten zu derartigen Senkungen im 1 kHz Oktavband führen können, oder ob nicht andere Einflüsse, wie Unterschiede der mittleren Radrauheiten, etc., ebenfalls eine Rolle spielen.

Da der Median $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ auffälliger Zeitpunkte in Peugen mit einem Plus von 1,7 dB nur etwas höher liegt als in BEGEL-03, ist der erwähnte Unterschied im Rollgeräuschmedian $\tilde{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$ letztlich für den in Peugen um 4 dB niedrigeren Gesamtanpassungswert $\Delta L_{\Sigma, eg, 100\%}$ für auffällige Züge verantwortlich. Insofern sind die Unterschiede in den Gesamtanpassungswerten $\Delta L_{\Sigma, eg}$ von 5,5 bzw. 5,9 dB vs. 3,2 dB anhand der vorliegenden Daten nicht begründbar und daher als Unsicherheiten zu werten.

Regionalzüge Baureihe 80-33

Die Messdaten dieser Zugskategorien liefern für vier verschiedene Messbögen Werte für Gesamtanpassungswerte $\Delta L_{\Sigma, eg}$ bei VzG-Geschwindigkeiten, die – ebenso wie die Eingangsparemeter zu deren Berechnung – weitestgehend plausibel erscheinen. Im engsten Bogen BEGEL-01 mit 256 m Radius tritt mit 5,4 dB der höchste Wert für $\Delta L_{\Sigma, eg}$ auf, der jedoch

aufgrund der hohen Schienenrauheit eher im unteren Bereich für allgemein zu empfehlende Anpassungswerte anzusiedeln ist. Und beim weitesten Bogen BEGEL-02 ist mit 0,6 dB der geringste Wert zu beobachten. In ersterem Bogen bestehen auch ausreichend Messdaten für die Ermittlung von Gesamtanpassungswerten bei geringeren Geschwindigkeiten, die mit Geschwindigkeitszunahme vor allem aufgrund des steigenden Rollgeräusches im 1 kHz Oktavband konsistent sinken.

Aber die Baureihe 80-33 macht einen Nachteil des im europäischen Rechenmodell bzw. in der RVE 04.01.02 verankerten, vereinfachten Ansatzes zur Berücksichtigung von auffälligen Bogengeräuschen offensichtlich, bei welchem lediglich zwischen engen Bögen bis 300 m Radius und weiteren Bögen bis 500 m Radius differenziert wird. Denn der Messbogen Platt ist mit einem Radius von 299 m gemäß dieser Kategorisierung noch den engen Bögen zuzuordnen, jedoch ist die VzG Geschwindigkeit mit 80 km/h bereits vergleichbar mit üblichen Geschwindigkeiten in weiteren Bögen. Zwar sind gegenüber BEGEL-01 bei VzG-Geschwindigkeit von 60 km/h der Median $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ auffälliger Zeitpunkte und die Anteile auffälliger Züge und Zeitpunkte vergleichbar. Als Folge der höheren Geschwindigkeit steigt jedoch der Rollgeräuschmedian $\tilde{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$ von 60 auf 80 km/h um 3,7 dB an (dieser Wert entspricht indes nur dann den Erwartungen, wenn ausschließlich von rund 3 bis 3,5 dB Steigerung je 10 km/h gemäß BEGEL-01 abzüglich 3 bis 4 dB für die Schienenrauheitsabnahme ausgegangen und die meist doch deutlich geringeren Gleisabklingraten in Platt außer Acht gelassen werden), wodurch der Gesamtanpassungswert $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}}$ in Platt auf 2,9 dB abfällt und damit beinahe exakt zwischen den Werten von BEGEL-01 und BEGEL-02 zu liegen kommt. Aufgrund dieser Zusammenhänge scheint es deshalb fraglich, ob eine einzelne Radiengrenze bei 300 m zielführend ist, oder ob bei der Grenzziehung nicht auch die VzG-Geschwindigkeiten Berücksichtigung finden sollten.

Der Messbogen Zellerndorf wirkt aufgrund seines Radius von 304 m und seines Gesamtanpassungswertes $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}}$ von 2,1 dB auf den ersten Blick zwar ähnlich gelagert wie Platt. Allerdings ist vor allem der gegenüber Platt um rund 7 dB und damit deutlich gestiegene Rollgeräuschmedian $\tilde{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$ für einen vergleichsweise geringen Gesamtanpassungswert $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}, 100\%}$ ausschließlich auffälliger Vorbeifahrten von 2,5 dB verantwortlich, der sich durch den hohen Anteil auffälliger Züge von knapp 80 % in einen kaum weiter verringerten Gesamtanpassungswertes $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}}$ von 2,1 dB übersetzt. Der Grund für diese hohen Rollgeräusche wird vor allem den mittleren Schienenrauheiten in Zellerndorf zugeschrieben, die deutlich über jenen von Platt liegen. Zwar kommen diese, sofern Radrauheiten gemäß RVE 04.01.02 berücksichtigt werden, bei Emissionen nur im 800 Hz Terzband deutlich und

damit nur eingeschränkt im 1 kHz Oktavband zu tragen. Jedoch fällt aufgrund des spektralen Abfalls der Schallemissionen hin zu höheren Frequenzen dem 800 Hz Terzband das größte Gewicht bei der Oktavbandbildung zu, sodass von maximal möglichen Unterschieden im 1 kHz Oktavband von 5 bis 6 dB ausgegangen werden kann. Zudem liegen die Gleisabklingraten im entsprechenden Frequenzbereich durchwegs bei Zellerndorf etwas höher, wodurch eigentlich leisere Rollgeräusche hervorgerufen werden sollten. Und auch bei den Radrauheiten sind größere Variationen unwahrscheinlich, da Platt und Zellerndorf an der gleichen, 1-gleisigen Strecke liegen und die Messungen in einem zeitlichen Abstand von rund 3 Wochen stattfanden. Daher kann bei Zellerndorf zusammenfassend festgehalten werden, dass sich im Hinblick auf den Gesamtanpassungswert $\Delta L_{\Sigma, eg}$ die Effekte des deutlich höherem Rollgeräusches im 1 kHz Oktavband und des sehr hohem Anteils auffälliger Züge größtenteils kompensieren und sich daher ein mit Platt vergleichbarer Wert ergibt. Gleichzeitig unterstreicht es aber die Variationsmöglichkeiten, die ohne den eingetretenen Kompensationseffekt Abweichungen von einigen Dezibel in beide Richtungen verursachen können.

Schnellbahnen der Baureihe 4020

Diese Zugskategorie verkehrte ausschließlich in den engen Bögen BEGEL-01, ESB-01 und ESB-02, wobei in allen Messbögen Ergebnisse für die Geschwindigkeiten von 40 km/h bis zur VzG-Geschwindigkeit von 60 km/h zur Verfügung stehen. Zunehmende Geschwindigkeiten bewirken die üblichen Steigerungen des Rollgeräuschmedians $\tilde{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$, die bei tendenziell geschwindigkeitsunabhängigen Medianen $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ der auffälligen Zeitpunkte zu sinkenden Gesamtanpassungswerten, sowohl ausschließlich auffälliger Vorbeifahrten ($\Delta L_{\Sigma, eg, 100\%}$), als auch aller Züge ($\Delta L_{\Sigma, eg}$) führen. Erstere sind bei BEGEL-01 wegen der höheren Schienenrauheiten und der entsprechend höheren Rollgeräusche im 1 kHz Oktavband (bei 50 und 60 km/h beträgt die Zunahme gegenüber der Bögen in ESB rund 4 bis 5 dB und bei 40 km/h rund 3 bis 4 dB) durchwegs am geringsten: so sind bei ESB-02 die Werte von $\Delta L_{\Sigma, eg, 100\%}$ um etwa 3 bis 3,5 dB höher, während bei ESB-01 die Erhöhungen mit rund 0,5 bis 2 dB als Folge etwas geringerer Mediane $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ auffälliger Zeitpunkte und geringerer, mittlere Anteile auffälliger Zeitpunkte in den Zugvorbeifahrten (~35 % vs. 45 - 50 %) niedriger ausfallen. Dies führt letztlich zu den leicht unterschiedlichen Gesamtanpassungswerten $\Delta L_{\Sigma, eg}$ von beispielsweise 4,7 dB bei BEGEL-01 und 6,6 dB bei ESB-02 für die 60 km/h Klasse. Würde bei BEGEL-01 hingegen die geringen Schienenrauheiten von ESB-02 vorhanden sein, so würde dies zu vergleichbaren Werten im Bereich von 6-7 dB bei VzG-Geschwindigkeit führen.

Schnellbahnen der Baureihe 4024

Die auch unter der Bezeichnung Talent bekannten Schnellbahnen zeichnen sich grundsätzlich durch sehr geringe Rollgeräusche und vergleichsweise geringe Häufigkeiten von akustischen Auffälligkeiten aus. Allerdings stehen für diese Schnellbahnen ähnlich wie für die Baureihe 4020 nur ausreichend Messdaten aus engen Bögen (BEGEL-01 und ESB, meist von 40 bis 60 km/h) zur Verfügung, weshalb sich diese Aussage nur auf enge Bögen bezieht. So zeigen Schnellbahnen der Baureihe 4024 in der Regel die geringsten Rollgeräuschmediane $\tilde{L}_{0,8-1,25\text{kHz}}$ und die geringsten Anteile an auffälligen Vorbeifahrten in Tab. 6-2 und Tab. 6-3. Da die mittleren Anteile von auffälligen Zeitpunkten während der Vorbeifahrt mit meist 35 bis 55 % in ähnlichen Bereichen und die Mediane $\tilde{L}_{1,6-12,5\text{kHz}}$ auffälliger Zeitpunkte mit rund 83 bis 85 dB im unteren Bereich der Spannweite anderer Personenzüge liegen, ordnen sich letztlich auch die Gesamtanpassungswerte $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}, 100\%}$ ausschließlich auffälliger Vorbeifahrten mit rund 10 dB in ESB und schienenrauheitsbedingt rund 7 dB bei BEGEL-01 in ähnlichen Regionen ein. Der erwähnte, niedrige Anteil auffälliger Züge bewirkt letztlich dann aber doch vergleichsweise niedrige Gesamtanpassungswerte $\Delta L_{\Sigma, \text{eg}}$ von 2,7 dB bei BEGEL-01 und 6,2 dB bei ESB-02. Auch hier zeigt sich, dass niedrigere Geschwindigkeiten diese Werte konsistent erhöhen und dass sich die Gesamtanpassungswerte von BEGEL-01 jenen von ESB-02 deutlich annähern würden, sofern ähnlich glatte Schienen vorhanden wären.

6.4 Diskussion emissionsseitiger Anpassungswerte

Die Anpassung der Belästigungswirkung soll einen wirkungsäquivalenten Pegelvergleich bzw. auch eine Gegenüberstellung zu Dosis-Wirkungskurven und Grenzwerten erlauben. Dosis-Wirkungskurven liegen beispielsweise für Lärmindizes L_{den} für Belästigung und L_{night} für Schlafstörung vor (WHO 2018 [44]). Sie beziehen sich jeweils auf den Fassadenpegel von betroffenen Anrainern. Eine Dosis-Wirkungskurve für Schienenverkehrslärm mit einem Anteil an Kurvengeräuschen wäre somit ebenfalls für den Fassadenpegel anzugeben. Damit ist auch ein Anpassungswert grundsätzlich erst nach Berücksichtigung der Schallausbreitung vom Entstehungsort hin zum Immissionsort anzuwenden. Erst am Fassadenpegel ergibt sich die Pegel-Zeitstruktur mit ihrem jeweiligen Frequenzspektrum. Daher ist die Anpassung auf Seiten der Emission bei erster Betrachtung nicht zweckmäßig. Eine durchwegs stringente Vorgangsweise wäre die Berücksichtigung der Pegelanhebung für den Schalleistungspegel der Emission unter Berücksichtigung der Wirkdauer und des Frequenzspektrums, danach folgend die Ausbreitungsberechnung und die Belästigungsanpassung erst auf Seiten eines Fassaden-Beurteilungspegels bzw. Lärmindex.

Im vorliegenden Projekt wurden Vorbeifahrtspegel in Entfernungen von 7,5 m bis 50 m von der Schienenachse ermittelt. Dies stellt einen repräsentativen Abstand zu Schienenstrecken dar, in dem die Lärmindizes in einem nach WHO maßgeblichen Bereich liegen. Höhere Anpassungen für etwaig näher zur Schienenstrecke liegende Anrainer werden die Ausnahme sein, für weiter entfernt liegende Anrainer, kann eine Verringerung der hochfrequenten Anteile durch atmosphärische Dämpfung, Bodendämpfung und Abschirmung zu einer Überbewertung der Belästigungswirkung führen.

Die Anpassungswerte für auffällige Anteile sind nach dem Modell vom Verhältnis der hoch- (> 1250 Hz Terzbänder) zum niederfrequenten Anteil (1000 Hz Oktavband) abhängig. Mit steigendem Abstand ergibt sich eine unterschiedliche Dämpfung einzelner Frequenzbänder. Bei der freien Ausbreitung wirkt sich vor allem die unterschiedliche atmosphärische Dämpfung nach ISO 9613-1 [27] als auch die Bodendämpfung (ÖAL 28 [45]) aus. Abb. 6-8 zeigt die Spektren mit ansteigender Entfernung ausgehend von gemessenen Spektren bei 7,5 m Entfernung. Die Dämpfung wird dabei nach ÖAL 28 (Oktober 2021) berechnet, wobei eine freie Ausbreitung auf porösem Boden ($G=1$) und 10°C Lufttemperatur bei 70 % relativer Luftfeuchtigkeit angenommen ist. Diese Einstellung bezieht sich auf insgesamt geringere Dämpfungswerte für den A-bewerteten Gesamtpegel von Verkehrsgeräuschen als bei anderen meteorologischen Bedingungen und wurde für Österreich als Standardbedingung festgelegt (ÖAL 28). Andererseits variieren gerade die Dämpfungswerte für Oktavbandmittenfrequenzen von 8 kHz nach ISO 9613-1 beispielsweise von 202 dB/km bei 15°C und 20 % relativer Luftfeuchte bis hin zu 59 dB/km für 30°C und 70 % relativer Luftfeuchte. Als Ersatzschallquelle wurde eine 100 m lange gerade Schienenstrecke

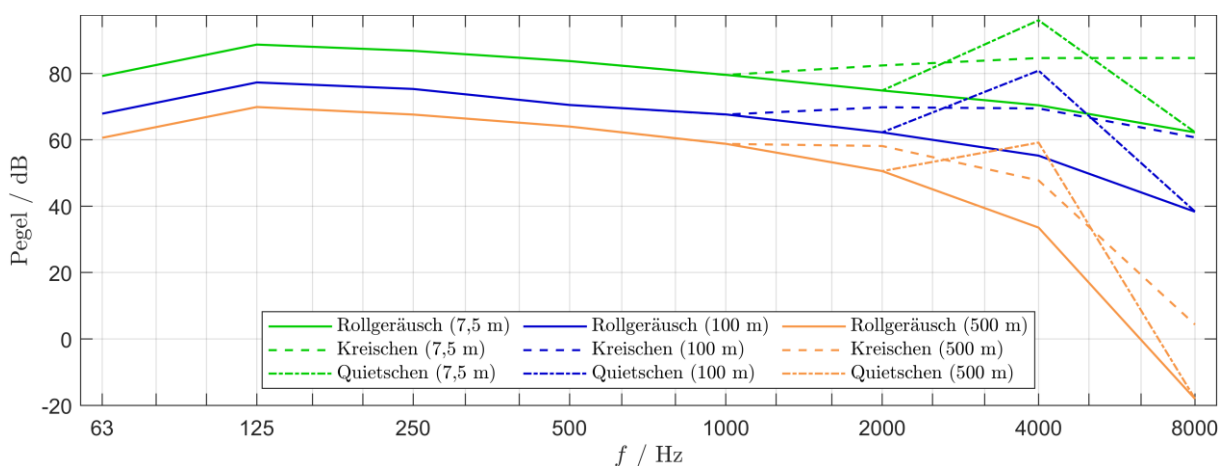


Abb. 6-8: Oktavbandspektren von unauffälligem Rollgeräusch sowie auffälligen Kurvengeräuschen gemessen in 7,5 m und prognostiziert für 100 m und 500 m von der Schienenachse

angenommen. Die Schallpegel in 7,5 m Abstand wurden exemplarisch aus den vorliegenden Messdaten entnommen.

In 100 m und noch stärker in 500 m sinken vor allem die Oktavbandspektren für 8000 Hz stark gegenüber dem unauffälligen Rollgeräusch im unteren Frequenzbereich ab. In Entfernungen von 500 m werden Geräuschanteile in diesem Frequenzband nicht mehr wahrnehmbar. Für das Kreischgeräusch verringert sich die ursprüngliche Differenz der Summe der Oktavbänder 2000 Hz, 4000 Hz und 8000 Hz zum Pegel für 1000 Hz von 9 dB bei 7,5 m zu 5 dB in 100 m und 0 dB in 500 m. Das Quietschgeräusch bleibt zwar weiterhin als tonaler Anteil mit dem deutlich erkennbaren 4000 Hz Bandpegel bestehen, doch verringert sich auch in diesem Fall die Differenz zum 1000 Hz Band. Ausgehend von 16 dB bei 7,5 m, reduziert sich die Differenz zu 13 dB in 100 m und 1 dB in 500 m.

Abgesehen von der atmosphärischen Dämpfung sind die einzelnen Frequenzbereiche auch unterschiedlich stark vom Einfluss des effektiven Schallgeschwindigkeitsgradienten und dem Effekt der Brechung in der Atmosphäre betroffen. Im Falle von abschirmenden Kanten entlang des Ausbreitungsweges ist der Effekt der Beugung zu beachten, welcher insbesondere bei kürzeren Wellenlängen zu stärkeren Abminderungen führt. [46]

Insgesamt werden Anpassungswerte für auffällige Geräuschanteile mit der Entfernung tendenziell sinken. Allerdings werden mit steigendem Abstand zu einem Bogen nicht nur die Geräuschanteile eines kurzen Segments, sondern das Geräusch aus zumindest mehreren, bis hin zu allen Abschnitten des Bogens zu erwarten sein. Angesichts der zeitlichen Abfolge werden die Auftrittswahrscheinlichkeit und damit die Einwirkzeit der einzelnen Bogengeräusche mit steigender Entfernung ansteigen. Somit sinken zwar die Anpassungen einzelner Zeitabschnitte, gegenläufig erhöht sich aber die Anzahl der auffälligen Zeitabschnitte. Das Geräuschspektrum selbst wird also zwar weniger belästigend, dies wird aber zumindest teilweise durch die steigende Auftrittswahrscheinlichkeit und Einwirkzeit kompensiert. Wichtig zu erwähnen ist, dass bei Entfernungen, welche deutlich größer als der Bogenradius sind (also auch deutlich größer als die betrachteten 500 m), der gesamte Bogen vermutlich gleichmäßig hörbar sein wird, da dann auch eine eventuelle Richtcharakteristik keine große Rolle mehr spielt.

In Anbetracht der vielfältigen Variation der Anpassungswerte aufgrund von Bogenparameter, Fahrzeugkollektiv und meteorologischen Schwankungen scheint die Berücksichtigung des sich ändernden Pegel-Zeitverlaufs und gleichzeitig der unterschiedlichen frequenzabhängigen Ausbreitungsdämpfung nicht sinnvoll möglich. Dagegen erschienen die für Entfernungen von 7,5 m bis 50 m Entfernung gewonnen Erkenntnisse als durchaus repräsentativ für alle

hinsichtlich der Belästigungswirkung relevanten Abstände zu einer Schienenstrecke, auch wenn natürlich gewisse Unsicherheiten vorhanden sind, welche mit steigender Entfernung zunehmen werden.

Der Vergleich der Emissionen von Bogeninnen- und -außenseite in Anhang A.1 deutet für den Bewertungsparameter von breitbandigen Kreischgeräuschen bei Fahrten ohne Auffälligkeiten, vermutlich als Folge der Überlagerung der Emissionen geringfügig näherer Quellen und/oder deren Richtcharakteristik, geringfügig höhere Werte an der Bogeninnenseite an (~ 0,5 bis 2 dB). Demgegenüber sind bei vorhandenen, breitbandigen Auffälligkeiten tendenziell höhere Werte auf der Bogenaußenseite zu beobachten (~ 1 bis 4 dB), was bei Spurkranzanlauf grundsätzlich plausibel ist. Jedoch zeigt die Messstelle Platt, dass dies nicht allgemeingültig ist und bogenabhängig auch auf der Bogeninnenseite ein signifikanter Anteil an breitbandigen Auffälligkeiten höhere Emissionen hervorrufen kann. Tonale Auffälligkeiten traten bei den Messungen nicht nur spärlich auf, sondern zwischen den Messstellen bestehen auch gegenläufige Tendenzen: in Peugen sind höhere Emissionen mehrheitlich an der Bogeninnenseite, bei Platt und Zellerndorf an der Bogenaußenseite zu beobachten (siehe Anhang A.2). Die Summenpegel von 800 Hz bis 6,3 kHz für unauffällige Kurzzeitspektren sind erneut an der Bogeninnenseite höher, wenngleich bei dieser breitbandigeren Größe die Werte etwas höher ausfallen (~ 2 bis 4 dB).

Hinsichtlich der Gesamtanpassungswerte kann zwar aufgrund der beobachteten, bogeninnenseitig etwas höheren, mittleren Emissionen von akustisch unauffälligen Bereichen der Zugsvorbeifahrten auf geringere Werte geschlossen werden. Gleichzeitig ist aber bei auffälligen Segmenten keine eindeutige Tendenz hinsichtlich jener Bogenseite – auch bei separater Betrachtung von tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten – ableitbar, welche eine differenzierte Betrachtung der Anpassungswerte letztlich rechtfertigen würde.

6.5 Empfehlungen

Die Schallindizes der europäischen Umgebungslärmrichtlinie sollen einen Jahresmittelwert für ein für die Lärmemission ausschlaggebendes und hinsichtlich der Witterung durchschnittliches Jahr darstellen. Damit beschreiben sie per se keine tatsächlichen Vorbeifahrtspegel einzelner Fahrzeuge an bestimmten Zeitpunkten mit ihren jeweiligen meteorologischen Bedingungen und Betriebszuständen (fahrzeugseitig als auch bzgl. der gesamten Oberbauparameter). Daher sind auch Bogengeräusche grundsätzlich für definierte, durchschnittliche Bedingungen zu berücksichtigen. Von wesentlicher Bedeutung ist eine unschlüssige Definition der Anpassungswerte in der vorliegenden europäischen Richtlinie. Es ist mit hoher Sicherheit

davon auszugehen, dass sich die angegebene Anpassungswerte aufgrund ihrer Größenordnung nur auf eine gesamte Anpassung von schalltechnisch und perzeptiven Werten beziehen können. Dies ist auch im Hinblick auf deren Höhe im Vergleich zu den Werten der Schall 03 [23] schlüssig, welche dezidiert die Lästigkeit miteinander bezieht. Daher werden im folgenden auch Gesamtanpassungswerte für entsprechende normative Festlegungen diskutiert. Eine Zusammenstellung der exemplarisch ermittelten Gesamtanpassungswerte $\Delta L_{\Sigma, eg}$ aller Züge bei VzG-Geschwindigkeit ist in Tab. 6-4 dargestellt. Aufgrund der in Abschnitt 6.3 dargestellten hohen Variabilität der gewonnenen Anpassungswerte ist allerdings keine finale Empfehlung der Handhabung von emissionsseitigen Anpassungswerte möglich. Möglich ist eine Diskussion hinsichtlich der derzeitigen empfohlenen Anpassungswerte nach Anhang II der europäischen Umgebungslärmrichtlinie, welche lediglich zwischen engen Bögen mit Radien $R \leq 300$ m und Bögen mit $300 \text{ m} < R \leq 500$ m unterscheidet. Insgesamt wäre eine detailliertere abgestufte Einteilung bzw. stetige Funktion zu bevorzugen, um unplausible Sprünge zu vermeiden. Die begrenzte Datenlage dieses Projektes erlaubt dazu jedoch keine verbesserten Vorschläge. Auch die grobe Festlegung der Anpassungswerte der derzeitigen Richtlinie in ausschließlich 8 dB oder 5 dB kann nur bedingt erweitert werden.

Für Güterzüge (Grauguss) in engen Bögen scheinen sich hohe Anpassungswerte von 8 dB bei erster Betrachtung zu bestätigen. Wesentlich ist hier jedoch auch eine Berücksichtigung der für die Prognoseberechnung eingesetzten Geschwindigkeit (im Netz der ÖBB üblicherweise gemäß des VzG) gegenüber der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit. Die besonders hohen Anpassungswerte beziehen sich bei der Messung BEGEL-01 mit der mit Abstand höchsten Anzahl an Güterzugvorbeifahrten auf Geschwindigkeiten < 50 km/h.

Bogen	ESB-01	ESB-02	BEGEL-01	Platt	Zellerdorf	BEGEL-03	Peugen	BEGEL-02
Radius / m	226	230	256	299	304	310	332	440
v_{VzG} / km/h	60	60	60	80	80	80	80	90
GZ, GZ-Kfz (GG)	-	-	-	-	-	1,9	-	1,1
GZ, GZ-Kfz (K/LL)	-	-	-	-	-	-	-	-
Rz-mx	-	-	-	-	-	5,1	-	1,7
RJ	-	-	-	-	-	5,5	-	-
80-33	-	-	5,4	2,9	2,1	-	-	0,6
S4020	-	6,6	4,7	-	-	-	-	-
S4024	-	6,2	2,7	-	-	-	-	-
DesiroML	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 6-4: Überblick der exemplarisch ermittelten Gesamtanpassungswerte $\Delta L_{\Sigma, eg}$ aller erfassten Züge (inkl. Regenphasen) aus den Projekten BEGEL, ESB und PAAB, getrennt nach Messbogen und Zugkategorie (alle Anpassungswerte in Dezibel)

Nachdem sowohl die Richtlinie, als auch deren österreichische Umsetzung RVE 04.01.02 eine Mindestgeschwindigkeit von 50 km/h für Vollbahnen festlegen, werden bei Betrachtung von Tab. 6-2 diese erhöhten Anpassungswerte bereits durch die überschätzte Fahrgeschwindigkeit kompensiert. Damit scheint eine Senkung der Anpassungswerte auf 5 dB, wie in der RVE 04.01.02 diskutiert durchaus plausibel.

Einen Ausreißer hinsichtlich dieser Situation zeigen jedoch die Ergebnisse der Messung ESB-02 mit Anpassungswerten > 10 dB, wobei hier keine Fahrten mit VzG dokumentiert sind. Aufgrund des derzeit so beschränkten Datenmaterials scheint dahingehend die Beibehaltung der 8 dB wiederum gerechtfertigt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Erstellung der RVE 04.01.02 im Hinblick auf die Berechnung von Lärmindizes L_{den} und L_{night} nach Richtlinie 2002/49/EG erfolgte. Diese Lärmindizes beinhalten per Definition keine Anpassungswerte für die Belästigungswirkung von verschiedenartigen Verkehrsgeräuschen. Die dortige Formulierung, die sich lediglich auf die akustische Anpassung der Emission bezieht, wird mit den Erkenntnissen dieses Forschungsvorhabens nicht in Frage gestellt. Vielmehr zeigt diese Problematik die uneinheitliche Handhabung von Anpassungswerten in der europäischen Richtlinie, welche den Eindruck einer akustischen Anpassungen erwecken, tatsächlich aber auch die perzeptive Wirkung beinhalten.

Für weitere Bögen mit $R > 300$ m ist die Mindestgeschwindigkeitsregel zumindest für die in Tab. 6-2 gezeigten Werte nicht relevant. Sehr wohl aber liegen auch hier die tendenziell höheren Werte für jene Geschwindigkeitsklassen vor, welche unter der VzG liegen. Auch diese würden durch die Prognoseberechnung mit der VzG teilweise kompensiert werden. Es verbleibt somit die Möglichkeit auch die Gesamtanpassungswerte (bestehend aus akustischen und perzeptiven Anteilen) für weitere Bögen auf 3 dB zu senken.

Eine Extrapolation der Empfehlungen für Güterzüge mit durchgehend „leisen“ K/LL-Bremsklotzsohlen erscheint vor dem Hintergrund der Ergebnisse und deren ausführlichen Diskussion in Kap. 6.3 nur begrenzt möglich zu sein. So könnte man derzeit lediglich annehmen, dass sich die Anpassungswerte für diesen Fahrzeugtyp nicht maßgeblich von den bisherigen Werten unterscheiden sollte, liegt doch die Radrauheit zwischen jener von graugussgebremsten Güterwagen und jener von Personenzugwagen bzw. Triebwagengarnituren mit Scheibenbremsen.

Für Personenzüge zeigt sich ein durchaus heterogenes Bild. Die RVE 04.01.02 empfiehlt dazu keine Abweichung von den in der europäischen Richtlinie definierten Werten. Jedoch werden selbst in engen Bögen Anpassungswerte > 5 dB meist nur für jene Geschwindigkeitsklassen erreicht, welche unterhalb der Mindestgeschwindigkeit von 50 km/h oder der anzusetzenden

VzG-Geschwindigkeit liegen. Weitaus schlüssiger erweist sich die Wahl eines reduzierten Anpassungswertes von 5 dB. Die Datenlage für Bögen > 300 m erscheint besonders unbefriedigend. So ergeben sich zwar deutliche Hinweise, dass ein Anpassungswert von 5 dB die tatsächlich gefundenen Ergebnisse insbesondere für moderne Triebwagengarnituren deutlich überschätzt, während hier die einzelnen Untersuchungen von Railjets und $R = 303$ m und von Reisezügen der allgemeinen Klasse die Wahl von 5 dB bestätigen.

Alle diese Betrachtungen zeigen, dass die RVE 04.01.02 bereits Anpassungswerte für belästigende Kurvengeräusche enthält und sich entgegen der ursprünglichen Idee der Berechnung von reinen Lärmindizes bereits erweitert hat. Daher ist vor einem weiteren, konkreten Belästigungszuschlag jedenfalls abzusehen.

Diesen Einordnungen von Anpassungswerten sind jedoch vor dem Hintergrund von 8 verschiedenen Messbögen zu verstehen, die letztlich eine Stichprobe aller im Netz vorhandenen Bögen darstellt und deren Repräsentativität nicht abschätzbar ist (bei der Auswahl der Messbögen wurde beispielsweise darauf geachtet, dass auffällige Bogengeräusche auftreten). Zudem bestehen die in Kap. 6.3 diskutierten offenen Fragen zur Beeinflussung des Grundrollgeräusches, wie auch der mittleren Emissionshöhe von Auffälligkeiten im oberen Frequenzbereich, die beide letztlich direkte Auswirkung auf Anpassungswerte haben und sich daher in Unsicherheiten manifestieren.

Insbesondere im Anwendungsfall, der über die strategische Umgebungslärmkartierung hinausgeht, können detailliertere Eingangsparameter zur Berechnung bzw. Messergebnisse für die tatsächlichen örtlichen Verhältnisse vorliegen, um konkrete Lärmindizes oder Beurteilungspegel zu bilden. Hinsichtlich der Anwendung der Anpassungswerte ist zu betonen, dass Anpassungswerte nur für Zeitbereiche erkannter auffälliger Geräusche vergeben werden dürfen. Unzulässig wäre eine Anpassung aufgrund des Frequenzspektrums von berechneten Vorbeifahrtspegeln, da diese nicht die Pegel-Zeitstruktur beinhalten, welche bei der Detektion von auffälligen Geräuschen notwendig ist. Das Kriterium von „Summenpegel des oberen Frequenzbereichs zum 1 kHz Oktavband des Rollgeräusches“ bezieht sich konkret auf die auffälligen Kreisch- und Quietschgeräuschspektren und nicht auf unauffällige Spektren, die für eine normale Vorbeifahrt auch einen höheren Anteil dieses Kriteriums aufweisen können. Hinsichtlich der Bildung von Beurteilungspegeln aufgrund von gemessenen L_{Aeq} Werten an Schienenstrecken, darf die Pegel-Zeitstruktur der einzelnen Vorbeifahrten mitberücksichtigt werden. Allerdings ist zu beachten, dass gemessenen Pegel bereits die Erhöhung durch die jeweiligen Kurvengeräusche beinhalten und daher nicht die in PAAB betrachteten Gesamtanpassungswerte, sondern nur mehr die wirkungsäquivalenten perzeptiven Anteile berücksichtigt werden dürfen.

7 ZUSAMMENFASSUNG

In den beiden Projekten BEGEL und ESB wurden neben Einflussfaktoren auf die Auftrittshäufigkeiten tonal oder breitbandig auffälliger Bogengeräusche bereits resultierende Erhöhungen des Vorbeifahrtspegels für messtechnisch erfasste Kombinationen aus Bogenradius, Zugkategorie und mittlerer Vorbeifahrtsgeschwindigkeit abgeschätzt und pauschalen Zuschlägen von Berechnungsmodellen gegenübergestellt. Diese schalltechnischen Anpassungswerte bilden aber nicht Steigerungen des Lästigkeitsempfindens ab, welche üblicherweise durch diese hochfrequenten, auffälligen Geräuschanteile hervorgerufen werden. Vorliegende Arbeit hatte zum Ziel, eben diese Lästigkeitssteigerung und deren Abhängigkeiten von den akustischen Eigenschaften wie Frequenzgehalt, die Dauer oder zeitliche Variationen bei verschiedenen Rollgeräuschen im Detail zu untersuchen und daraus perzeptive Anpassungswerte abzuschätzen, um letztlich zusammen mit schalltechnischen Anpassungswerten für vorliegende Messdaten exemplarische Gesamtanpassungswerte bilden zu können. Kern der Untersuchungen bilden Wahrnehmungstests mit Versuchspersonen, denen entsprechend präparierte Stimuli präsentiert wurden und die die Lästigkeit dieser Stimuli zu beurteilen hatten. Zur Erstellung der Stimuli konnten die gleisnahen Emissionsmessungen aus den vorangegangenen Projekten aufgrund ihrer gegenüber Immissionsmessungen in größerer Entfernung deutlich geänderten zeitlichen Struktur der auffälligen Komponenten nicht genutzt werden. Aus diesem Grund wurden im Rahmen von PAAB akustische Messungen in Bögen durchgeführt, die zusätzlich zwei Immissionsmesspunkte umfassten. Im Folgenden werden die einzelnen Eckpunkte der Arbeiten und die jeweiligen Erkenntnisse zusammengefasst.

Akustische Messungen

Wesentliche Voraussetzung für die Messbögen waren geringe Radien, freie Schallausbreitung und hinreichend ebenes Gelände über eine Länge von mindestens 50 m auf zumindest einer Bogenseite. Letztlich konnten drei Messbögen identifiziert werden, welche diese Kriterien erfüllten (zweigleisige Südbahn in Peugen, sowie eingleisige Nordwestbahn nahe Platt und nahe Zellerndorf). Allerdings mussten dabei Kompromisse im Verkehrsaufkommen eingegangen werden, da an der Nordwestbahn nur ein geringeres Verkehrsaufkommen ohne Fernverkehrszüge bestand.

In den drei Messbögen wurde jeweils an drei Tagen im Zeitraum von Ende Aug. bis Ende Sept. 2018 in 5 Messpunkten (in Entfernungen von 2,5 m, 7,5 m, 25 m und 50 m zur Gleisachse, sowie in einem zum 2,5 m oder zum 7,5 m Messpunkt symmetrisch angeordneten Messpunkt

auf der gegenüberliegenden Bogenseite) die Schallsituationen bei Zugsvorbeifahrten erfasst. Ergänzt wurden diese konventionellen Mikrofonmessungen durch Messungen mit einem binauralen Kunstkopfmesssystem in 25 m (an zwei Tagen je Bogen) und in 50 m (an einem Tag je Bogen). In Summe standen Schallmessungen von 216 Zugsvorbeifahrten für die weiteren Auswertungen zur Verfügung.

Um die erfassten Schallemissionen besser einordnen zu können, wurden in allen drei Messbögen die akustische Schienenrauheiten, sowie die Gleisabklingraten zeitnah zu den akustischen Messungen erhoben. Dabei zeigte sich, dass die Schienenrauheiten zwar in allen drei Messbögen im langwelligen Bereich das Grenzspektrum der ÖNORM EN ISO 3095 überschreiten, in Zellerndorf diese Überschreitungen jedoch am deutlichsten ausfallen und bis in den mittleren Wellenlängenbereich reichen. Dies deckt sich mit den in Zellerndorf beobachteten, höchsten Grundrollgeräuschen der Züge.

Klassifizierung von Auffälligkeiten

Basis für die Auswahl und Erstellung von Stimuli für den Wahrnehmungstest war eine Klassifizierung der Geräusche unauffälliger Vorbeifahrten, sowie der auffälligen Ereignisse. Trotz des Vorliegens umfangreicher Messungen aus BEGEL und ESB gestaltete sich dies schwierig, da zum Teil deutlich divergierende Rahmenbedingungen bestanden (Bogenradien, Vorbeifahrtsgeschwindigkeiten, Zugkategorien, akustische Gleiseigenschaften, etc.).

Zur Klassifizierung von akustischen Auffälligkeiten wurde in den Zeitverläufen zwischen Einzelereignissen differenziert. Für tonale Auffälligkeiten wurden dabei ganze Ereignisse betrachtet und aus den Verteilungen der Quietschfrequenzen der Bereich der zu testenden Frequenzen und Pegel abgeleitet. Für breitbandige Auffälligkeiten wurden hingegen vor allem Zeitabschnitte fixer Länge betrachtet und aus Segmenten mit Auffälligkeiten verschiedene Parameter wie zum Beispiel die Anzahl und Dauer der Ereignisse aber auch die Größe des Bewertungsparameters bestimmt.

Durch den Vergleich der Emissionsdaten aus BEGEL und PAAB konnten dann geeignete Geräusche aus den Aufnahmen in PAAB gewonnen werden, welche sich für die anschließende Modifikationen gut eigneten. Die Daten aus ESB konnten wegen unterschiedlicher Zugkategorien und Geschwindigkeiten nicht berücksichtigt werden.

Wahrnehmungstests

Nach sorgfältiger Auswertung der Messdaten stellte sich heraus, dass die Verwendung der Kunstkopfdaten für den Hörversuch zu einer starken Einschränkung der zu untersuchenden Bedingungen führen würde, da die Messtage sehr unterschiedliches Material lieferten und eine

Untersuchung des Distanzeffektes sich schwierig gestalten würde. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurde daher entschieden, ausschließlich Mikrofondaten zu verwenden.

Um geeignetes Stimulusmaterial für die Wahrnehmungstest zu erzeugen, wurde der Ansatz gewählt, bestehende Geräusche mittels moderner Signalverarbeitungsmethoden zu modifizieren. Dafür wurden sogenannte Frame-Multiplier verwendet. Diese stellen so etwas wie zeitabhängige Filter dar, welche in der Zeit-Frequenz-Ebene definiert sind. Diese Methode wurde einerseits verwendet, um z.B. tonale Geräusche zu isolieren und um später die Frequenz zu modifizieren, andererseits wurde sie verwendet um Rollgeräusche mit auffälligen Bogengeräuschen zu kombinieren. Der Ansatz vollständig synthetisiertes Quietschen zu erzeugen wurde nicht weiterverfolgt, da die erzielten Geräusche nicht realistisch genug klangen. Die Stimulierung wurde dahingehend ausgerichtet, dass die 4 s langen Stimuli einen möglichst großen Umfang an verschiedenartigen Bogengeräuschen abdecken, gleichzeitig die Dauer des Experiments aber in einem Rahmen bleibt, der zuverlässige Ergebnisse erlaubt. Die Variationen betreffen beispielsweise das Rollgeräusch und dessen Amplitude, die Frequenz und Intensität tonaler Auffälligkeiten oder die Intensität und den spektralen Inhalt breitbandiger Auffälligkeiten. Weiters wurden einige spezielle Geräusche inkludiert, wie kombinierte Auffälligkeiten oder breitbandige Auffälligkeiten mit verschiedenen, zeitlichen Strukturen.

Für die Wahrnehmungstests standen in Summe 30 normalhörende Versuchspersonen zur Verfügung (16 weiblich, Alter $27,5 \pm 3,7$ Jahre). Die Lästigkeitsbeurteilung erfolgte mit freier Größenschätzung und jedes Geräusch wurde insgesamt dreimal beurteilt. Das Experiment dauerte je Versuchsperson rund 2 bis 2,5 h, wodurch sich letztlich 20790 Testurteile nach Ausschluss von eindeutig nachvollziehbaren Ausreißern bzw. Fehleingaben ergaben.

Modellierung

Die Auswertung des Wahrnehmungstest erfolgte auf Basis der mittleren Urteile über die Studienpopulation. Aus den unauffälligen Rollgeräuschen wurde ein Modell abgeleitet, welches die Bestimmung der perzeptiven und damit auch der Gesamtanpassungswerte für auffällige 4 s Segmente von Bogenfahrten erlaubte. Sowohl für Quietschen, als auch für Kreischen ergab sich, dass auffällige Vorbeifahrten deutlich anders beurteilt wurden, als unauffällige Fahrten. Für Kreischereignisse konnte gezeigt werden, dass der zur Detektion verwendete Parameter die perzeptiven Anpassungswerte gut erklären konnte, wobei sich die Streuung des Modellfehlers im Bereich von 1 dB bewegte. Beim Quietschen ergab sich für die perzeptiven Anpassungswerte kein ähnliches gutes Modell. Es zeigte sich, dass bei Quietschereignissen mit sehr starken Bandpegelerhöhungen der schalltechnische

Anpassungswert stark ansteigt, der perzeptive Anpassungswert aber geringer ist als bei weniger intensiven Quietschereignissen. Daraus lässt sich ableiten, dass ein einfaches Gesamtmodell der perzeptiven Anpassungswerte für alle auffälligen Geräuschkomponenten basierend auf rein energetischen spektralen Größen nicht definiert werden kann.

Wird hingegen der Gesamtanpassungswert, also die Summe aus schalltechnischem und perzeptivem Anpassungswert verwendet, lässt sich ein Gesamtmodell definieren, das auf dem Unterschied zwischen hochfrequenten und mittelfrequenten Frequenzbändern basiert, die durch den energetischen Summenpegel der Terzen von 1,6 kHz bis 12,5 kHz und den 1 kHz Oktavbandpegel beschrieben werden. Über alle im Test verwendeten auffälligen Bedingungen ergibt sich ein klarer linearer Zusammenhang und die Standardabweichung des Modellfehlers bleibt deutlich unter 2 dB. Daher muss in diesem Modell nicht zwischen den verschiedenen Arten der Auffälligkeiten unterschieden werden. Eine solche Unterscheidung zwischen tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten brächte zwar noch eine gewisse Verbesserung des Modellfehlers mit sich, allerdings würde dies in der Praxis mit einer deutlichen Erhöhung der Komplexität der Anwendung einhergehen. Beispielsweise müssten vor der Bestimmung von Anpassungswerten in Bögen die Häufigkeiten der beiden Auffälligkeitsarten getrennt geschätzt werden, woraus erst recht wieder Unsicherheiten unbekanntes Ausmaßes für die Anpassungswerte erwachsen. Zudem besteht auch eine gewisse Unschärfe in der Detektion bzw. Definition auffälliger Ereignisse. Aus diesen Gründen überwiegt aus Sicht der Autoren der Vorteil eines auffälligkeitstypunabhängigen Ansatzes dem Nutzen einer Unterscheidung im Modell deutlich, weswegen im Weiteren das Gesamtmodell verwendet wurde.

Anpassungswerte

Eine Einschätzung von mittleren Anpassungswerten für die Prognoserechnung kann grundsätzlich durch Anwendung des entwickelten Modells auf ein entsprechend umfangreiches, repräsentatives Set an Emissionsmessdaten erfolgen. Hierfür ist zunächst die Bildung von zugbezogenen Anpassungswerten erforderlich. Da allerdings für Vorbeifahrten mit akustischen Auffälligkeiten die zeitlichen Verläufe der Emissionen ohne akustische Auffälligkeiten unbekannt sind, können zugbezogene Gesamtanpassungswerte nicht exakt berechnet werden. Als Näherung wird die energetische Mittelung der Gesamtanpassungswerte, die aus allen Kurzzeitspektren der Vorbeifahrt gebildet werden, vorgeschlagen. Allerdings kann es bei Zügen mit stark variierenden Schallemissionen im Zugverband, abhängig von den vorherrschenden Emissionen beim Auftreten der Auffälligkeiten zu Über- oder Unterschätzungen der Gesamtanpassungswerte kommen. Im Extremfall, wenn die Auffälligkeiten ausschließlich in leisen oder in lauten Segmenten der

Vorbeifahrt auftreten, können diese Abweichungen bis zu 5 dB (bei 10 dB Emissionsdifferenz im Zugverband) betragen. Jedoch wird davon ausgegangen, dass derartige Extremfälle selten zu beobachten sind und dass darüber hinaus mittlere Anpassungswerte auch Züge beinhalten, die geringere Emissionsschwankungen aufweisen, weshalb die energetische Mittelung der Anpassungswerte von Kurzzeitspektren als ausreichend genau erachtet wird.

Im Anschluss wurden für alle vorliegenden Emissionsmessdaten aus den Projekten BEGEL, ESB und PAAB zugsbezogene Gesamtanpassungswerte exemplarisch abgeschätzt und analysiert. Dabei zeigte sich eine klare Geschwindigkeitsabhängigkeit der Anpassungswerte, die aus einem mit der Geschwindigkeit steigenden Grundrollgeräusch und einer weitgehenden Unabhängigkeit der Summenpegel von Auffälligkeiten im oberen Frequenzbereich resultiert und bei betrachteten Daten zu einem Abfall von rund 1-2 dB je 10 km/h Geschwindigkeitsanstieg führt. Diese Tendenz erscheint plausibel, da mit höherem Grundrollgeräusch die in etwa gleichbleibenden akustischen Auffälligkeiten in den Hintergrund treten und daher geringere Anpassungswerte erfordern. Als Konsequenz dieser Abhängigkeit sind mittlere Anpassungswerte nur für Kollektive von Vorbeifahrten mit vergleichbaren Geschwindigkeiten sinnvoll zu bestimmen. Aber auch alle anderen Rahmenbedingungen, die auf das Rollgeräusch signifikanten Einfluss haben (zB Schienen- und Radrauheiten, sowie Gleisabklingraten im entsprechenden Wellenlängen- bzw. Frequenzbereich), beeinflussen somit die Gesamtanpassungswerte.

Vor diesem Hintergrund wurden mittlere Gesamtanpassungswerte getrennt nach Geschwindigkeitsklassen (mit einer Breite von 10 km/h), Zugkategorien und Messbögen berechnet und die Auftrittshäufigkeiten der Auffälligkeiten innerhalb der betrachteten Gruppe von Vorbeifahrten berücksichtigt. Da aus dem Entstehungsprozess der Umgebungslärmrichtlinie Indizien hervorgehen, dass die im Europäischen Berechnungsmodell vorgesehenen, pauschalen Zuschläge schalltechnische und perzeptive Auswirkungen auffälliger Bogengeräusche adressieren und damit keine gesonderten perzeptiven Anpassungen anzuwenden sind, können die berechneten Gesamtanpassungswerte direkt mit den bestehenden Anpassungswerten der nationalen Implementierung des Berechnungsmodells (RVE 04.01.02) verglichen werden. Allerdings werden die Werte der RVE (nur) zum Teil bestätigt und die Ergebnisse divergieren unerwartet stark. Letzteres ist u. a. auch auf signifikante Differenzen des Rollgeräusches im mittleren Frequenzbereich zurückzuführen, die jedoch nicht vollständig durch oberbautechnische Einflussgrößen erklärbar sind.

Güterzüge weisen beispielsweise im engen Bogen bei BEGEL (aufgrund des Messzeitraums 2013/14 wird von Graugussbremsen ausgegangen) einen Gesamtanpassungswert von 5,8 dB

bei 40 km/h auf, weshalb für die VzG-Geschwindigkeit von 60 km/h die in der RVE genannte Anpassung von 5 dB gerechtfertigt erscheint. Demgegenüber liegen bei ESB die Gesamtanpassungen im unkonditionierten Bogen bei rund 11,1 dB für 50 km/h (auch 2016 wird der Anteil an leisen Güterwagen auf der S45 weiterhin vernachlässigbar gering eingeschätzt), wodurch höhere Anpassungswerte für das Prognosemodell bei der VzG-Geschwindigkeit von 60 km/h zu wählen wären. Für weitere Bögen kommen die Anpassungswerte bei VzG-Geschwindigkeit hingegen im Bereich von 1 bis 3 dB zu liegen, was für eine Senkung der RVE-Werte von 5 dB auf 3 dB sprechen würde.

Ebenfalls ein heterogenes Bild zeigt sich bei Personenzügen: so werden in engen Bögen Anpassungswerte > 5 dB meist nur für Geschwindigkeitsklassen unterhalb der VzG-Geschwindigkeit von 60 km/h erreicht, sodass eine Senkung der Werte in der Prognose auf 5 dB argumentierbar ist. Bei weiteren Bögen deuten die Ergebnisse darauf hin, dass der RVE-Anpassungswert von 5 dB insbesondere für moderne Triebwagengarnituren die realen Verhältnisse deutlich überschätzt, während die einzelnen Untersuchungen von Railjets und Reisezüge der allgemeinen Klasse die Wahl von 5 dB bestätigen.

Im Hinblick auf die Anwendung in der Prognoserechnung ist anzumerken, dass die Anpassungswerte emissionsseitig auf die Quellstärken des Rollgeräusches aufgeschlagen werden. Durch die frequenzabhängige Ausbreitungsrechnung erfahren hochfrequente Geräuschanteile stärkere Dämpfung als Anteile im mittleren Frequenzbereich, wodurch zu vermuten wäre, dass Gesamtanpassungswerte entsprechend des Modells ebenfalls abnehmen. Jedoch ist zu bedenken, dass mit zunehmender Entfernung in der Regel auch Auffälligkeiten länger wahrnehmbar sind, was zu einem gegenläufigen Effekt in den zugbezogenen Anpassungswerten führt. Aufgrund der zahlreichen Einflüsse, aber auch als Folge fehlender Daten über die Auftrittshäufigkeiten von Auffälligkeiten entlang von Bögen, erscheint eine Berücksichtigung einer Entfernungsabhängigkeit von Anpassungswerten nicht sinnvoll.

Ähnliches gilt für eine Unterscheidung zwischen Bogeninnen- und -außenseite, denn bei Vergleich der Emissionen beider Bogenseiten sind zum Teil unterschiedliche Tendenzen festzustellen. Zwar tendieren akustisch unauffällige Fahrten im mittleren und oberen Frequenzbereich durchwegs zu höheren Emissionen auf der Bogeninnenseite. Bei breitbandigen Auffälligkeiten sind auf der Bogenaußenseite mehrheitlich höhere mittlere Emissionen im oberen Frequenzbereich zu beobachten, die auf einen häufigeren Spurkranzanlauf an der Bogenaußenseite hindeuten. Allerdings zeigt sich am Beispiel Platt, dass dies nicht allgemeingültig ist, denn zumindest in einer Fahrtrichtung sind die

breitbandigen Auffälligkeiten auf beiden Seiten nahezu ausgeglichen. Und auch die wenigen, tonalen Auffälligkeiten zeigen ein heterogenes Bild, weshalb letztlich eine bogenseitenabhängige Differenzierung der Gesamtanpassungswerte nicht gerechtfertigt erscheint.

Des Weiteren ist einschränkend festzuhalten, dass durch die vorliegenden Messdaten aus 8 verschiedenen Bögen nur ein Teilbereich der möglichen Kombinationen aus Zugskategorie, Bogenkategorie und Geschwindigkeitsklasse abgedeckt wird. So fehlen beispielsweise leise Güterwagen in den Messdaten und folglich in den Abschätzungen zur Gänze, gleichzeitig werden sie aber zukünftig den überwiegenden Anteil im Güterverkehr stellen. Darüber hinaus sind die 8 Messbögen als Stichprobe aller im Netz vorhandenen Bögen zu verstehen, jedoch ist deren Repräsentativität nicht abschätzbar, insbesondere da bei der Auswahl der Bögen in den einzelnen Projekten auf das häufige Auftreten akustischer Auffälligkeiten oder eine freie Schallausbreitung geachtet wurde.

Die vorliegenden Ergebnisse bieten daher die Möglichkeit einer Einordnung der bestehenden Anpassungswerte der RVE, eine finale Beurteilung erlauben sie jedoch nicht. Durch eine Ausdehnung der Betrachtungen auf weitere Messquerschnitte könnte hier ein klareres Bild gezeichnet werden. Darüber hinaus kann ein größeres Ensemble an Messdaten entscheidend dazu beitragen, weitere Verbesserungen bei der Festlegung von Anpassungswerten vorzunehmen, wie beispielsweise eine Glättung des unplausiblen Sprungs der Anpassungswerte zwischen den beiden Bogenkategorien (Radien ≤ 300 m und Radien > 300 m und ≤ 500 m) durch eine stetige Funktion in Abhängigkeit von Oberbau-, Bogen- und Fahrzeugparameter.

8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Thomas Maly, Norbert Ostermann, Florian Biebl, Heinz Hoislbauer, Manuel Gunacker und Vojislav Djurdjev: „Bewertung des akustischen Einflusses von Gleisbögen für die Erstellung von Lärmkarten (BEGEL)“, Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF) 2012, Ergebnisbericht, Dez. 2015, online: <https://www2.ffg.at/verkehr/file.php?id=870> (zugegriffen: 1. Okt. 2021).
- [2] Thomas Maly, Michael Ostermann, Norbert Ostermann, Florian Biebl und Manuel Gunacker: „Einflüsse auf Schallemissionen in Bögen (ESB)“, Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF) 2014, Ergebnisbericht, Juni 2019, online: https://projekte.ffg.at/anhang/5dea52d83c724_ESB_Ergebnisbericht_Hauptteil.pdf (zugegriffen: 1. Okt. 2021).
- [3] Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 45681:2005-03, Akustik - Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen“, März 2005.
- [4] André Fiebig und Klaus Genuit: „Der Einsatz der Psychoakustik zur Bewertung von Umweltgeräuschen“, in *Tagungsband, DAGA 2015 - 41. Jahrestagung für Akustik (Fortschritte der Akustik)*, März 2015, S. 199–202, ISBN: 1234567890.
- [5] Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union: *Richtlinie 2002/49/EG über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm*, 25. Juni 2002, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L 189 vom 18. Aug. 2002.
- [6] Europäische Kommission: *Richtlinie (EU) 2015/996 zur Festlegung gemeinsamer Lärmbewertungsmethoden gemäß der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates*, 19. Mai 2015, Amtsblatt der Europäischen Union L 168 vom 1. Juli 2015.
- [7] Ivan Zenzerovic, Wolfgang Kropp und Astrid Pieringer: „Influence of spin creepage and contact angle on curve squeal: A numerical approach“, *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 419, S. 268–280, 2018, ISSN: 0022-460X.
- [8] Bo Ding, Giacomo Squicciarini, David Thompson und Roberto Corradi: „An assessment of mode-coupling and falling-friction mechanisms in railway curve squeal through a simplified approach“, *Journal of Sound and Vibration*, Bd. 423, S. 126–140, 2018, ISSN: 0022-460X, doi: 10.1016/j.jsv.2018.02.048.
- [9] Van-Vuong Lai, Marc Anciant, Olivier Chiello, Jean-François Brunel und Philippe Dufrénoy: „A nonlinear FE model for wheel/rail curve squeal in the time-domain including acoustic predictions“, *Applied Acoustics*, Bd. 179, S. 11, 2021, ISSN: 0003-682X.
- [10] Helmut Venghaus: „Der Squeal Indicator als Kenngröße zur Systematisierung von Kurvengeräuschen im Eisenbahnverkehr“, in *Tagungsband, DAGA 2021 - 47. Jahrestagung für Akustik (Fortschritte der Akustik)*, Berlin, 2021, S. 352–355, ISBN: 978-3-939296-18-8.
- [11] Michael Ostermann: „Noise prediction of trains in curves“, Dissertation, TU Wien, Institut für Verkehrswissenschaften, Wien, 2021, doi: 10.34726/hss.2021.91123.
- [12] Austrian Standards International: „ÖNORM EN 14363:2016+A1:2018, Bahnanwendungen – Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen – Fahrverhalten und stationäre Versuche“, 15. Nov. 2019.

- [13] Dave Anderson, N. Wheatley, Bob Fogarty, Jiandong Jiang, Alex Howie und Wayne Potter: „Mitigation of Curve Squeal Noise in Queensland, New South Wales and South Australia“, in *Conference on Railway Engineering*, Perth, Australia, 2008, S. 625–636.
- [14] Barbara Griefahn, Truls Gjestlnd und Anna Preis: „Silence - Sub-projekt A „Annoyance““, Deliverable A.D7.
- [15] S.N. Hoogzaad, W. Schwanen und Nathan Isert: „Die Lärmproblematik in Abstell- und Rangieranlagen - Ein Vergleich der gesetzlichen Regelungen“, 2016.
- [16] Eva Panulinova, Slávka Harabinová und Lubica Argalášová: „Tram squealing noise and its impact on human health“, *Noise Health*, Bd. 18, Nr. 85, S. 329–337, 2016, ISSN: 1463-1741, doi: 10.4103/1463-1741.195799.
- [17] Arnaud Trollé, Catherine Marquis-Favre und Achim Klein: „Acoustical indicator of noise annoyance due to tramway in in-curve operating configurations“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 133, Nr. 5, S. 3275–3275, 2013, ISSN: 0001-4966.
- [18] Hae Young Ji, Dong Hoe Koo und Jae Chul Kim: „Experimental verification of differences in subjective annoyance responses using a jury test to compare the noise emissions of straight and curved sections of an urban railway“, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, Bd. 230, Nr. 4, S. 1363–1374, 2016, doi: 10.1177/0954409715593972.
- [19] Tomasz Kaczmarek: „Squeal tram noise annoyance“, in *EURONOISE 2006 - The 6th European Conference on Noise Control: Advanced Solutions for Noise Control*, Jän 2006, S. 6.
- [20] Giora Rosenhouse: „The subjective analysis of wheel-rail squealing noise by modification of the British Standard BS 4142:2014“, in *INTER-NOISE 2018 - 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, S. 3965–3974.
- [21] Austrian Standards Institute / Österreichisches Normungsinstitut: „ONR 305011, Berechnung der Schallimmission durch Schienenverkehr - Zugverkehr, Verschub- und Umschlagbetrieb“, 15. Nov. 2009.
- [22] Drangu Sehu, Jean Marc Wunderli, Kurt Heutschi, Thomas Thron, Markus Hecht, Andre Rohrbeck und Thomas Ledermann: „sonRAIL - Projektdokumentation“, Okt. 2010, online: <https://www.empa.ch/documents/56129/160826/sonRail-projektdokumentation.pdf/f036553f-80c8-4b87-bc74-ead535ea29ab> (zugegriffen: 21. Dez. 2021).
- [23] „Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BlmSchV), Anlage 2 (zu § 4) - Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03)“, ULR: https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_16/anlage_2.html (zugegriffen 21. Dez. 2021).
- [24] Joint Research Centre, European Commission: „Draft JRC Reference Report on Common NOise ASSESSMENT MethOdS in EU (CNOSSOS-EU)“, inst, Version 2d, Mai 2010, online: https://circabc.europa.eu/sd/d/f33acf7b-1125-4119-ae0-db981b10d974/CNOSSOS_draftMay2010.pdf (zugegriffen: 21. Dez. 2021).
- [25] Austrian Standards International: „ÖNORM EN 15610:2019, Bahnanwendungen - Akustik - Messung der Schienen- und Radrauhigkeit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen“, 15. Nov. 2019, ident mit EN 15610:2019-05.
- [26] Austrian Standards Institute / Österreichisches Normungsinstitut: „ÖNORM EN ISO 3095, Akustik - Bahnanwendungen - Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen“, 15. Dez. 2014, ident mit EN ISO 3095:2013-08.

- [27] International Organization for Standardization: „ISO 9613-1, Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere“, 1993.
- [28] C. I. Chessell: „Propagation of noise along a finite impedance boundary“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 64, Nr. 4, S. 825–834, 1977, doi: 10.1121/1.381603.
- [29] Chunyang Xu und Jian Kang: „Soundscape evaluation: Binaural or monaural?“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 145, Nr. 5, S. 3208–3217, 2019, doi: 10.1121/1.5102164.
- [30] Norbert Ostermann, Thomas Maly, Holger Waubke, Christian Kaseß, Martin Jaksch und Florian Biebl: „Psychoakustische Analyse von schienenverkehrsinduzierten Schallmissionen (PASS)“, Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF) 2012, Ergebnisbericht, Nov. 2014, online: <https://www2.ffg.at/verkehr/file.php?id=638> (zugegriffen: 1. Okt. 2021).
- [31] Christian Kaseß und Holger Waubke: „Moving sources and the 2.5d helmholtz boundary element method“, in *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics (ICA)*, Aachen, Sep. 2019, S. 7475–7482, ISBN: 978-3-939296-15-7.
- [32] David Thompson: *Railway Noise and Vibration - Mechanisms, Modelling and Means of Control*, Elsevier, 2009, ISBN: 978-0-08-045147-3.
- [33] Christian Kaseß, Thomas Maly, Peter Balazs und Wolfgang Kreuzer: „Time-variant signal manipulation using frame multipliers“.
- [34] Zdeněk Průša, Peter L. Søndergaard, Nicki Holighaus, Christoph Wiesmeyr und Peter Balazs: „The Large Time-Frequency Analysis Toolbox 2.0“, in *Sound, Music, and Motion*, Mitsuko Aramaki, Olivier Derrien, Richard Kronland-Martinet und Sølvi Ystad (Hrsg.), Springer International Publishing, 2014, S. 419–442, doi: 10.1007/978-3-319-12976-1_25., ISBN: 978-3-319-12975-4.
- [35] Zdeněk Průša und Nicki Holighaus: „Phase Vocoder Done Right“, in *25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2017) Proceedings*, Kos, 2017, S. 1006–1010, ISBN: 978-0-9928626-7-1, doi: 10.23919/EUSIPCO40094.2017.
- [36] „SOFA - Spatially Oriented Format for Acoustics (SourceForge.net)“, ULR: <https://sourceforge.net/projects/sofacoustics/> (zugegriffen 16. Dez. 2021).
- [37] Austrian Standards International: *ÖNORM EN 1793-5 - Lärmschutzvorrichtungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 5: Produktspezifische Merkmale - In-situ-Werte der Schallreflexion in gerichteten Schallfeldern*, 15. Feb. 2019.
- [38] Bolajoko O. Olusanya, Adrian C. Davis und Howard J. Hoffmann: „Hearing loss grades and the International classification of functioning, disability and health“, *Bull World Health Organ*, Bd. 97, S. 725–728, Okt. 2019, doi: 10.2471/BLT.19.230367.
- [39] H.L. Lane, A.C. Catania und S.S. Stevens: „Voice level: Autophonic scale, perceived loudness, and effects of sidetone“, *Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 33, Nr. 2, S. 160–167, 1961, doi: 10.1121/1.1908608.
- [40] Mats E. Nilsson, Mikael Andéhn und Paulina Leśna: „Evaluating roadside noise barriers using an annoyance-reduction criterion“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 124, Nr. 6, S. 3561–3567, 2008, doi: 10.1121/1.2997433.

- [41] Sanford Fidell: „Noise-Induced Annoyance“, in *Handbook of Noise and Vibration Control*, M.J. Crocker (Hrsg.), Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2007, S. 316–319, ISBN: 978-0-471-39599-7.
- [42] Christian H. Kasess, Anton Noll, Piotr Majdak und Holger Waubke: „Effect of train type on annoyance and acoustic features of the rolling noise“, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 134, Nr. 2, S. 1071–1081, 2013, doi: 10.1121/1.4812771.
- [43] Brandon M. Greenwell und Christine M. Schubert Kabban: „investr: An R Package for Inverse Estimation“, *The R Journal*, Bd. 6, Nr. 1, S. 90–100, 2014, doi: 10.32614/RJ-2014-009.
- [44] World Health Organization (WHO): *Environmental Noise Guidelines for the European Region*, 2018, ISBN: 978 92 890 5356 3.
- [45] Österreichischer Arbeitsring für Lärmbekämpfung: „ÖAL-Richtlinie Nr. 28 - Berechnung der Schallausbreitung im Freien und Zuweisung von Lärmpegeln und Bewohnern zu Gebäuden“, 1. Okt. 2021.
- [46] Christian Kirisits, Erich Mursch-Radlgruber, Dieter Hohenwarter und Bernhard Streit: „ACUMET - Analyse und Berücksichtigung des Einflusses der Meteorologie auf die Schallausbreitung von Bahn- und Straßenverkehrslärm“, *Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF)* 2013, Ergebnisbericht, Sep. 2016, online: <https://www2.ffg.at/verkehr/file.php?id=930> (zugegriffen: 28. Jan. 2022).

Anhang A Vergleich der Emissionen auf Bogeninnen- und -außenseite

A.1 Breitbandige Auffälligkeiten

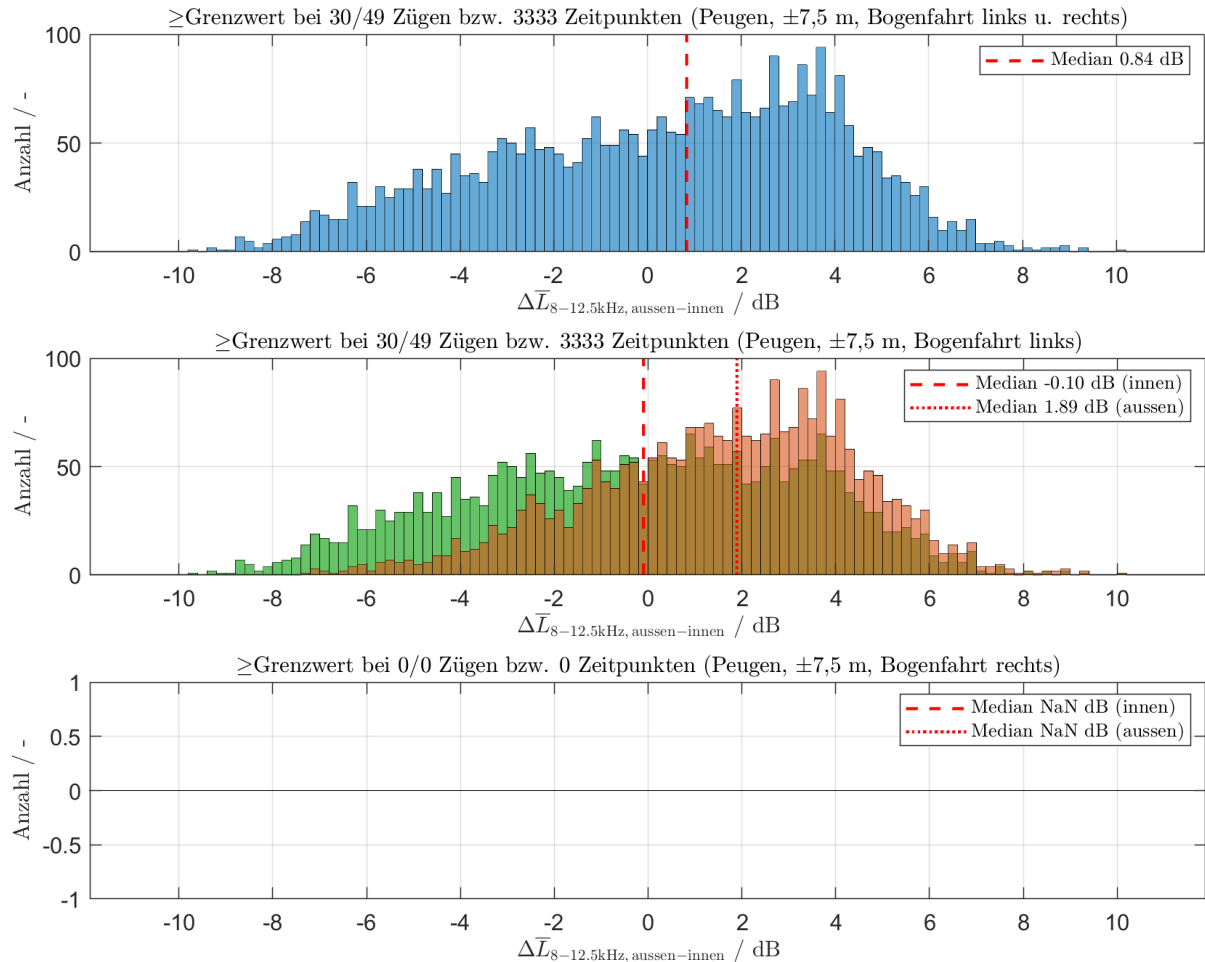


Abb. A-1: Histogramm der Bewertungsparameterdifferenzen $\Delta \bar{L}_{8-12,5\text{kHz}}$ jener Kurzzeitspektrenpaare während Zugsvorbeifahrten in Peugen, bei welchen zumindest auf einer Seite eine breitbandige Auffälligkeit erkannt wurde - fahrtrichtungsunabhängig (oben) und differenziert nach Bogenfahrtrichtung (Mitte: nach links; unten: nach rechts), sowie separiert nach Seite der Auffälligkeitsdetektion (grün: Bogeninnenseite; orange: Bogenaußenseite)

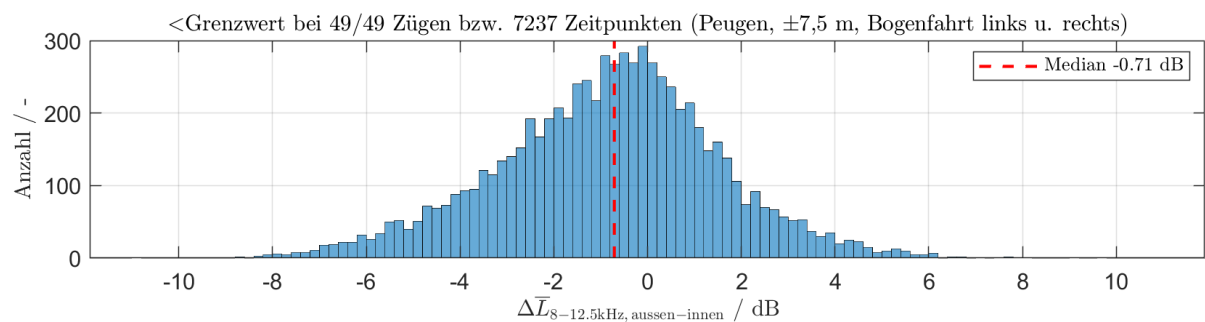


Abb. A-2: Histogramm der Bewertungsparameterdifferenzen $\Delta \bar{L}_{8-12,5\text{kHz}}$ jener Kurzzeitspektrenpaare während Zugsvorbeifahrten in Peugen, bei welchen auf keiner Bogenseite eine breitbandige Auffälligkeit erkannt wurde

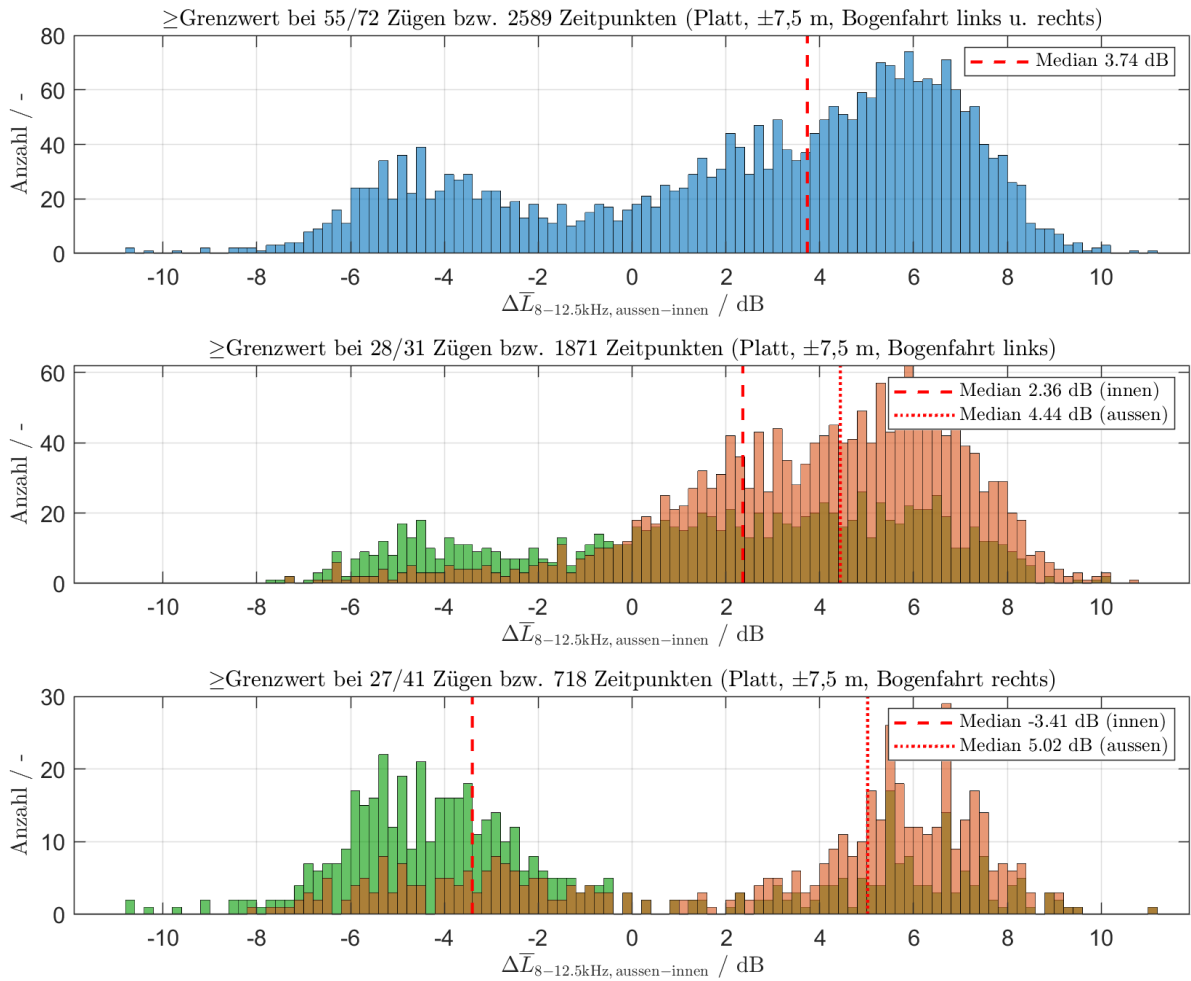


Abb. A-3: Histogramm der Bewertungsparameterdifferenzen $\Delta \bar{L}_{8-12,5\text{kHz}}$ jener Kurzzeitspektrenpaare während Zugvorbeifahrten in Platt, bei welchen zumindest auf einer Seite eine breitbandige Auffälligkeit erkannt wurde - fahrtrichtungsunabhängig (oben) und differenziert nach Bogenfahrtrichtung (Mitte: nach links; unten: nach rechts), sowie separiert nach Seite der Auffälligkeitsdetektion (grün: Bogeninnenseite; orange: Bogenaußenseite)

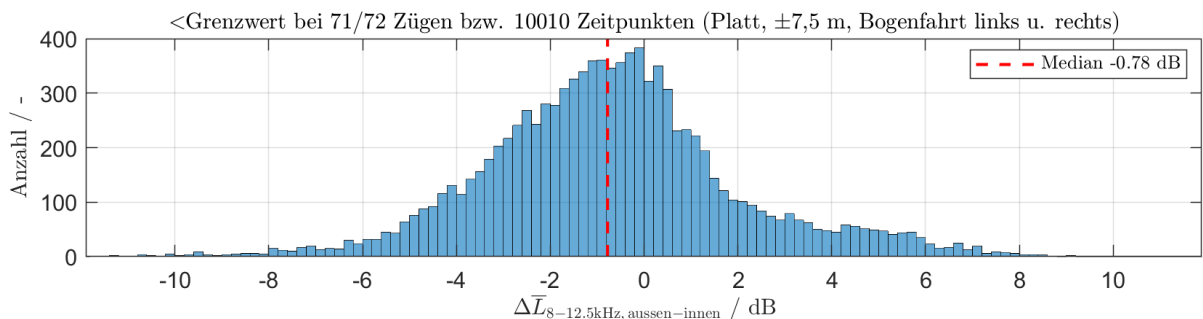


Abb. A-4: Histogramm der Bewertungsparameterdifferenzen $\Delta \bar{L}_{8-12,5\text{kHz}}$ jener Kurzzeitspektrenpaare während Zugvorbeifahrten in Platt, bei welchen auf keiner Bogenseite eine breitbandige Auffälligkeit erkannt wurde

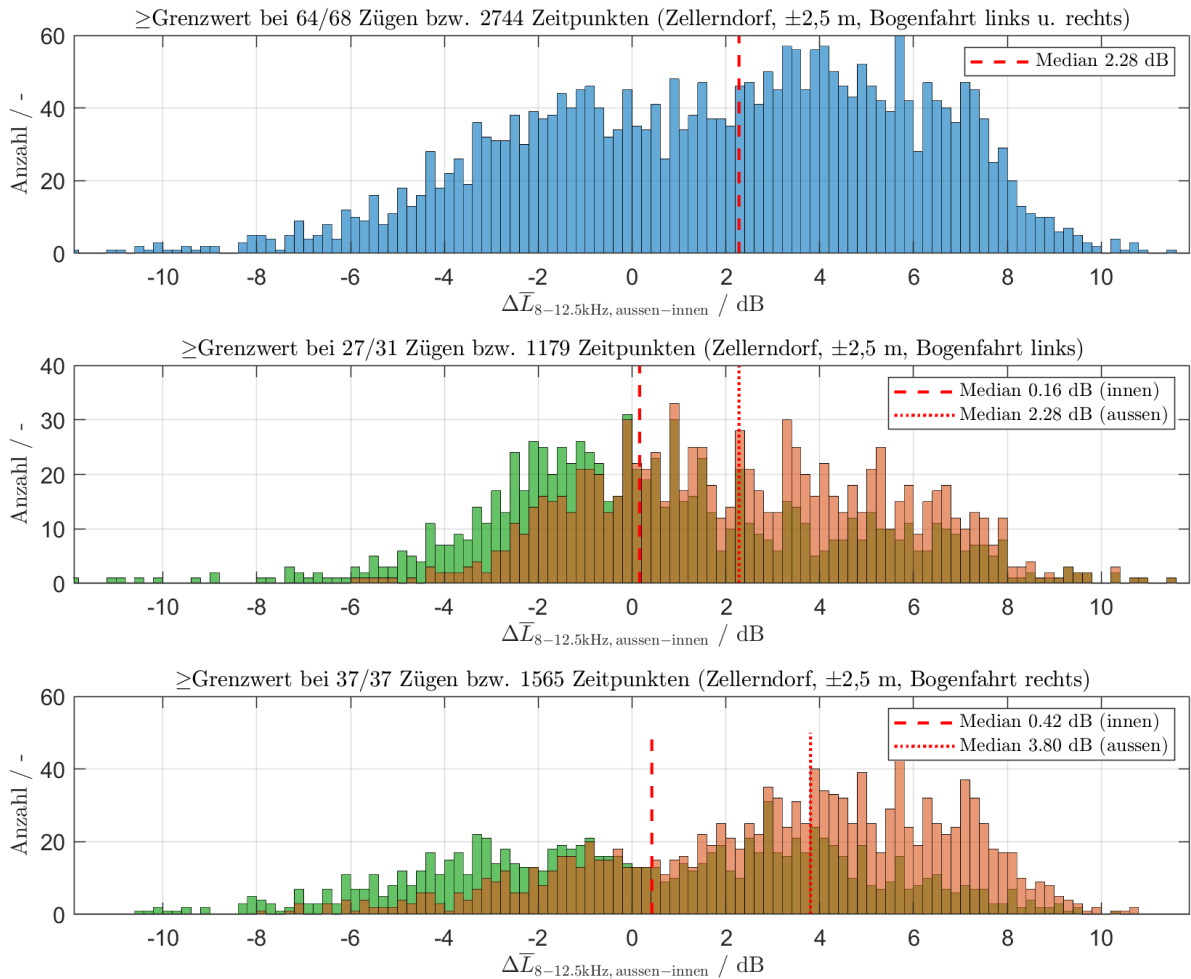


Abb. A-5: Histogramm der Bewertungsparameterdifferenzen $\Delta\bar{L}_{8-12,5\text{kHz}}$ jener Kurzzeitspektrenpaare während Zugsvorbeifahrten in Zellerndorf, bei welchen zumindest auf einer Seite eine breitbandige Auffälligkeit erkannt wurde - fahrtrichtungsunabhängig (oben) und differenziert nach Bogenfahrtrichtung (Mitte: nach links; unten: nach rechts), sowie separiert nach Seite der Auffälligkeitsdetektion (grün: Bogeninnenseite; orange: Bogenaußenseite)

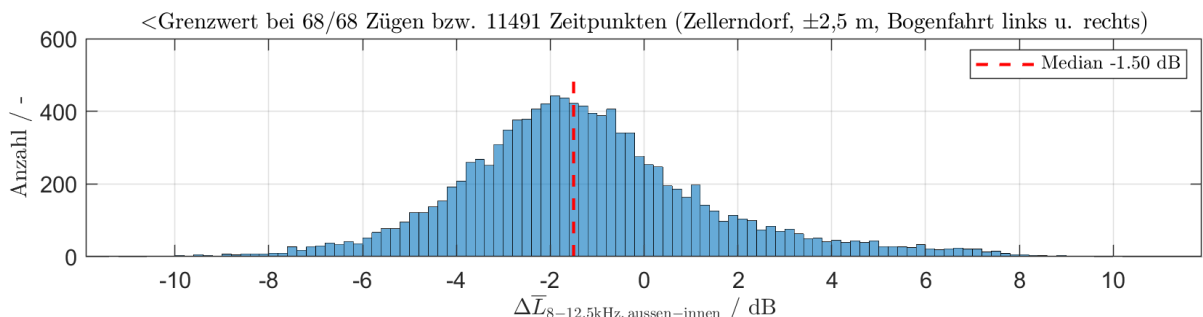


Abb. A-6: Histogramm der Bewertungsparameterdifferenzen $\Delta\bar{L}_{8-12,5\text{kHz}}$ jener Kurzzeitspektrenpaare während Zugsvorbeifahrten in Zellerndorf, bei welchen auf keiner Bogenseite eine breitbandige Auffälligkeit erkannt wurde

A.2 Tonale Auffälligkeiten

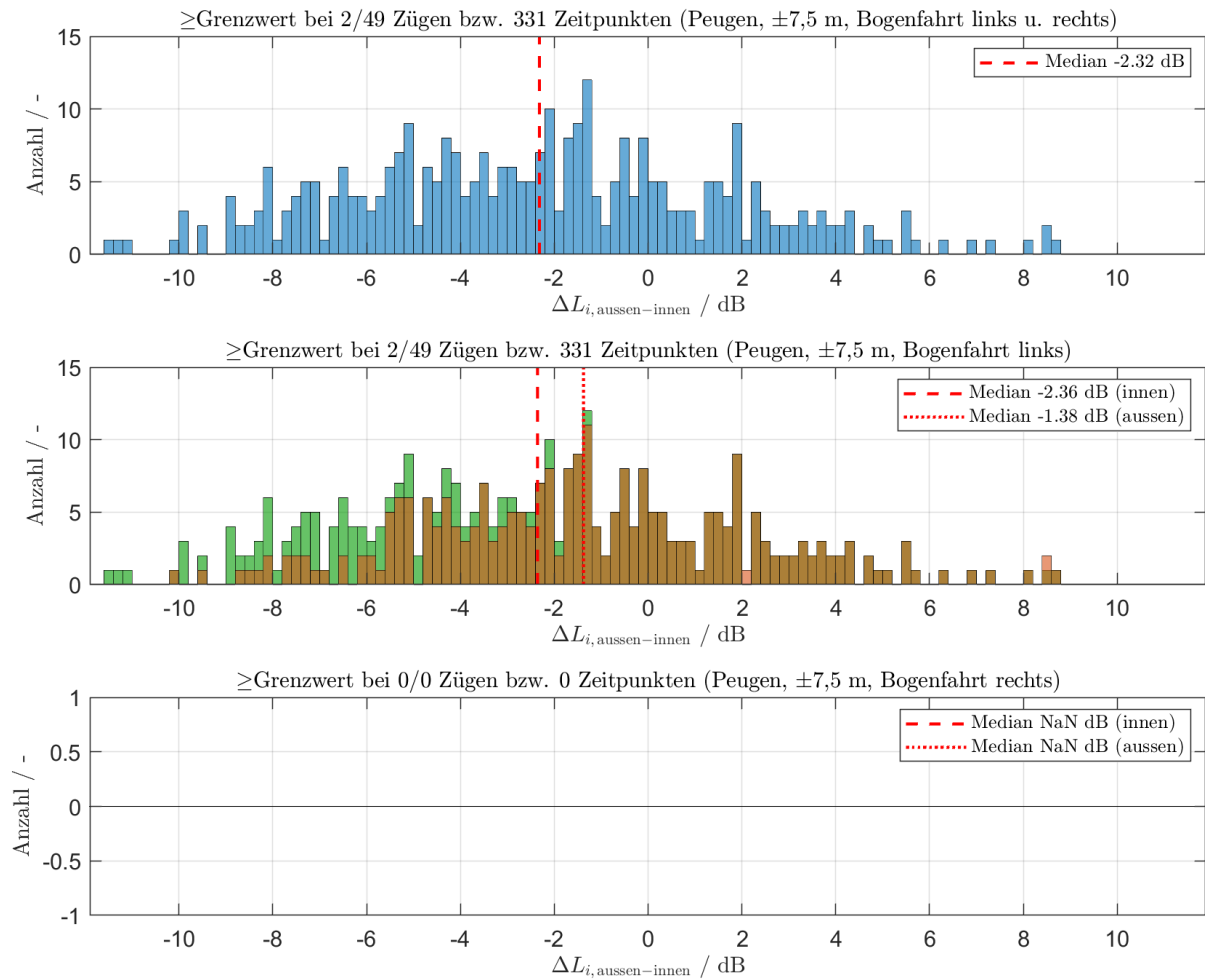


Abb. A-7: Histogramm der Bewertungsparameterdifferenzen $\Delta \bar{L}_i$ jener Kurzzeitspektrenpaare während Zugsvorbeifahrten in Peugen, bei welchen zumindest auf einer Seite eine tonale Auffälligkeit (im Bereich von 800 Hz bis 6,3 kHz) erkannt wurde - fahrtrichtungsunabhängig (oben) und differenziert nach Bogenfahrtrichtung (Mitte: nach links; unten: nach rechts), sowie separiert nach Seite der Auffälligkeitsdetektion (grün: Bogeninnenseite; orange: Bogenaußenseite)

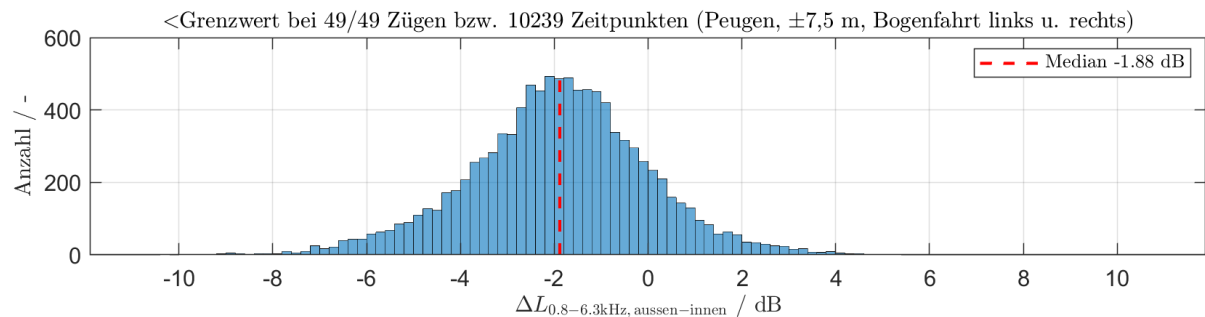


Abb. A-8: Histogramm der der Differenzen der Summenpegel $\Delta L_{0,8-6,3\text{kHz}}$ von 800 Hz bis 6,3 kHz jener Kurzzeitspektrenpaare während Zugsvorbeifahrten in Peugen, bei welchen auf keiner Bogenseite eine tonale Auffälligkeit erkannt wurde

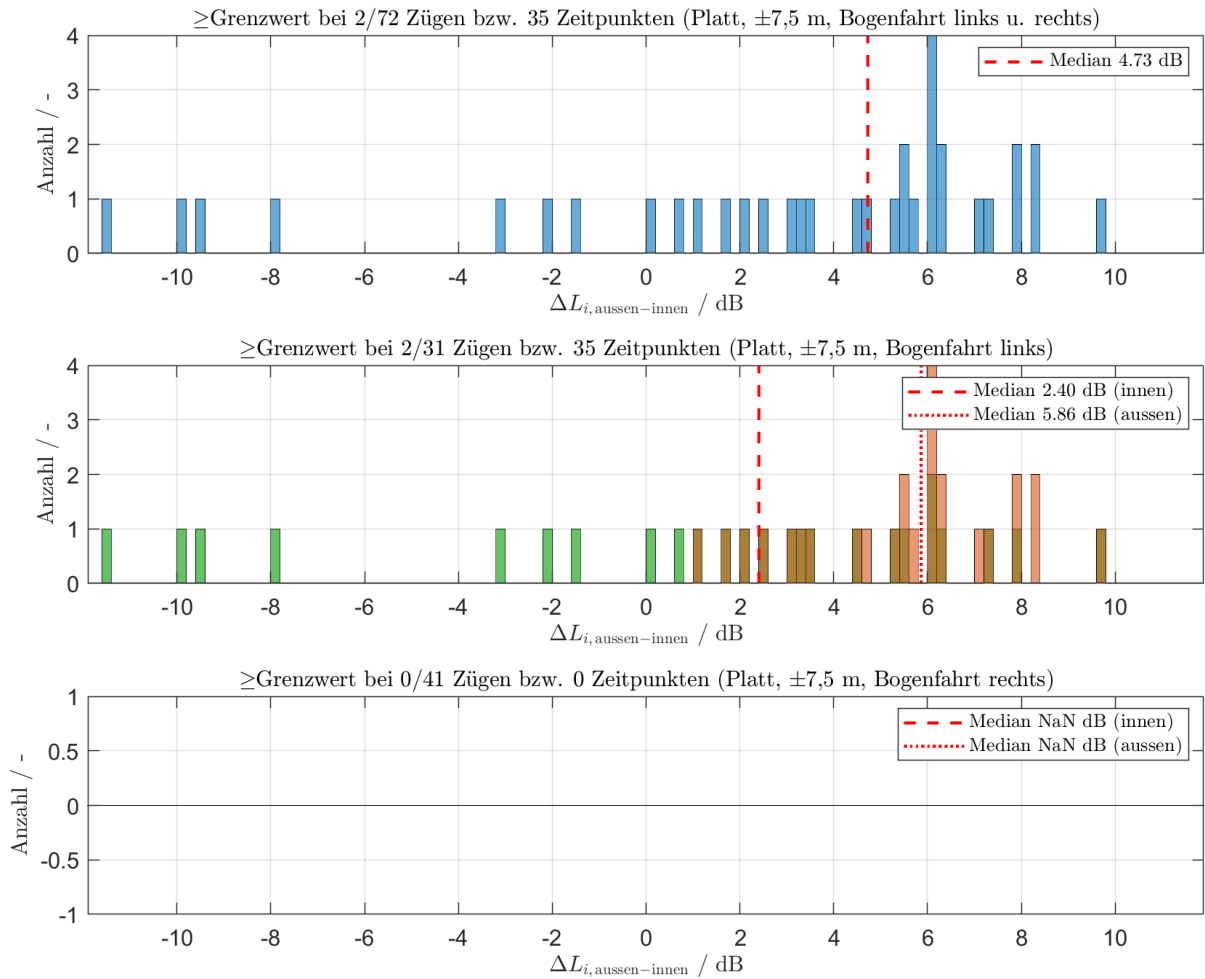


Abb. A-9: Histogramm der Bewertungsparameterdifferenzen $\Delta \bar{L}_i$ jener Kurzzeitspektrenpaare während Zugvorbeifahrten in Platt, bei welchen zumindest auf einer Seite eine tonale Auffälligkeit (im Bereich von 800 Hz bis 6,3 kHz) erkannt wurde - fahrtrichtungsunabhängig (oben) und differenziert nach Bogenfahrtrichtung (Mitte: nach links; unten: nach rechts), sowie separiert nach Seite der Auffälligkeitsdetektion (grün: Bogeninnenseite; orange: Bogenaußenseite)

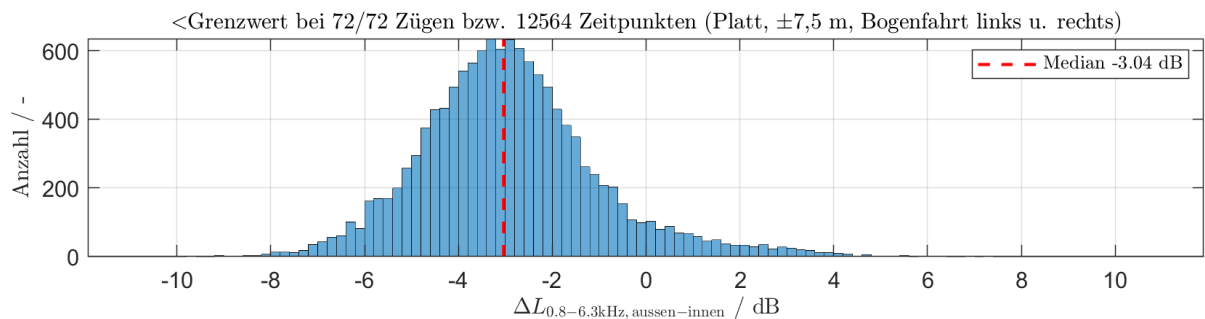


Abb. A-10: Histogramm der der Differenzen der Summenpegel $\Delta L_{0,8-6,3\text{kHz}}$ von 800 Hz bis 6,3 kHz jener Kurzzeitspektrenpaare während Zugvorbeifahrten in Platt, bei welchen auf keiner Bogenseite eine tonale Auffälligkeit erkannt wurde

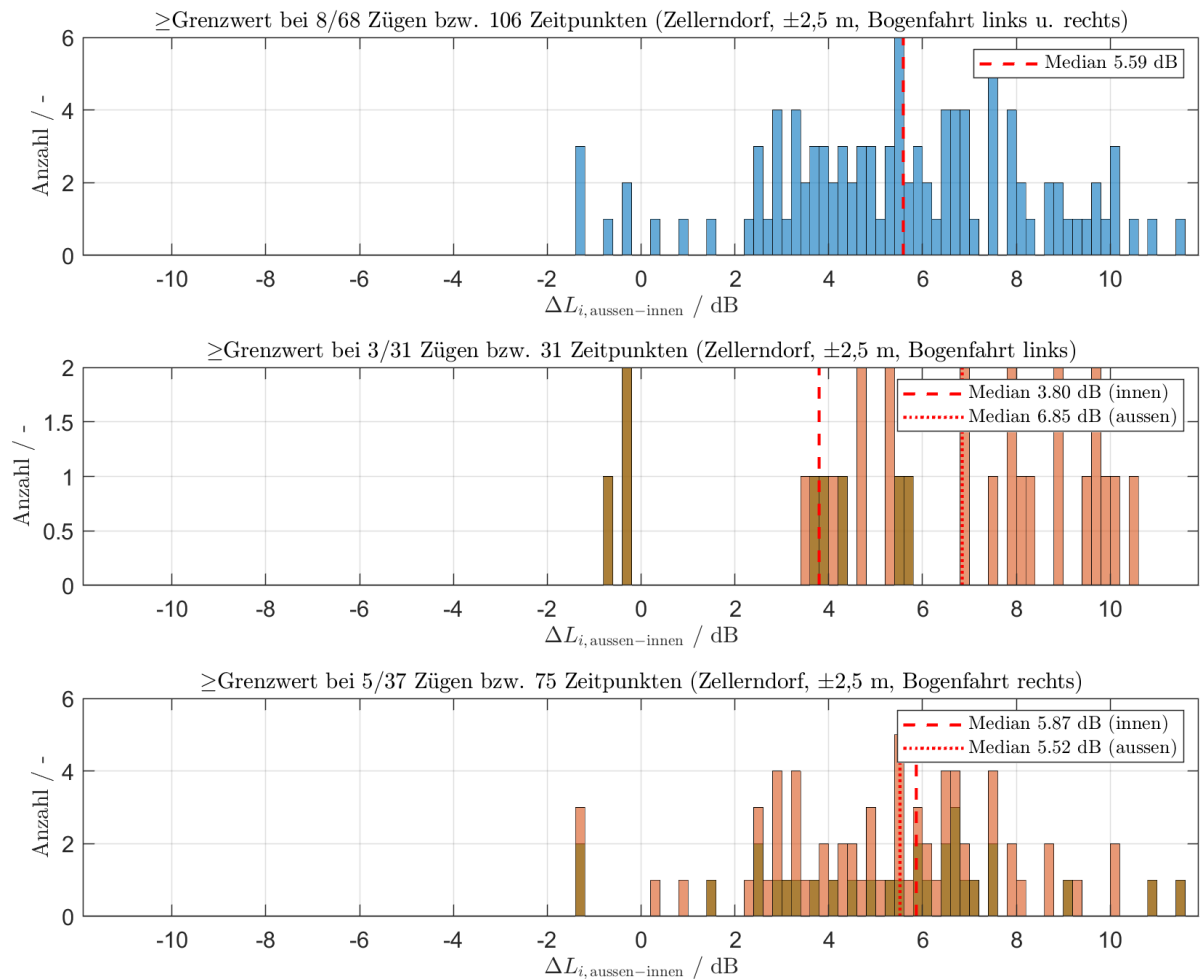


Abb. A-11: Histogramm der Bewertungsparameterdifferenzen $\Delta\bar{L}_i$ jener Kurzzeitspektrenpaare während Zugsvorbeifahrten in Zellerndorf, bei welchen zumindest auf einer Seite eine tonale Auffälligkeit (im Bereich von 800 Hz bis 6,3 kHz) erkannt wurde - fahrtrichtungsunabhängig (oben) und differenziert nach Bogenfahrtrichtung (Mitte: nach links; unten: nach rechts), sowie separiert nach Seite der Auffälligkeitsdetektion (grün: Bogeninnenseite; orange: Bogenaußenseite)

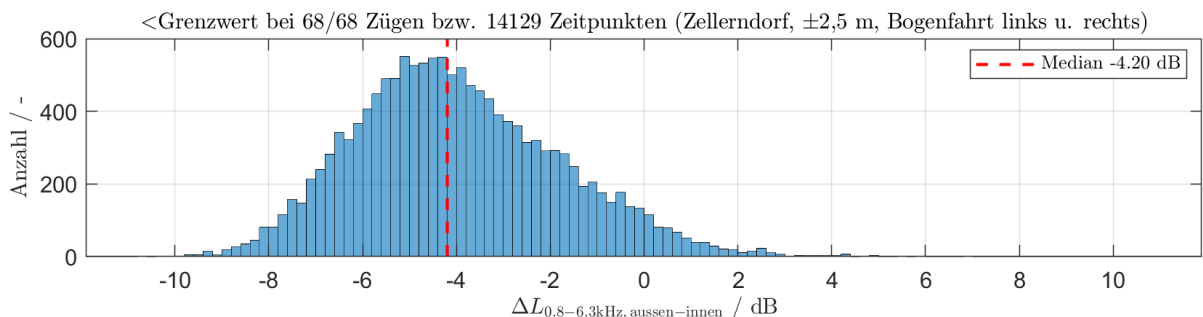


Abb. A-12: Histogramm der der Differenzen der Summenpegel $\Delta L_{0,8-6,3\text{kHz}}$ von 800 Hz bis 6,3 kHz jener Kurzzeitspektrenpaare während Zugsvorbeifahrten in Zellerndorf, bei welchen auf keiner Bogenseite eine tonale Auffälligkeit erkannt wurde

Anhang B Auswahl des Rollgeräusches

- Railjet-Reisezug in Peugen

Im Vergleich zeigt sich (Abb. B-1), dass das 2. Sample bis auf einen leicht abfallend L_A (ca. 2 dB) am wenigsten Störgeräusche aufweist. Aus dem Spektrogramm und den Spektren ist ersichtlich, dass die anderen Samples mehr Störgeräusche aufweisen. Verschiebt man beim 2. Sample den Beginn um ca. 0,3 s nach hinten, um schwache Geräusche am Anfang zu minimieren, ergibt sich ein maximaler Unterschied im relevanten Frequenzbereich von ca. 0,65 dB bei 200 Hz. In 50 m wäre auch das 6. Sample gut. Das 2. Sample wurde ausgewählt und um 0,25 s nach hinten verschoben.

- Regionalzug der Baureihe 80-33 in Platt

Bei Sample 1 und 3 (Abb. B-2) ist ein deutlicher Pegelabfall sichtbar. Bei 2. Sample besteht ein Geräusch am Anfang. Auch beim 5. Sample treten Geräusche auf und beim 6. Sample gibt es einen Anstieg am Ende. Das 4. Sample ist gut mit einem leichten Abfall am Anfang. Über 10 kHz sind bei diesem Sample die Geräusche etwas geringer als der Median. Daher wurde das 4. Sample ausgewählt.

- Regionalzug der Baureihe 80-33 in Zellerndorf

1.-4. Sample (Abb. B-3) haben leichte bis deutliche Nebengeräusche, das 5. Sample zeigt wenig bis keine Auffälligkeiten. Das 6. Sample hat ein leichtes Schleifgeräusch in 25 m. Bei den Emissionsspektren ergibt sich eine gute Übereinstimmung (aber auch eine sehr kleine Varianz der Vorbeifahrten). Daher wurde das 5. Sample ausgewählt.

- Güterzug in Peugen

In 25 m treten (Abb. B-4) starke Pegelschwankungen bei allen Geräuschen außer dem 4. Geräusch auf, dort sind es nur ca. 2 dB (Kurven unmittelbar unterhalb der Spektrogramme). Bei allen Geräuschen außer dem 1. Geräusch treten über 10 kHz Störgeräusche auf, die aber im Bereich der üblichen hochfrequenten Anteile ohne detektierte breitbandige Geräusche sind. Im Mittenbereich ist das 4. Sample eher im höheren Bereich. Aufgrund der geringeren Schwankungen wurde das 4. Sample ausgewählt.

- Güterzug in Platt

Bei den Güterzügen in Platt (Abb. B-5) treten vor allem in 25 m teils starke Schwankungen auf. Das 4. Sample scheint hier noch am konstantesten in 25 m. Leichte Störgeräusche und etwas erhöhte Emission treten hier bei 12,5 kHz auf, scheinen aber akzeptabel. Daher wurde das 4. Sample ausgewählt.

- Güterzug in Zellerndorf

Das 5. Sample (Abb. B-6) hat keine Nebengeräusche, allerdings einen leicht niedrigeren A-Pegel (ca. 1-2 dB), Sample 6 ist ebenfalls gut. In 50 m ergibt sich ein leichter Abfall des 5. Samples zum Ende (1-2 dB). 6. Sample hat leicht erhöhtes Emissionsspektrum und geringe Störgeräusche. Es wurde das 5. Sample ausgewählt.

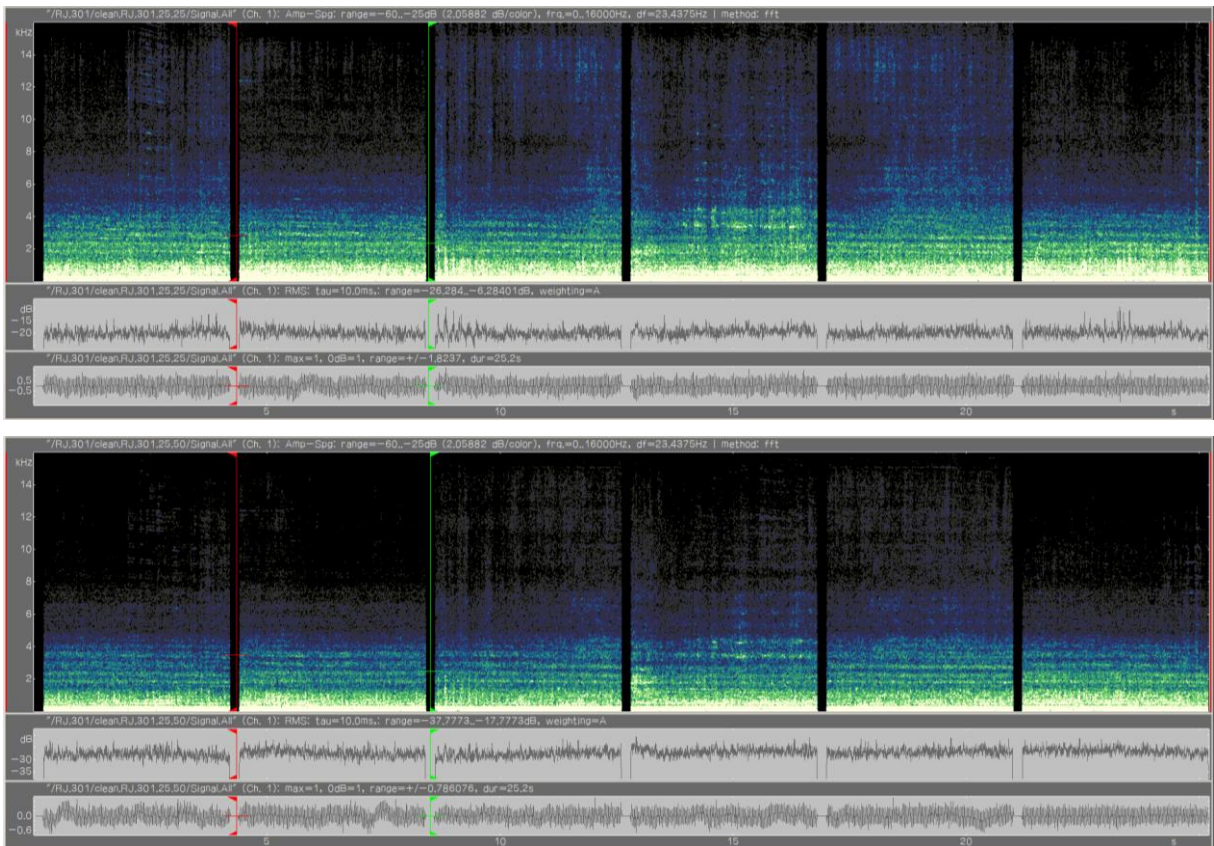
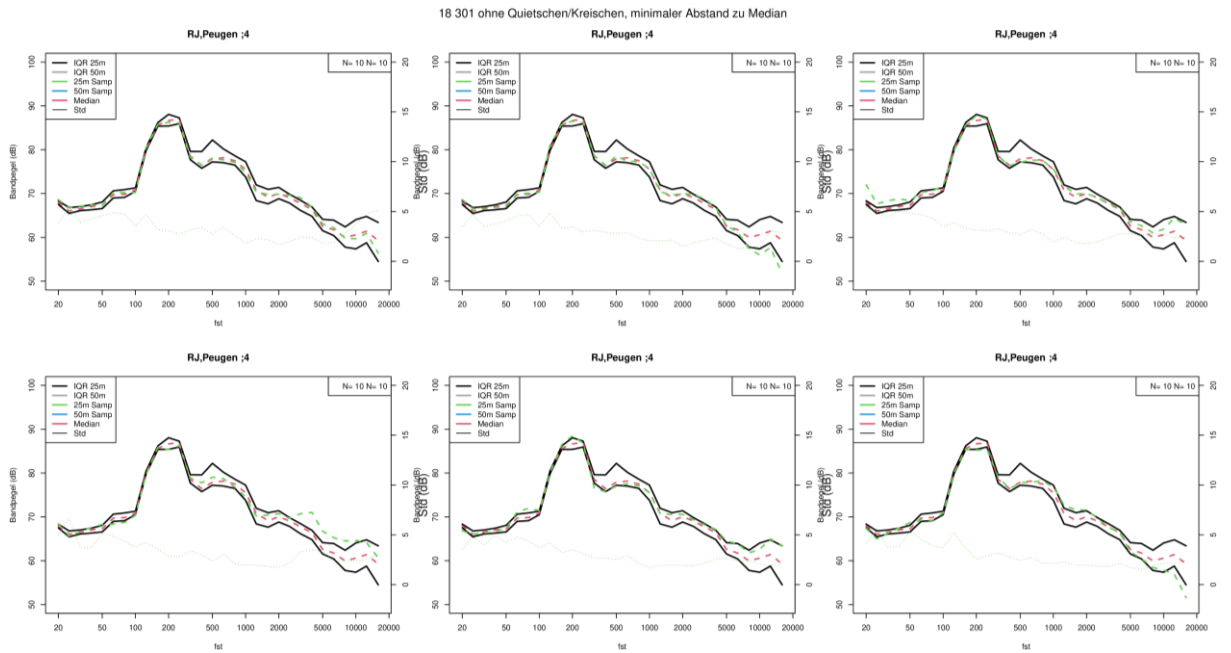


Abb. B-1: Railjet in 7,5, 25 und 50 m Entfernung. Spektren in 7,5 m im Vergleich zum Median (oben). 25 m (Mitte) und 50 m (unten). Ansteigender Abstand zu Median von 50 bis 2000 Hz.

21 302 ohne Quietschen/Kreischen, minimaler Abstand zu Median

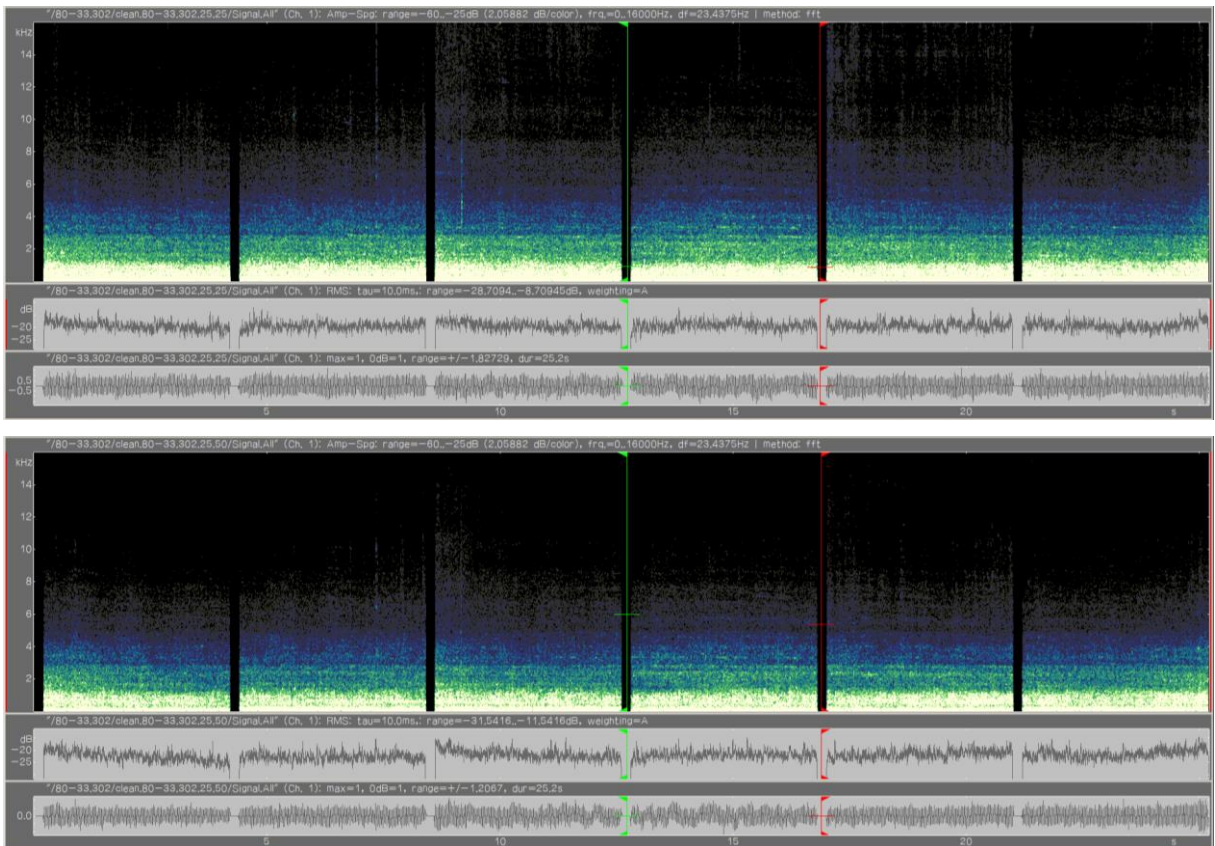
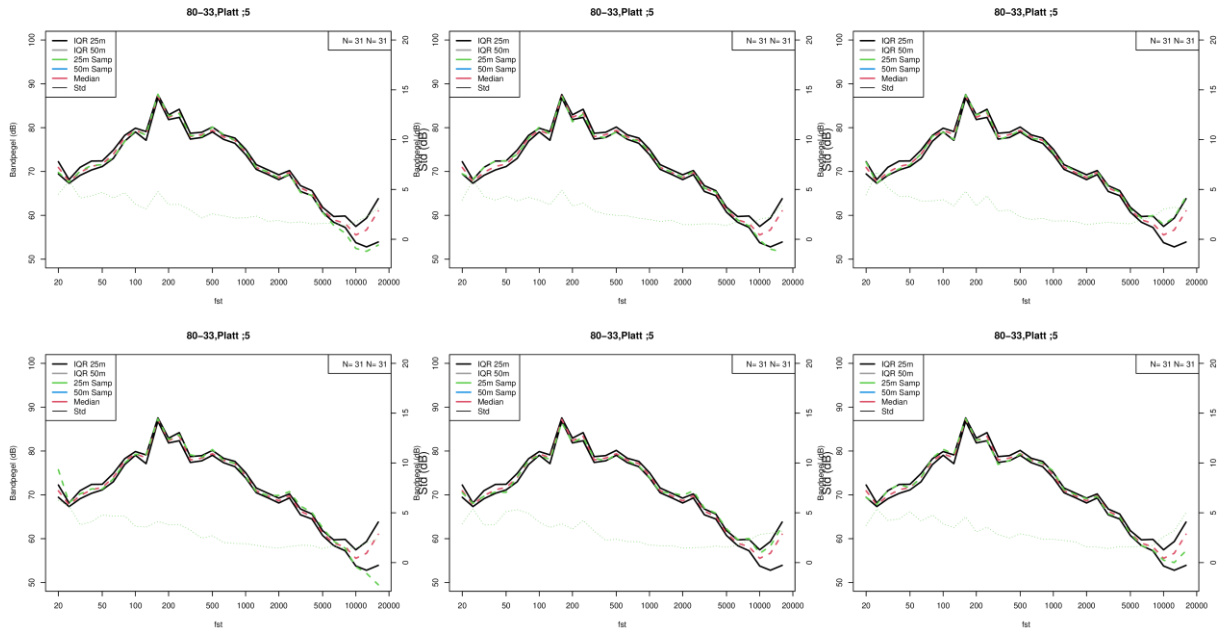


Abb. B-2: 80-33 (Platt) in 7,5, 25 und 50 m Entfernung. Spektren in 7,5 m im Vergleich zum Median (oben). 25 m (Mitte) und 50 m (unten). Ansteigender Abstand zu Median von 50 bis 2000 Hz. 4. Sample hat geringsten Störgeräuschanteil.

21 303 ohne Quietschen/Kreischen, minimaler Abstand zu Median

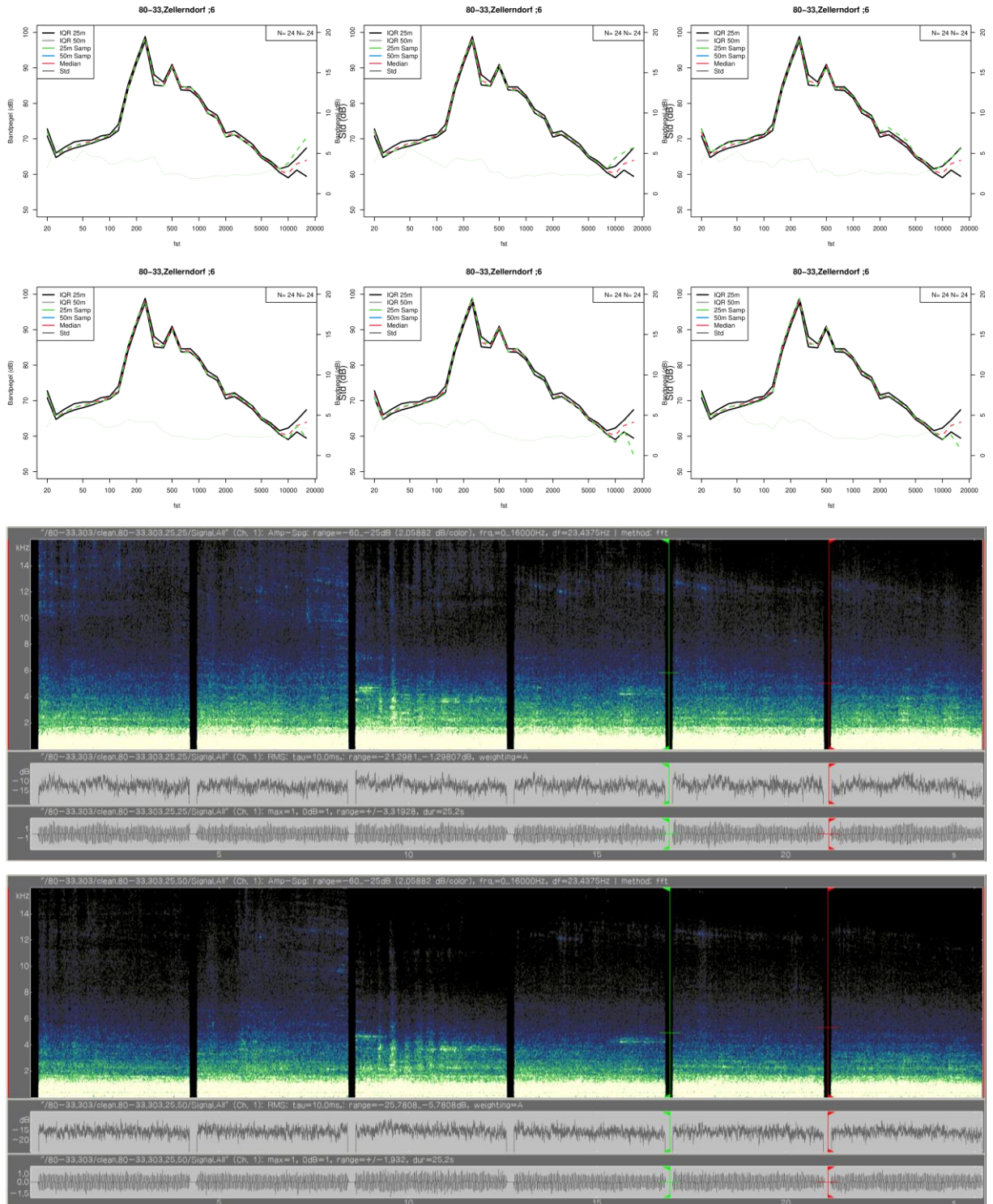


Abb. B-3: 80-33 (Zellerndorf) in 7,5, 25 und 50 m Entfernung. Spektren in 7,5 m im Vergleich zum Median (oben). 25 m (Mitte) und 50 m (unten). Ansteigender Abstand zu Median von 50 bis 2000 Hz. 5. Sample hat geringsten Störgeräuschanteil.

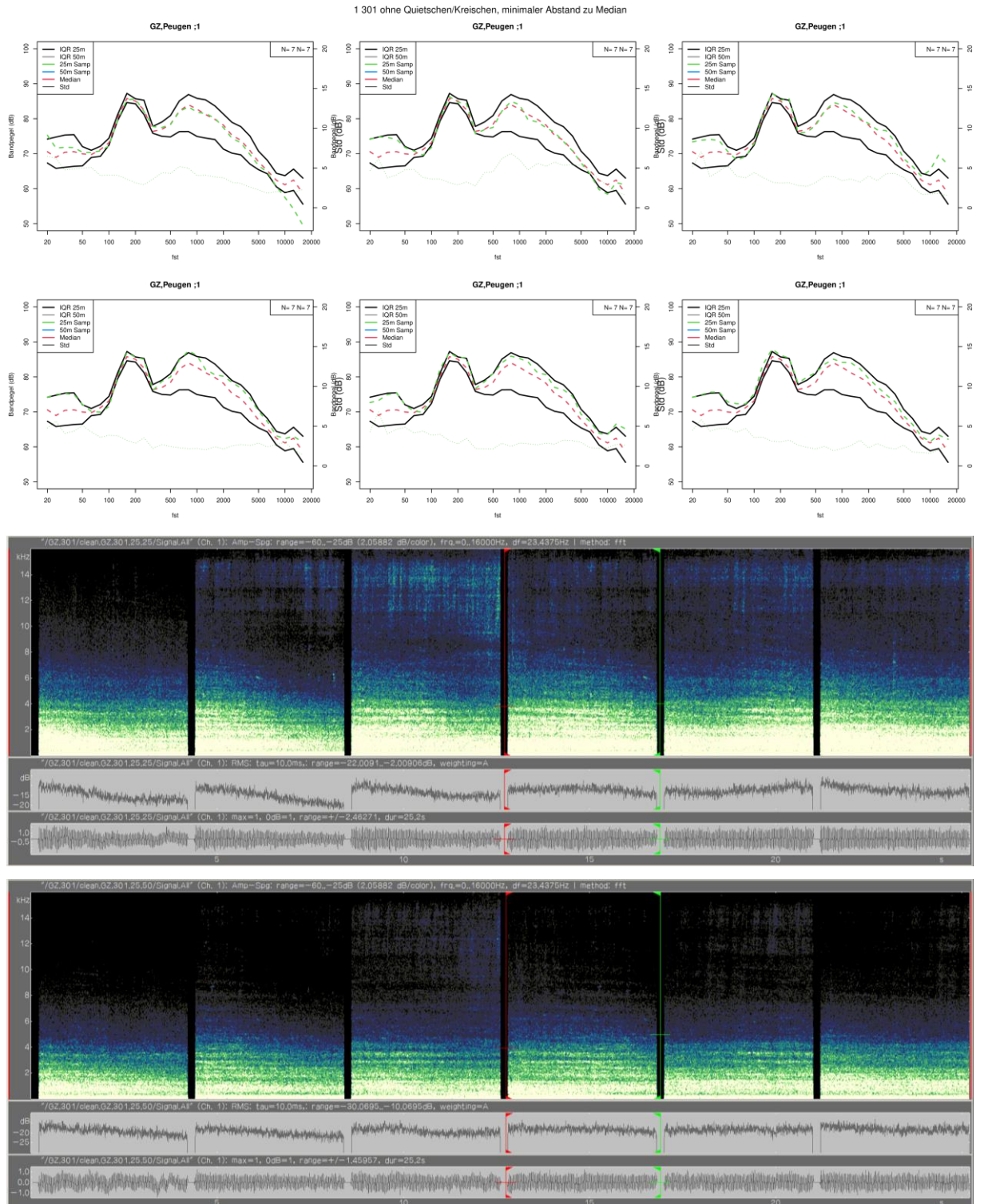
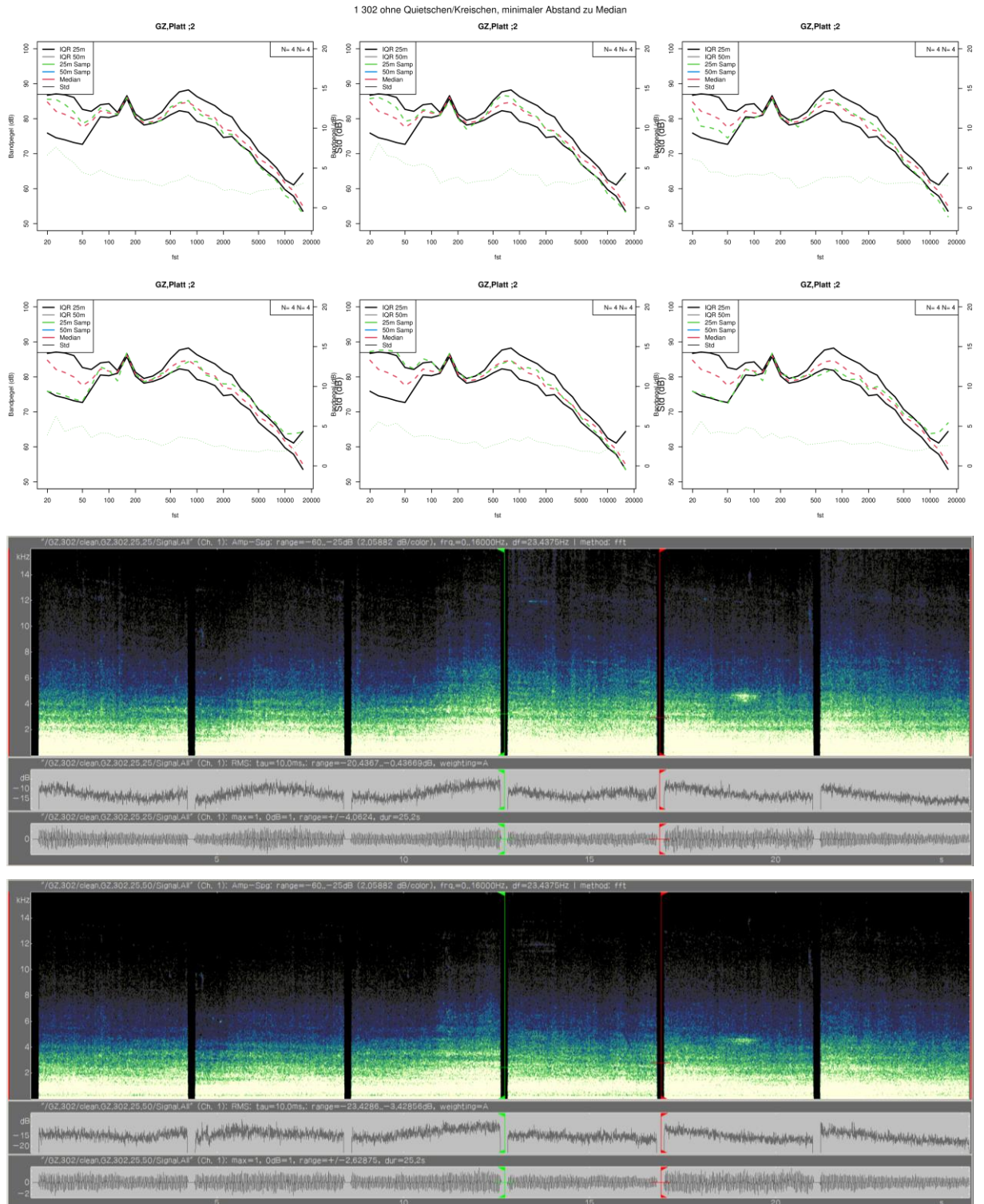


Abb. B-4: Güterzug (Peugen) in 7,5, 25 und 50 m Entfernung. Spektren in 7,5 m im Vergleich zum Median (oben). 25 m (Mitte) und 50 m (unten). Ansteigender Abstand zu Median von 50 bis 2000 Hz.



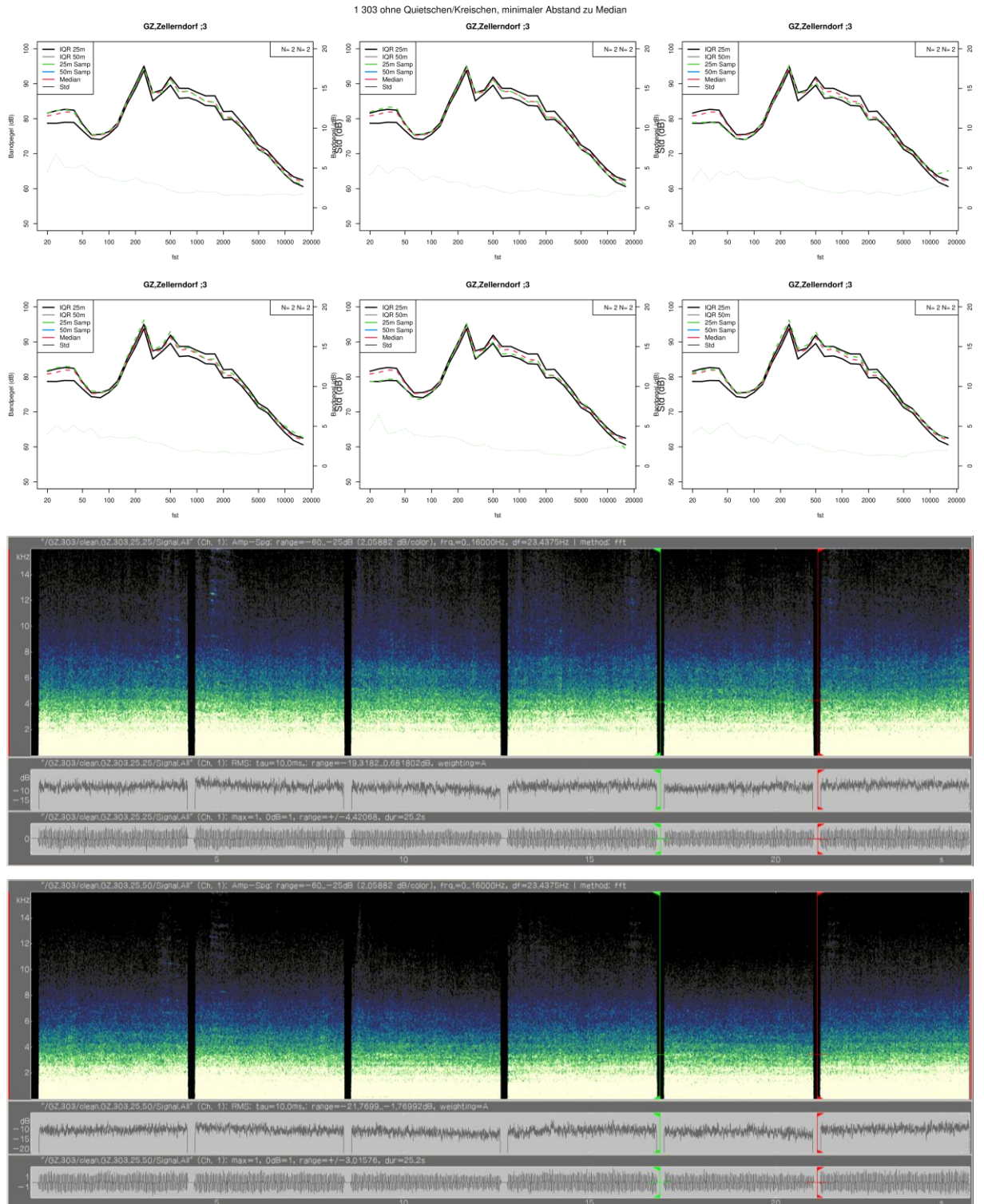


Abb. B-6: Güterzug (Zellerndorf) in 7,5, 25 und 50 m Entfernung. Spektren in 7,5 m im Vergleich zum Median (oben), 25 m (Mitte) und 50 m (unten). Ansteigender Abstand zu Median von 50 bis 2000 Hz. 5. Sample hat geringsten Störgeräuschanteil.

Anhang C Übersicht Quietschereignisse PAAB

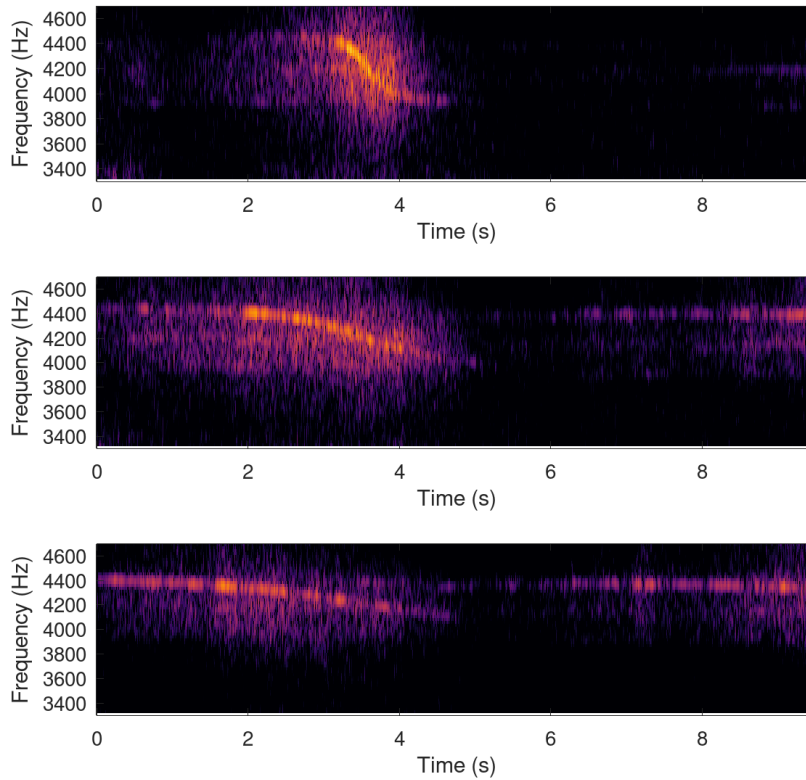


Abb. C-1: 301 03 DIC Messung 011 01

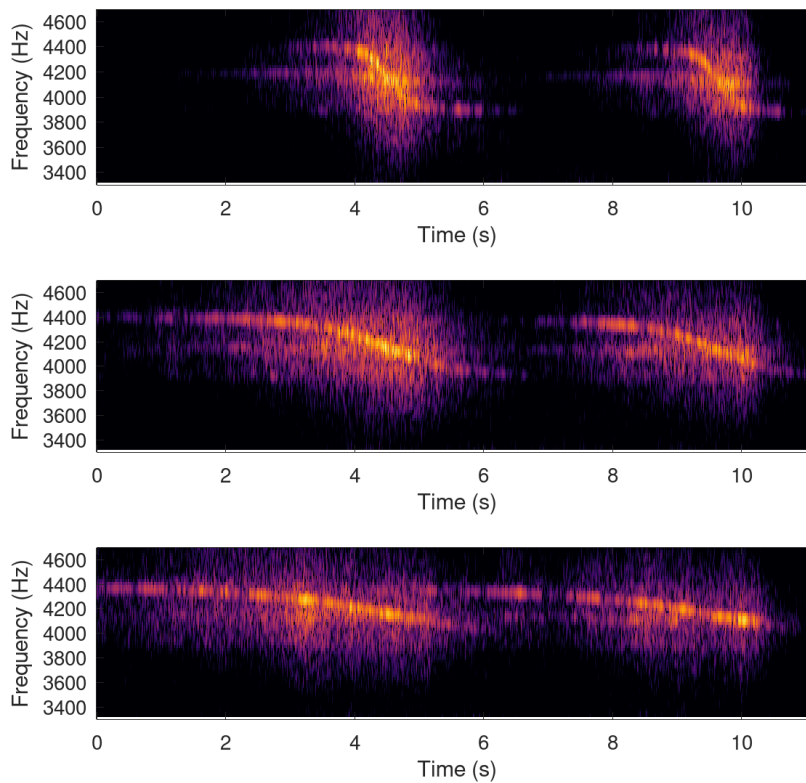


Abb. C-2: 301 03 DIC Messung 011 02

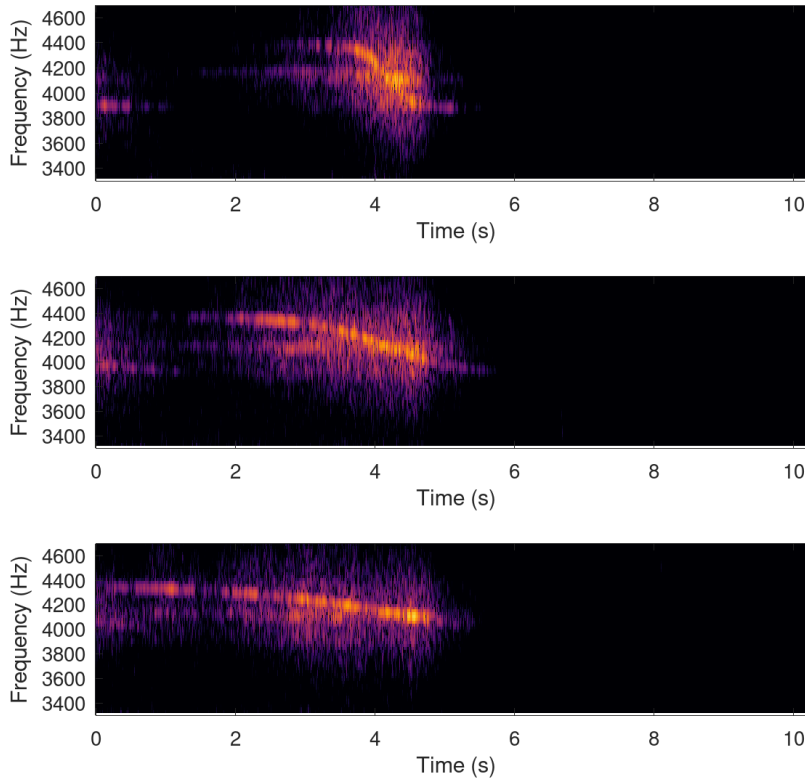


Abb. C-3: 301 03 DIC Messung 011 03

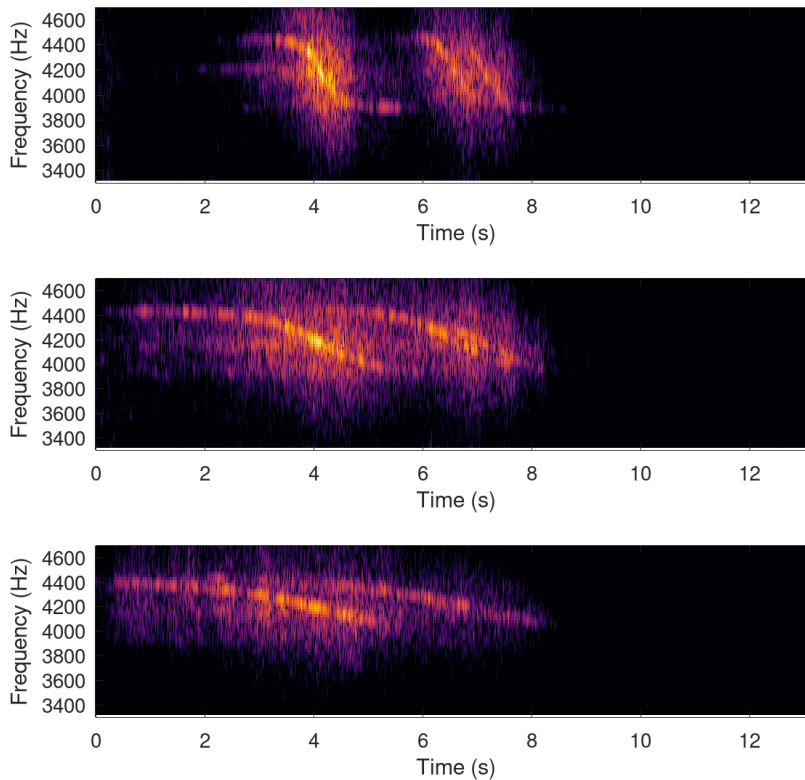


Abb. C-4: 301 03 DIC Messung 012 04

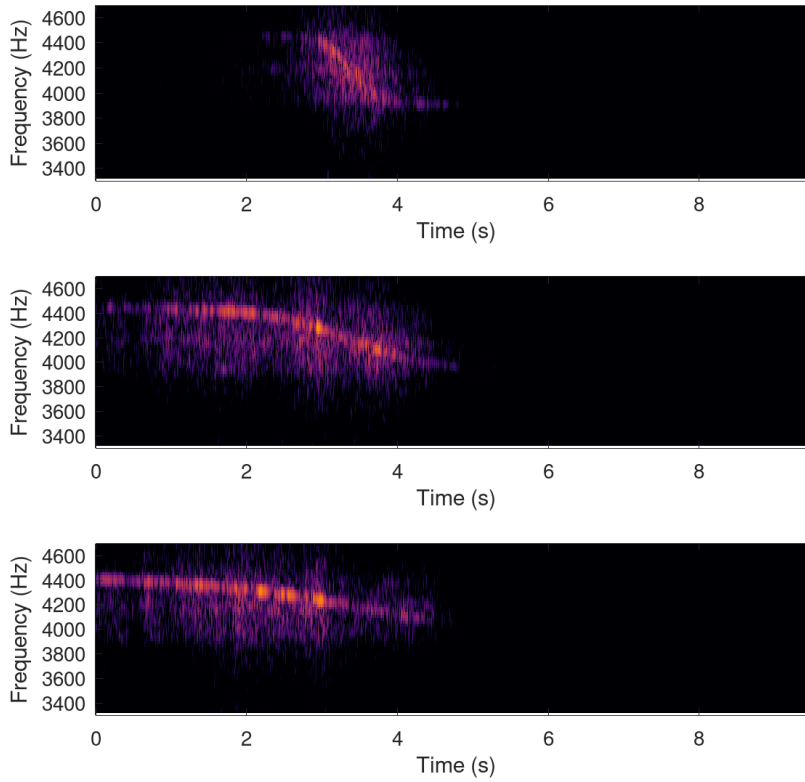


Abb. C-5: 301 03 DIC Messung 012 05

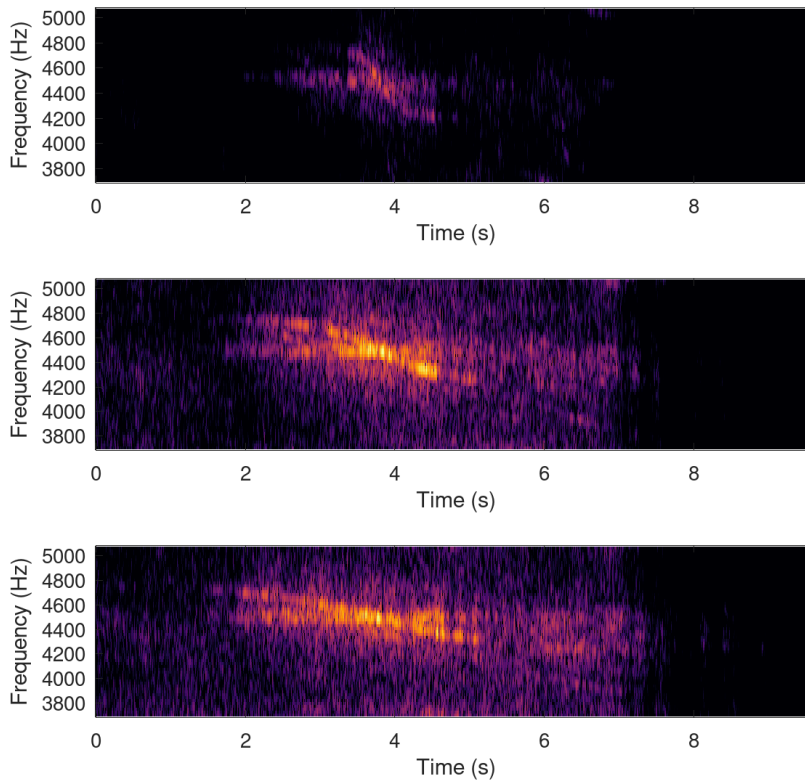


Abb. C-6: 302 02 DIC Messung 018 01

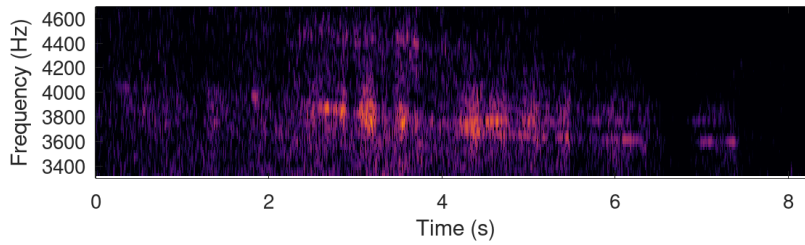
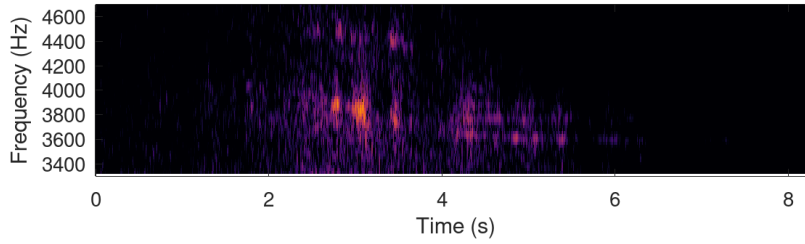
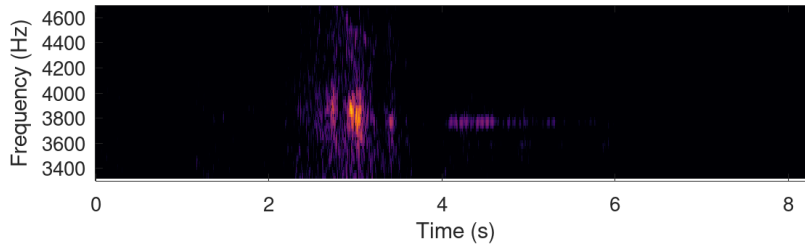


Abb. C-7: 303 01 DIC Messung 001 01

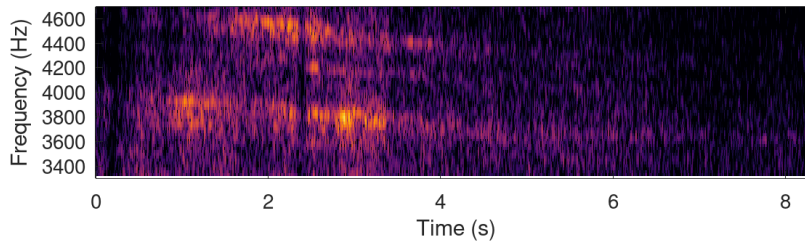
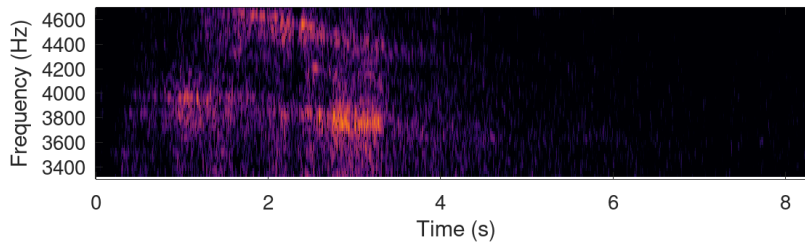
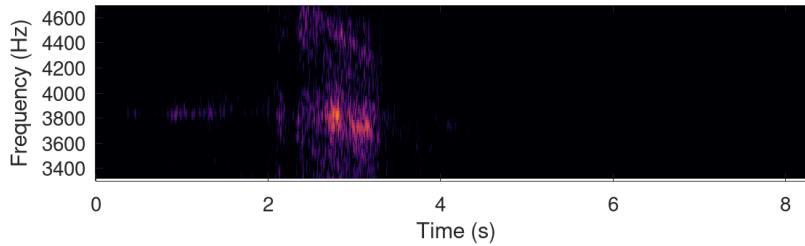


Abb. C-8: 303 01 DIC Messung 004 02

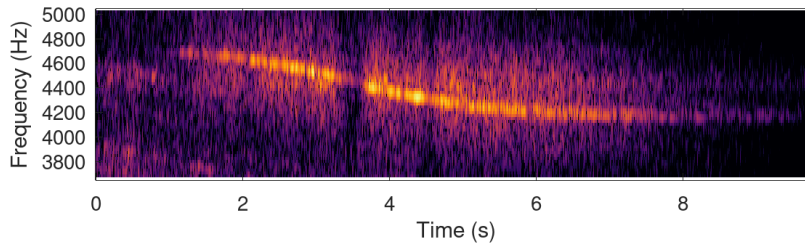
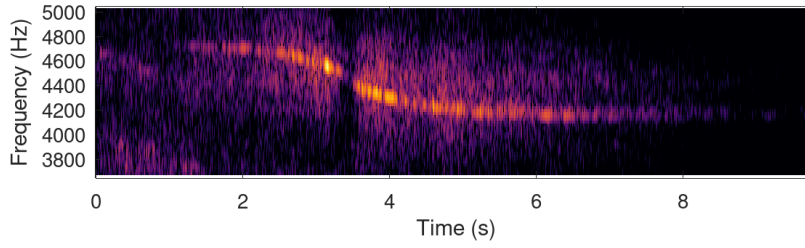
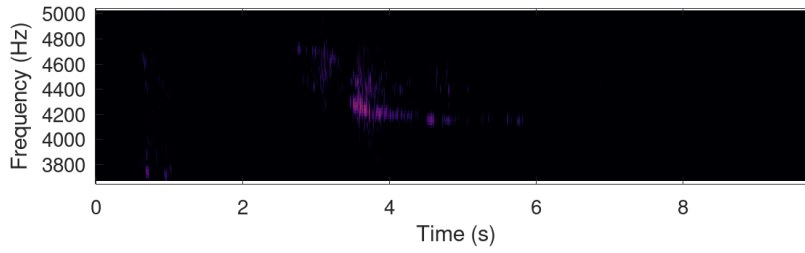


Abb. C-9: 303 02 DIC Messung 002 03

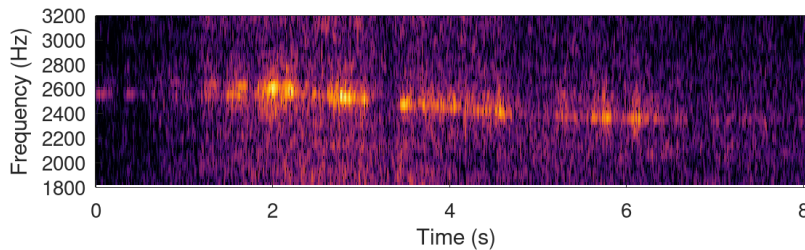
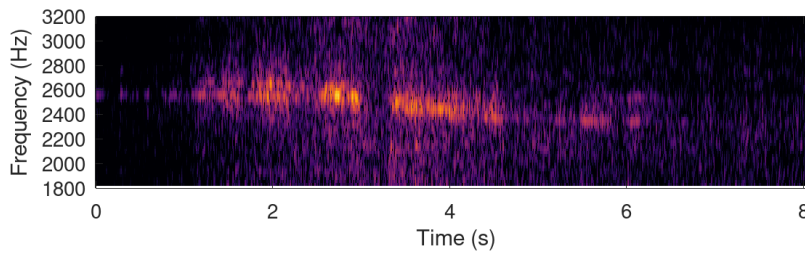
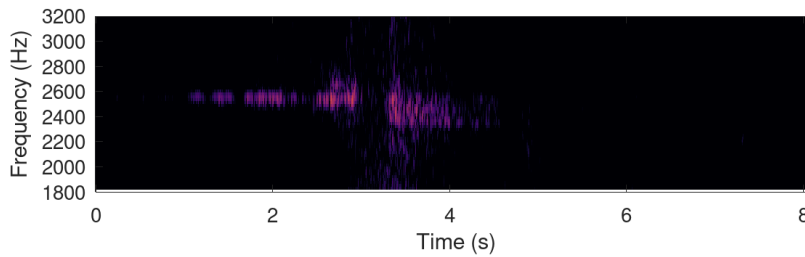


Abb. C-10: 303 02 DIC Messung 012 04

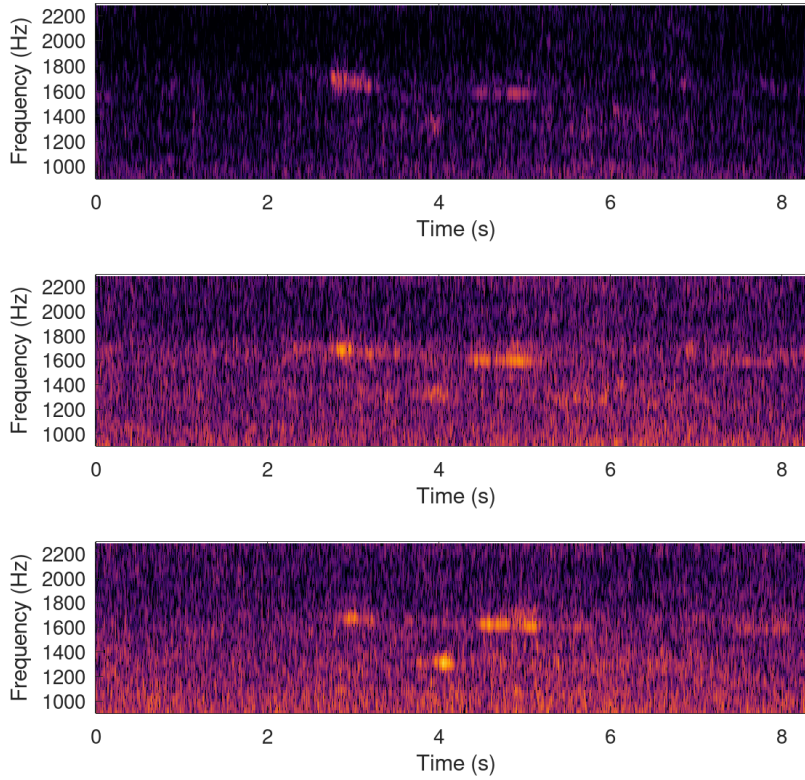


Abb. C-11: 303 02 DIC Messung 013 05

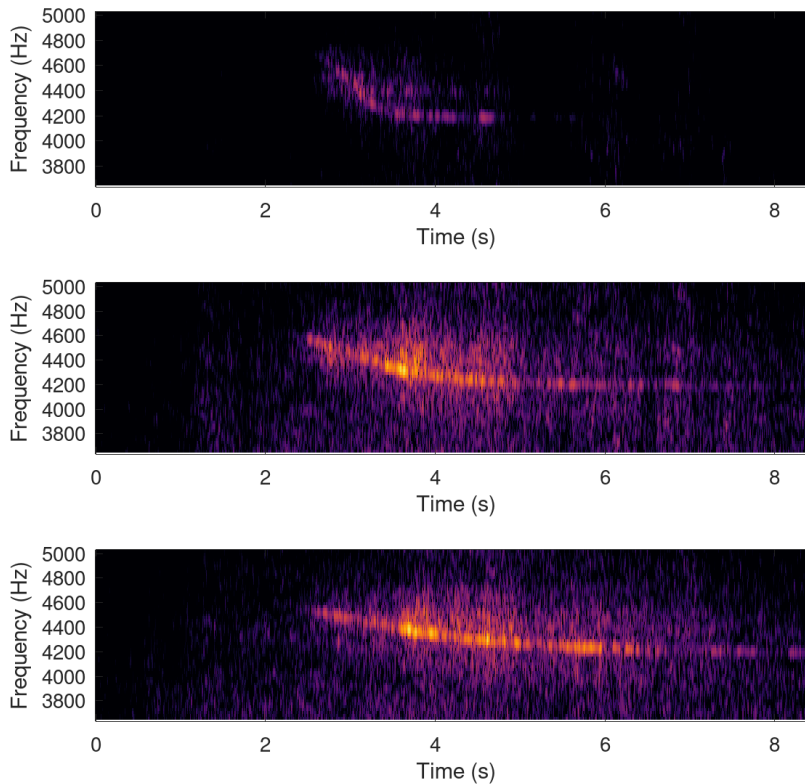


Abb. C-12: 303 03 DIC Messung 008 06

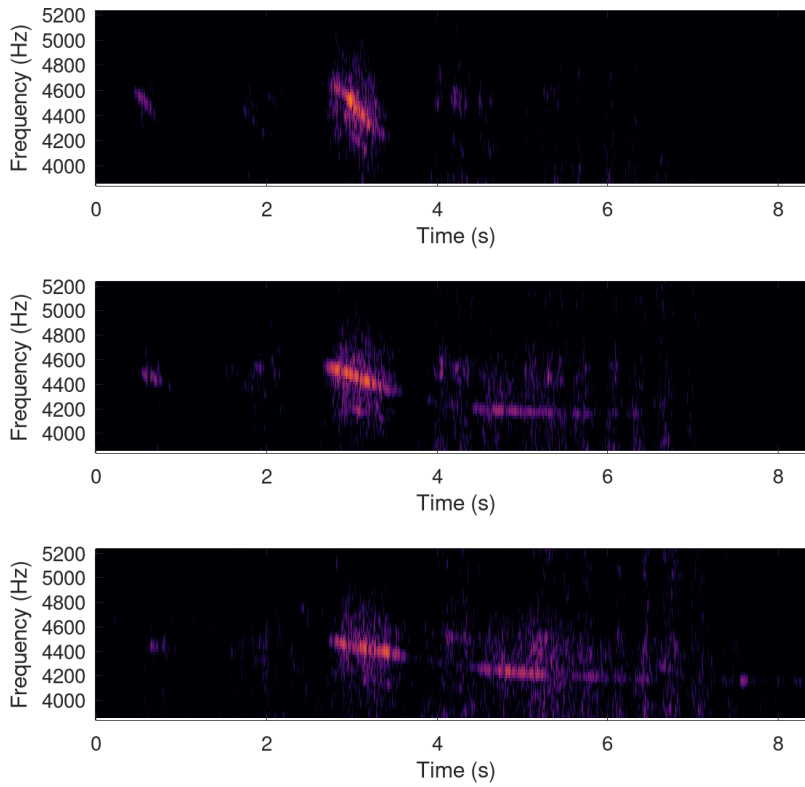


Abb. C-13: 303 03 DIC Messung 013 07

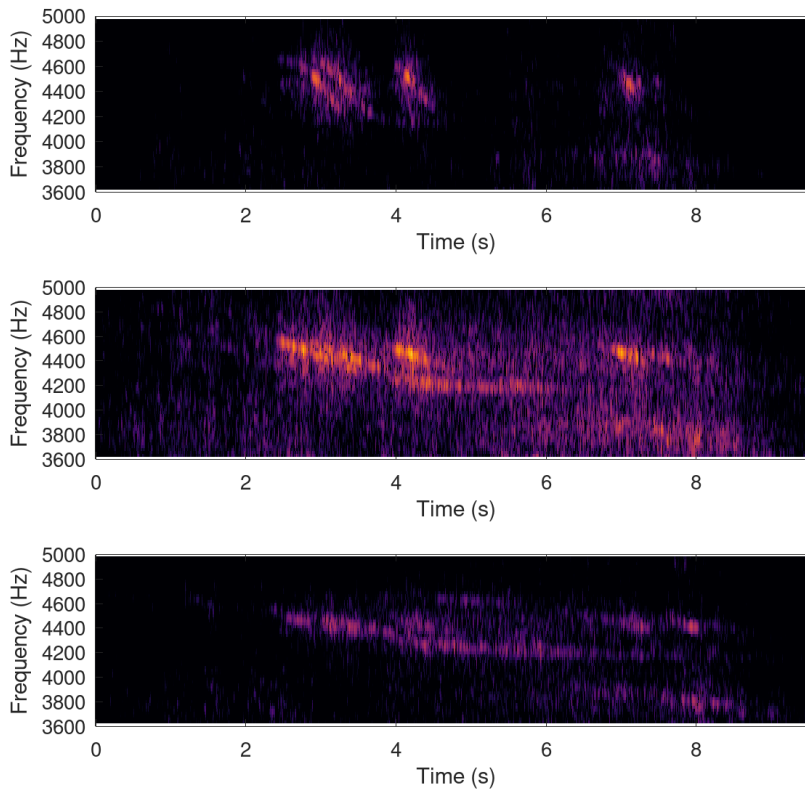


Abb. C-14: 303 03 DIC Messung 017 08

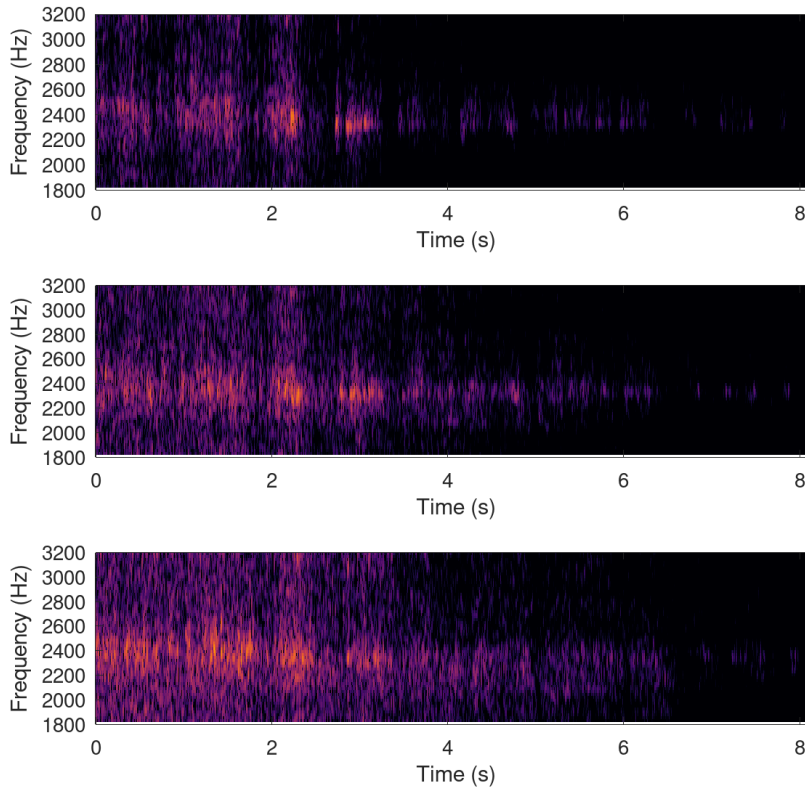


Abb. C-15: 303 03 DIC Messung 021 09

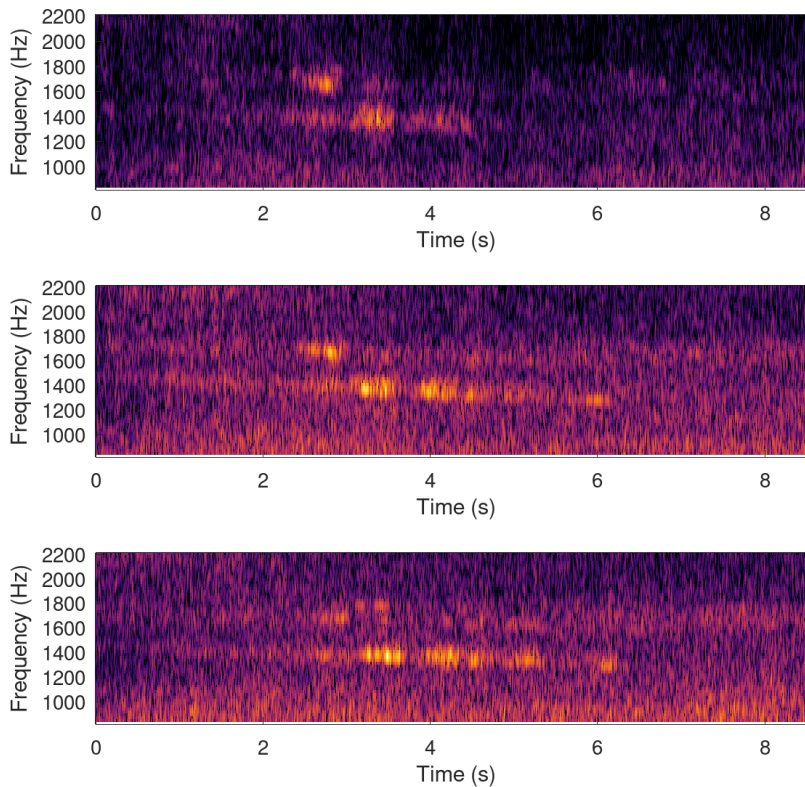


Abb. C-16: 303 03 DIC Messung 022 10

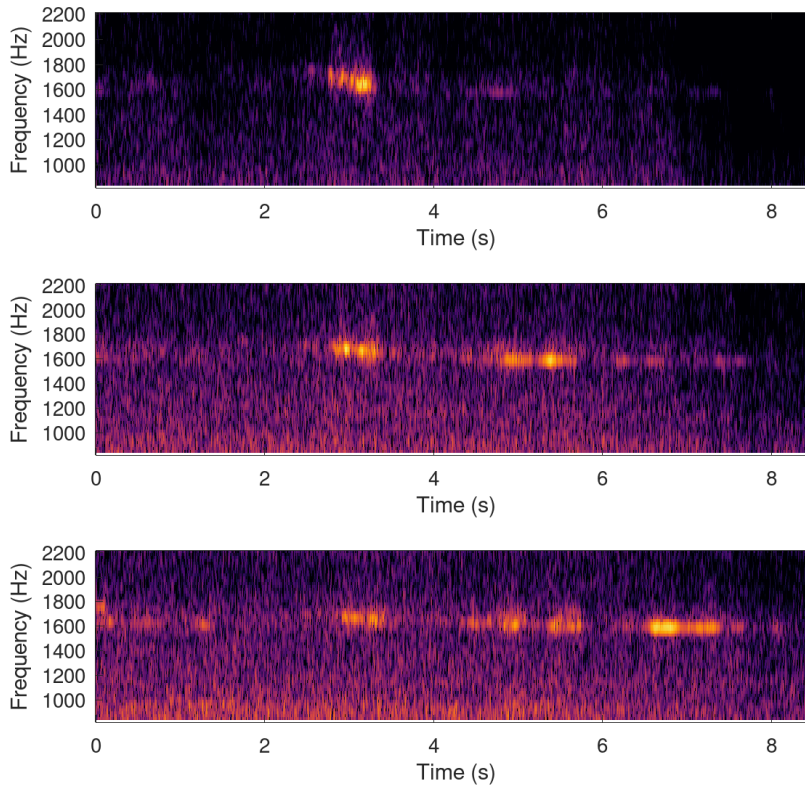


Abb. C-17: 303 03 DIC Messung 022 11

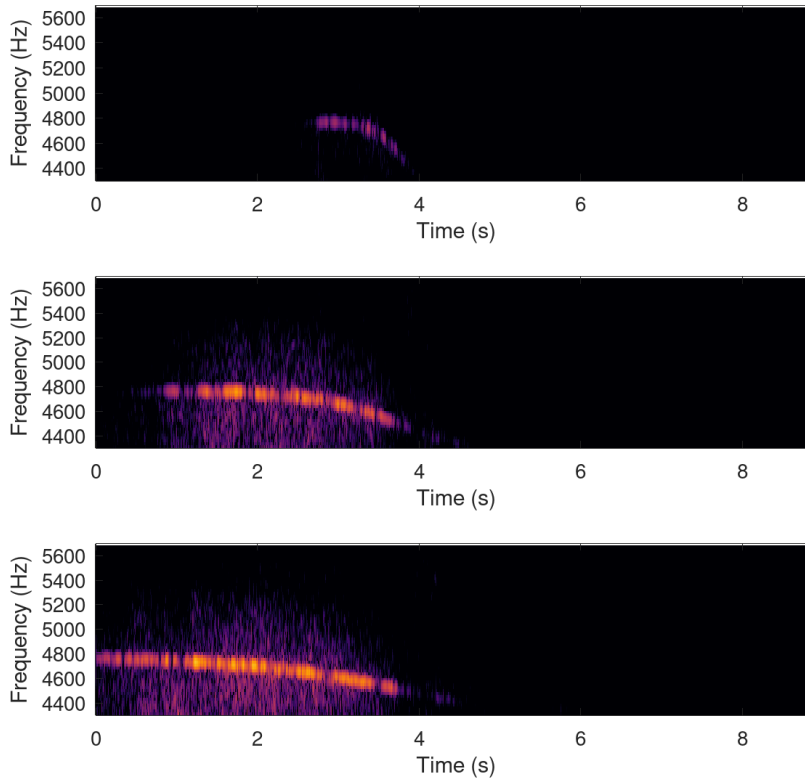


Abb. C-18: 303 03 DIC Messung 024 12

Anhang D Modelleingangsparameter für Gesamtanpassungswerte

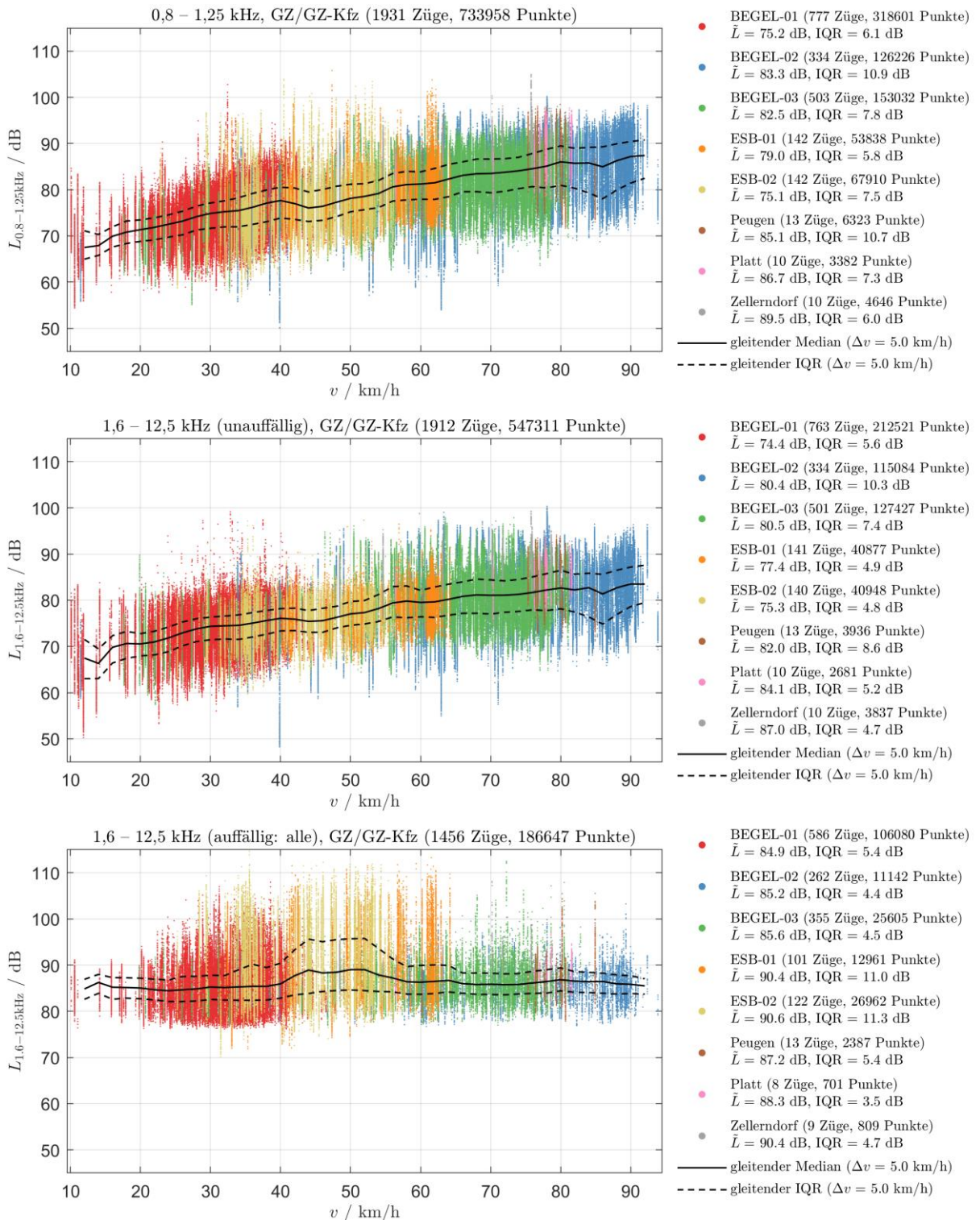


Abb. D-1: Modelleingangsparameter für Güterzüge der allgemeinen Klasse und Güterzüge für den KFZ-Transport: $L_{0,8-1,25\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte der Vorbeifahrten von Puffer-zu-Puffer (oben) und $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte ohne (Mitte) und mit (unten) akustischen Auffälligkeiten über der Geschwindigkeit v , inkl. gleitendem Median (schwarze durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarze strichlierte Linien)

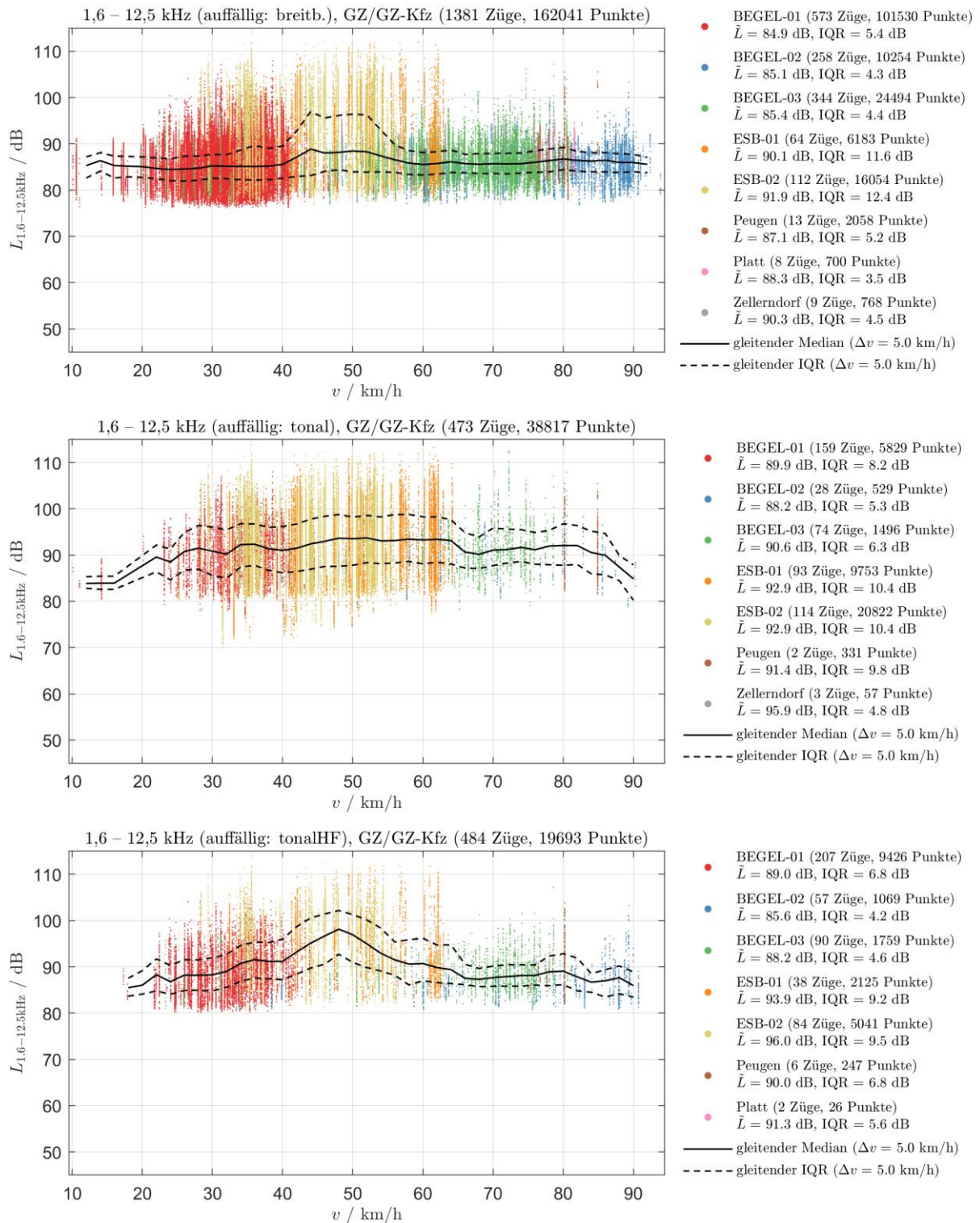


Abb. D-2: Modelleingangsparameter für Güterzüge der allgemeinen Klasse und Güterzüge für den KFZ-Transport: differenzierte Darstellung des Pegels $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für Zeitpunkte mit akustischen Auffälligkeiten (unterstes Diagramm in Abb. D-1) nach breitbandigen Auffälligkeiten (oben), tonalen Auffälligkeiten (Mitte) und hochfrequenten, tonal Auffälligkeiten (unten) inkl. gleitendem Median (schwarze durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarze strichlierte Linien)

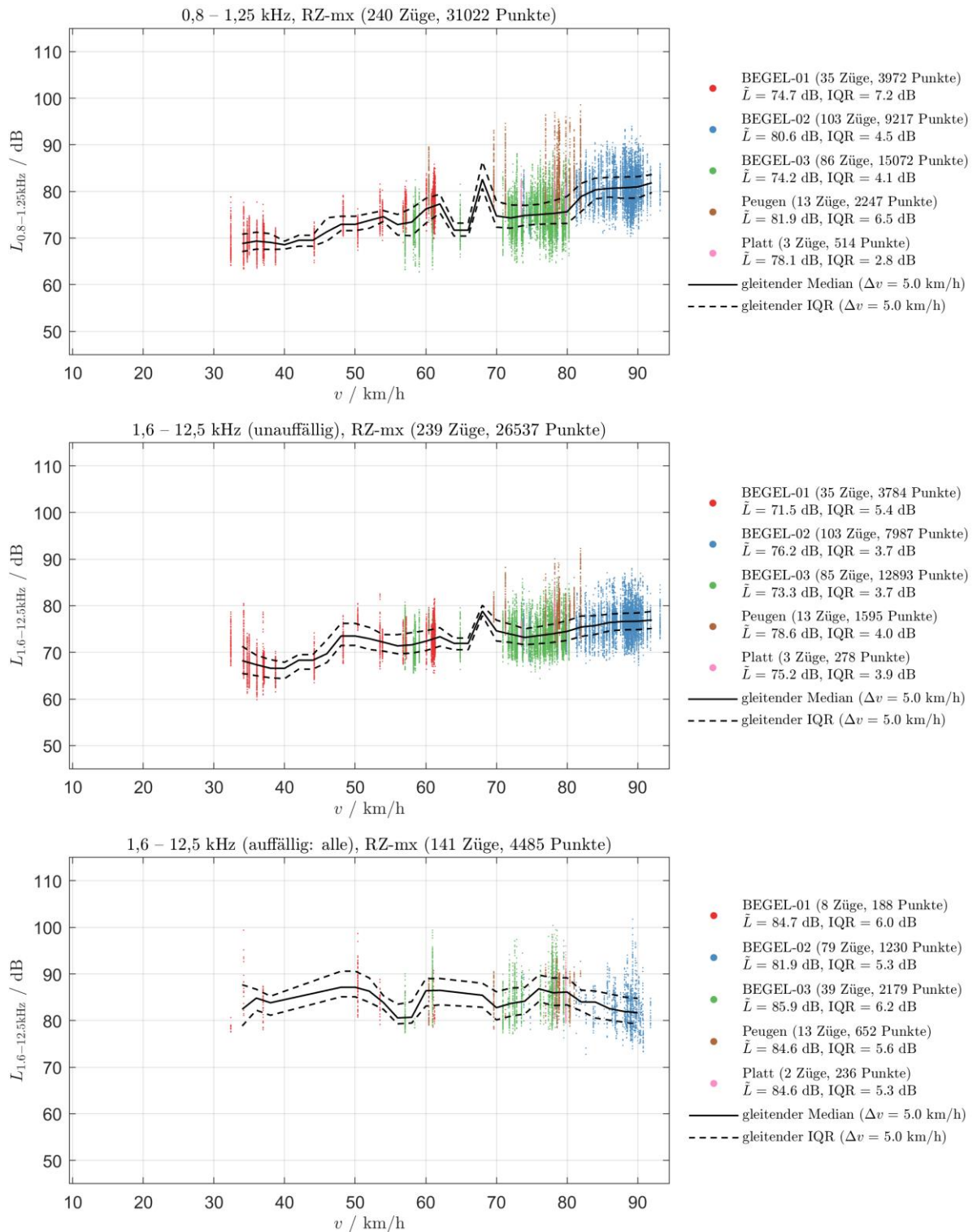


Abb. D-3: Modelleingangsparameter für Reisezüge der allgemeinen Klasse: $L_{0,8-1,25\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte der Vorbeifahrten von Puffer-zu-Puffer (oben) und $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte ohne (Mitte) und mit (unten) akustischen Auffälligkeiten über der Geschwindigkeit v , inkl. gleitendem Median (schwarze durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarze strichlierte Linien)

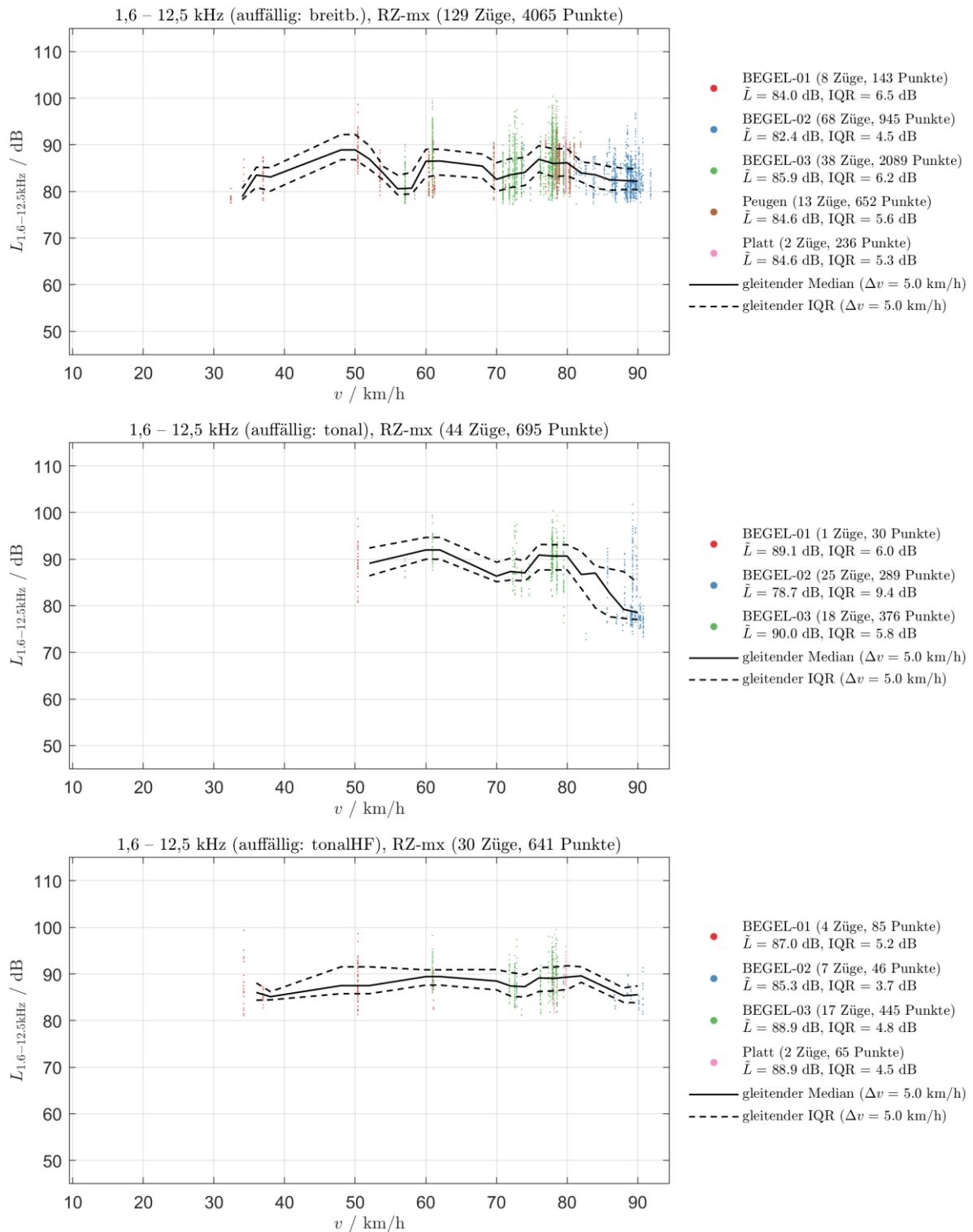


Abb. D-4: Modelleingangsparameter für Reisezüge der allgemeinen Klasse: differenzierte Darstellung des Pegels $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für Zeitpunkte mit akustischen Auffälligkeiten (unterstes Diagramm in Abb. D-3) nach breitbandigen Auffälligkeiten (oben), tonalen Auffälligkeiten (Mitte) und hochfrequenten, tonal Auffälligkeiten (unten) inkl. gleitendem Median (schwarze durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarze strichlierte Linien)

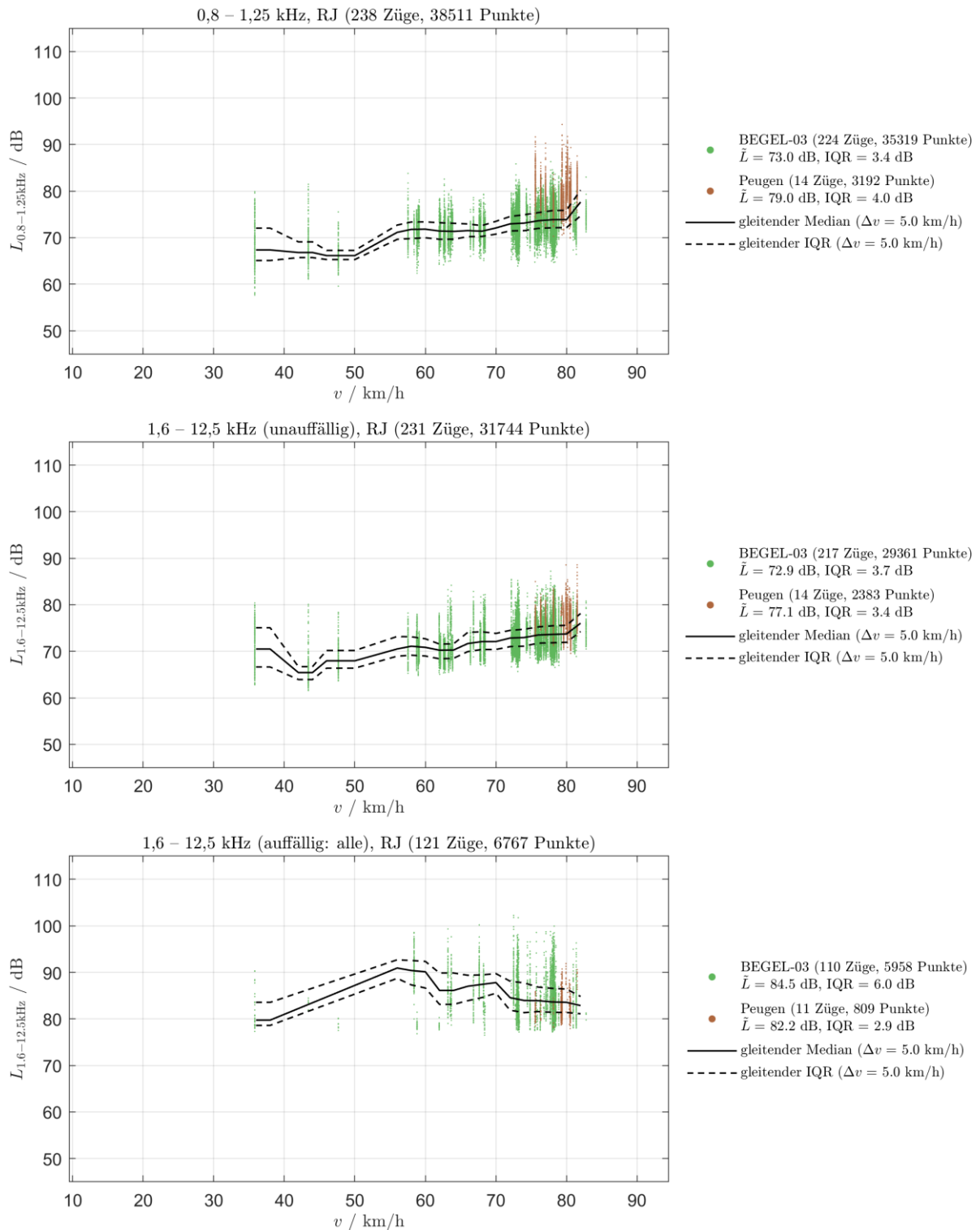


Abb. D-5: Modelleingangsparameter für Railjet-Reisezüge: $L_{0,8-1,25\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte der Vorbeifahrten von Puffer-zu-Puffer (oben) und $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte ohne (Mitte) und mit (unten) akustischen Auffälligkeiten über der Geschwindigkeit v , inkl. gleitendem Median (schwarze durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarze strichlierte Linien)

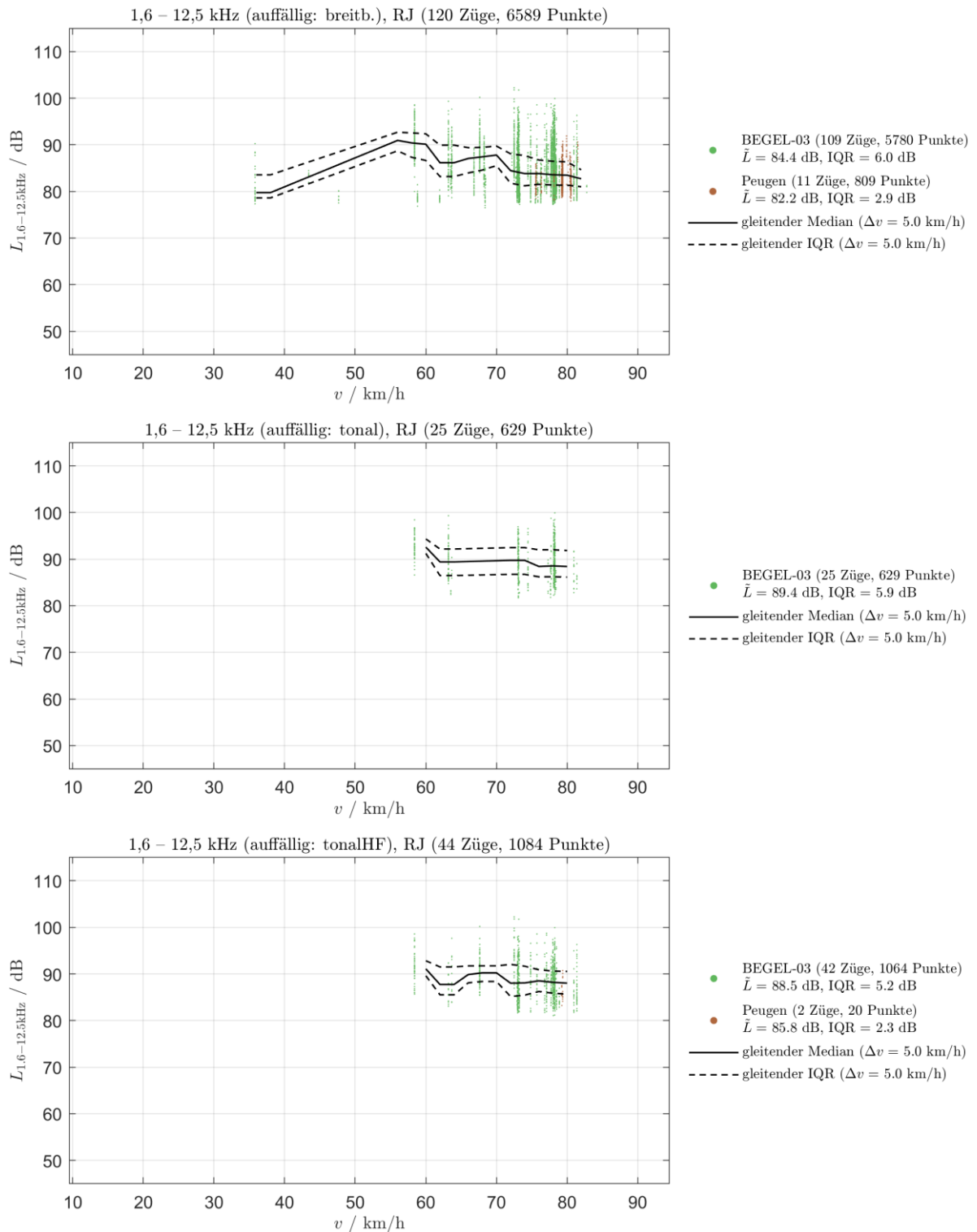


Abb. D-6: Modelleingangsparameter für Railjet-Reisezüge: differenzierte Darstellung des Pegels $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für Zeitpunkte mit akustischen Auffälligkeiten (unterstes Diagramm in Abb. D-6) nach breitbandigen Auffälligkeiten (oben), tonalen Auffälligkeiten (Mitte) und hochfrequenten, tonal Auffälligkeiten (unten) inkl. gleitendem Median (schwarze durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarze strichlierte Linien)

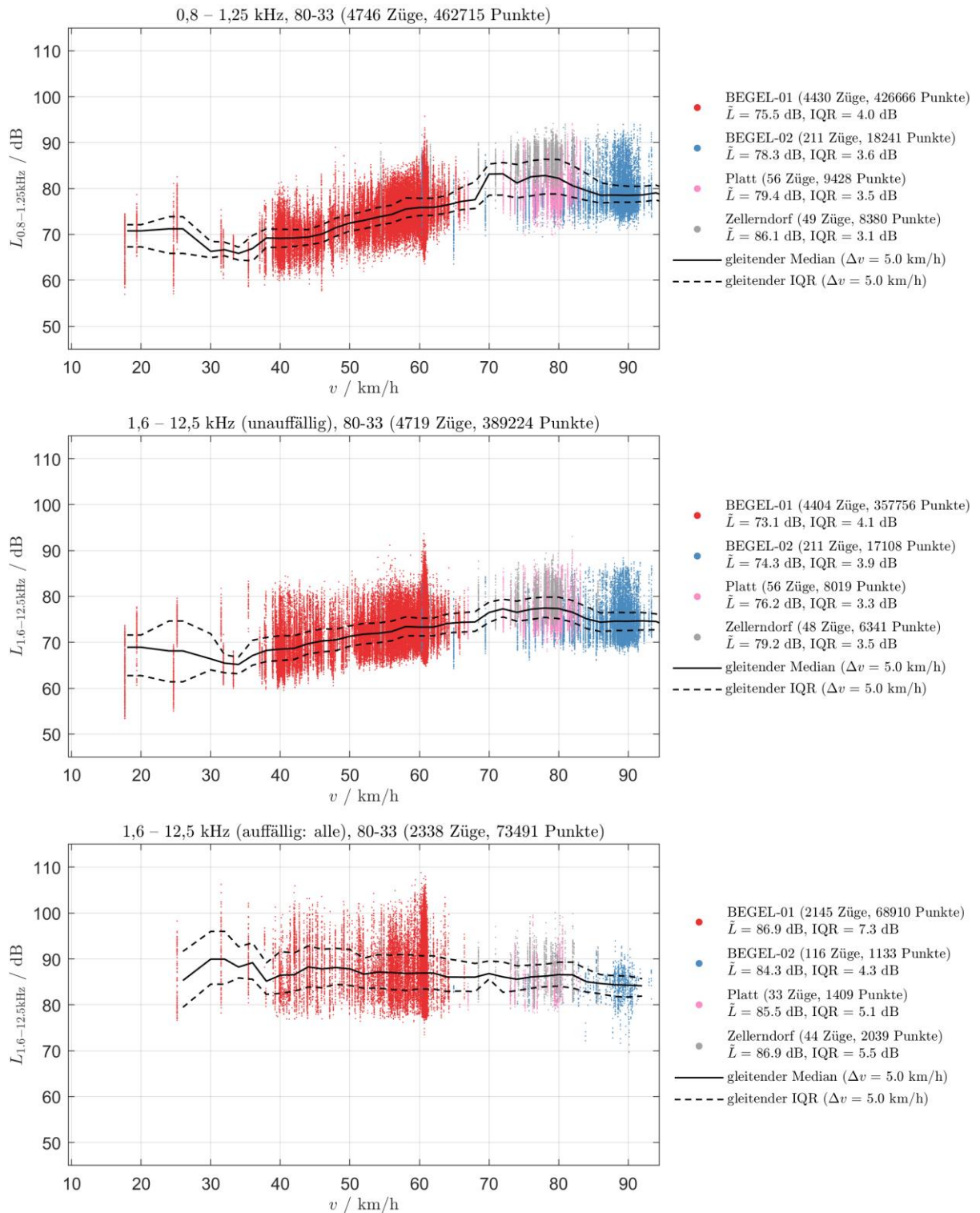


Abb. D-7: Modelleingangsparameter für Doppelstockreisezüge der Baureihe 80-33: $L_{0,8-1,25\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte der Vorbeifahrten von Puffer-zu-Puffer (oben) und $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte ohne (Mitte) und mit (unten) akustischen Auffälligkeiten über der Geschwindigkeit v , inkl. gleitendem Median (schwarze durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarze strichlierte Linien)

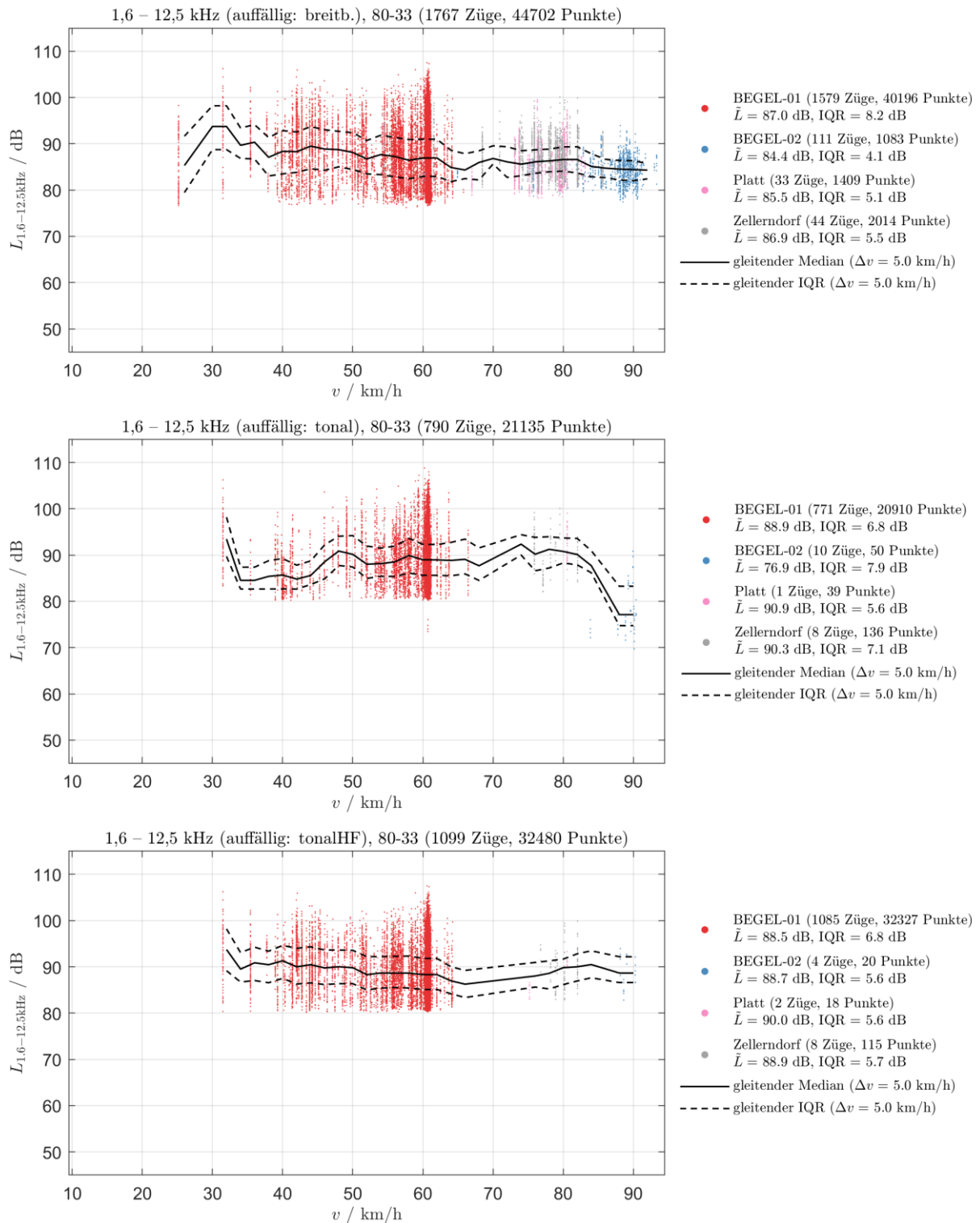


Abb. D-8: Modelleingangsparameter für Doppelstockreizeüge der Baureihe 80-33: differenzierte Darstellung des Pegels $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für Zeitpunkte mit akustischen Auffälligkeiten (unterstes Diagramm in Abb. D-7) nach breitbandigen Auffälligkeiten (oben), tonalen Auffälligkeiten (Mitte) und hochfrequenten, tonal Auffälligkeiten (unten) inkl. gleitendem Median (schwarze durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarze strichlierte Linien)

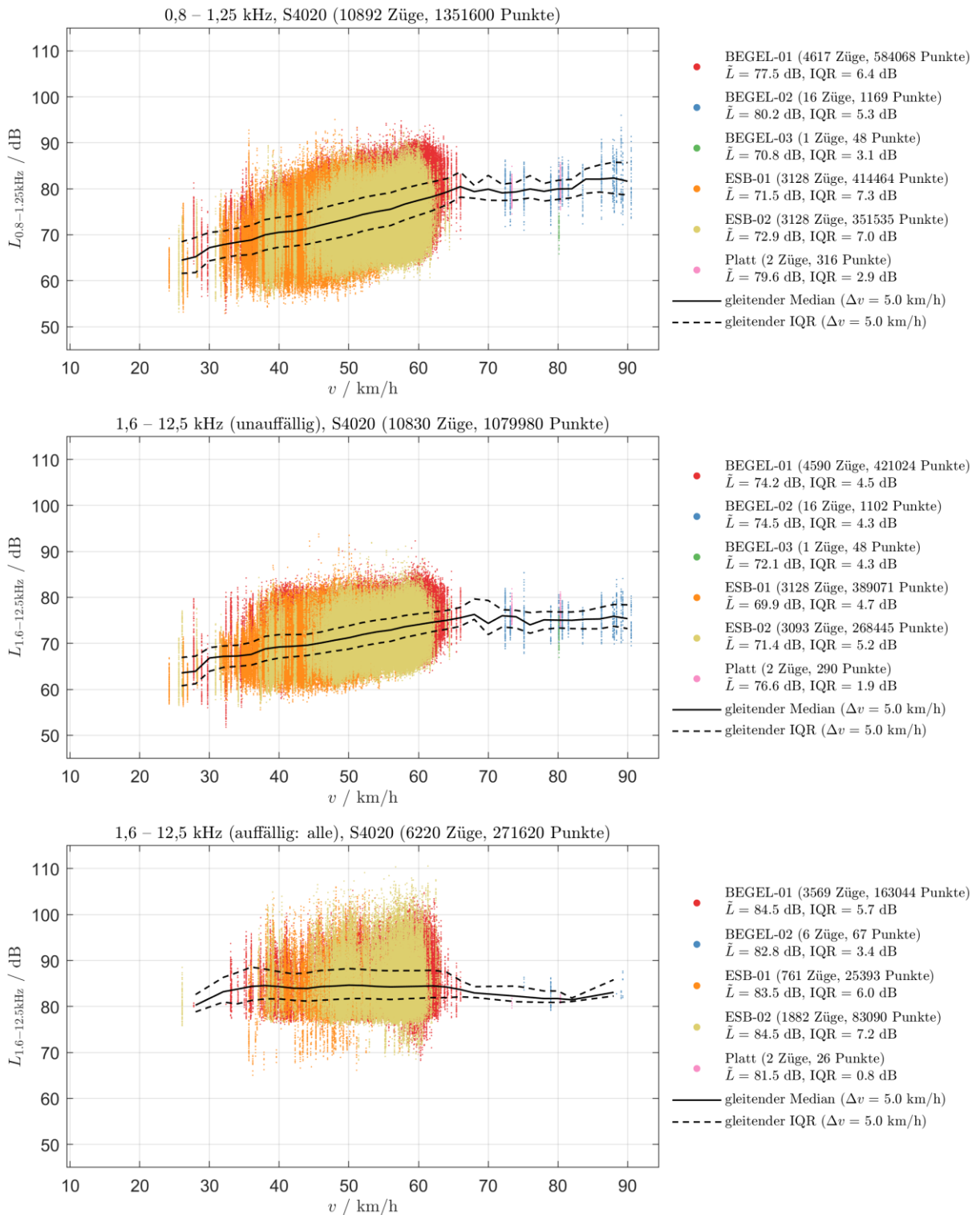


Abb. D-9: Modelleingangsparameter für Schnellbahnen der Baureihe 4020: $L_{0,8-1,25\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte der Vorbeifahrten von Puffer-zu-Puffer (oben) und $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte ohne (Mitte) und mit (unten) akustischen Auffälligkeiten über der Geschwindigkeit v , inkl. gleitendem Median (schwarze durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarze strichlierte Linien)

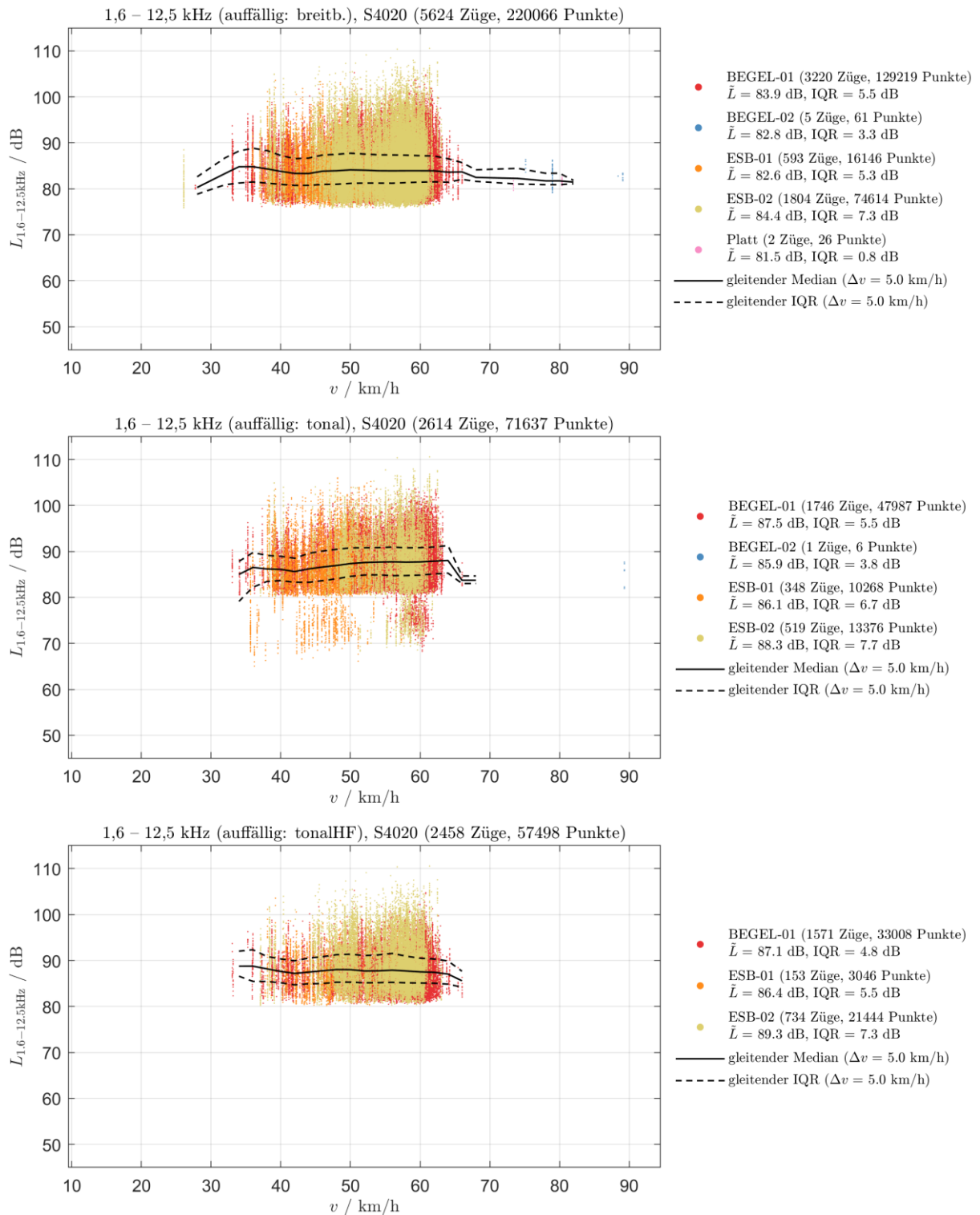


Abb. D-10: Modelleingangsparameter für Schnellbahnen der Baureihe 4020: differenzierte Darstellung des Pegels $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für Zeitpunkte mit akustischen Auffälligkeiten (unterstes Diagramm in Abb. D-9) nach breitbandigen Auffälligkeiten (oben), tonalen Auffälligkeiten (Mitte) und hochfrequenten, tonal Auffälligkeiten (unten) inkl. gleitendem Median (schwarze durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarze strichlierte Linien)

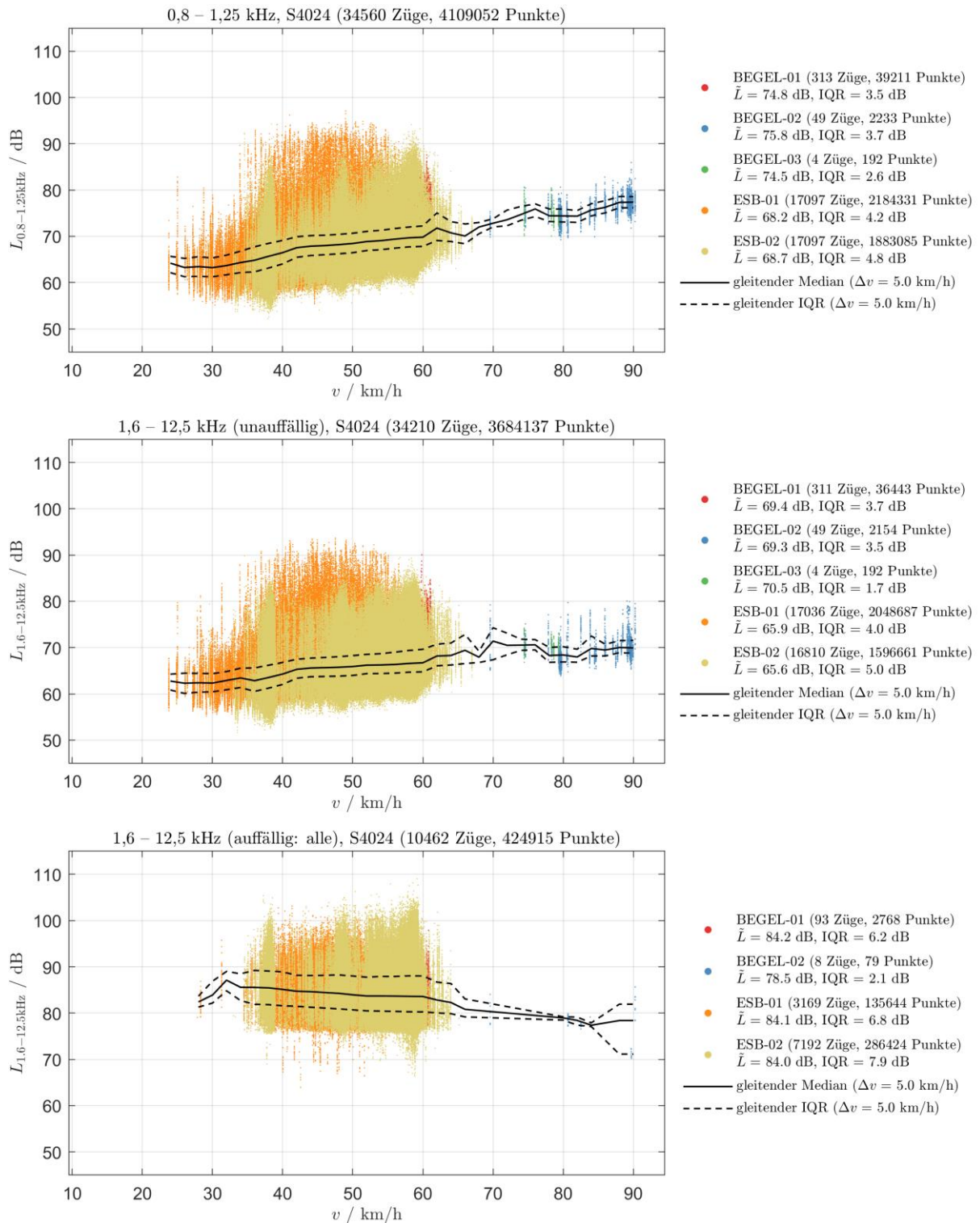


Abb. D-11: Modelleingangsparameter für Schnellbahnen der Baureihe 4024: $L_{0,8-1,25\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte der Vorbeifahrten von Puffer-zu-Puffer (oben) und $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für alle Zeitpunkte ohne (Mitte) und mit (unten) akustischen Auffälligkeiten über der Geschwindigkeit v , inkl. gleitendem Median (schwarze durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarze strichlierte Linien)

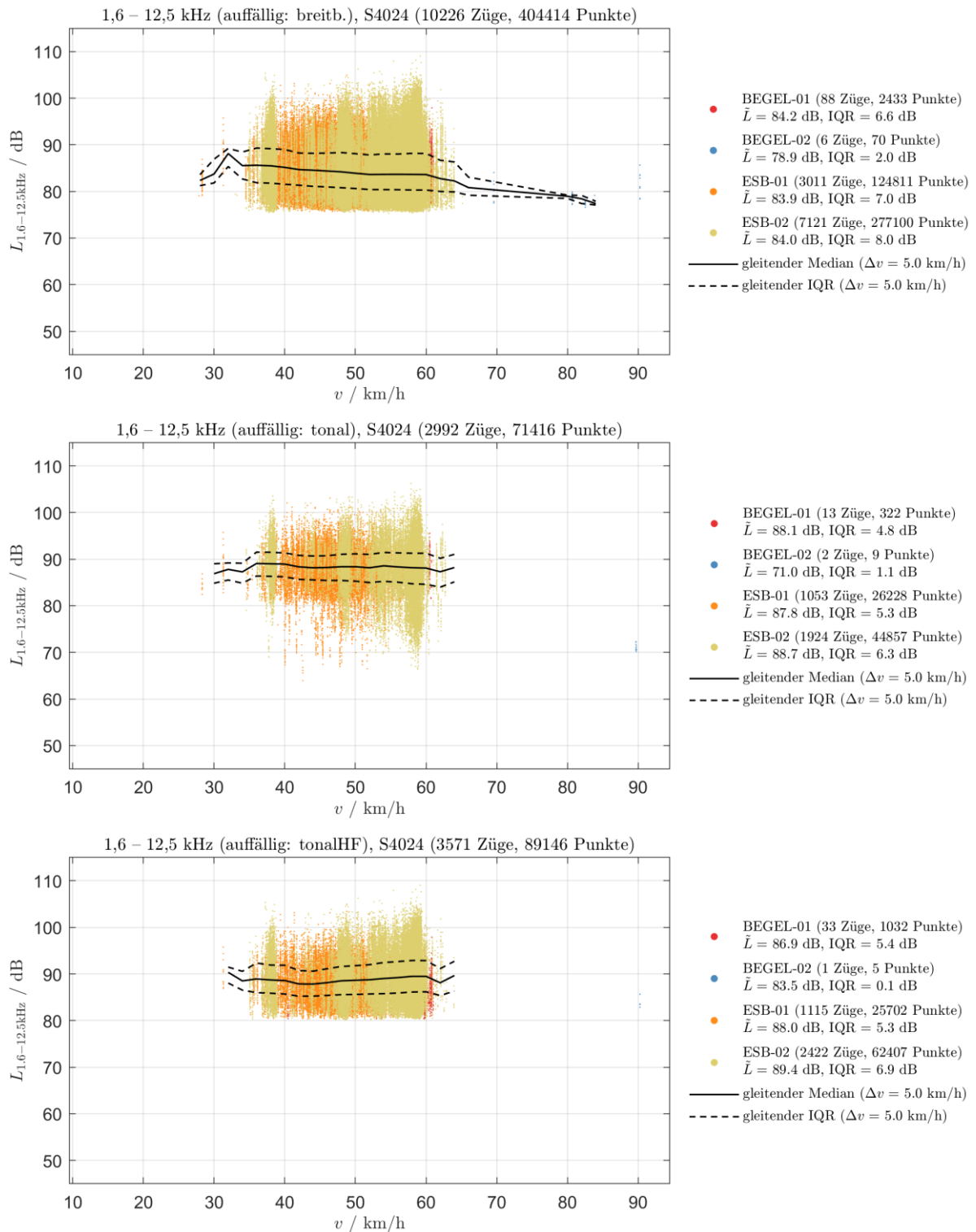


Abb. D-12: Modelleingangsparameter für Schnellbahnen der Baureihe 4024: differenzierte Darstellung des Pegels $L_{1,6-12,5\text{kHz}}$ für Zeitpunkte mit akustischen Auffälligkeiten (unterstes Diagramm in Abb. D-11) nach breitbandigen Auffälligkeiten (oben), tonalen Auffälligkeiten (Mitte) und hochfrequenten, tonal Auffälligkeiten (unten) inkl. gleitendem Median (schwarze durchgezogene Linie) und oberen bzw. unteren Quartil (schwarze strichlierte Linien)

Anhang E Verteilungen der zugbezogenen Gesamtanpassungswerte

E.1 Güterzüge (allgemeine Klasse und für den KFZ-Transport)

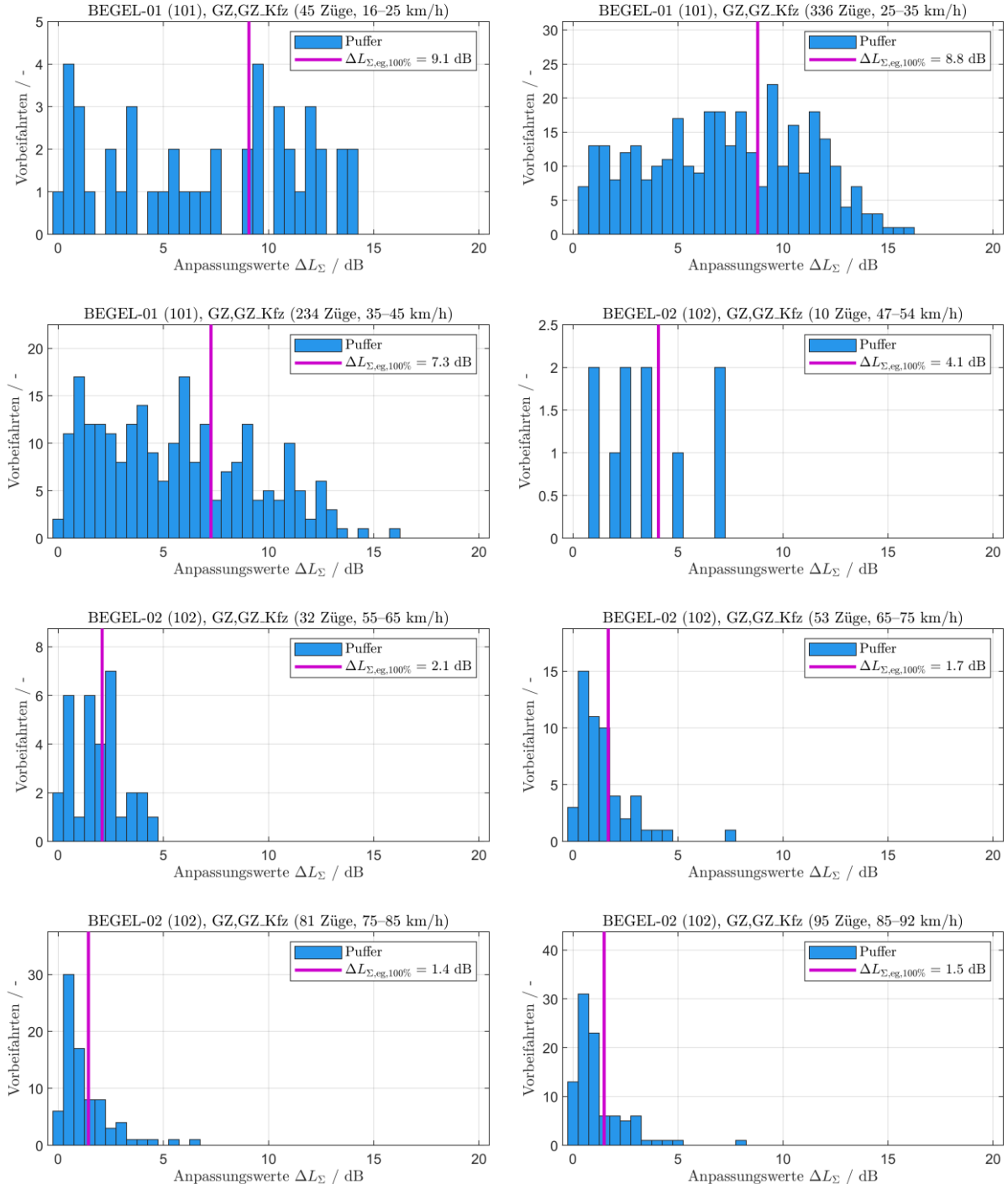


Abb. E-1: Verteilungen der zugbezogenen Anpassungswerte von Güterzügen der allgemeinen Klasse und für den KFZ-Transport inkl. energetischem Mittelwert $\Delta L_{\Sigma, eg}$ für verschiedene Messbögen und Geschwindigkeitsklassen

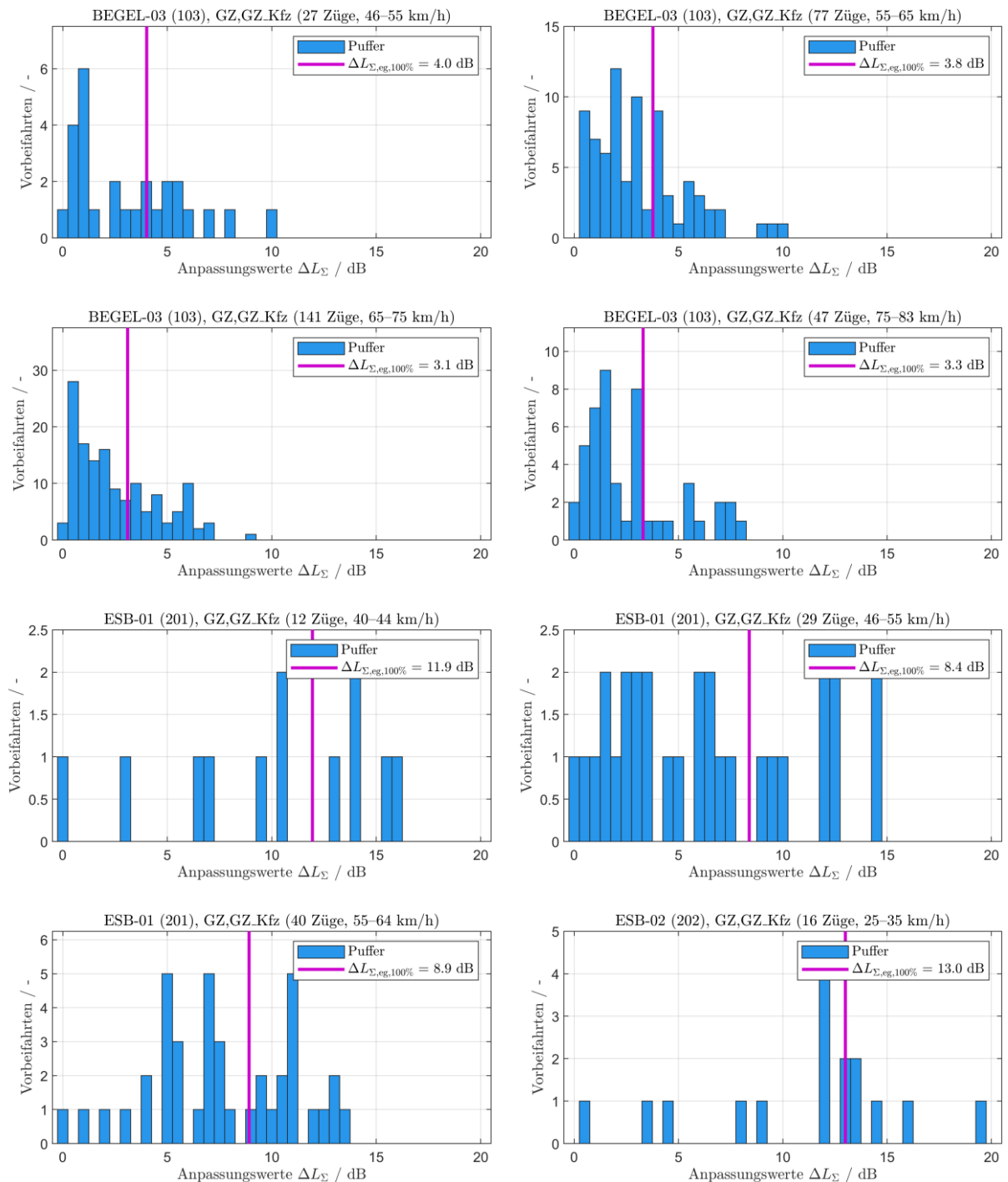


Abb. E-2: Verteilungen der zugbezogenen Anpassungswerte von Güterzügen der allgemeinen Klasse und für den KFZ-Transport inkl. energetischem Mittelwert $\Delta L_{\Sigma, eg}$ für verschiedene Messbögen und Geschwindigkeitsklassen

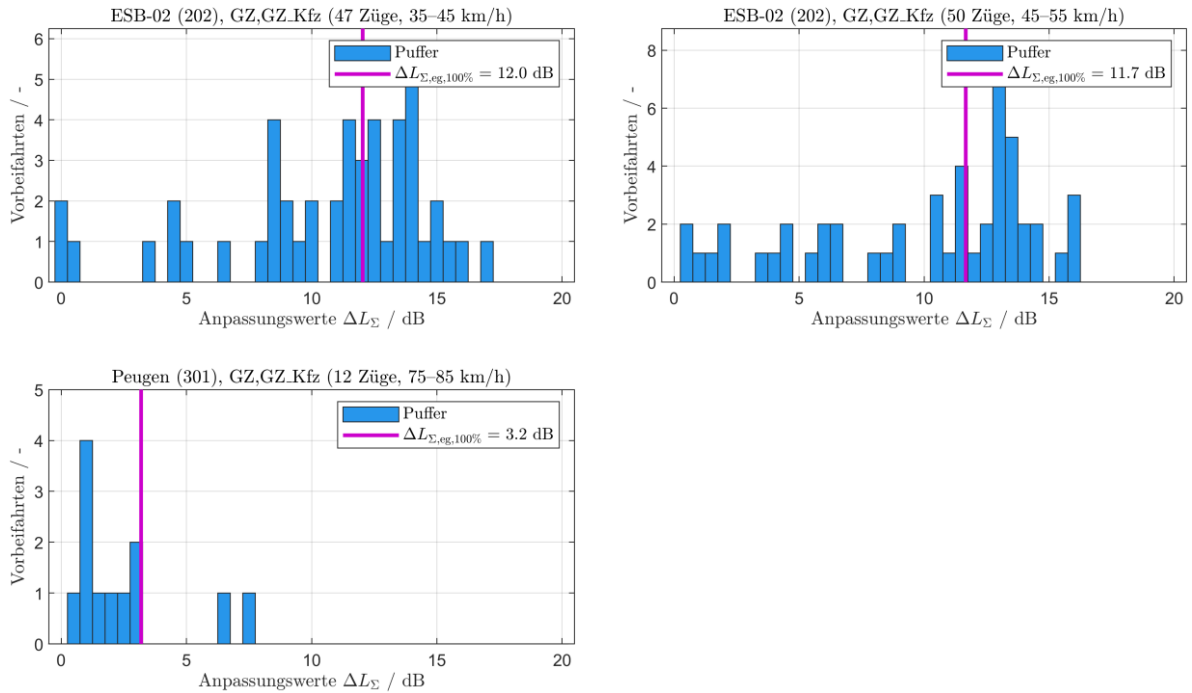


Abb. E-3: Verteilungen der zugbezogenen Anpassungswerte von Güterzügen der allgemeinen Klasse und für den KFZ-Transport inkl. energetischem Mittelwert $\Delta L_{\Sigma,eg}$ für verschiedene Messbögen und Geschwindigkeitsklassen

E.2 Reisezüge (allgemeine Klasse)

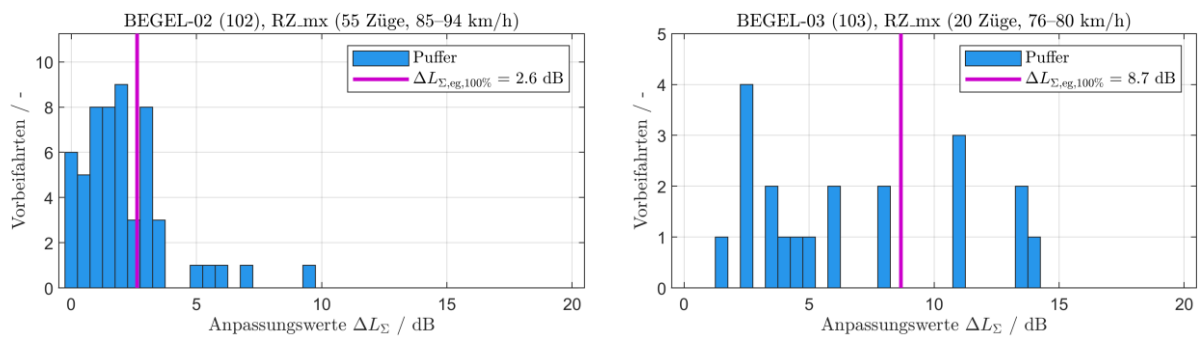


Abb. E-4: Verteilungen der zugbezogenen Anpassungswerte von Reisezügen der allgemeinen Klasse inkl. energetischem Mittelwert $\Delta L_{\Sigma,eg}$ für verschiedene Messbögen und Geschwindigkeitsklassen

E.3 Railjet Reisezüge

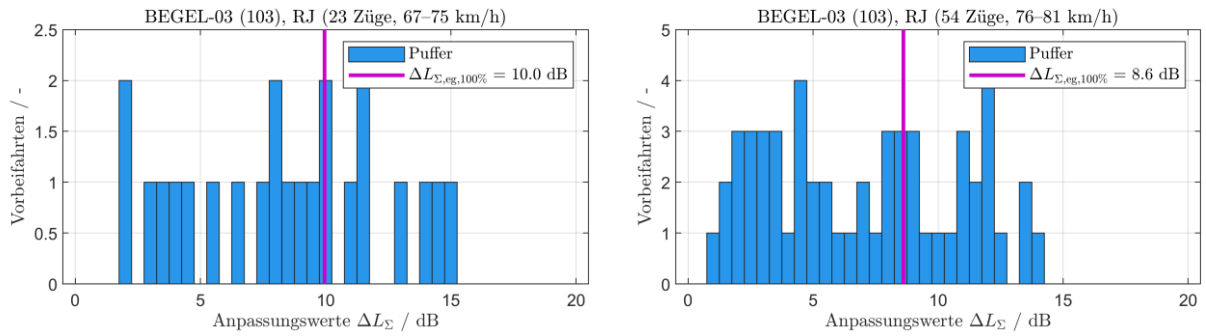


Abb. E-5: Verteilungen der zugbezogenen Anpassungswerte von Railjet Reisezügen inkl. energetischem Mittelwert $\Delta L_{\Sigma, eg}$ für verschiedene Messbögen und Geschwindigkeitsklassen

E.4 Regionalzüge der Baureihe 80-33

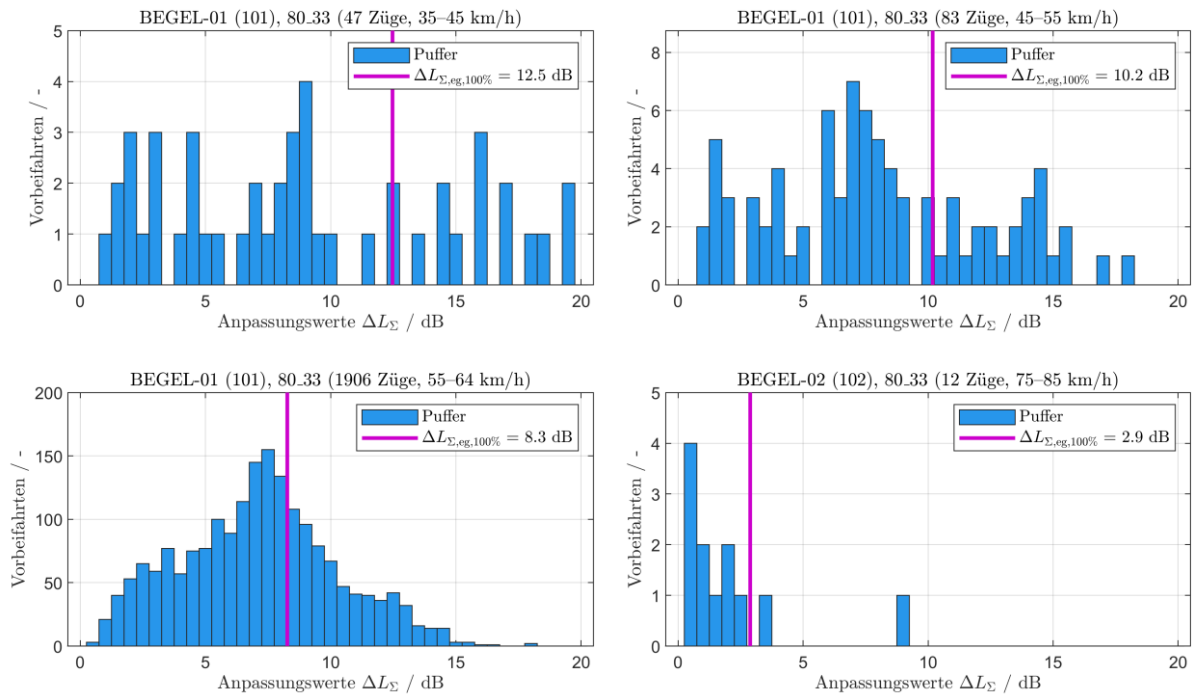


Abb. E-6: Verteilungen der zugbezogenen Anpassungswerte von Regionalzügen der Baureihe 80-33 inkl. energetischem Mittelwert $\Delta L_{\Sigma, eg}$ für verschiedene Messbögen und Geschwindigkeitsklassen

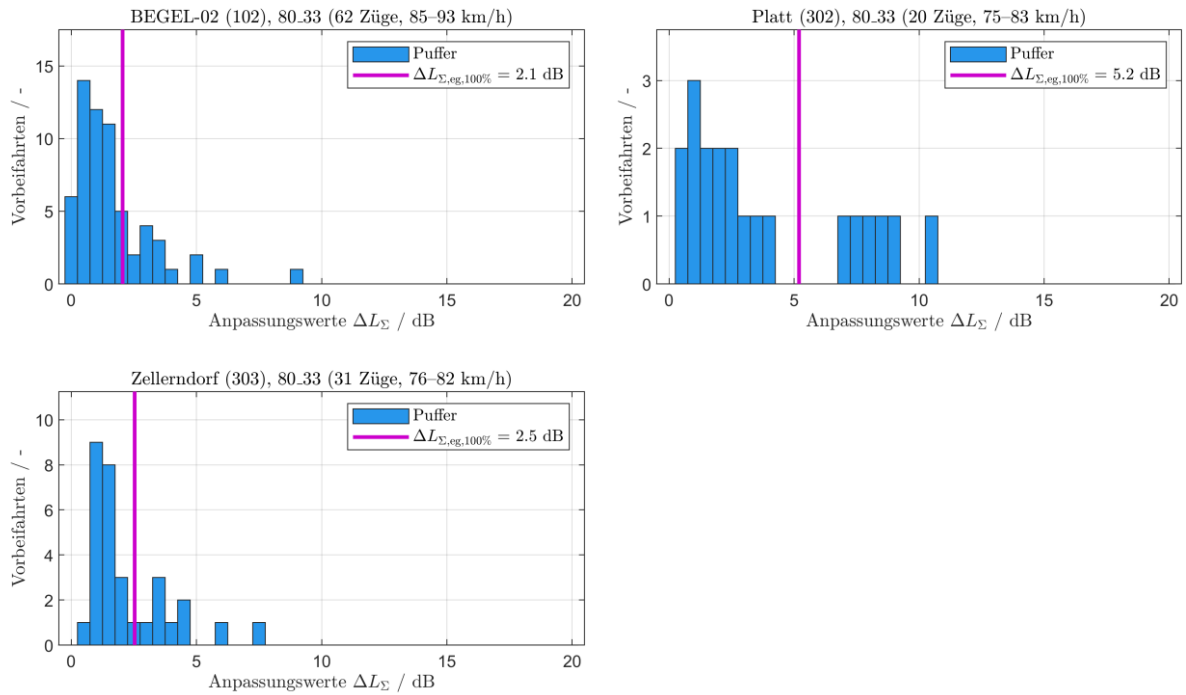


Abb. E-7: Verteilungen der zugbezogenen Anpassungswerte von Regionalzügen der Baureihe 80-33 inkl. energetischem Mittelwert $\Delta L_{\Sigma, eg}$ für verschiedene Messbögen und Geschwindigkeitsklassen

E.5 Schnellbahnen der Baureihe 4020

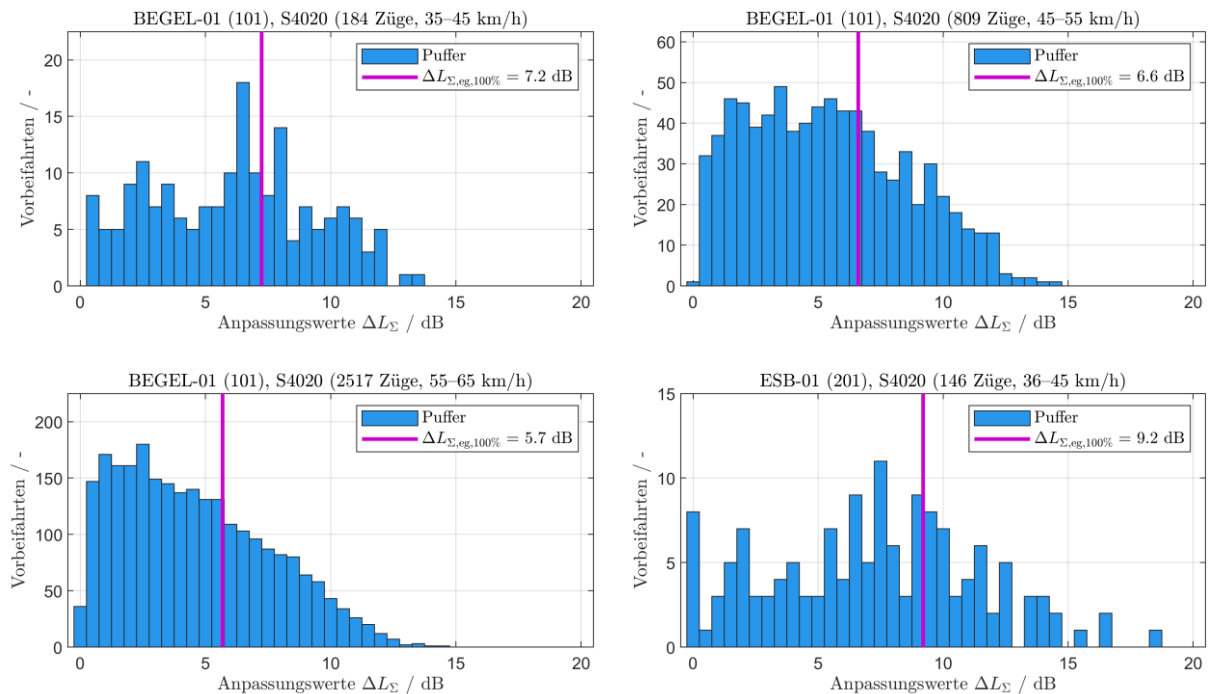


Abb. E-8: Verteilungen der zugbezogenen Anpassungswerte von Schnellbahnen der Baureihe 4020 inkl. energetischem Mittelwert $\Delta L_{\Sigma, eg}$ für verschiedene Messbögen und Geschwindigkeitsklassen

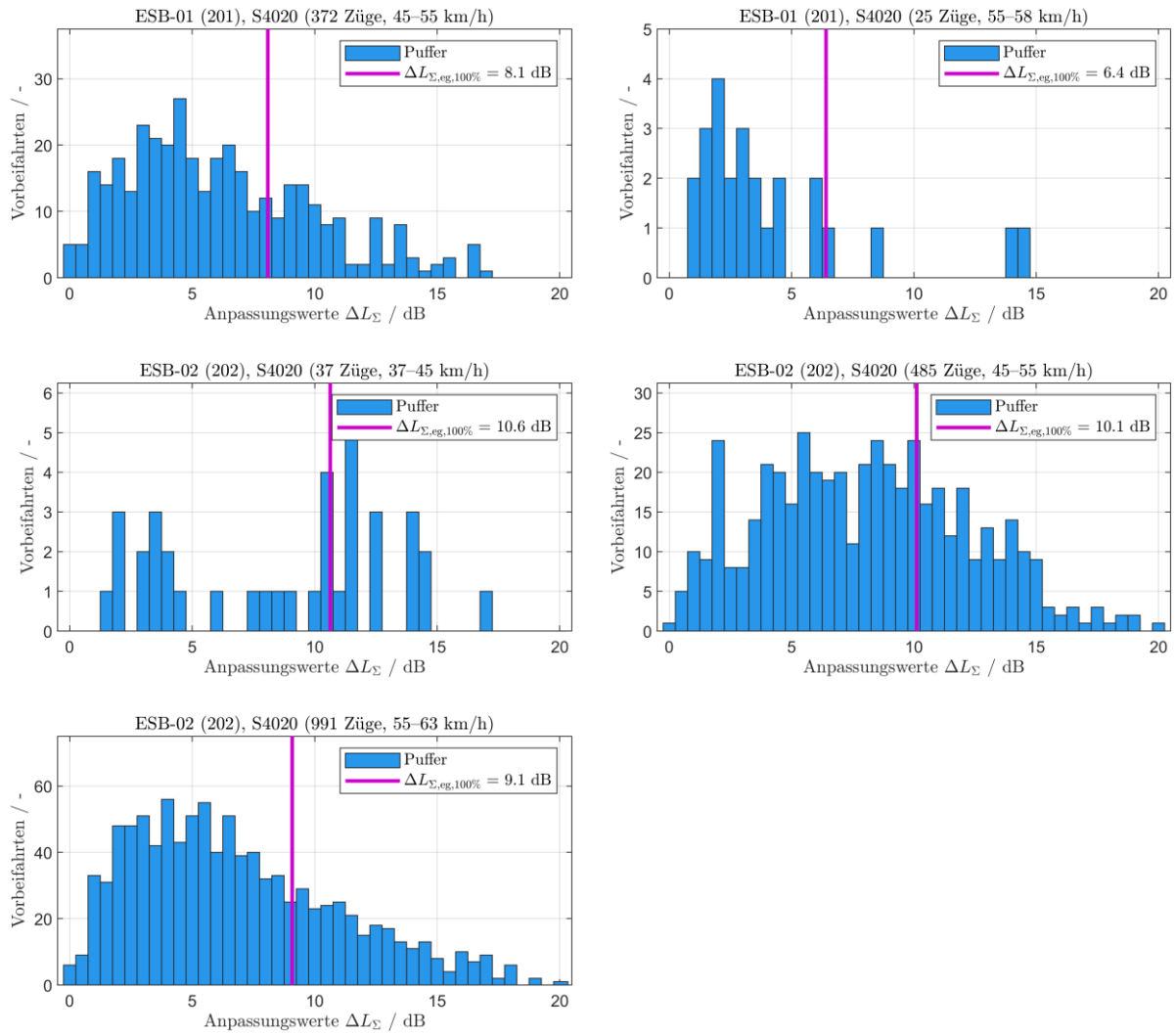


Abb. E-9: Verteilungen der zugbezogenen Anpassungswerte von Schnellbahnen der Baureihe 4020 inkl. energetischem Mittelwert $\Delta L_{\Sigma, eg}$ für verschiedene Messbögen und Geschwindigkeitsklassen

E.6 Schnellbahnen der Baureihe 4024

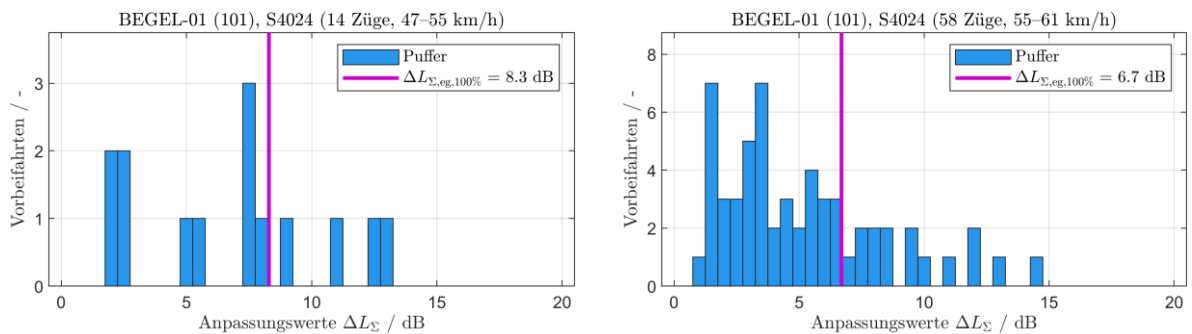


Abb. E-10: Verteilungen der zugbezogenen Anpassungswerte von Schnellbahnen der Baureihe 4024 inkl. energetischem Mittelwert $\Delta L_{\Sigma, eg}$ für verschiedene Messbögen und Geschwindigkeitsklassen

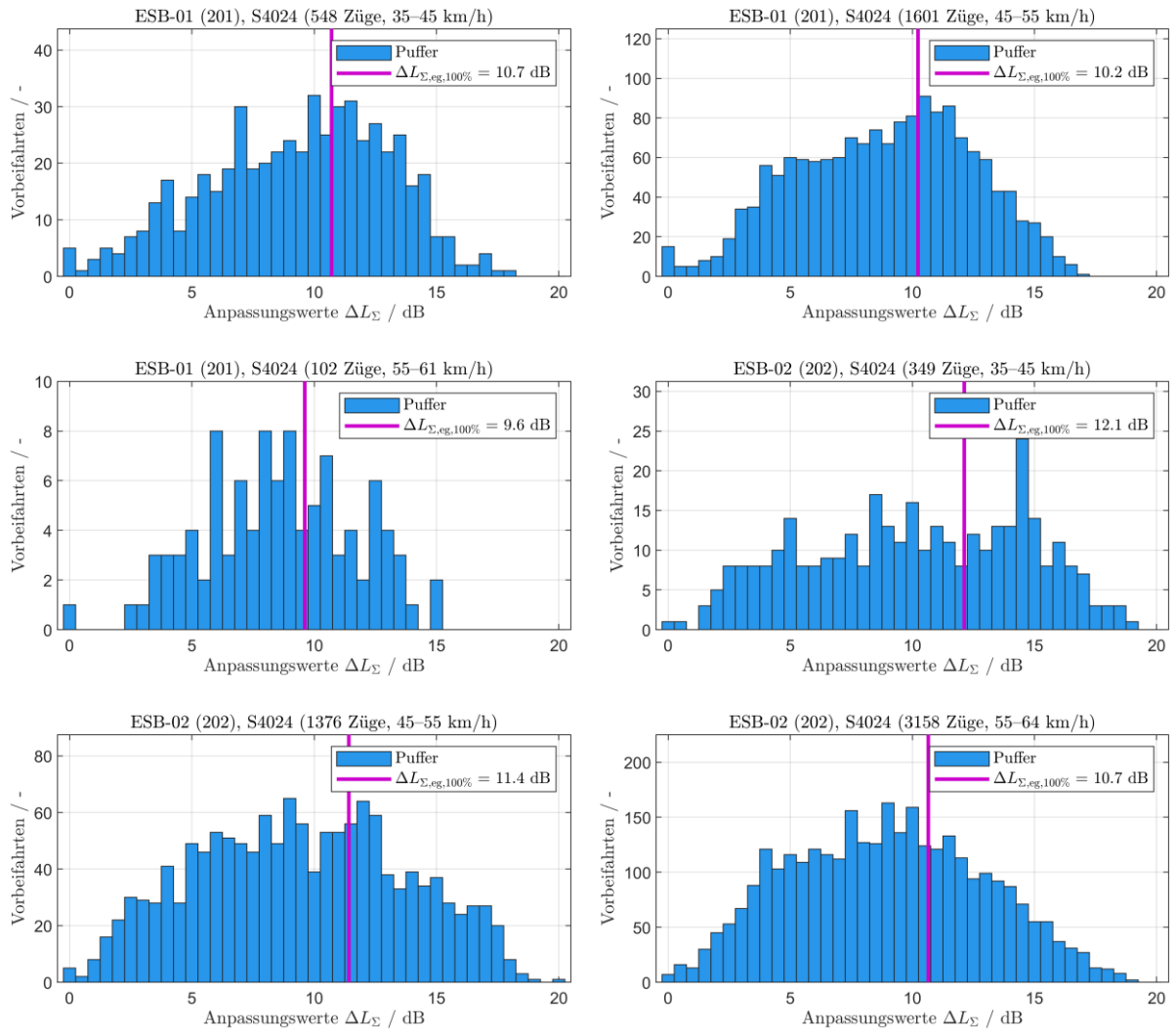


Abb. E-11 Verteilungen der zugbezogenen Anpassungswerte von Schnellbahnen der Baureihe 4024 inkl. energetischem Mittelwert $\Delta L_{\Sigma, eg}$ für verschiedene Messbögen und Geschwindigkeitsklassen