

Lärmarme Rumpelstreifen LARS

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2014
(VIF2014)

November 2017



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

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



ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
A - 1020 Wien



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



Für den Inhalt verantwortlich:

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



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



ABF Straßensanierungs GmbH
Straniakstraße 1
A-5020 Salzburg/Kasern



Programmmanagement:

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



Lärmarme Rumpelstreifen LARS

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2014
(VIF2014)

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Dr. Christian Kaseß

Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Maly

Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Kluger-Eigl

Ernst Demmelmayr

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

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

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Ronald Blab

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Institut für Schallforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften

INHALTSVERZEICHNIS

0. EXECUTIVE SUMMARY	6
0.1. DEUTSCHE VERSION	6
0.2. ENGLISH VERSION	7
1. PROBLEMSTELLUNG UND LÖSUNGSANSATZ.....	9
2. TESTSTRECKE	13
2.1. AUSWAHL TESTSTRECKE.....	13
2.2. TESTFELD 1	13
2.3. TESTFELD 2	17
2.4. PROFILBESTIMMUNG DER RUMPELSTREIFEN	21
3. MESSUNGEN UND DATENVORAUSWERTUNGEN.....	25
3.1. TESTFAHRZEUGE.....	26
3.2. AUßENMESSUNGEN EINZELFUGEN.....	28
3.3. AUßENMESSUNGEN RUMPELSTREIFEN.....	30
3.4. INNENMESSUNGEN RUMPELSTREIFEN.....	35
3.5. AUFBEREITUNG DER MESSERGEBNISSE	38
4. SIMULATION AUßENGERÄUSCH.....	43
4.1. EMISSIONEN DER EINZELFUGE BEIM PKW	43
4.2. EMISSIONEN DER EINZELFUGE BEIM LKW	44
4.3. SIMULATION FAHRBAHN UND BÖSCHUNG	46
4.4. SYNTHESE EINER BEWEGTEN QUELLE	48
4.5. EINFLUSS DER FUGENGEOMETRIE	49
4.6. HOCHFREQUENTE ANTEILE.....	50
4.7. PEGELANPASSUNG AN REFERENZSTREIFEN	51
4.8. VERGLEICH MESSUNG-SYNTHESE.....	51
5. SIMULATION INNENGERÄUSCH.....	59
5.1. EINZELFUGENSIGNAL BEIM PKW	59
5.2. EINZELFUGENSIGNAL BEIM LKW	62
5.3. SYNTHESE	63
5.4. EINFLUSS DER FUGENGEOMETRIE	63
5.5. HOCHFREQUENTE ANTEILE.....	63
5.6. PEGELANPASSUNG AN REFERENZSTREIFEN	64
5.7. VERGLEICH MESSUNG-SYNTHESE.....	64

6. WAHRNEHMUNGSTESTS	79
6.1. PROBANDENAUSWAHL.....	79
6.2. TESTDESIGN.....	79
6.3. SELEKTION DER STIMULI.....	82
6.4. TESTDURCHFÜHRUNG	84
6.5. DATENAUFBEREITUNG.....	89
7. ERGEBNISSE	92
7.1. SCHALL – AUßEN	92
7.2. SCHALL - INNEN	108
7.3. WAHRNEHMUNG AUßEN - LÄSTIGKEIT	118
7.4. WAHRNEHMUNG INNEN – DRINGLICHKEIT	126
7.5. REAKTIONSZEIT	132
7.6. BESCHLEUNIGUNG	137
7.7. FAHRERBEFRAGUNG	154
7.8. GEMEINSAME BETRACHTUNG.....	155
8. ERGEBNISÜBERSICHT	166
8.1. IMMISSION VS. INNENGERÄUSCH	166
8.2. EMISSION VS. INNENGERÄUSCH	168
8.3. VIBRATION AM LENKRAD.....	169
9. ZUSAMMENFASSUNG.....	171
9.1. ERKENNTNISSE.....	171
9.2. SCHLUSSFOLGERUNGEN	181
10. DANKSAGUNG.....	183
11. LITERATURVERZEICHNIS	184
ANHANG A TESTSTRECKE UND RUMPELSTREIFEN.....	188
ANHANG B MANUELLE SEGMENTIERUNG DER INNENRAUMSIGNALS.....	193
ANHANG C WAHRNEHMUNGSTEST INSTRUKTIONEN.....	200
ANHANG D FAHRERBEFRAGUNG	203

0. EXECUTIVE SUMMARY

0.1. Deutsche Version

Im Augenblick ist die Verwendung von Rumpelstreifen (rumble strips) aufgrund der erhöhten Lärmbelastung bei Überfahung im Nahbereich bebauter Gebiete problematisch, obwohl in Studien ihre positive Wirkung auf die Verkehrssicherheit bereits dokumentiert wurde. Ziel des Projektes ist es, den Lärm in der Umgebung abzuschwächen ohne den Warneffekt für den Lenker signifikant zu beeinflussen. Zu diesem Zweck wurden neben konventionellen Rumpelstreifen drei alternative Konzepte untersucht: kegelförmige Ausbildung der Fräsung, um den Schall unter das Fahrzeug zu leiten, quasizufällige Variation der Abstände der Fräsungen, um Tonhaltigkeit und damit die Lästigkeit zu senken und die zum Teil bereits verwendeten sinusförmig ausgeformten Rumpelstreifen, welche im Wesentlichen Vibrationen und nur sehr wenig Luftschall erzeugen sollen.

Zur Analyse wurde zunächst eine Teststrecke mit unterschiedlichen Fräsmustern erstellt und die Auswirkungen der Überfahrten mit einem PKW und einem LKW messtechnisch erfasst. Unter anderem wurden die Vibrationen (Fahrsitz und Lenkrad) und die Akustik im Fahrzeug, sowie die Schallabstrahlung in der Umgebung mit Mikrofon und einem Kunstkopf gemessen. Zudem wurden synthetische Geräusche erzeugt, mit deren Hilfe ein größerer Wertebereich abgedeckt werden konnte. Neben der Berechnung von A-gewichteten Schalldruckpegeln wurden Spektren und psychoakustische Parameter ermittelt, Wahrnehmungstest zur Bewertung der Lästigkeit der Schallimmissionen und der Dringlichkeit von Fahrzeuginnengeräuschen mit 16 Probanden durchgeführt, sowie Reaktionszeiten bestimmt. Zur Prüfung der durch die Auswertungen erlangten Erkenntnisse wurde die Teststrecke erweitert und erneut Überfahrten von PKW und LKW gemessen und analysiert.

Die Untersuchungen zeigten sehr deutlich, dass die Wirkung innen wie außen stark von den jeweiligen Fahrzeugeigenschaften und Rahmenbedingungen abhängig ist, weshalb eine Verallgemeinerung nur teilweise möglich ist. Während LKW und PKW ähnliche Emissionen (bei lauten Rumpelstreifen) aufweisen, sind Fahrzeuginnengeräusche und Vibrationen im LKW deutlich geringer. Speziell die Innengeräusche liegen zum Teil unterhalb der Wahrnehmungsschwelle. Zudem besteht eine große Abhängigkeit zwischen den Innen- und Außengeräuschen, sodass eine Senkung des Außenpegels in der Regel mit einer Senkung des Innengeräusches einhergeht – auch durch schräg gefräste Fugen konnte keine Richtwirkung nachgewiesen werden. Durch die zufällige Variation des Fugenabstandes

können tonale Komponenten in den Schallimmissionen zwar wirkungsvoll vermindert werden, gleichzeitig wurden jedoch – vermutlich durch die breitbandigere Anregung – deutlich höhere Schalldruckpegel hervorgerufen, wodurch etwaige positive Effekte in der Lästigkeit vermindert werden. Rumpelstreifen mit sinusförmigen Längsprofil entsprachen hingegen bei ausreichend großer Wellenlänge den Erwartungen: Verminderung der akustischen Schallabstrahlung, während bei entsprechender Frästiefe die Vibrationen am Lenkrad größtenteils beibehalten werden. Allerdings muss für deren Einsatz erst abgewogen werden, inwieweit die aufmerksamkeitssteigernde Wirkung bei Entfall der akustischen Komponente bestehen bleibt.

0.2. English Version

Rumble strips have been shown to have a positive effect on traffic safety. Unfortunately, the use of rumble strips in the close vicinity of populated areas is problematic due to the increased noise burden. The aim of the project LARS was to find rumble strip designs that cause less noise in the environment without significantly affecting the alerting effect inside the vehicle. For this purpose, a number of conventional designs as well as three alternative concepts were investigated: conical grooves to guide the noise under the car, pseudo-random groove spacing to reduce tonality and thus annoyance, as well as sinusoidal depth profiles which should produce mostly vibration and only little noise and which are already used in practice.

To achieve this aim, a test track was established covering a range of different milling patterns in order to measure the effects of rumble strips for a car and a commercial vehicle running over them. Acoustic measurements using microphones and a head-and-torso-simulator were done inside the vehicle as well as in the surroundings of the track. Furthermore, the vibration of the steering wheel and the driver seat were measured. In addition to the A-weighted sound pressure level, spectra and different psychoacoustical parameters were determined.

Perception tests with 16 listeners were performed where the annoyance of the immissions as well as the urgency and reaction times for the sounds generated in the interior were determined also using synthetic stimuli to cover a larger range of rumble strip designs. For validation purposes a further test track was established, measured, and the results analyzed. The results show that the effect of the rumble strips inside as well as outside of the vehicle heavily depends on the properties of the vehicle, making general statements about the effect of the designs difficult. While in the surroundings (for loud rumble strips) the commercial vehicle and the car produce similar emissions, in the interior the increase of noise and

vibration is considerably lower inside the commercial vehicle. In particular the acoustic effects sometimes are not even perceptible. In addition, the noise levels inside and outside of the vehicle depend on each other to a large degree, thus typically resulting in a diminished effect in the interior when the emission is reduced. Conical grooves seem to behave similar to rumble strips with conventional design. Although, randomized milling patterns did reduce the tonality of the noise, higher noise pressure levels probably caused by the wide band excitation counteracted potentially positive effects. Sinusoidal rumble strips with longer wave lengths essentially had the expected effects: reduction in the noise while essentially keeping up the vibration levels. However, the use of such patterns requires careful consideration whether the alerting effect is still given when the acoustic warning signal disappears or is strongly diminished.

1. PROBLEMSTELLUNG UND LÖSUNGSANSATZ

Zur Erhöhung der Sicherheit auf Straßen werden hauptsächlich auf Autobahnen, vor Tunnelportalen und in unfallgefährdeten Bereichen Rumpelstreifen entlang der Fahrbahn angebracht, um beim Abkommen vom Fahrstreifen die Aufmerksamkeit von Fahrzeuglenkern zu erhöhen oder sie im Falle von Sekundenschlaf wachzurütteln [1]. Dabei wird neben Vibrationen zurzeit vorrangig auf einen akustischen Warnton gesetzt. Zu diesem Zweck werden Fräsungen im Asphalt oder Beton mit periodischem Muster durchgeführt. Für solche Muster gilt im Allgemeinen, dass kürzere Abstände und eine tiefere Fräsung eine bessere Wirkung im Sinne eines größeren Pegelausschlags erzielen [2] [3]. Das Problem, das sich dabei ergibt ist, dass dieser Warnton als penetranter Lärm in der Umgebung wahrgenommen wird, da einerseits eine beträchtliche Erhöhung des Schalldruckpegels erfolgen kann [4] und andererseits das tonale Geräusch selbst als unangenehm empfunden wird. Hinzu kommt noch, dass durch zahlreiche Obertöne das Geräusch eine akustische Schärfe aufweist, welche sich auf die empfundene Lästigkeit ebenfalls negativ auswirken kann. Dieser Wirkungszusammenhang bei Vorhandensein tonaler Komponenten zeigt sich auch in der Normung, bei der tonhaltige Geräusche mit Zuschlägen versehen werden [5] [6]. Rumpelstreifen werden zwar abseits der regulären Fahrstreifen installiert, sodass eine Befahrung nur sehr selten auftreten sollte. In der Praxis scheint die Zahl der Befahrungen deutlich höher zu liegen: beispielsweise berichtet Perillo [7], dass Fahrer von Lastkraftwagen Rumpelstreifen als akustische Orientierungshilfe bei schlechter Sicht verwenden.

Aufgrund des verursachten Lärms ist die Installation solcher Rumpelstreifen gerade in der Nähe von bewohnten Gebieten problematisch, da der Sicherheitsaspekt, der für die Einrichtung von Rumpelstreifen spricht, und das Erfordernis Lärmschutz zwei Gegenspieler sind. Der Schutz vor Lärm ist ein wesentliches Umweltziel und dient der Lebensqualität und der Erhaltung der Gesundheit von Anrainern. Die Weltgesundheitsorganisation (englisch World Health Organization, WHO) hat festgestellt, dass hohe Lärmpegel die Gesundheit beeinträchtigen und die Lebenserwartung reduzieren können. [8]

Sollen zukünftig Rumpelstreifen auch auf Straßenabschnitten realisiert werden, welche in der Nähe von bewohnten Gebieten liegen, so ist es erforderlich, die Belästigung von Anrainern zu reduzieren, die durch erhöhte Schallemissionen bei der Überfahrt von Fahrzeugen über Rumpelstreifen erzeugt wird. So wird mittlerweile auch ein Ansatz von Rumpelstreifen mit sinusförmigem Verlauf verfolgt (z.B. in den USA), durch welche nur niedere Frequenzbereiche angeregt werden. Der Umgebungspegel ist stark reduziert im Vergleich zu

herkömmlichen Rumpelstreifen [9] [10], wogegen die Vibrationen im Fahrzeug vergleichbar sind, wie aus Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) hervorgeht [10]. Auch Reifen können im Falle eines regelmäßigen Reifenprofils tonale Geräuschanteile beim Abrollen hervorrufen. Diese lästigen tonalen Geräusche wurden jedoch beseitigt, indem man den Abstand und die Breite der Blöcke über den Reifenumfang variiert. Auf diese Weise wird anstelle eines lästigen Tones ein Rauschen erzeugt. Ein ähnlicher Ansatz wird von manchen Herstellern für Rückwärtswarner an LKWs verfolgt (z.B. [11]). Auch hier wird der Ton durch ein Rauschsignal ersetzt, um den Warneffekt zu erhalten und gleichzeitig die Lärmbelästigung in der Umgebung zu reduzieren.

Unter Berücksichtigung dieser Entwicklungen widmet sich das vorliegende Forschungsprojekt der Fragestellung von lärmarmen Rumpelstreifen, indem folgende drei Ansätze näher untersucht werden:

- Reduzierung der Schallabstrahlung, indem der Schall unter das Fahrzeug gelenkt wird.
- Angenehmere Schallcharakteristik, indem das tonale Geräusch durch ein rauschartiges Geräusch ersetzt wird.
- Verminderung der Entstehung höherfrequenter Schallanteile durch sinusförmige Rumpelstreifen, welche nur Anregungen bei tiefen Frequenzen erzeugen. Bei diesem Ansatz dienen anstelle eines lauten Geräusches verstärkt Vibrationen dazu, die Aufmerksamkeit des Fahrers zu erhöhen.

Durch Auswahl und Verbesserung dieser Ansätze soll das Ergebnis des vorliegenden Forschungsvorhaben sein, die Aufmerksamkeit des Fahrers bei Überfahren eines Rumpelstreifen weiterhin zu erhöhen und ihn dadurch auf sein Fehlverhalten hinzuweisen, und dabei die Lärmbelästigung im Vergleich zu bisher in Österreich angewandten Fräsgeometrien zu senken.

Zu diesem Zweck werden Testmuster für die drei Konzepte erstellt, daraus ein numerisches Modell entwickelt und gemeinsam mit den Ergebnissen von Hörversuchen optimierte Fräsmuster abgeleitet. Die zwei vielversprechendsten Muster werden gefräst, vermessen und durch Vergleich die Erreichung der Ziele validiert (vgl. Abb. 1-1). Für eine solche Evaluierung der aufmerksamkeitssteigernden Wirkung sprunghaft ansteigender, pulshaltiger akustischer Signale, wie sie bei Überfahren von Rumpelstreifen entstehen, werden, wie auch bei ähnlich gelagerten Projekten üblich, Parameter wie die empfundene Dringlichkeit und die Reaktionszeit auf ein Schallereignis erhoben. Dabei gibt es verschiedene Faktoren die bereits als wichtig identifiziert wurden, z.B. wird eine höhere Grundfrequenz der Pulsfolge (engere Abstände) als dringlicher empfunden [12] und auch die Reaktionszeit wird durch

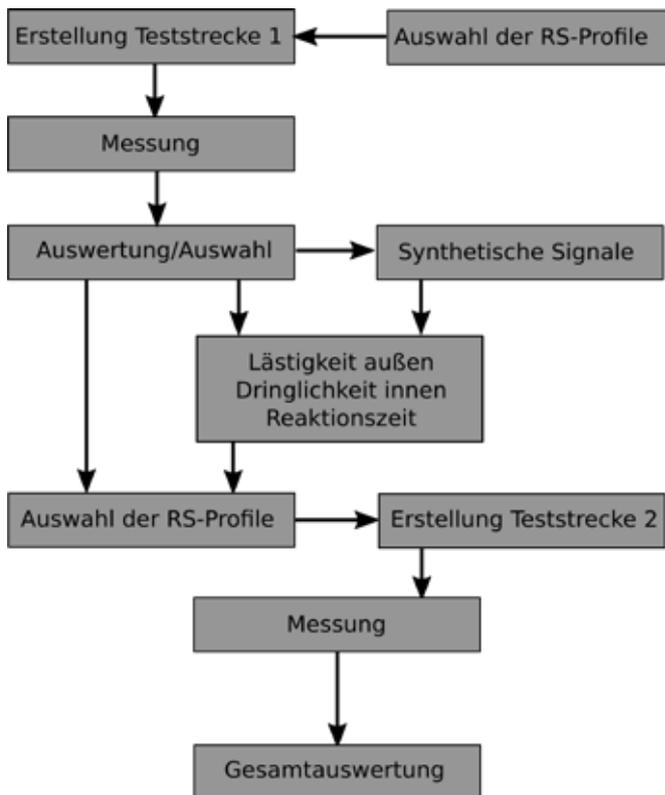


Abb. 1-1: Überblick über den Ablauf

eine höhere Pulsfrequenz niedriger [13] [14]. Ebenso kann eine gewisse Unregelmäßigkeit der Pulsfolge die Reaktionsgeschwindigkeit erhöhen [13]. Bezüglich einer Verbesserung der Wirkung akustischer Signale durch Kopplung mit Vibration gibt es allerdings widersprüchliche Ergebnisse [14].

In der Literatur bestehen bereits gewisse Richtwerte für die akustischen Warnsignale im Fahrzeuginnenen. So werden in [3] beispielsweise 3 - 8 dB für die Wahrnehmung des Geräusches und 10 dB für die Warnwirkung genannt, wobei jenseits von 15 dB die Wahrscheinlichkeit einer Schreckreaktion zunimmt. Gleichzeitig legen frühere Ergebnisse eine reduzierte Wirkung der Rumpelstreifen sowohl akustisch als auch taktil in Lastkraftwagen nahe [15] [16]. Insofern stellt sich die Frage, ob solche Ziele in einem PKW und einem LKW simultan erreicht werden können. Dementsprechend werden in vorliegendem Projekt diese zwei verschiedenen Fahrzeugtypen durch Einsatz sowohl eines PKWs als auch eines LKWs untersucht.

In Bezug auf den Projektumfang und die Projektziele ist jedoch folgendes festzuhalten:

- Die Untersuchung im Innenraum erfolgt auf Basis psychophysikalischer Parameter. Aufweckreaktionen werden in diesem Projekt hingegen nicht untersucht werden.

- Eine Beibehaltung der verkehrssicherheitstechnischen Wirkung kann letztendlich nur mittels Langzeitstudien der Unfallzahlen nachgewiesen werden. Ein dafür maßgeblicher Teilaspekt besteht in der wachrüttelnden Wirkung für den Lenker. Eine wesentliche Frage ist daher, ob tatsächlich diese Wirkung bei Veränderung der Fräsmuster erhalten und gleichzeitig ein Schutz der Umgebung vor Lärm erreicht werden kann. Es ist davon auszugehen, dass bei einer Verringerung des Schalldruckpegels außerhalb des Fahrzeuges eine gleichzeitige Beibehaltung des Innenraumpegels schwer erzielbar sein wird. Die Erhaltung der aufmerksamkeitssteigernden Wirkung kann grundsätzlich nur sichergestellt werden, indem die akustische Alarmwirkung nur geringfügig verschlechtert oder bei starkem Abfall der akustischen Alarmwirkung ein Ausgleich durch eine Erhöhung der Vibrationen gegeben ist.
- Aufgrund der Rahmenbedingungen wird in vorliegendem Projekt die aufmerksamkeitssteigernde Wirkung der Rumpelstreifen anhand ausgewählter, in Studien häufig verwendeter Parameter (z.B. Reaktionszeit, Intensität der Vibration beurteilt mit Hilfe standardisierter Bewertungsparameter) abgeschätzt. Sofern sich die Parameter im Vergleich zu den Eigenschaften des bisher eingesetzten Rumpelstreifentyps nur geringfügig verschlechtern, kann von einer vergleichbaren Wirkung ausgegangen und das damit verbundene Risiko einer Fehlabschätzung als gering eingestuft werden. Eine stärkere Veränderung der Interaktion zwischen akustischer und taktiler Wirkung, wie bei sinusförmig gefrästen Rumpelstreifen vermutet wird, bedarf einer multimodalen Untersuchung der Wahrnehmung, welche im Rahmen des Projekts jedoch nicht möglich ist.

2. TESTSTRECKE

Das vorliegende Projekt beinhaltete unter anderem die Auswahl, bauliche Herstellung und Messung unterschiedlicher Varianten von Rumpelstreifen auf einer eigens errichteten Teststrecke. Nach der Wahl eines geeigneten Streckenabschnitts auf dem Straßennetz der ASFINAG wurden 2015 als Basis für die weiteren Auswertungen mehrere Segmente von Rumpelstreifen erstellt und vermessen (Testfeld 1). Zur Verifizierung der gewonnenen Erkenntnisse wurden 2017 weitere Rumpelstreifenvarianten gefräst und hinsichtlich der akustischen Wirkung bzw. der Vibrationen geprüft (Testfeld 2).

2.1. Auswahl Teststrecke

In Abstimmung mit der ASFINAG wurde ein geeigneter Straßenabschnitt, d.h. ein möglichst langes gerades Straßenstück mit einem Pannestreifen auf dem die Fräsungen mit einer geringen Verkehrsbeeinträchtigung durchgeführt werden könnten, ausgesucht. Dabei musste besonders darauf geachtet werden, dass eine freie Schallausbreitung gewährleistet ist und sich damit keine Hindernisse wie Leitplanken oder Lärmschutzwände, Bewuchs, Schilder, etc. im Bereich der Teststrecke befinden. Zudem durfte der Höhenunterschied (Dammhöhe) zwischen Fahrbahnoberfläche und Umgebung nicht zu stark ausfallen, da Kunstkopfmessungen im Immissionspunkt in 25 m Entfernung in einer Höhe von 1,2 m über der Fahrbahnoberfläche vorgesehen waren und das eingesetzte Kunstkopfmesssystem nur Messungen in einer Höhe bis ca. 3,5 m über dem Gelände erlaubt. Da die ordnungsgemäße Durchführung der Lärmessungen sehr stark von der Wetterlage abhängig ist, sollte die Teststrecke nicht allzu weit von Wien entfernt sein, um möglichst flexibel bei der Messdurchführung zu bleiben. Durch Sichtung von Luftbilddaufnahmen wurden einige Straßenabschnitte ausgesucht, welche dann vor Ort genauer untersucht wurden. Der Übergang von der A22 auf die S3 stellte sich für dieses Vorhaben als am besten geeignet heraus: neben den erwähnten Kriterien, zeichnete sich der Streckenabschnitt durch Vorhandensein eines Pannestreifens und vergleichsweise kurze Distanzen zu umliegenden Auf- und Abfahrten aus. In Abb. 2-1 ist der ausgewählte Bereich für die Teststrecke zwischen km 1,5 bis 2,5 dargestellt.

2.2. Testfeld 1

Gemeinsam mit der ASFINAG und ABF wurden die Varianten für die Rumpelstreifen des ersten Testfeldes ausgewählt. Die im Forschungsantrag ursprünglich vorgesehenen 6 verschiedenen Fräsmuster wurden auf 9 erweitert, um eine größere Bandbreite abzudecken.

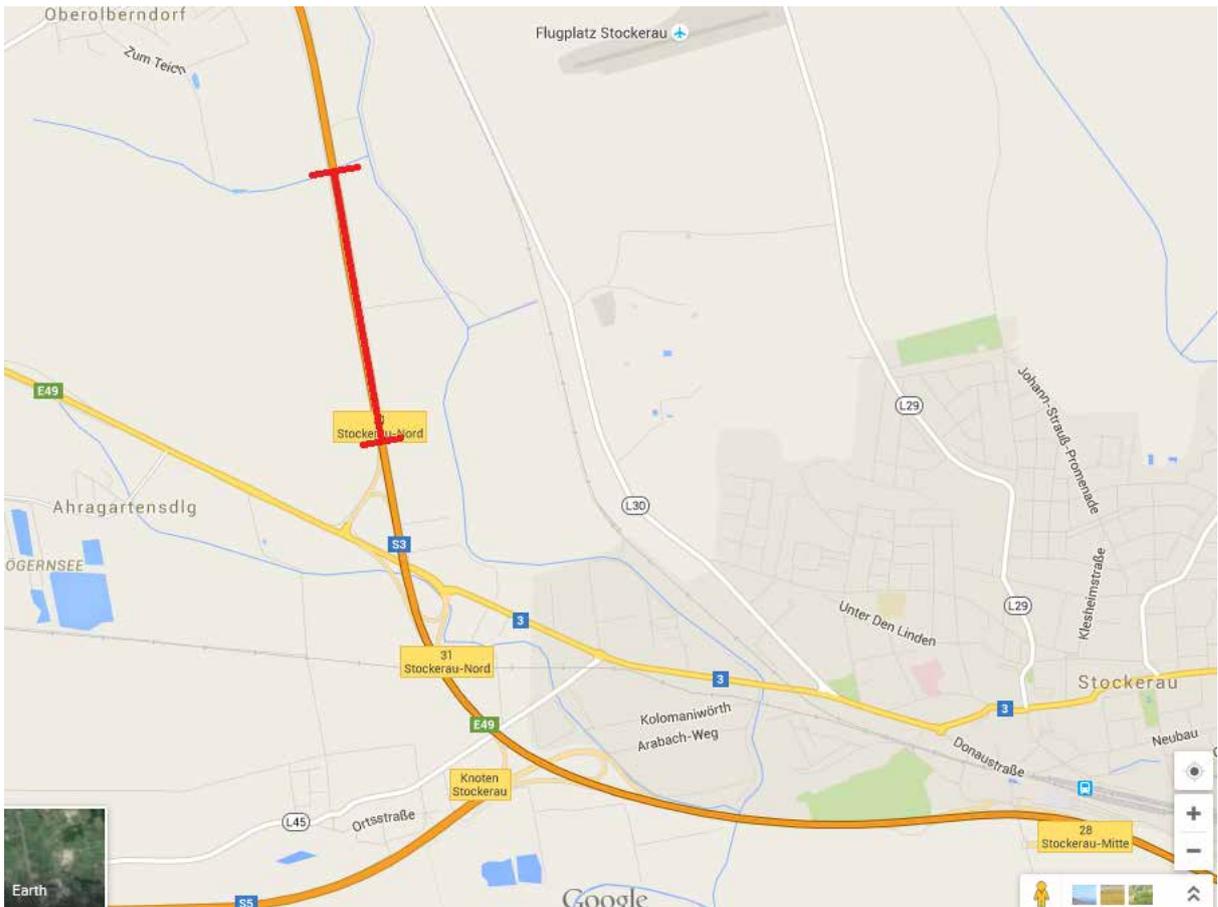


Abb. 2-1: Lage der Teststrecke S3 Weinviertler Schnellstraße km 1,5 bis 2,5

Kurzbezeichnung	RS0a	RS0b	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7
Beschreibung	konventionell (häufig verwendeter Abstand)	konventionell, schärfere Kante als RS0a	konventionell mit doppeltem Fugenabstand	nach links geneigte Frästrommel	nach rechts geneigte Frästrommel	konventionell mit Zufallsabständen	Sinus mit gewölbter Frästrommel	Sinus ausschließlich im Längsprofil	Sinus mit gewölbter Frästrommel
Fugenform									
Fräsmuster									
Grundriss Einzelfuge	rechteckig	rechteckig	rechteckig	trapezförmig	trapezförmig	rechteckig	wellenförmig	-	wellenförmig
Frästrommel	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	gewölbt	gewölbt	gewölbt
Breite B / mm	300	300	300	300	300	300	150 - 300	300	100 - 300
Länge L / mm	150	140	200	200 - 80	80 - 200	140	durchgehend	durchgehend	durchgehend
Fugenabstand A / mm	300	300	600	300	300	300 (Mittel)	600	600	300
Tiefe T / mm	7	10	10	12 - 5	5 - 12	10	9 - 16	0 - 7	6 - 16

Tab. 2-1: Testfeld 1 – Auswahl Rumpelstreifen

In Tab. 2-1 sind alle 9 Varianten inkl. der wesentlichen geometrischen Parameter zusammengefasst. Generell wurden alle Rumpelstreifen mit einer Breite von 300 mm gefräst. Die Fugenlänge der Rumpelstreifen in Fahrtrichtung schwankte zwischen 80 bis 200 mm, bzw. war durchgängig bei den Sinusvarianten. Für die Periodizität wurden 300 und 600 mm variiert, sowie ein Zufallsabstand (200 - 470 mm) gewählt. Die Abstände für das pseudozufällige Muster wurden so erstellt, dass einerseits der Kehrwert des Abstands gleichverteilt ist und der mittlere Abstand 300 mm beträgt. Wie in Abb. 2-2 dargestellt, entspricht dies einer gleichförmigen (d.h. jede Frequenz ist gleich wahrscheinlich) Frequenzverteilung zwischen etwa 60 bis 140 Hz bei 100 km/h (PKW) und etwa 50 bis 110 Hz bei 80 km/h (LKW).

Die Varianten RS0a und RS0b stellen die Standardausführung und eine etwas „extremere“ Variante für Rumpelstreifen dar. Der wesentlichste Unterschied dabei ist die Tiefe (7 bzw. 10 mm) und der schärfere Übergang in Längsrichtung, d.h. die Frästrommel senkt sich bei RS0a graduell ab, während sie bei RS0b fast senkrecht absinkt. Dadurch ergibt sich auch die unterschiedliche Fugenlänge (150 bzw. 140 mm) der Fräsung. Die gemessenen Geometrien sind nochmals in Abschnitt 2.4 beschrieben. Die Variante RS1 stellt die Standardausführung aber mit doppelter Periodizität (600 statt 300 mm) und größerer Fräslänge (200 statt 140 mm) dar. RS2 und RS3 sind neue, konische Fräsmuster mit einer Periodizität von 300 mm, die einmal mit einer Querneigung zum Fahrstreifen hin und einmal zum Fahrbahnrand (180° gedreht) hin ausgeführt wurden. Durch die konische Form ergeben

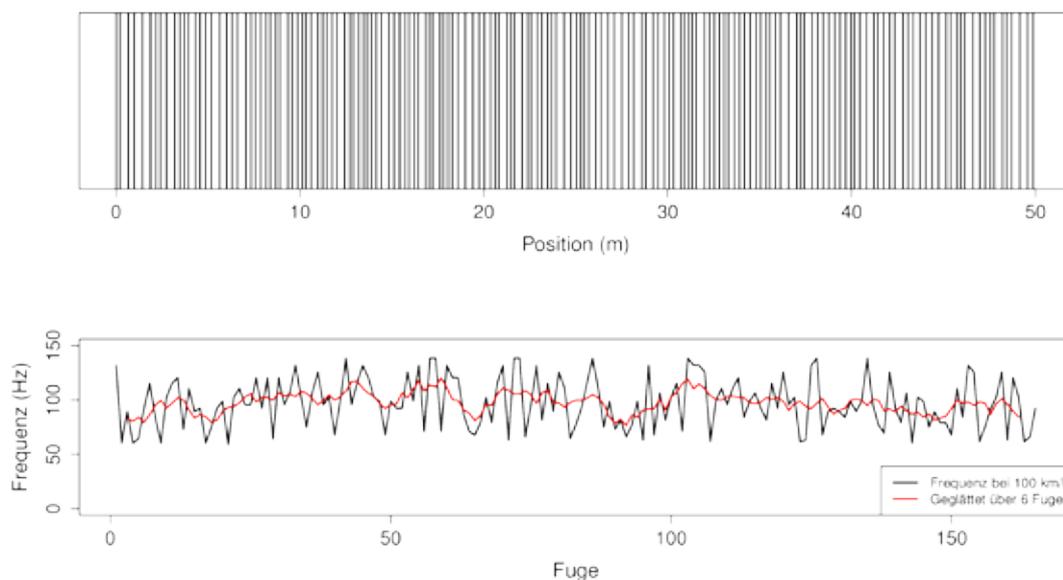


Abb. 2-2: Fugenabfolge mit zwischen 200 und 470 mm variierendem Fugenabstand (oben) und lokale Frequenz bei 100 km/h (unten) des Pseudozufallsstreifen RS4 (für RS14 wurden die Abstände verdoppelt)

sich für die Fräsung linear verlaufende Tiefen von 5 bis 12 mm und Längen von 80 bis 200 mm. RS4 ist vom Fräsprofil ähnlich RS0b allerdings mit dem bereits erwähnten Zufallsabstand statt einer Periodizität von 300 mm. Die Varianten RS5 und RS7 sind Sinusfräsungen mit einer Periodizität von 600 und 300 mm und einer gewölbten Frästrommel. Für RS7 wurde hierbei das gleiche Formrad wie für RS0a verwendet, allerdings wurde die volle Tiefe gefräst, weswegen sich ein Sinusverlauf ergibt. Die Variante

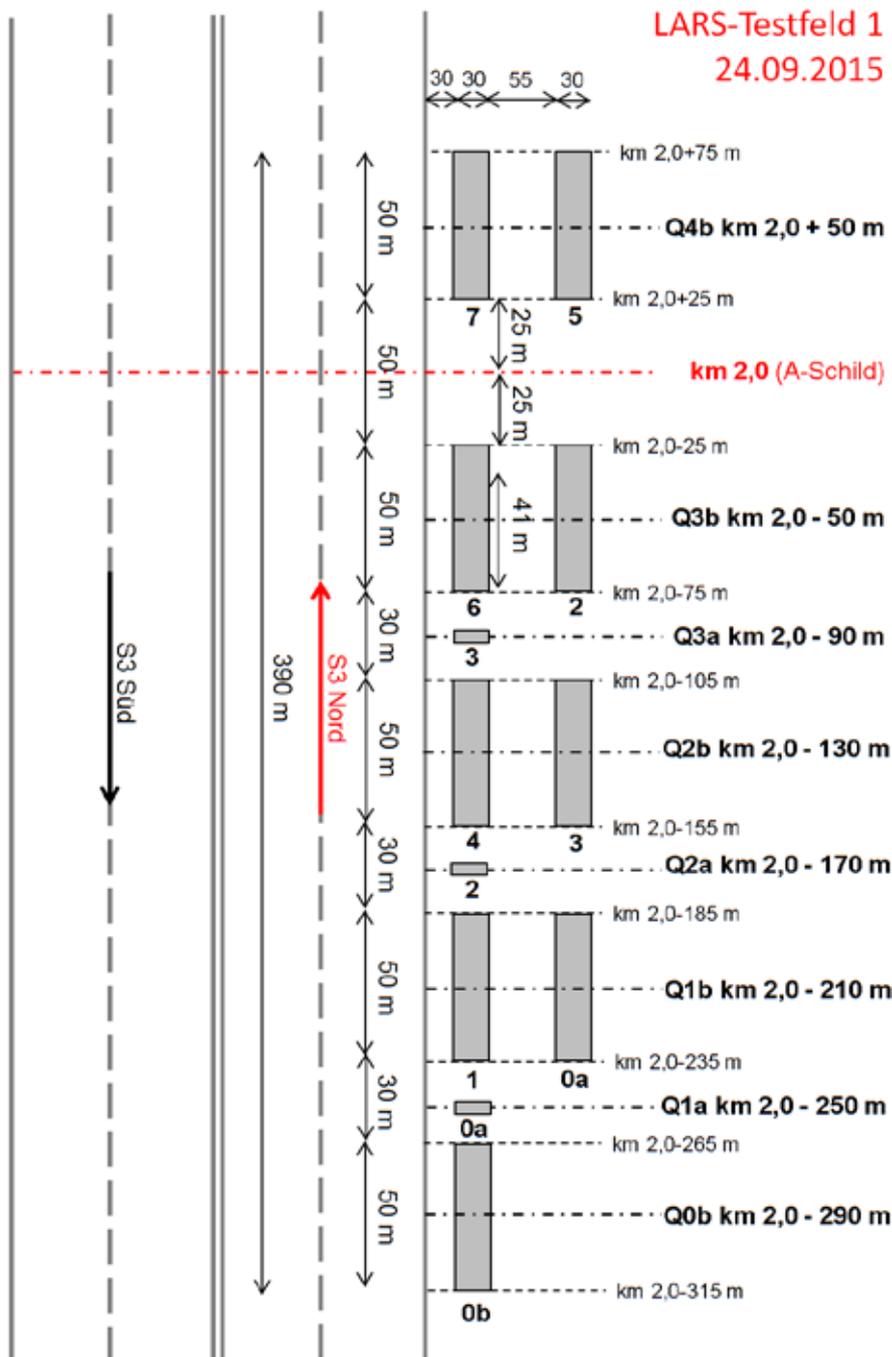


Abb. 2-3: Testfeld 1 - Anordnung der Rumpelstreifen



Abb. 2-4: Reinigung der gefrästen Rumpelstreifen

RS6 mit der Sinusfräsung geht über die gesamte Breite (flache Frästrommel) und wird stellenweise nur auf eine Tiefe von 0 mm gefräst. Fotos aller Fräsmuster sind im Anhang A dargestellt.

Die Fräsarbeiten wurden von der ABF Straßensanierungs GmbH am 24.09.2015 auf dem Pannestreifen in Fahrtrichtung Nord (Hollabrunn) ausgeführt. In Abb. 2-3 ist die Anordnung der 9 verschiedenen Rumpelstreifen inklusive von zusätzlich 3 Einzelfugen (gerade Einzelfuge der RS0b, linksgeneigte Einzelfuge der RS2 und rechtsgeneigte Einzelfuge der RS3), die ausschließlich der Modellbildung dienen, auf der S3 (km 2,0-315 bis km 2,0+75) dargestellt. Die gesamte Testfeldlänge betrug ca. 390 m und jeder Rumpelstreifen wurde 50 m lang ausgeführt mit mindestens 30 m Abstand zwischen den jeweiligen Streifen. Je Messquerschnitt (Q0-Q4) wurden 1-2 Rumpelstreifen mit 55 cm Abstand zueinander gefräst. Nach den Fräsarbeiten wurde die Fahrbahnoberfläche sofort gereinigt (siehe Abb. 2-4), um Rückstände zu entfernen bzw. die Fräsmuster besser vermessen zu können.

2.3. Testfeld 2

Als Teststrecke wurde der Abschnitt auf der S3 ausgewählt, an welchem bereits das erste Testfeld erstellt wurde (siehe Abb. 2-1), da sich dieser bereits gut bewährt hat und um möglichst vergleichbare Bedingungen zu erhalten. Basierend auf den Ergebnissen der Untersuchungen wurden sinnvolle Varianten für optimierte Rumpelstreifen für das zweite

Kurzbezeichnung	RS8	RS9	RS10	RS11	RS12	RS13	RS14
Beschreibung	Sinus, breiter und flacher als RS6	Sinus, breiter als RS6	Sinus, breiter und tiefer als RS6	Sinus, breiter, tiefer und halber Fugenabstand gegenüber RS6	konventionell mit doppeltem Fugenabstand, breiter und flacher als RS12	konventionell, breiter und höherer Fugenabstand gegenüber RS0a	konventionell mit Zufallsabständen, breiter, flacher und doppelter Abstand als bei RS4
Fugenform							
Fräsmuster							
Grundriss Einzelfuge	-	-	-	-	rechteckig	rechteckig	rechteckig
Frästrommel	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch
Breite B / mm	350	350	350	350	350	350	350
Länge L / mm	durchgehend	durchgehend	durchgehend	durchgehend	200	150	120
Fugenabstand A / mm	600	600	600	300	600	400	600 (Mittel)
Tiefe T / mm	0 - 2 (4)	0 - 5 (7)	0 - 7 (10)	0 - 7 (10)	7	7	7

Tab. 2-2: Testfeld 2 – Auswahl Rumpelstreifen

Testfeld ausgewählt. Die im Forschungsantrag ursprünglich vorgesehenen 2 optimierten und zu validierenden Fräsmuster wurden auf 7 erweitert, um die Ergebnisse besser interpretieren und absichern zu können. In Tab. 2-2 sind alle 7 Varianten inkl. der wesentlichen geometrischen Parameter zusammengefasst. Generell wurden alle Rumpelstreifen diesmal mit einer Breite von 350 statt 300 mm gefräst, um eine größere Anregung bei LKW-Reifen zu begünstigen. Die Längen der Fräsungen in Fahrtrichtung variierten bei 120, 150 und 200 mm, bzw. waren durchgängig bei den Sinusvarianten. Für die Periodizität wurden 300, 400 und 600 mm sowie der doppelte Zufallsabstand (400-1200 mm) vom Testfeld 1 variiert. Bei den Varianten RS8, RS9 und RS10 handelt es sich um reine Sinusfräsungen mit unterschiedlichen Tiefen aber gleicher Periodizität im Vergleich zur ursprünglichen Variante RS6. Die Variante RS11 ist ebenfalls eine reine Sinusfräsung, allerdings mit einer Periodizität von 300 statt 600 mm im Vergleich zur ursprünglichen Variante RS6. Die geplanten Tiefen für die Sinusfräsungen waren eigentlich mit 4, 7 und 10 mm vorgesehen, aber die tatsächliche Ausführung war im Mittel um ca. 2 mm geringer. Für RS12 wurde im Vergleich RS1 die Breite auf 350 mm erhöht und die Tiefe von 10 auf 7 mm verringert. Durch laufende Kontrollen während der Fräsarbeiten wurde bei diesem Rumpelstreifensegment jedoch nach ca. 10 m festgestellt, dass die Fugentiefe nicht den Vorgaben entsprach, sondern mit mehr als 10 mm deutlich zu groß war (Ursache war wohl

eine unbeabsichtigte Verstellung der Fugentiefen nach Fräsung der ersten drei Fugen), Daher wurde die Fräsmaschine nach 19 Fugen neu auf die Soll-Tiefe von 7 mm eingestellt, sodass dieses Segment zwei verschiedene Tiefen aufweist: Fugen 4-19 mit einer Tiefe > 10 mm sowie ab Fuge 20 (und auch Fugen 1-3) mit einer Tiefe von 7 mm.

Bei Variante RS13 wurde eine Standardfräsung allerdings breiter und mit einem größeren Fugenabstand von 400 statt 300 mm ausgewählt. Für die Variante RS14 wurde im Vergleich zur ursprünglichen Variante RS4 die Breite erhöht, der Zufallsabstand verdoppelt und die Tiefe verringert.

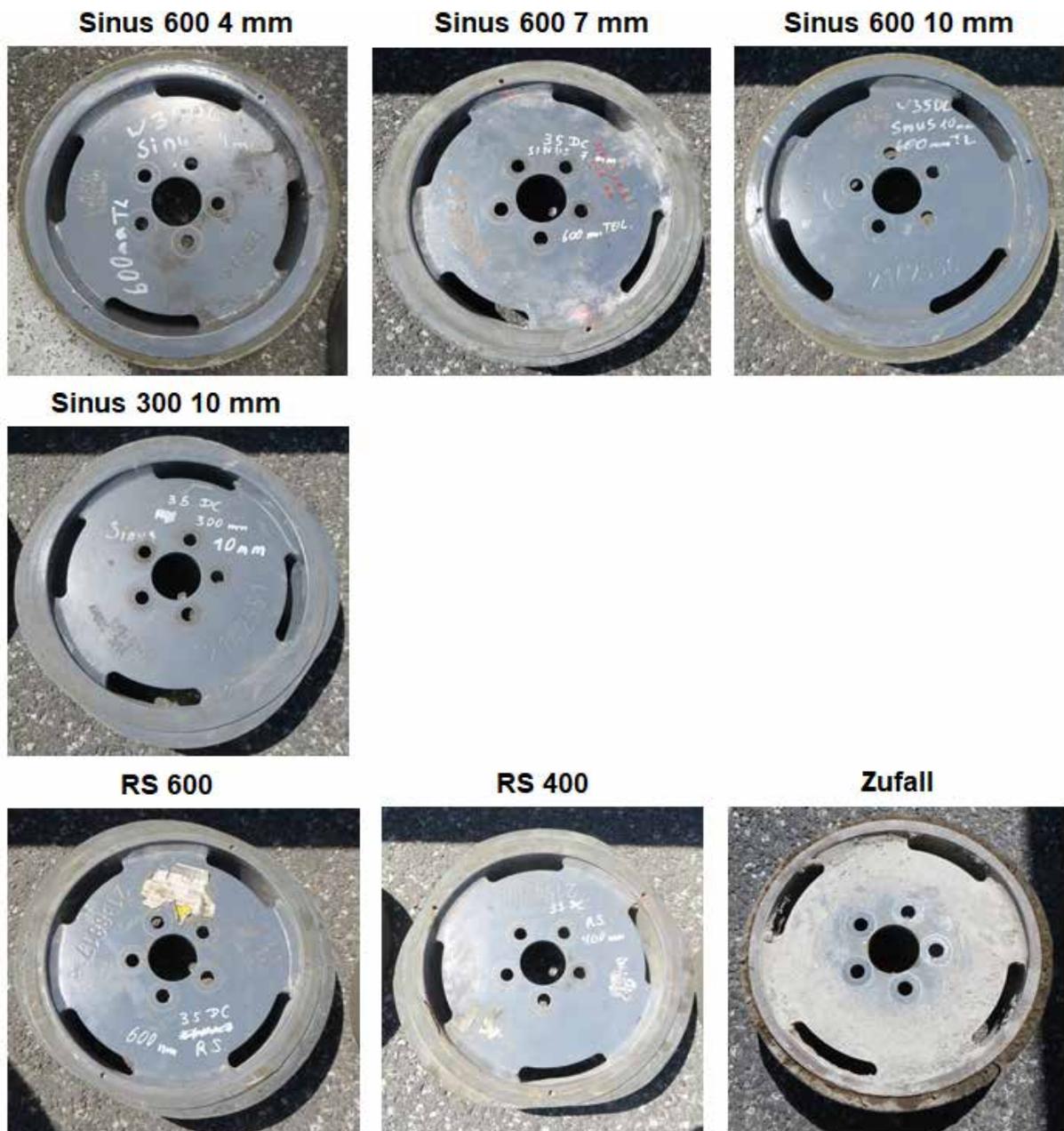


Abb. 2-5: Testfeld 2 – Frästrollmeln

Die Fräsarbeiten wurden von der ABF Straßensanierungs GmbH am 13.06.2017 auf dem Pannestreifen in Fahrtrichtung Süd (Wien) ausgeführt. Für die Fräsungen wurden die Frästrommeln gemäß Abb. 2-5 eingesetzt.

In Abb. 2-6 ist die Anordnung der 7 verschiedenen Rumpelstreifen auf der S3 (km 2,0+190 bis km 2,0-257) dargestellt. Die gesamte Testfeldlänge betrug ca. 447 m und jeder Rumpelstreifen wurde 50 m lang ausgeführt mit mindestens 30 m Abstand zwischen den jeweiligen Streifen. Je Messquerschnitt (Q5-Q8) wurden 1-2 Rumpelstreifen mit 55 cm

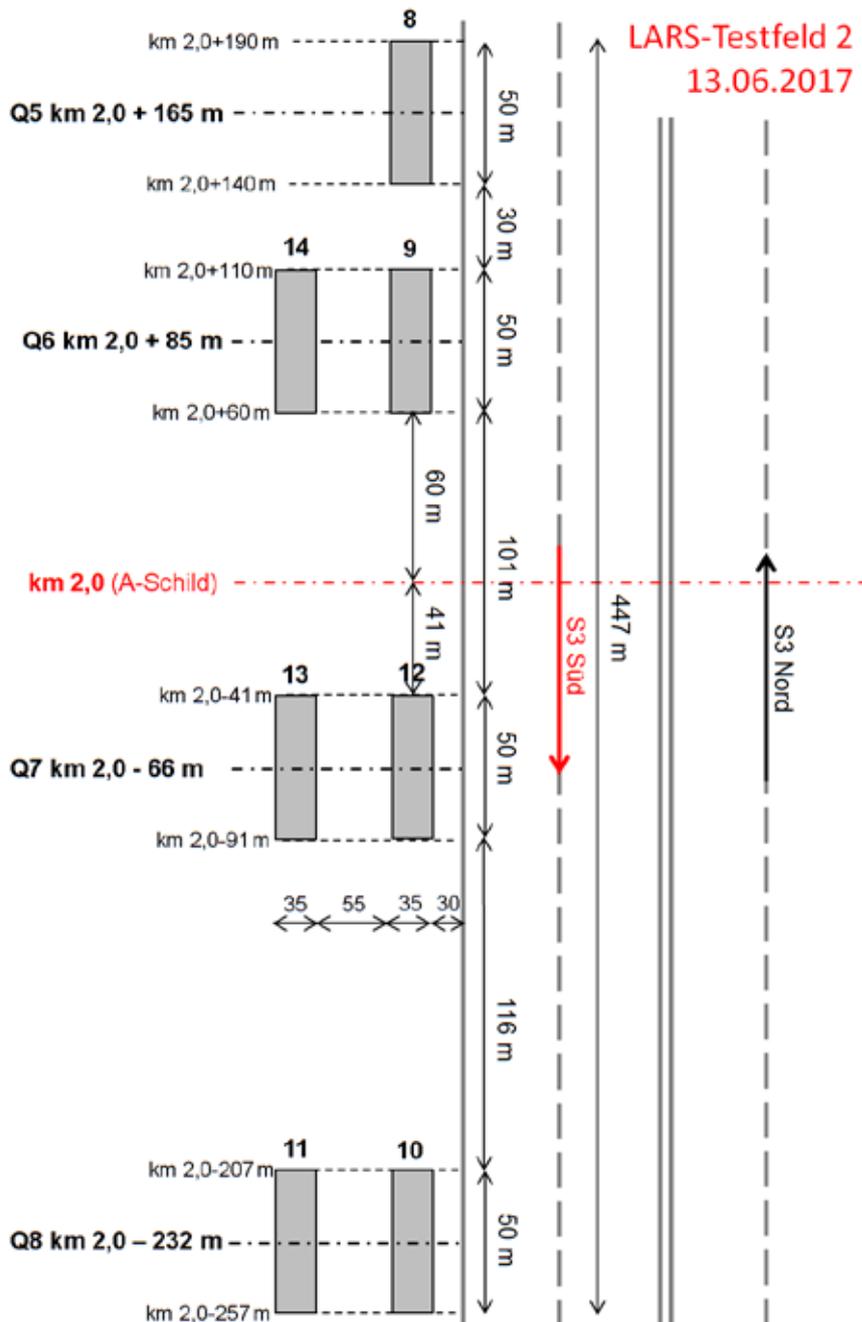


Abb. 2-6: Testfeld 2 - Anordnung der Rumpelstreifen

Abstand zueinander gefräst. Nach den Fräsarbeiten wurde die Fahrbahnoberfläche wieder sofort gereinigt (siehe Abb. 2-3), um Rückstände zu entfernen bzw. die Fräsmuster besser vermessen zu können.

Zur besseren Übersicht ist in Anhang A nochmals die gesamte Messtrecke mit beiden Fahrtrichtungen dargestellt. Weiters findet sich dort auch eine Gesamtübersicht aller gefrästen Rumpelstreifengeometrien.

2.4. Profilbestimmung der Rumpelstreifen

Die Kontrolle des Ist-Zustandes der erstellten Rumpelstreifen ist aufgrund der grobkörnigen Struktur der Fahrbahn- und der gefrästen Rumpelstreifenoberfläche, aber auch der Ablagerung von kleinen Schotterkörner in der Oberfläche mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Zudem sind durch manuelle Messungen von Distanzen bzw. Tiefen lediglich charakteristische Parameter der Rumpelstreifen (wie maximale und ggf. minimale Fugentiefe) bestimmbar.

Um für die Interpretation der Auswertergebnisse eine bessere Datengrundlage zur Verfügung zu haben, wurden die Längsprofile – das bedeutet der Tiefenverlauf über den Weg – mit einem eigens angefertigten Messsystem ermittelt. Hierzu wurden ein tastender Wegaufnehmer, (lineares Potentiometer) an dessen Spitze sich eine drehbare Walze befindet die mittels Federkraft gegen den die Fahrbahnoberfläche gepresst wird, und ein Rollrad, welches auf der Achse eines Drehgebers angebracht wurde, auf einer starren, fahrbaren Platte montiert (siehe Abb. 2-7, links). Dieses Messsystem wurde über die Rumpelstreifen gezogen (siehe Abb. 2-7, rechts), wobei die Messsignale der beiden



Abb. 2-7: Messung der Rumpelstreifenprofile: Messsystem bestehend aus tastendem Wegaufnehmer zur Tiefenerfassung und Drehgeber mit Rollrad zur Messung des zurückgelegten Weg (links) und manuelle Durchführung der Messung (rechts)

Sensoren mittels eines digitalen Aufzeichnungsgerätes (Roland Edirol R-44E) jeweils während der gesamten Überfahrt eines 50 m langen Rumpelstreifensegments aufgezeichnet wurden.

Auswertung der Sensorsignale

Über den Umfang des Rades wurden die Pulse des Drehgebers (360 pro Umdrehung) in ein Wegsignal umgerechnet und das Signal des Tiefengebers in Millimeter umgerechnet. Mit Hilfe des Wegsignals wurde das Tiefensignal auf ein äquidistantes Raster mit 1 mm Auflösung interpoliert. Mittels eines Medianfilters über 15 mm wurde das Signal geglättet um die ungefähren Positionen der Fugen zu finden. Mittels Korrelation wurden auf Basis der ersten Fuge dann die Positionierung verfeinert und danach ein Mittelwert über alle Fugen gebildet. Die gemittelte Fuge wurde verwendet, um die Positionierung mittels Korrelation nochmals zu verbessern.

Gemessene Fugengeometrien

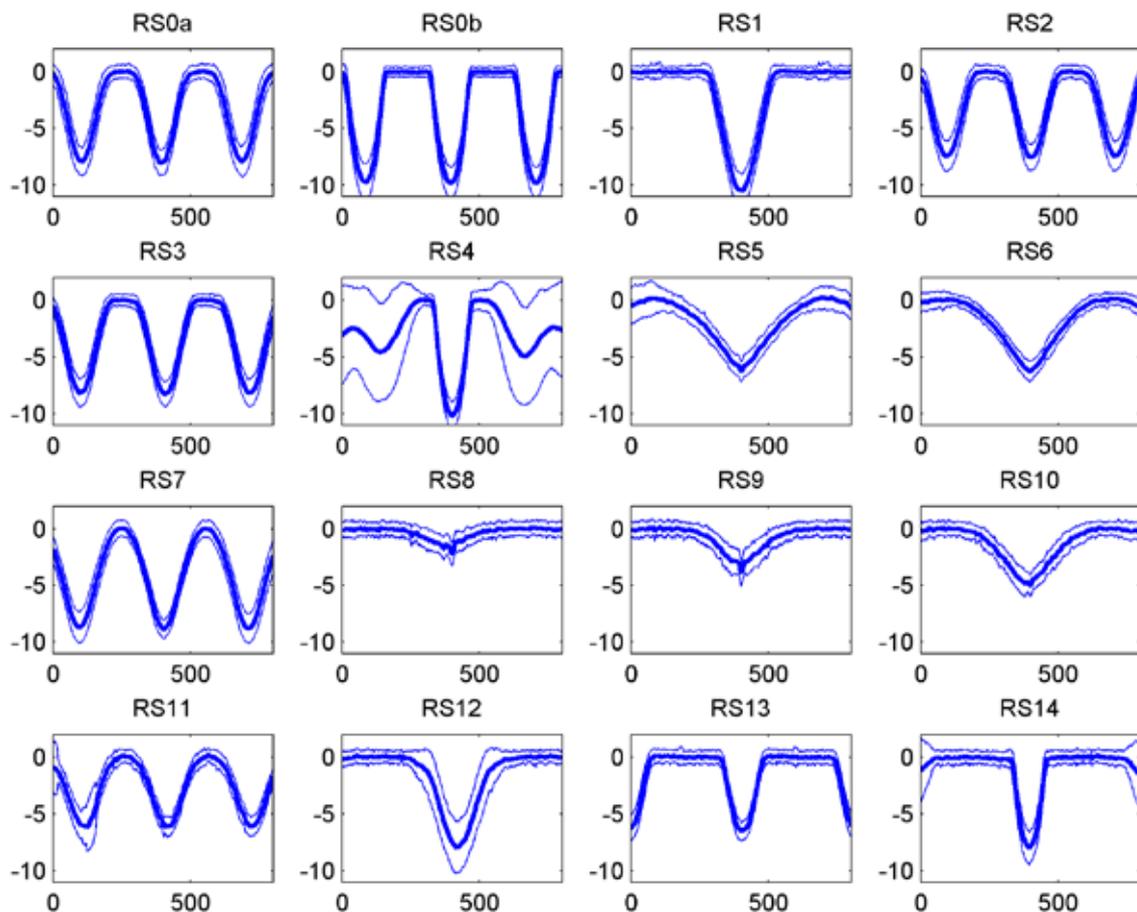


Abb. 2-8: Gemessene Fugengeometrien mit Mittelwert (dicke Linie) und Standardabweichung (dünne Linien)

Abb. 2-8 zeigt eine Übersicht über die Geometrien aller gefrästen Fugen im Überblick. Vor allem RS0b, RS4 und RS14 aber auch RS1 und RS13 haben sehr scharfe Übergänge wogegen RS0a, RS2 und RS3 leicht abgerundet sind. RS7 und RS11 (die dargestellte Streuung zu Beginn rührt von kurzen Messausfällen her) sind 300 mm Sinusfräsungen wobei bei RS7 die Tiefenangabe schwierig ist, da die Querwölbung der Trommel eine gewisse Unsicherheit bei der Tiefenmessung verursacht. Die 600 mm Streifen sehen abgesehen von der unterschiedlichen Tiefe sehr ähnlich aus. Die Standardabweichung bewegt sich im Bereich 1-2 mm. Bei RS4 entsteht die hohe Abweichung am Rand durch den unterschiedlichen Abstand (siehe auch RS14). Bei RS12 ist die unterschiedliche Fräsung am Anfang und am Ende für die hohe Streuung verantwortlich.

Abb. 2-9 zeigt die Variabilität der Fräsung am Formrad, d.h. vier verschiedenen Fugen bei 300 mm, 3 bei 400 mm und 2 bei 600 mm. Bei RS1 ist klar ersichtlich, dass hier die beiden

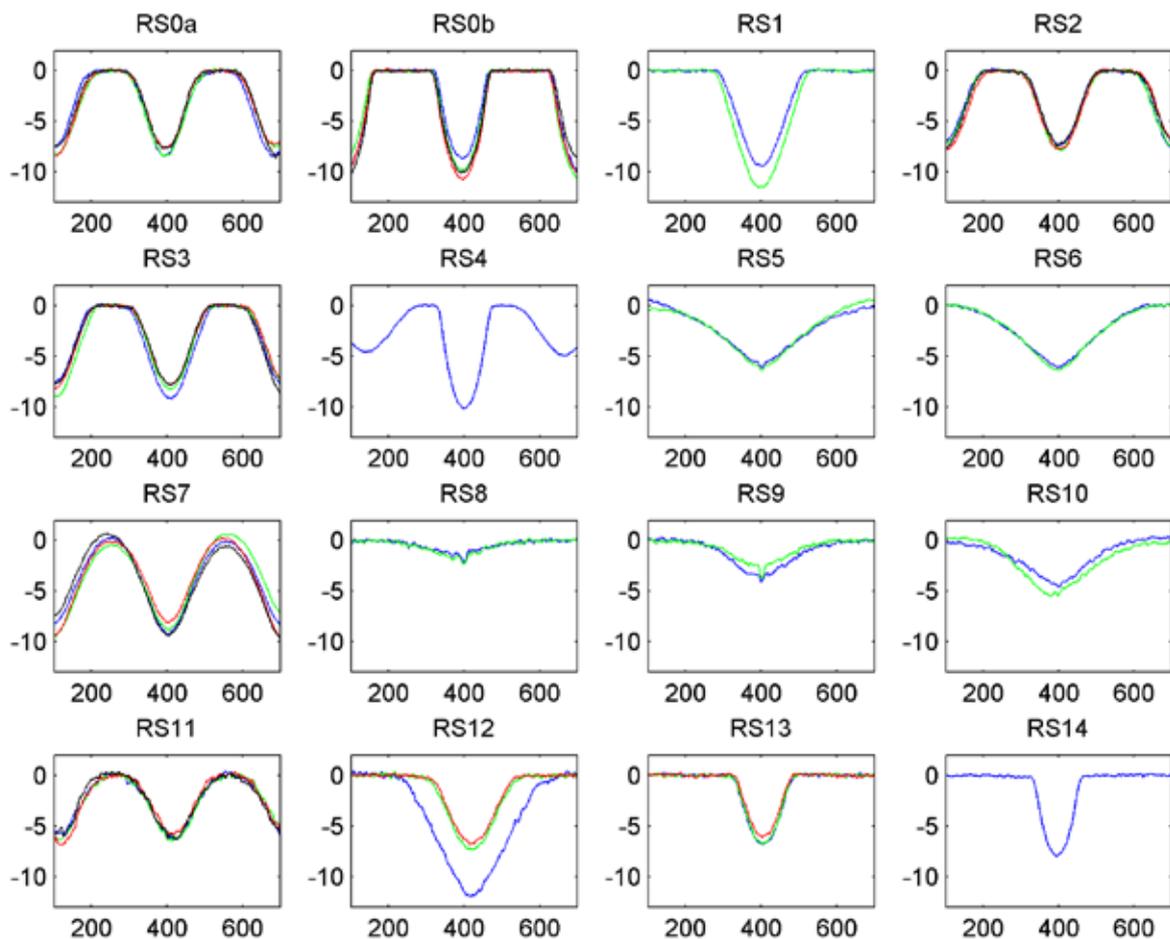


Abb. 2-9: Variabilität der gemessenen Fugengeometrien am Formrad: Farbliche Kodierung der jeweiligen mittleren Fugen am Formrad (4 bei 300 mm, 3 bei 400 mm und 2 bei 600 mm) außer bei RS12, bei welchen blau den Anfang des RS und rot das Ende zeigt, während grün den Bereich dazwischen markiert; bei den einzeln gefrästen Zufallsstreifen (RS4 und RS14) gibt es hingegen nur ein mittleres Profil

Fugen die bei einer Umdrehung des Formrades gefräst werden, nicht ident sind, sondern ein Unterschied von ca. 2 mm besteht. Bei RS10 kann man allerdings wieder eine starke Variabilität der Fugen auf dem Formrad feststellen. Bei RS12 ist die Fräsung nicht gleichmäßig tief. Die blaue Linie stellt den Mittelwert über 16 Fugen am Anfang dar (ca. 9,6 m), grün 20 Fugen in der Mitte und rot stellt den Mittelwert von der 40 bis zum Ende des RS dar.

3. MESSUNGEN UND DATENVORAUSSWERTUNGEN

Als Grundlage für die weiteren Untersuchungen wurden einerseits die Schallemissionen- und -immissionen von Überfahrten der Rumpelstreifen mit zwei Testfahrzeugen (PKW und LKW), wie auch Schallemissionen von Überfahrten der Einzelfugen messtechnisch erfasst. Andererseits wurden auch im Fahrzeuginneren dieser beiden Fahrzeuge die Schallsituationen bei Überfahrten über die Rumpelstreifen, wie auch die Beschleunigungen am Lenkrad und am Fahrersitz ermittelt, wobei Außen- und Innenmessungen zeitlich nacheinander (Abstand von mehreren Wochen) durchgeführt wurden.

Im Detail bestand das eingesetzte, akkubetriebene Gesamtmesssystem aus folgenden Hauptkomponenten, die je nach Messaufgabe in unterschiedlichen Kombinationen eingesetzt wurden:

- Kunstkopf HMS IV (Head Acoustics) zur binauralen Erfassung von Schallsituationen und des Messsignals der Laserlichtschranke
- 1/2" CCP Freifeld-Mikrofon-Sets mit TEDS (G.R.A.S), jeweils bestehend aus Mikrofon 40AE und Vorverstärker 26CA zur Erfassung der Schallsituation auf konventionelle Art
- 3-achsiger TEDS Miniaturbeschleunigungsaufnehmer des Typs 66A11 (Meggitt) zur Erfassung der Lenkradbeschleunigungen
- 3-achsiger TEDS Ganzkörper-Sitzbeschleunigungsaufnehmer des Typs SV 38 (Svantek), welcher den Anforderungen der ISO 8041 über Messeinrichtungen zur Schwingungseinwirkung auf den Menschen [17] entspricht, zur Erfassung von Beschleunigungen der Sitzfläche des Fahrersitzes
- Laserlichtschranke zur Fahrzeugerkennung im Messquerschnitt, zur Geschwindigkeitsmessung und zur zeitlichen Synchronisation von Kunstkopf- und Mikrofonaufnahmen
- 24-Kanal ICP[®]-Modul DIC24 (Head Acoustics) zur Aufzeichnung der Messsignale von konventioneller Mikrofone, der Beschleunigungsgeber und der Laserlichtschranke
- HD-Videokamera V727 (Panasonic) zur nachträglichen, visuellen Identifikation von parallel fahrenden Fahrzeugen (bei Außenmessungen)

Entsprechend des Projektplans wurden die Messungen in zwei Messserien wie folgt durchgeführt:

- Messserie 1 (MS1): Sie umfassten die Außenmessungen und die Messungen im Fahrzeuginneren der Einzelfugen und der Rumpelstreifen des 1. Testfeldes (siehe

Tab. 2-1 und Abb. 2-3). Die Messungen wurden im Okt. 2015 begonnen und dauerten (aufgrund des Wintereinbruchs im Nov. 2015) bis April 2016 an.

- Messserie 2 (MS2): Innerhalb dieser Serie wurden einerseits Innenmessungen aller Rumpelstreifen des 2. Testfeldes (siehe Tab. 2-2 und Abb. 2-6), sowie Außenmessungen der Rumpelstreifenvarianten 12 und 13 in Messquerschnitt Q7 durchgeführt. Aufgrund des geringen Mehraufwandes wurden bei den Innenmessungen auch die Rumpelstreifen des 1. Testfeldes zum besseren Vergleich einbezogen. Des Weiteren wurden - über den Projektumfang hinausgehend - mit vereinfachter Messkonfiguration auch die Emissionen der Rumpelstreifen in Querschnitt 6 (Varianten 9 und 14), wie auch in Querschnitt 8 (Variante 10 und 11) erfasst. Die Messungen fanden zwischen Juli und Okt. 2017 statt.

3.1. Testfahrzeuge

Da vergangene Untersuchungen zeigen, dass die Auswirkungen von Rumpelstreifenbefahrungen in Bezug auf Fahrgeräusche und Vibrationen im Fahrzeuginneren sich stark unterscheiden [15] [16], wurden in vorliegendem Projekt als Testfahrzeuge sowohl ein PKW, als auch ein LKW herangezogen. Konkret wurden ein BMW 320d (Baujahr 2003) und ein MAN 84S, welcher von der Autobahnmeisterei Stockerau zur Verfügung gestellt wurde, eingesetzt. Abb. 3-1 zeigt Fotos der Fahrzeuge, wobei beim PKW entgegen der Darstellung wegen der universelleren Einsetzbarkeit in Sommer und Winter bei allen Messungen Winterreifen verwendet wurden. Die technischen Details dieser Fahrzeuge sind in Tab. 3-1 zusammengefasst.

PKW und LKW wurden bei allen Messungen mit Videokameras (bei PKW: GoPro Hero 3+ bzw. bei LKW GoPro Hero 4) ausgestattet, mit welchem die Überfahrt des jeweils rechten



Abb. 3-1: verwendete Testfahrzeuge: BMW 320d (links) und MAN 84S der Autobahnmeisterei Stockerau (rechts)

	PKW	LKW
Marke	BMW	MAN
Typ	320d, 346L	84S
Baujahr	05/2003	05/2014
Eigengewicht	1415 kg	14190 kg
Motor	Dieselmotor (4 Zylinder, Reihe)	Dieselmotor (6 Zylinder, Reihe)
Leistung	110 kW	294 kW
Achszahl (gesamt/angetrieben)	2/1	3/2
Achsabstand 1	2725 mm	3900 mm
Achsabstand 2	-	1400 mm
Bereifung Achse 1	Semperit Speed Grip 2 205/55R16H	Goodyear, Ultra Grip WTS 385/65R22.5 (Anfang Okt. 2017 rechter Reifen getauscht auf Goodyear Ultra Grip max S mit gleicher Dimension)
Bereifung Achse 2	Semperit Speed Grip 2 205/55R16H	Goodyear, Ultra Grip WTD 315/80R22.5 Zwillingsräder
Bereifung Achse 3	-	Goodyear, Ultra Grip WTS 385/65R22.5

Tab. 3-1: Eigenschaften der Testfahrzeuge

Vorderrades über Einzelfugen oder Rumpelstreifen zur Bewertung des Überdeckungsgrades aufgezeichnet wurde. Beim LKW war eine starre vibrationsarme Befestigung schräg vor dem Rad an der Anbauplatte für den Schneepflug und damit eine gute Sicht auf beide Flanken des Reifens möglich (siehe Abb. 3-2, rechts). Eine derartige Anordnung konnte beim PKW wegen des geringen Bodenabstands und den damit einhergehenden, sehr schlechten Lichtverhältnisse, wie auch aufgrund der fehlenden Befestigungsmöglichkeit aufgrund der gekrümmten Oberflächen nicht verfolgt werden. Als bester Kompromiss wurde die Videokamera beim PKW mittels Saugfußhalterung hinter dem Vorderrad vor den Messungen installiert (siehe Abb. 3-2, links), wodurch nur die äußere Reifenflanke durch die Videoaufzeichnungen erfasst wurde.

Zur Geschwindigkeitsbestimmung der Einzelfugen- und Rumpelstreifenüberfahrten wurden in beiden Fahrzeugen Tablets (Samsung Galaxy Tab 2 GT-P5100) mitgeführt, welche im Sekundentakt die GPS-Informationen wie Position und Geschwindigkeit aufgezeichnet. Darüber hinaus wurden bei den Außenmessungen an beiden Fahrzeugen jeweils zwei Reflexionsstreifen angebracht (siehe Abb. 3-3). In Kombination mit einer in der Mitte des jeweiligen Messquerschnitts angeordneten Laserlichtschranke konnten dadurch einerseits die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge und andererseits der Zeitpunkt das Passieren der Fahrzeuge innerhalb der akustischen Aufzeichnungen sehr exakt bestimmt werden.



Abb. 3-2: Videokameras zur Aufzeichnung der Einzelfugen- und Rumpelstreifenüberfahrten des rechten Vorderreifens von PKW (links) und LKW (rechts)



Abb. 3-3: Reflexionsstreifen zur Fahrzeuergreifung im Messquerschnitt und zur Geschwindigkeitsmessung bei Außenmessungen bei PKW (oben) und LKW (unten)

3.2. Außenmessungen Einzelfugen

Die akustischen Außenmessungen der drei Einzelfugen, insbesondere jene der Rumpelstreifenvariante 0A, dienen der Modellierung der Schallquelle, weshalb im Gegensatz zu den Rumpelstreifen eine Erfassung der Schallemissionen ausreichend ist. Aufgrund dessen wurde eine vereinfachte Messkonfiguration (siehe Abb. 3-4 und Abb. 3-5), bestehend

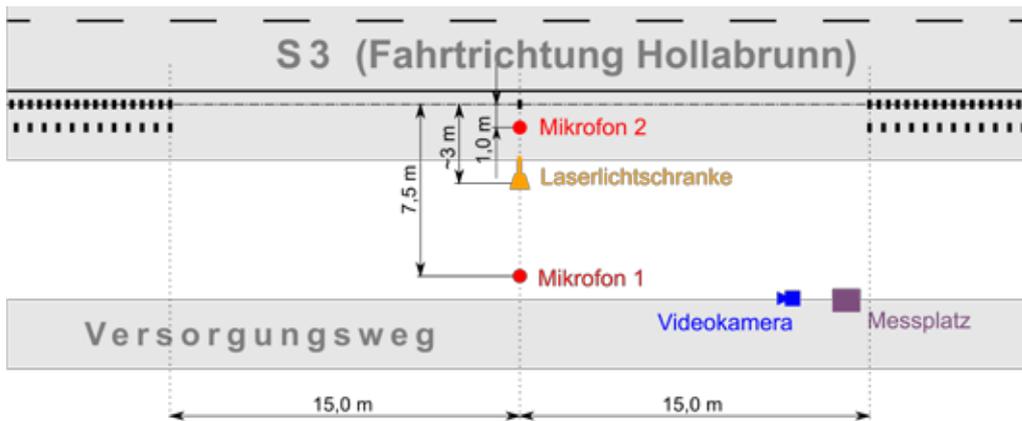


Abb. 3-4: vereinfachte Messkonfiguration für die Emissionsmessung einer Einzelfuge



Abb. 3-5: Messaufbau zur Emissionsmessung von Einzelfugen mit 2 Mikrofonen und einer Laserlichtschranke

aus einem Mikrofon 1 in 7,5 m Entfernung zur Fugenmitte und 1,2 m über der Fahrbahnoberfläche im Bereich der Einzelfugen und einem Mikrofon 2 in 1 m Entfernung und 31,5 cm über der Fahrbahnoberfläche, gewählt. Zusätzlich wurde die Laserlichtschranke in etwa 3 m Entfernung angeordnet, wodurch die Testfahrzeuge einerseits zuverlässig detektiert und deren Geschwindigkeiten zuverlässig bestimmt werden konnten. Die Videokamera zur nachträglichen, anlassbezogenen Kontrolle der Verkehrssituation wurde in einiger Entfernung zum Messquerschnitt aufgestellt und so ausgerichtet, dass vor allem die Anfahrt zur Einzelfuge, sowie die Überfahrt im Video zu erkennen sind.

Die Messungen fanden an Tagen ohne Niederschlag und grundsätzlich bei trockener Fahrbahn statt. Lediglich bei den ersten Messungen der Einzelfuge 0A war eine geringe Restfeuchtigkeit der Fahrbahnoberfläche vorhanden. Im Gegensatz zu den Immissionsmessungen in einer Entfernung von 25 m besteht bei Emissionsmessungen aufgrund der kürzeren Distanz ein geringerer Einfluss von Wind auf die Schallmesswerte.

Messserie	Messquerschnitt	Messdatum	Einzelfuge	Überfahrten	
				PKW	LKW
1	Q1a	22. Okt. 2015	0A	11	12
1	Q2a	30. Okt. 2015	2	14	11
1	Q3a	30. Okt. 2015	3	13	11

Tab. 3-2: Überblick über Emissionsmessungen der drei Einzelfugen

Trotzdem wurde darauf geachtet, dass keine stürmischen Windverhältnisse während der Messungen vorherrschten.

Die Emissionsmessungen der drei Einzelfugen fanden während des regulären Verkehrs (d.h. ohne weitere verkehrstechnische Maßnahmen, wie Absperrungen, o.ä.) an zwei Tagen im Herbst 2015 statt (siehe Tab. 3-2). Die Fahrer waren instruiert, mit den rechten Rädern möglichst mittig über die Einzelfugen zu fahren. Zudem sollten auf der 2-spurigen Fahrbahn Parallelfahrten mit anderen Fahrzeugen im Bereich der Einzelfugen, sofern dies im Rahmen der Verkehrsvorschriften durch Geschwindigkeitsreduktion möglich war, vermieden werden. Als Zielüberfahrtsgeschwindigkeit wurden 100 km/h für den PKW und 80 km/h für den LKW definiert, wobei für eine konstante An- und Abfahrtsgeschwindigkeit der Tempomat verwendet wurde. Da einerseits bei den hohen Geschwindigkeiten die Einzelfugen nicht immer mittig getroffen werden können bzw. sich ein variabler, seitlicher Versatz einstellt, und andererseits erst durch Mehrfachmessungen von Überfahrten mit großer Überdeckung die Reproduzierbarkeit geprüft werden kann, wurden im Vorfeld festgelegt, dass mindestens 10 Emissionsmessungen je Fahrzeug erforderlich sind. Die genaue Anzahl an Überfahrten richtete sich u.a. auch nach Einschätzung der Fahrer bzgl. der Anzahl an Überfahrten mit geringem seitlichem Versatz (siehe Tab. 3-2).

3.3. Außenmessungen Rumpelstreifen

Die grundlegende Messkonfiguration der akustischen Außenmessungen für Rumpelstreifen ist in Abb. 3-6 skizziert. Im Detail wurden die Immissionen mit einem Kunstkopfmesssystem in 25 m Entfernung zur jeweiligen Rumpelstreifenmitte und 1,2 m über der Fahrbahn, sowie mit einem Mikrofon 1 in gleicher Höhe, jedoch um 1 m entgegen der Fahrriichtung versetzt erfasst. Die Emissionsmessungen wurden mit einem Mikrofon 2 in 7,5 m Entfernung zur Rumpelstreifenmitte und 1,2 m Höhe über der Fahrbahn realisiert. Im Gegensatz zu den in Kap. 3.2 beschriebenen Einzelfugenmessungen, wurde auf eine Nahfeldmessung in 1,0 m Entfernung verzichtet. Die Laserlichtschranke wurde analog zu den Einzelfugenmessungen in etwa 3 m Entfernung zu den Rumpelstreifen angeordnet. Der Messplatz und die Videokamera befanden sich hingegen in einer größeren Distanz zum Messquerschnitt, um

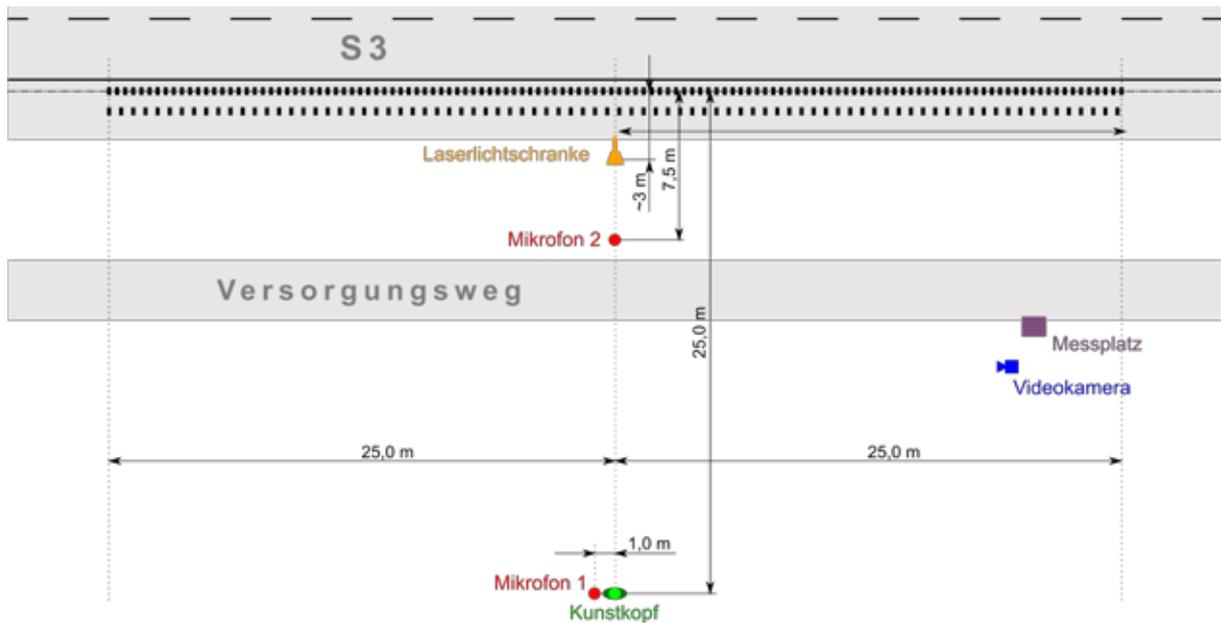


Abb. 3-6: grundlegende Messkonfiguration für die Emissions- und Immissionsmessung der Messquerschnitte Q1b, Q2b, Q3b und Q4b der 1. Messserie, sowie des Messquerschnitts Q7 der 2. Messserie: Darstellung exemplarisch für die in Fahrtrichtung gesehenen linken, d. h. dem 1. Fahrstreifen näheren Rumpelstreifen

die direkte Schallausbreitung bis zum Ende der 50 m langen Rumpelstreifensegmente sicherstellen bzw. um die komplette Überfahrt über die Rumpelstreifen per Video erfassen zu können.

In Abb. 3-7 (oben) ist exemplarisch der reale Messaufbau der grundlegenden Messkonfiguration dargestellt. Das Kunstkopfmesssystem war, ebenso wie bei Mikrofonmessungen im Freien üblich, mit einem Windschutz ausgerüstet (siehe Abb. 3-7 unten, links). Das Messequipment zur Immissionsmessung musste, um eine gleichbleibende Höhendifferenz zur Fahrbahnoberfläche im Bereich der Rumpelstreifen sicherstellen zu können, aufgrund von Höhenänderungen der Fahrbahn und des Geländes in verschiedenen Höhen aufgestellt werden. Sofern möglich, wurden hierfür Stative eingesetzt (siehe Abb. 3-7 unten, Mitte). Ab einer Höhendifferenz von etwa 2,2 m musste jedoch auf ein Podest zurückgegriffen werden, bei welchem die ebene Grundfläche zur Vermeidung von unerwünschten Reflexionen mit schallabsorbierendem Material bedeckt wurde (siehe Abb. 3-7 unten, Mitte).

Durch den Einsatz des Kunstkopfmesssystems konnte nur an Tagen gemessen werden, an denen sehr geringe Wahrscheinlichkeiten für Niederschlag vorhergesagt wurden. Die Überfahrten fanden in der Regel bei trockener Fahrbahnoberfläche statt. Nur während der ersten Überfahrten der beiden Messtage 31. März 2016 (Q1b) und 4. Okt. 2017 (Q7 bzw.



Abb. 3-7: Messaufbau zur Emissions- und Immissionsmessung von Rumpelstreifen (oben): Einsatz eines Kunstkopfmesssystems zur binauralen Erfassung der Schallimmissionen inkl. Windschutz (Detailansicht unten, links), sowie zwei 2 Mikrofonen und einer Laserlichtschranke, wobei das Mikrofon 1 und der Kunstkopf in 25 m Entfernung in Abhängigkeit der erforderlichen Höhe über Gelände auf Stativen (unten, Mitte) oder auf einem Podest (unten, rechts) angeordnet wurden

Q8) war in den Rumpelstreifen zum Teil noch Restfeuchtigkeit vorhanden. Da durch die Überfahrten die Rumpelstreifen innerhalb weniger Überfahrten auftröckneten, wurde zwischen diesen beiden Fahrbahnzuständen im Folgenden nicht weiter unterschieden. Des Weiteren musste im Hinblick auf die Messbedingungen aufgrund der größeren Messdistanz besonders darauf geachtet werden, dass kaum Wind während der Messungen auftrat.

Die Überfahrten der Rumpelstreifen fanden analog zu den Einzelfugen statt: die Fahrer wurden angewiesen, mit den rechten Rädern mittig über die Rumpelstreifen unter

Messserie	Messquerschnitt	Messdatum	Rumpelstreifen	Überfahrten	
				PKW	LKW
1	Q1b	31. März 2016	1	16	10
			0A	16	14
1	Q2b	4. April 2016	4	16	14
			3	16	13
1	Q3b	3. Nov. 2015	6	24	18
			2	20	19
			Leerfahrt	8	7
1	Q4b	5. April 2016	7	15	12
			5	16	14
2	Q6 (nur Emissionsmessung)	18. Juli 2017	9	7	11
			14	16	17
2	Q7	4. Okt. 2017	12	22	15
			13	17	18
			Leerfahrt	1	1
2	Q8 (nur Emissionsmessung)	4. Okt. 2017	10	17	15
			11	17	18
			Leerfahrt	1	1

Tab. 3-3: Überblick über die Emissions- und Immissionsmessung der Rumpelstreifen (Messquerschnitte Q1b, Q2b, Q3b und Q4b der 1. Messserie, sowie des Messquerschnitts Q7 der 2. Messserie)

Verwendung des Tempomats mit konstanter Geschwindigkeit (PKW mit 100 km/h und LKW mit 80 km/h) die Rumpelstreifen zu befahren, wobei Parallelfahrten mit anderen Fahrzeugen auf der 2. Fahrbahn (unter Einhaltung der der Verkehrsvorschriften) vermieden werden sollten. Aus den gleichen Überlegungen wie bei den Emissionsmessungen der Einzelfugen sollte auch für jeden Rumpelstreifen und für jedes der beiden Fahrzeuge mindestens 10 Schallmessungen durchgeführt werden (vgl. Kap. 3.2).

Tab. 3-3 gibt einen Überblick über die akustischen Außenmessungen, wobei folgende Details ergänzend zu erwähnen sind:

- In der Messserie 1 konnten die Messungen im Querschnitt Q3b noch im Herbst 2015 umgesetzt werden. Der Wintereinbruch Anfang Nov. 2015 machte eine Messpause bis in den März 2016 erforderlich.
- Messungen im Querschnitt Q3b konnten im Zuge einer vom vorliegenden Projekt unabhängigen Totsperrung der S3 in Fahrtrichtung Nord abgehalten werden. Aufgrund der deutlich geringeren Umlaufzeiten (wenige Minuten vs. 10-15 Minuten) konnten wesentlich mehr Messungen als in den anderen Querschnitten der 1. Messserie absolviert werden.
- Rumpelstreifen der 2. Messserie wurden am 13. Juni 2017 ebenfalls während einer vom vorliegenden Projekt unabhängigen Totsperrung der S3 in Fahrtrichtung Süd gefräst. Die

für den frühen Abend des gleichen Tages angesetzten akustischen Außenmessungen im Messquerschnitt Q7 wurden durch zu starken Wind verhindert. Aufgrund der im Anschluss auftretenden hochsommerlichen Witterungsverhältnisse wurden die Außenmessungen auf den Zeitbereich Sept. - Okt. 2017 verschoben.

- Aufgrund von Wetterprognosen mit anhaltend ungünstigen Windverhältnissen, konnte die Messung in Querschnitt Q7 erst Anfang Okt. nachgeholt werden. Da sich am Messtag allerdings über Mittag wechselhafte Windverhältnisse mit stärkeren Windböen einstellten, wurde die Anzahl der Überfahrten erhöht. Dadurch konnten mehrere Messungen in den zwischendurch auftretenden, windschwachen Phasen aber auch in den Abendstunden bei abflauendem Wind durchgeführt werden.
- Außenmessungen der über den angebotenen Projektumfang hinausgehenden Rumpelstreifen in Messquerschnitt Q6 und Q8 dienten lediglich einer Abschätzung bzw. Prüfung der Unterschiede in den Schallemissionen. Aus diesem Grund, aber auch um Parallelmessungen zu erlauben und damit zusätzliche Messfahrten zu vermeiden, wurde hierfür eine deutlich vereinfachte Messkonfiguration mit Messequipment des Projektpartners ISF vorgesehen: für die Emissionen wurden lediglich zwei im Abstand von 20 cm angeordnete Messmikrofone (Brüel & Kjaer, Outdoor Microphone Kit UA1404 mit Messverstärker: Nexus Conditioning Amplifier Type 2690-0S2) in 7,5 m Entfernung zur Rumpelstreifenmitte und 1,2 m über der Fahrbahn eingesetzt. Die Emissionsmessungen im Querschnitt Q6 wurden im Zuge der Überfahrten für die Innenmessungen (siehe Kap. 3.4) durchgeführt. Die Emissionsmessungen im Querschnitt Q8 wurden gleichzeitig mit den Außenmessungen in Q7 durchgeführt. Die vorverstärkten analogen Messsignale wurden mit einem digitalen Mehrkanalrekorder (Roland, Edirol R4-Pro) aufgezeichnet (Samplingrate 48 kHz, 24bit) und mittels einer Kalibrierung (1 kHz, 94 dB, Brüel & Kjaer Typ: 4231) nachträglich kalibriert.
- Zur Einschätzung der Fahrgeräusche wurden in ausgewählten Querschnitten die Emissionen und Immissionen von Vorbeifahrten gänzlich ohne Befahrung der Rumpelstreifen („Leerfahrten“) erfasst.
- Für eine erste Abschätzung des Querschnitts Q0b (RS0b) wurden die Messungen im direkt danach situierten Rumpelstreifen verwendet. Da eine Analyse dieser Daten eine deutliche Erhöhung des Schalldruckpegels beim PKW im Vergleich zu RS0a ergab (ca. 4 dB(A), siehe Abb. 7-19), wurde von einer Außenmessung im Querschnitt Q0b abgesehen.

- Der Abschnitt Q5 (RS8) wurde außen nicht vermessen, da aufgrund der Ergebnisse aus Testfeld 1 und der äußerst geringen Fugentiefe keine relevanten Veränderungen des Vorbeifahrtsignals zu erwarten waren.

3.4. Innenmessungen Rumpelstreifen

Im PKW wurde für die Innenmessungen das Kunstkopfmesssystem auf einem Holzunterbau am Beifahrersitz und ein konventionelles Mikrofon in Fahrzeugmitte (seitlichen Abstand zu Kunstkopfmittle ca. 35 cm), auf annähernd gleicher Höhe wie die Mikrofone in den Ohrmuscheln des Kunstkopfes montiert (siehe Abb. 3-8, oben). Des Weiteren wurde zur Erfassung der Beschleunigungen auf der Sitzfläche des Fahrersitzes ein 3-achsiger Ganzkörper-Sitzbeschleunigungsaufnehmer (ISO 8041 [17]), am Fahrersitz platziert und zur Erfassung der Beschleunigungen am Lenkrad ein 3-achsiger Miniaturbeschleunigungsaufnehmer am obersten Punkt des Lenkrads (bei Nullstellung) befestigt (siehe Abb. 3-8, unten). Die Bedienung dieser Messausrüstung erfolgte durch eine Person, welche sich während der Messfahrten hinter dem Fahrer auf der Rückbank befand.



Abb. 3-8: Messaufbau im PKW für Innenmessungen: Kunstkopfmesssystem am Beifahrersitz und in Fahrzeugmitte angeordnetes Mikrofon (oben, links und rechts), Detailansicht des 3-achsigen Ganzkörper-Sitzbeschleunigungsaufnehmers am Fahrersitz (unten, links) und Detailansichten des 3-achsigen Miniaturbeschleunigungsaufnehmers am obersten Punkt des Lenkrads (unten, Mitte und rechts)

Der sich ergebene halboffene Raum im Holzunterbau für Kunstkopf und Mikrofon wurde zur Vermeidung von Resonanzen durch absorbierendes Material ausgekleidet. Um ein Vibrieren des Beifahrersitzes zu verhindern, wurde dieser mit Gurten zu der Kopfstütze im Fonds straff abgespannt. Darüber hinaus wurden einige Teile der Innenausstattung (Sonnenblende, Haltegriffe, Beifahrergurt und dessen Höhenverstellung, Handschuhdeckel, Abdeckung der dritten Bremsleuchte, Aschenbecherdeckel, Sitzverstellhebel, etc.), welche unerwünschte Störgeräusche während der Fahrt oder der Überfahrt von Rumpelstreifen oder Einzelfugen hervorrufen können, mit Klebeband fixiert und/oder mit Schaumstoffteilen bzw. Gummiteilen geklemmt.

Das im PKW verwendete Messequipment kam auch für die Innenmessungen im LKW zum Einsatz. Da jedoch in der Fahrerkabine nur ein weiterer Sitzplatz für einen Beifahrer zur Verfügung steht, welcher für die Person zum Bedienen des Messequipments vorgesehen war, wurde der Kunstkopf und das Mikrofon mittels eines speziell angefertigten Holzunterbaus über der Mittelkonsole angeordnet (siehe Abb. 3-9, oben, links). Der Kunstkopf befand sich damit in Fahrtrichtung gesehen um ca. 13 cm nach rechts gegenüber der LKW-Mitte versetzt. Die relative Position zwischen Kunstkopf und Messmikrofon war nahezu gleich wie beim Aufbau im PKW (seitlicher Abstand ca. 35 cm und nahezu gleiche Höhe wie die Mikrophone des Kunstkopfes).

Um unerwünschte Schallreflexionen an den größeren, ebenen Flächen des Holzunterbaus zu vermeiden, wurden diese mittels schallabsorbierender Matten verkleidet. Im Zuge von Probefahrten zeigte sich, dass Vibrationen in der Fahrerkabine des LKWs generell deutlich geringer als im PKW ausfielen und keine von der Innenausstattung hervorgerufenen Störgeräusche vorhanden waren, sodass auf Maßnahmen zur Fixierung einzelner Teile verzichtet werden konnte.

Beide Fahrzeuge waren auch bei den Innenraummessungen jeweils mit der in Kap. 3.1 erwähnten Grundausrüstung (GoPro-Videokamera und Tablet zur GPS-Messung) bestückt. Zudem wurden die Fahrzeuge bei den Innenmessungen der 2. Messserie mit der Laserlichtschranke ausgerüstet und am Beginn jedes Rumpelstreifens ein mit einem Reflexionsstreifen senkrecht beklebter Leitkegel aufgestellt, um die exakten Zeitpunkte bestimmen zu können, an welchen das jeweils rechte Vorderrad den Beginn des Rumpelstreifens erreicht.

Bei der 1. Messserie wurden zur Synchronisation der Aufzeichnungen vom Kunstkopfmesssystem und dem Modul DIC24 zur Erfassung des Mikrofon- und der Beschleunigungssignale, mit einer mechanischen Klappe eindeutige akustische Impulse zu



Abb. 3-9: Messaufbau im LKW für Innenmessungen: Kunstkopfmesssystem (ohne den während der Messungen eingesetzten Windschutz) und Mikrophon angeordnet zwischen Fahrer und Beifahrersitz (oben, links), Mikrophon und Überblick über Anordnung der Beschleunigungsaufnehmer (oben, rechts), Detailansicht des 3-achsigen Ganzkörper-Sitzbeschleunigungsaufnehmers am Fahrersitz (unten, links) und Detailansichten des 3-achsigen Miniaturbeschleunigungsaufnehmers am obersten Punkt des Lenkrads (unten, Mitte und rechts)

Beginn jeder Messung erzeugt. Bei der 2. Messserie wurde die Erzeugung solcher Impulse zur Absicherung zwar beibehalten, jedoch wurde für die zeitliche Synchronisation der Aufzeichnungen wie bei den Außenmessungen das in beide Systeme eingespeiste Laserlichtschrankensignal herangezogen.

Die Innenmessungen fanden ausschließlich bei trockener Fahrbahn statt. Im Hinblick auf die Windstärke wurde aufgrund des sehr geringen Einflusses auf die akustischen Messungen im Fahrzeuginneren lediglich darauf geachtet, dass keine stark böigen Windverhältnisse das geradlinige Überfahren der Rumpelstreifen behindern.

Innenmessungen wurden sowohl in der 1. wie auch in der 2. Messserie durchgeführt (siehe Tab. 3-4). Bei der 2. Messserie wurde – aufgrund des geringen Mehraufwandes, der besseren Vergleichbarkeit aller Streifen, der Möglichkeit die Reproduzierbarkeit zwischen den Messserien zu prüfen und der (nachträglichen) Bestimmung des Anfangszeitpunkts in den akustischen Aufzeichnungen aller Rumpelstreifen – beide Testfelder befahren. Im

Messserie	Messdatum	Fahrzeug	Rumpelstreifen	Überfahrten
1	21. April 2016	PKW	0B, 1, 4, 6, 7	21
			0A, 2, 3, 5	18
1	12. April 2016	LKW	0B, 1, 4, 6, 7	18
			0A, 2, 3, 5	15
2	18. Juli. 2017	PKW	0B, 1, 4, 6, 7	14
			0A, 2, 3, 5	15
			8, 9, 10, 12	15
			11, 13, 14	15
2	19. Juli 2017	LKW	0B, 1, 4, 6, 7	15
			0A, 2, 3, 5	16
			8, 9, 10, 12	16
			11, 13, 14	17

Tab. 3-4: Überblick über Innenmessungen

Gegensatz zu den Außenmessungen wurde bei jedem Testfeld stets alle Rumpelstreifen einer Reihe der beiden Reihen gemessen. Ansonsten waren die Vorgaben an die Fahrer bzw. die vorgesehenen Fahrgeschwindigkeiten und die erforderliche Mindestanzahl an Messungen gleich zu jenen der Außenmessungen (vgl. Kap. 3.2 und 3.3).

3.5. Aufbereitung der Messergebnisse

Nach Abschluss der Messungen wurden die Daten in nachfolgenden Schritten für die weitere Nutzung vorbereitet. Dabei kamen unter anderem die Programmiersprache für technisch-wissenschaftliche Berechnungen MATLAB V9.1.0 von MathWorks, wie auch das Analyseprogramm ArtemiS V11.0 (Advanced Research Technology for Measurement and Investigation of Sound and Vibration) von Head Acoustics zum Einsatz.

Überfahrtgeschwindigkeit

Zur Bestimmung der Überfahrtgeschwindigkeit aus den GPS-Aufzeichnungen (Log-Daten) wurden zunächst die GPS-Koordinaten der Mittelpunkte der verschiedenen Rumpelstreifen und Einzelfugen mittels Google Maps bestimmt. Danach wurden die Verläufe der Abstände zwischen den Fahrzeugen (auf Basis der GPGGA-Einträge in den Log-Daten) und den Rumpelstreifen- und Einzelfugenmitten gebildet. Die Bewegungsgeschwindigkeiten in den Log-Daten (GPVTG-Einträge) zum Zeitpunkte von Abstandsminima wurden schließlich als Überfahrtgeschwindigkeiten verwendet, sofern Abstände ≤ 100 m und die Geschwindigkeit ≥ 50 km/h betragen, sowie die Fahrtrichtung (definiert durch auf- oder absteigenden Breitengrad). Aufgrund der geringen Aufzeichnungsrate der GPS-Informationen (1 Datensatz je Sekunde) und der begrenzten Genauigkeit der GPS-Ortung ist die Genauigkeit dieser Art

der Geschwindigkeitsbestimmung (abgeschätzt durch mehrere Überfahrten mit gleichen Tempomateinstellung) in Bereich von rund $\pm 1-2$ km/h angesiedelt.

Bei den Außenmessungen wurden zudem die Überfahrtgeschwindigkeiten im Messquerschnitt (d.h. bei Mitte des Rumpelstreifens) durch den zeitlichen Abstand der beiden Impulse der Lichtschrankenmessung und dem bekannten Abstand der Streifen auf den Fahrzeugen ermittelt. Aufgrund der sehr kurzen Ansprechzeit der eingesetzten Lichtschranke von 1 ms und der Genauigkeit der Abstandsbestimmung im Millimeter- und damit im unteren, einstelligen Promillebereich ist von einer deutlich höheren Gesamtgenauigkeit der ermittelten Geschwindigkeiten im Bereich von wenige Zehntel Stundenkilometern auszugehen. Diese Abschätzung wird durch geringe Schwankungen in diesem Bereich bei mehreren Überfahrten und gleichen Tempomateinstellungen gestützt.

Überdeckung

Für alle Überfahrten über Rumpelstreifen und Einzelfugen sowohl der Außen-, wie auch der Innenmessungen wurden die Videoaufzeichnung des rechten vorderen Rades herangezogen, um den seitlichen Versatz von der Rumpelstreifen- bzw. Einzelfugenlängsachse abschätzen zu können (siehe Beispiele von Standbildern in Abb. 3-10). Zu diesem Zweck wurde folgende grobe, Skala für die Überdeckung der Radlauffläche über dem Rumpelstreifen bzw. der Einzelfuge eingeführt, wobei ein negatives Vorzeichen in Fahrtrichtung gesehen einen Versatz nach links bedeutet:

- 0: mittige Befahrung mit einer Überdeckung von (nahezu) 100 %
- ± 1 : leichter seitlicher Versatz mit einer Überdeckung von ca. 90 %
- ± 2 : mäßige seitlicher Versatz mit einer Überdeckung von rund 75 %
- ± 3 : größerer seitlicher Versatz mit einer Überdeckung von rund 50 %
- ± 4 : hoher seitlicher Versatz mit geringer Überdeckung von rund 25 %
- ± 5 : sehr hoher seitlicher Versatz ohne Überdeckung (0 %)

Da der seitliche Versatz bei einer Rumpelstreifenüberfahrt sowohl beim PKW, als auch beim LKW zum Teil stark variieren, wurde der Überdeckungsgrad für die drei Bereiche Anfang, Mitte und Ende getrennt bestimmt.

Die Radlaufflächenbreite beträgt beim PKW rund 18 und beim LKW rund 31 cm, während die Rumpelstreifen in der Regel eine Breite von 30 cm (1. Messserie) bzw. von 35 cm (2. Messserie) aufweisen. Folglich kann der LKW bei Rumpelstreifen der 1. Messserie grundsätzlich zwar keine hundertprozentige Überdeckung aufweisen, jedoch wurden mittige



Abb. 3-10: Exemplarische Standbilder aus den Onboard-Videoaufnahmen von Rumpelstreifenüberfahrten des PKWs (links) und des LKWs (rechts) mit sehr guter Überdeckung

Befahrungen trotz dessen mit 0 bewertet. Wie in Abb. 3-10 (links) zu erkennen ist, kann beim PKW durch die Perspektive der Videoaufzeichnung lediglich die Position der rechten Reifenflanke in Bezug zur rechten Rumpelstreifenkante (bzw. Einzelfugenkante) beurteilt werden. Der sichtbare Fahrbahnbereich hinter der Aufstandsfläche des Rades und vor dem Seitenschweller lässt lediglich eine Bewertung der Position der linken Rumpelstreifen- oder Einzelfugenkante zu, wenn der Überdeckungsgrad $< 50\%$ ist. Aus diesem Grund wurde durch die beurteilende Person entgegen die oben definierten Skalenwerte für mittige Überfahrt und für linksseitigen Versatz wie folgt verwendet:

- 0: rechte Reifenflanke befindet sich bei rechter Rumpelstreifen- oder Einzelfugenflanke oder ist minimal nach links versetzt (Überdeckung ca. 100 %)
- -1: geringer seitlicher Versatz nach links um wenige Zentimeter (aufgrund der im Gegensatz zur Rumpelstreifen- und Einzelfugenbreite deutlich geringeren Reifenbreite blieb die Überdeckung bei 100 %)
- -2: mäßiger seitlicher Versatz nach links im Bereich von 5 bis 10 cm (wie im bei Skalenwert von -1 Überdeckung von 100 %)
- -3: größerer seitlicher Versatz nach links um etwa 10 bis 17 cm (Überdeckung speziell bei 1. Messserie von 75 bis 100 %)
- -4: hoher seitlicher Versatz (Überdeckung von 25 bis 75 %)
- -5: sehr hoher seitlicher Versatz (Überdeckung $< 25\%$)

Diese asymmetrische Bewertung führt bei symmetrischer Verteilung des Versatzes zu einer Linksverschiebung der Beurteilungen. Dieser Umstand wurde jedoch erst im Zuge der

Auswertungen des 2. Testfeldes erkannt. Für eine vergleichbare Bewertung der Rumpelstreifen beider Testfelder wurde jedoch entschieden, die asymmetrische Beurteilung für den PKW zwar beizubehalten, jedoch ist dies bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Berechnung beschreibender Parameter

Die erfassten Aufzeichnungen der akustischen Signale und der Beschleunigungssignale wurden für Rumpelstreifenüberfahrten grundsätzlich wie folgt verarbeitet:

- Kalkulation der Zeitdifferenzen der Startzeitpunkte von Aufnahmen mit dem Kunstkopf und Mikrofonaufnahmen mittels DIC24 Aufzeichnungssystem, wobei bei Einsatz der Laserlichtschranke die Impulsdifferenzen verwendet wurden, während für die Innenmessungen der 1. Messserie künstlich erzeugte, akustische Impulse zu Beginn jeder Messung herangezogen wurden
- Bestimmung der Segmentgrenzen in den Aufnahmen für die Rumpelstreifenüberfahrten, wobei Beginn und Ende dieser Segmente dadurch definiert sind, dass sich mindestens eine Achse am Rumpelstreifen befindet. Für die Daten der 1. Messserie erfolgte diese Segmentierung manuell auf Basis der Kunstkopfmessungen, wodurch gewisse Unsicherheiten in den Segmentgrenzen vorhanden sind (Anhang B).
- Die Emissionsmessungen in Q6 und Q8 erfolgten ohne die Verwendung der Laserlichtschranke. Um trotzdem zuverlässig die Vorbeifahrt zu segmentieren, wurde die zeitliche Verzögerung zwischen den beiden Mikrofonen während der Vorbeifahrt bestimmt. Diese verändert sich abhängig von der Position des Fahrzeugs relativ zum Messquerschnitt. Im Nulldurchgang ist das Fahrzeug im Messquerschnitt.
- Schneiden gemäß der Segmentgrenzen unter Berücksichtigung von Vor- und Nachlaufzeiten zur Eliminierung von Einschwingvorgängen bei der nachfolgenden Parameterberechnung und zur Beurteilung der Eigenschaften auf Fahrbahnbereichen unmittelbar vor Rumpelstreifen
- Schalldrücke
 - Berechnung von Schalldruckpegel (ohne Zeitbewertung, mit A- und C-Frequenzbewertung), Lautheit (DIN45631), Rauigkeit, Schärfe (Aures und DIN45692), Tonalität und Schwankungsstärke als Zeitverlauf für die geschnittenen Segmente

- Berechnung der Mittelwerte, sowie 50- und 95-Perzentilwerte aus den Zeitverläufen für das gesamte Segment, sowie für Teilsegmente (beispielsweise 0,5 s Segmente zu Segmentbeginn, -mitte und -ende)
- Beschleunigungen
 - Hochpassfilterung mit Grenzfrequenzen von 5, 15 und 25 Hz (IIR-Filter, Butterworth 6. Ordnung)
 - Frequenzbewertung der un- und aller hochpassgefilterten Beschleunigungssignale: W_h -Bewertung gemäß ISO 5349-1 [18] für Beschleunigungen am Lenkrad und W_d -Bewertung für Sitzbeschleunigungen in horizontaler Ebene und W_k für Sitzbeschleunigungen der Hochachse gemäß ISO 2631-1 [19]
 - separate Berechnung der Effektivwerte (RMS – root mean square) aus den Zeitverläufen für das gesamte Segment, sowie für Teilsegmente (beispielsweise 0,5 s Segmente zu Segmentbeginn, -mitte und -ende) je Beschleunigungsachse
 - Berechnung der Gesamtbeschleunigung durch quadratische Addition der Effektivwerte der einzelnen Beschleunigungsachsen

4. SIMULATION AUßENGERÄUSCH

Die Synthetisierung von Überfahrtsgeräuschen im Außenbereich erfolgte auf Basis der Messungen der zylindrischen Einzelfuge 0a in Kombination mit einer Schallausbreitungsberechnung unter Verwendung der Randlelementemethode. Abb. 4-1 stellt den Ablauf und die einzelnen Teile der Synthese der Rumpelstreifen dar. Die Beschreibung der einzelnen Teile erfolgt im weiteren Verlauf dieses Kapitels.

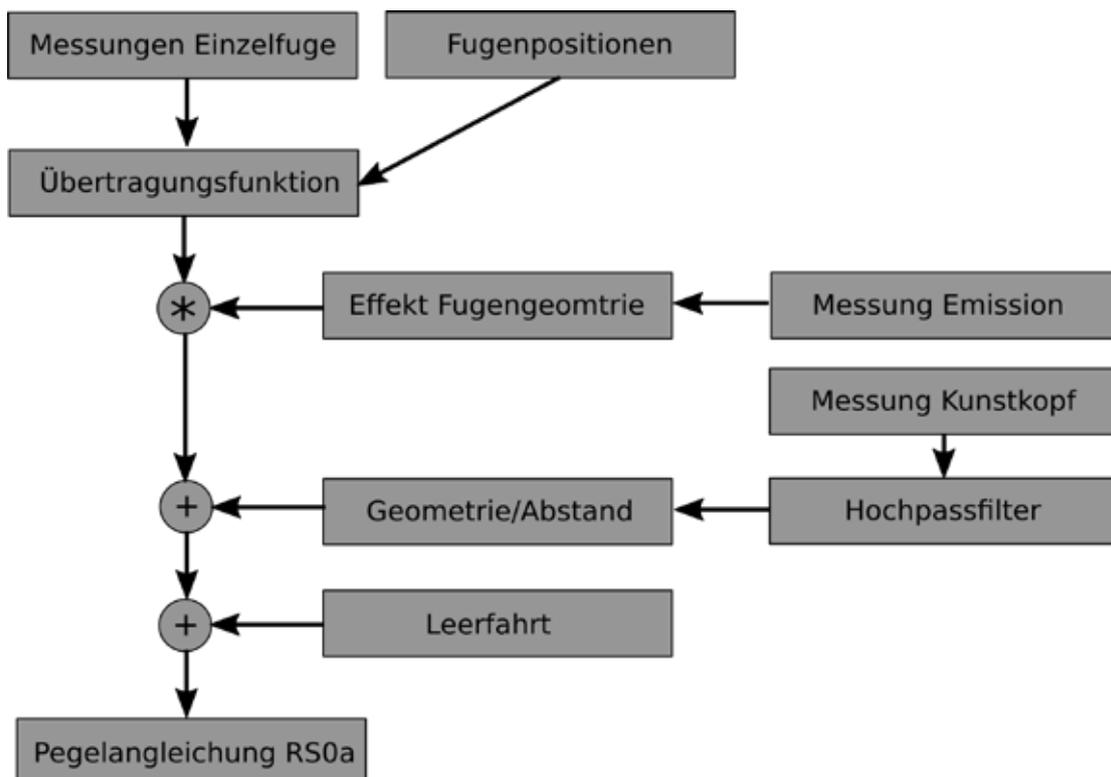


Abb. 4-1: Ablauf der Erstellung der synthetischen Außengeräusche

4.1. Emissionen der Einzelfuge beim PKW

Die Messungen der Überfahrten der Einzelfugen beim PKW zeigten eine hohe Reproduzierbarkeit (Abb. 4-2).

Die Messungen wurden in 1 m Entfernung, 31,5 cm über der Fahrbahn durchgeführt. Um eine möglichst gute Übereinstimmung zu erzielen, wurden die Signale händisch synchronisiert. Als Anhaltspunkt galt hier die starke negative Spitze die sowohl beim Vorder- als auch beim Hinterrreifen zu sehen war. Es ist ersichtlich, dass der Beginn der Überfahrt relativ deutlich erkennbar ist, die Dauer des Ausschwingens ist etwas schwieriger zu erkennen. Die rote Linie illustriert den Mittelwert über alle Überfahrten.

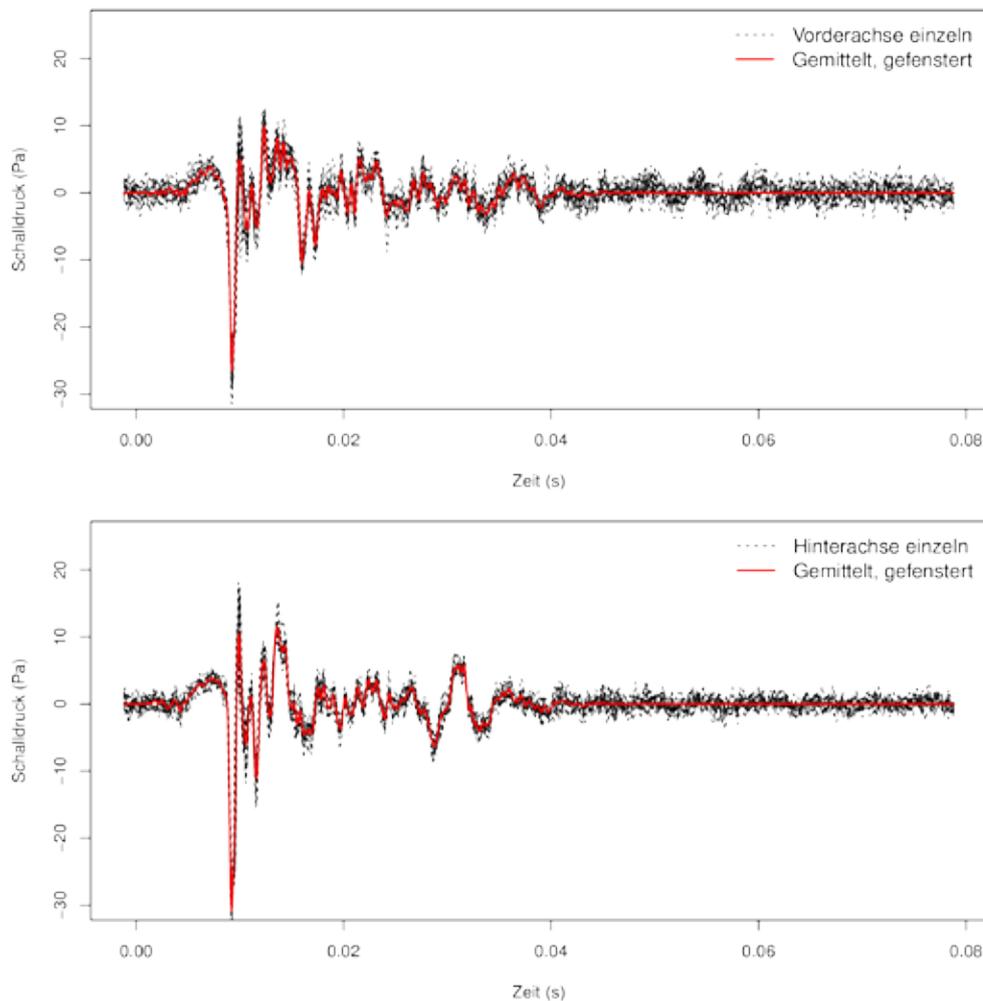


Abb. 4-2: Signale der einzelnen Messungen der Überfahrten des PKW der Einzelfuge 0a mit einem Überdeckungsgrad von max. 2. Der gefensterter Mittelwert ist rot dargestellt

Der Überdeckungsgrad war für die meisten Überfahrten sehr gut, von 11 Überfahrten waren nur 2 Überfahrten mit einem Grad schlechter als 3. Dies erklärt zum Teil auch die geringe Schwankung. Außerdem sind die Emissionen beim PKW nicht so stark vom Grad der Überdeckung abhängig.

Es wurden für die Synthese die gemittelten Impulse aller Überfahrten mit einem Überdeckungsgrad 2 und besser verwendet.

4.2. Emissionen der Einzelfuge beim LKW

Die Streuung beim LKW ist deutlich ausgeprägter (Abb. 4-3), weiters ist der Pegel des Vorbeifahrtsgeräusches deutlich höher, was sich in einer erhöhten Streuung zwischen den jeweiligen Impulsen zeigt. Die Hinterachsen produzieren hier beim Überfahren der Fuge nur wenig zusätzlichen Lärm.

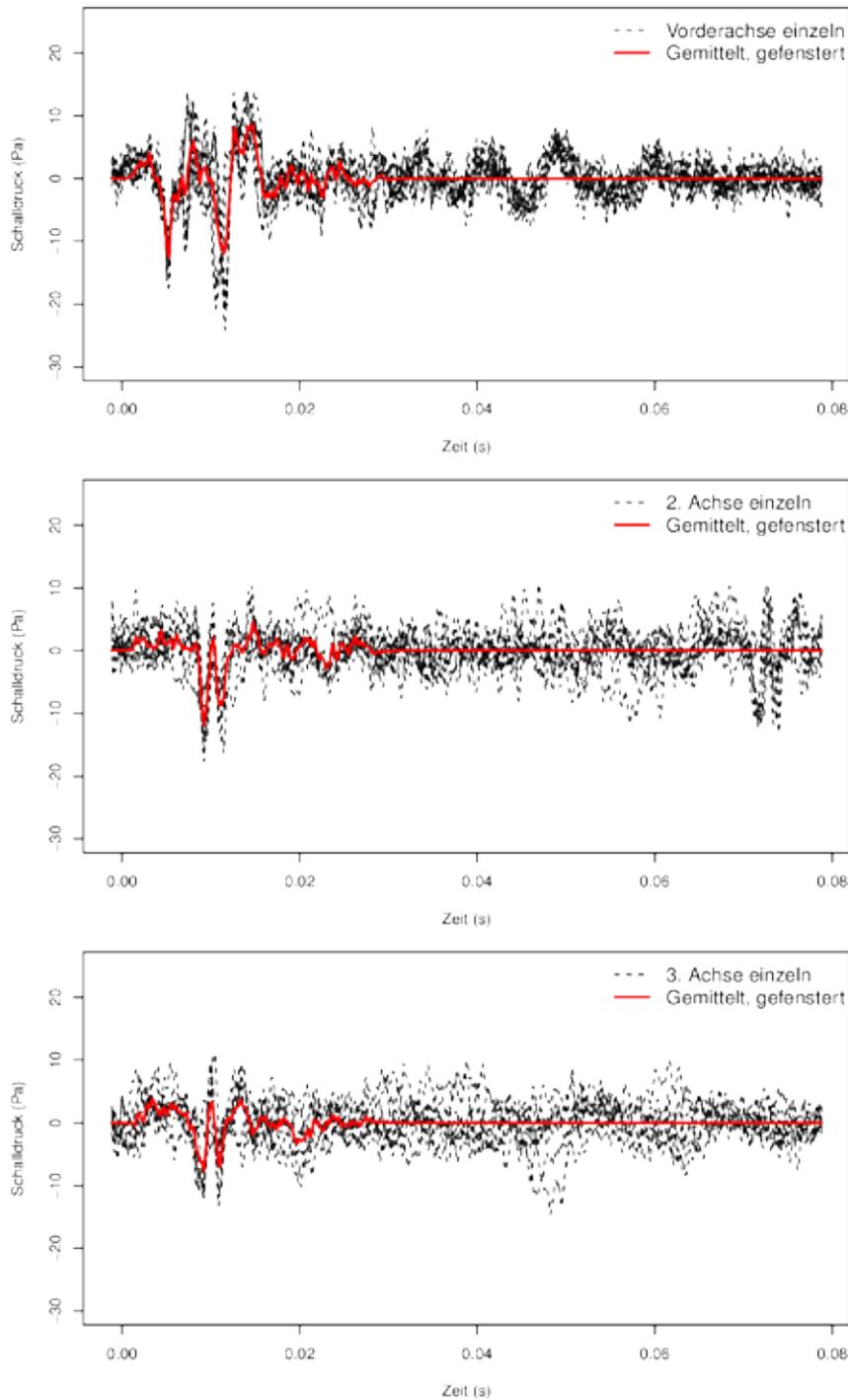


Abb. 4-3: Signale der einzelnen Messungen der Überfahrten des LKW der Einzelfuge 0a mit einem Überdeckungsgrad von max. 2. Der gefensterter Mittelwert ist rot dargestellt

Auch hier wurde händisch synchronisiert wobei dies beim LKW etwas schwieriger war als beim PKW. Grund dafür ist der Effekt des Überdeckungsgrades auf das Fugengeräusch.

Abb. 4-4 zeigt die Unterschiede für unterschiedliche Überdeckung (gemittelt über die jeweiligen Überfahrten). In der rechten unteren Grafik sind die nach Überdeckungsgrad

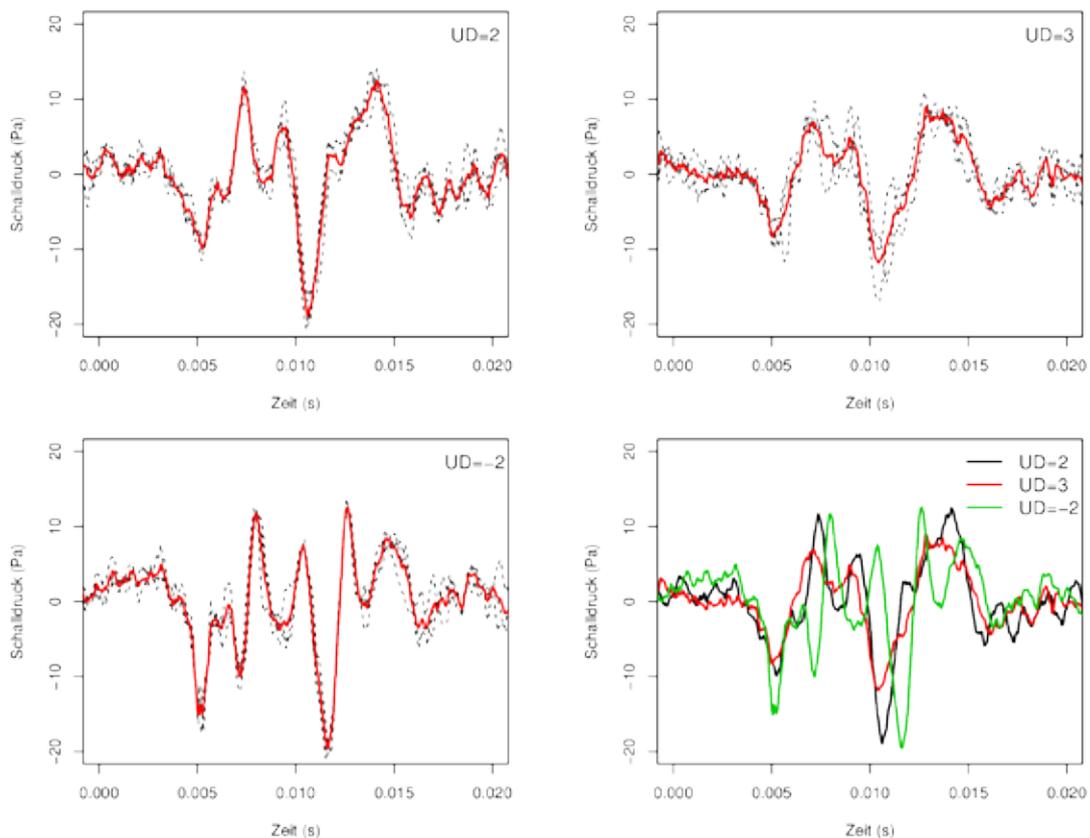


Abb. 4-4: Einzelfugengeräusch beim LKW als Funktion des Überdeckungsgrades

gruppierten und gemittelten Signale dargestellt. Es zeigen sich hier Unterschiede im Ablauf und in der Höhe.

Wie beim PKW wurden für die Synthese die gemittelten Impulse aller Überfahrten mit einem Überdeckungsgrad 2 und besser verwendet. Nach der akustischen Auswertung der kegelförmigen Einzelfugen wurde von einer Synthese mittels dieser abgesehen. Im Innenraum wäre dies außerdem problematisch gewesen da hier die Einzelfugen nicht herangezogen werden konnten.

4.3. Simulation Fahrbahn und Böschung

Die Einzelfugenmessungen bilden die Basis für die künstlich erzeugten Vorbeifahrten. Um das akustische Signal in der Empfängerposition der Immissionsmessungen zu erhalten (25 m von RS und 1,2 m über der Straße) muss die Ausbreitung berechnet werden. Dafür wurde die Randlelementemethode verwendet. Der grundlegende Querschnitt bestand aus einer reflektierenden Fahrbahn und einer Böschung. Es wurden verschiedene Böschungshöhen simuliert (1, 1,5 und 2 m) die vergleichbar waren mit den bei der Messung tatsächliche vorhandenen Höhen (Abb. 4-5).

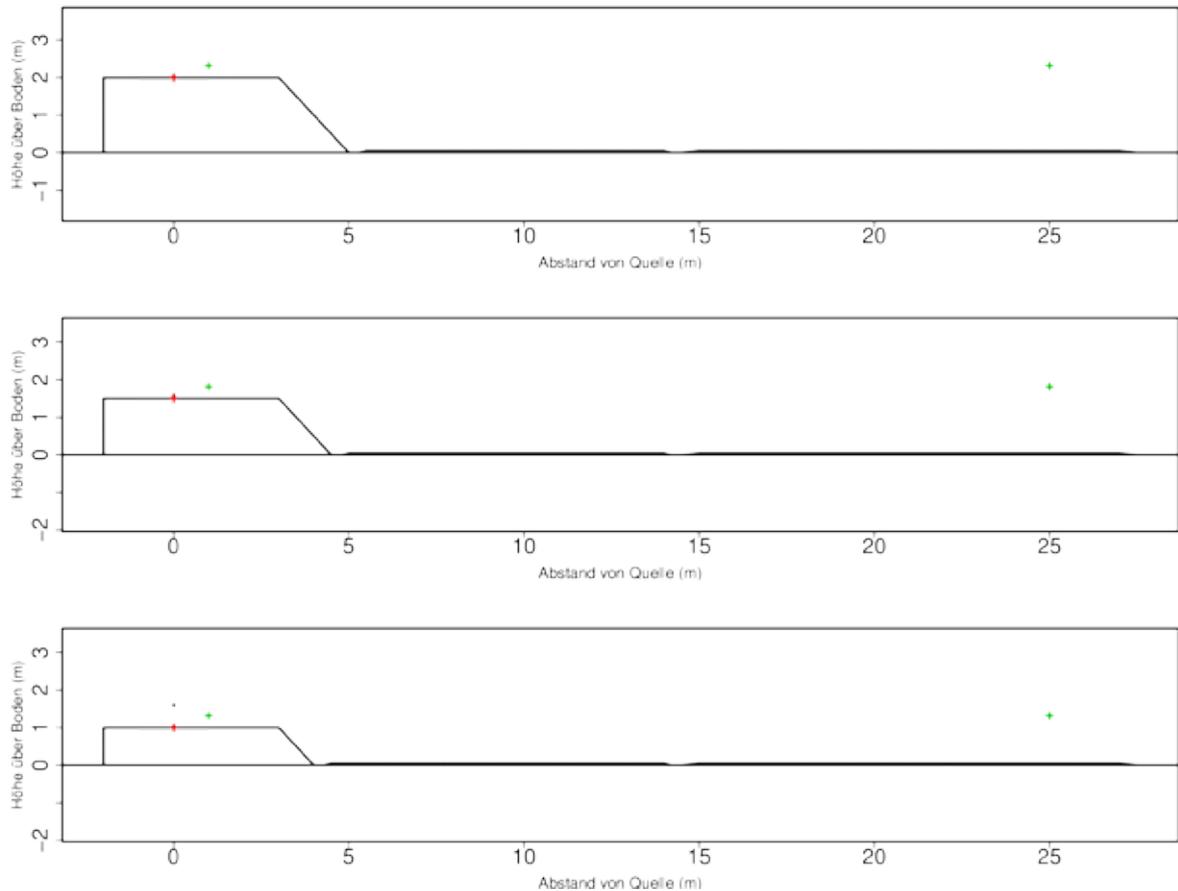


Abb. 4-5: Simulationsquerschnitte mit Quell- und Zielpositionen

Die Böschung und der Boden in der Umgebung wurden als absorbierend auf Basis eines Impedanzmodells angenommen. Dieses Modell wurde für Schotter bei Bahngleisen definiert und ist daher ein Modell für porösen Untergrund mit einer reflektierenden Grundschicht. Durch die Annahme von 3 Schichten produziert es keine starken Interferenzen und insgesamt keine extrem hohen Absorptionen (Abb. 4-6). Dadurch hat es sich bei Bahntrassen bewährt und wird daher in diesem Fall als Ersatz für den unbekanntem Boden eingesetzt [20]. Es wurde auch eine Simulation mit einem Standard-Admittanz-Modell für Grasland durchgeführt, hier ergaben sich allerdings ein ausgeprägter und relativ schmalbandiger Pegelbruch bei ca. 300 Hz und auch numerische Probleme bei ca. 1,5 kHz.

Abb. 4-7 stellt die gemittelte aus den Messungen bestimmte Transferfunktion zwischen dem Messpunkt direkt an der Einzelfuge (1 m Entfernung) und dem 25 m Messpunkt im darauf folgenden oder im davorliegenden RS-Querschnitt, also z.B. Q2a-Q2b oder Q2a-Q1b (d.h. 40 m in Längsrichtung entfernt). Die Simulationen für verschiedene Böschungshöhen sind darübergelegt. Größere Abweichungen treten hier im Bereich zwischen 1000 und 2000 Hz

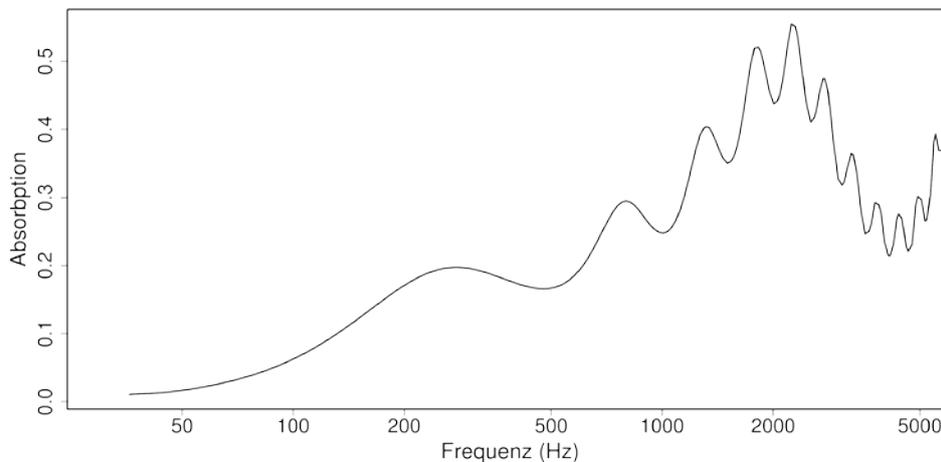


Abb. 4-6: Absorption des Impedanzmodells

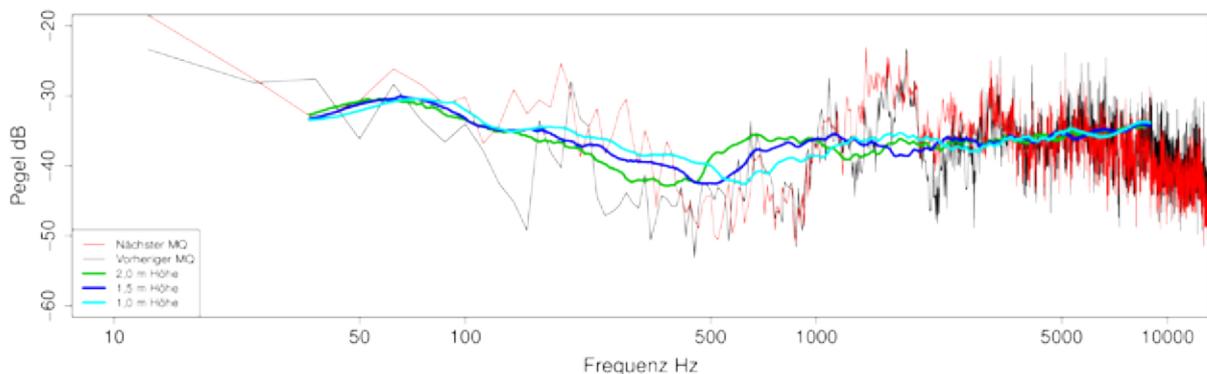


Abb. 4-7: Transferfunktion ermittelt aus Messungen einer Einzelfuge

auf. Unterschiede zwischen vorher und nachher liegenden Punkten können auf Dopplerverschiebung, Richtwirkung der Quelle (also des Reifens) oder aber auch Bodeneffekte zurückzuführen sein.

4.4. Synthese einer bewegten Quelle

Für die Synthese wurde angenommen, dass der Puls bei der Überfahrt einer Fuge stationär ist, d.h. das Signal aus Abschnitten 4.1 und 4.2 wurde mittels der Übertragungsfunktion an der Fugenposition zur Empfängerposition modifiziert.

Dazu wurde die Fouriertransformation des Einzelfugensignals mit der spektralen Übertragungsfunktion aus der BEM-Berechnung multipliziert. Da eine BEM-Berechnung mit der vollen Frequenzauflösung zu aufwändig wäre (bei 2 s Stimulusdauer z.B. 0,5 Hz) wurde die Übertragungsfunktion interpoliert. Dazu wurde mithilfe der Entfernung vom Empfänger zur Fuge die stark oszillierende Übertragungsfunktion demoduliert, und diese relativ glatte Funktion interpoliert. Danach wurde die Übertragungsfunktion wieder mit dem gleichen

Modulationsterm moduliert. Dieser Ansatz ist ähnlich dem Ansatz der für 2.5D Berechnungen verfolgt wurde [21].

Da die BEM-Berechnung keine Übertragungsdämpfung beinhaltet, wurde die Dämpfung mittels der ISO 9613-1 [22] (20°C, 50 % Luftfeuchtigkeit) für die jeweilige Entfernung Fuge-Empfänger bestimmt und die Amplitude der Übertragungsfunktion entsprechend modifiziert.

Da es sich bei den Aufzeichnungen um Kunstkopfaufnahmen handelt, wurden die synthetischen Aufnahmen ebenfalls modifiziert, um den räumlichen Eindruck einer Vorbeifahrt zu erhalten. Dazu wurde die Streuung einer ebenen Welle aus der Richtung der jeweiligen Fuge aus Sicht des Empfängers auf einer Kugel mit 20 cm Durchmesser verwendet. Daraus wurde die Übertragungsfunktion an der jeweiligen Position des Ohres berechnet.

Die Annahme eines stationären Pulses ist eine Vereinfachung, da der Reifen sich während der Dauer des Pulses weiterbewegt. Aufgrund der Rotation des Reifens bewegen sich aber unterschiedliche Punkte am Reifen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit. Im Speziellen hat der Kontaktpunkt des Reifens Geschwindigkeit 0. Daher ist es unklar, ob die Annahme einer gleichförmig bewegten Punktquelle richtiger ist als die einer stationären Quelle.

Da die Annahme einer stationären Übertragungsfunktion zum Zeitpunkt eines Impulses überzeugende Ergebnisse lieferte, wurde diese Variante verwendet.

Bis zu diesem Schritt wurden die Signale mit 16 kHz Abtastrate erzeugt, da die BEM-Rechnung nur bis 8 kHz durchgeführt wurde, danach wurden sie auf 48 kHz gesampelt.

4.5. Einfluss der Fugengeometrie

Das Profil der Einzelfuge entspricht in etwa dem des RS0b und RS4. Vermutlich auf Grund der Mittelung über mehrere Überfahrten und der dadurch erfolgten Abschwächung hochfrequenter Komponenten des Anregungspulses (bei gleichzeitiger Abschwächung des vor allem beim LKW stark vorhandenen und unerwünschten Motorsignals) zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen Synthese und Messung des abgerundeten und nicht so tiefen RS0a.

Um auch den Sinusstreifen synthetisieren zu können, mussten die Harmonischen modifiziert werden. Dazu musste der Unterschied zwischen Sinus (RS7) und RS0a sowie RS5 (RS6) und RS1 bestimmt werden. Um den Geländeeffekt gering zu halten, wurden hierfür die Aufzeichnungen in 7,5 m verwendet.

Es wurden pro Rumpelstreifen und Fahrzeug die fünf Überfahrten mit der besten Überdeckung verwendet. Die Audiosignale wurden auf 4 kHz hinuntergesampelt, da nur der

Frequenzbereich bis 2 kHz für den reinen Fugenteil interessant war. Das Signal wurde so geschnitten, dass ca. 10-11 m rund um den Messquerschnitt analysiert wurden. Mit einem gleitenden Hamming-Fenster (Länge 150 ms, Schrittweite 10 ms) wurden einzelne Segmente erzeugt und Fourier-transformiert. Es wurde die Grundfrequenz geschätzt und Amplituden des harmonischen Rasters bestimmt. Aus den Vorbeifahrten ohne Rumpelstreifen wurde das Grundgeräusch bei den gleichen Frequenzen bestimmt und energetisch von den Amplituden im Rumpelstreifenspektrum abgezogen um den Anstieg, der durch den Rumpelstreifen verursacht wurde, zu bestimmen. Werte unter 0 wurden auf 0 gesetzt und danach wurde das Maximum der korrigierten Rumpelstreifenamplitude und der Vorbeifahrtsamplitude (um 10 dB verringert) bestimmt. Dies hat den Sinn, den im Fahrgeräusch verschwundenen RS-Anteil nach unten zu begrenzen, da dies sonst in den weiteren Schritten (Differenzbildung) zu erheblichen Problemen führen würde. Die so bestimmten harmonischen Amplituden wurden logarithmiert und weiter verwendet, um die log-Einhüllende (Verbindung der harmonischen Komponenten) zu interpolieren.

Die Einhüllenden wurden über die Zeit geglättet indem immer der vorherige Zeitschritt gewichtet mit 0,1 und der aktuelle Zeitschritt gewichtet mit 0,9 gemittelt wurde. Aus den Einhüllenden wurden mittels der in [23] beschriebenen Methode Pol-Nullstellen-Filter (jeweils Ordnung 30) abgeleitet, um auch im spektralen Bereich eine gewisse Glättung zu erhalten.

Um den Effekt der Fuge zu schätzen wurden im Weiteren die Unterschiede in den Spektren zwischen RS0a und RS7 sowie RS1 und RS5 bestimmt.

Hierzu wurden alle 25 möglichen Kombinationen der 5 Vorbeifahrten des jeweiligen Rumpelstreifens verwendet. Es wurde für jede Kombination die Differenz der Spektren in dB bestimmt und über die Vorbeifahrt gemittelt. Danach wurden die 25 Differenzspektren gemittelt und mittels der Annahme eines minimalphasigen Systems wieder wie oben ein Filter bestimmt und die Sprungantwort berechnet. Es wurde ein ausreichend langes Segment verwendet, sodass die Sprungantwort abgeklungen war. Diese wurde dann auf 48 kHz gesampelt und als Filter für die jeweilige Bedingung verwendet.

Um die 400 mm Sinusstreifen abzubilden, wurden die spektrale Differenz zwischen 300 mm konventionell und Sinus (RS0a und RS7) und 600 mm (RS1 und RS5) gebildet, und diese dann mit 2/3 bei 300 mm und 1/3 bei 600 mm gemittelt und daraus ein Filter gebildet.

4.6. Hochfrequente Anteile

Im Außenbereich zeigten sich starke hochfrequente Anteile (über 2000 Hz), welche bei den aus den Einzelfugensignalen abgeleiteten synthetisierten Geräuschen nicht auftraten, aber

einen deutlichen Klangunterschied verursachen. Es wurden daher diese Geräusche in die synthetisierten Überfahrten übernommen. Da aber die Parameter der Rumpelstreifen modifiziert wurden, erfolgte anhand der bestehenden Messung eine Abschätzung, wie die hochfrequenten Komponenten modifiziert werden sollten, um z.B. den Fugenabstand von 400 mm zu berücksichtigen.

Um den HF-Anteil zu quantifizieren wurde der L_{Aeq} des zwischen 2000 und 8000 Hz Bandpassgefilterten RS-Signals verwendet (die besten 3 Vorbeifahrten). Um das Geräusch für den 400 mm konventionellen periodischen Streifen zu erzeugen, wurde das HF-Geräusch des RS0a verwendet, und mit 1/3 der Pegeldifferenz zwischen RS0a und RS1 skaliert. Die Annahme ist wie schon bei der Fugengeometrie dass 400 mm ähnlicher zu 300 mm sind, als zu 600 mm. Beim Sinus wurde die Differenz zwischen RS7 und RS5 verwendet. Ähnlich wurde auch bei den Pseudozufallsvarianten verfahren, wobei hier auch für 600 mm das Signal des RS4 verwendet wurde.

Die HF-Signale zur Überlagerung wurden mit 1920 Hz Grenzfrequenz hochpassgefiltert. Diese Frequenz wurde verwendet, da sich ansonsten immer ein im Spektrogramm sichtbarer Einbruch bei ca. 2000 Hz ergab. Die Vorbeifahrten ohne Rumpelstreifen wurden mit 1920 Hz tiefpassgefiltert und ebenfalls überlagert.

4.7. Pegelanpassung an Referenzstreifen

Die Synthese und die Ausbreitungsrechnung sind mit Unsicherheiten behaftet und daher wurde noch eine Pegelanpassung im tieffrequenten Bereich unter 1000 Hz vorgenommen. Dafür wurde bis zu 950 Hz (etwas oberhalb der 9. Harmonische beim PKW bei Überfahrt des RS0a) der Unterschied in der Energie zwischen normaler Vorbeifahrt und RS-Fahrt und Synthese des RS0a berechnet. In diesem Frequenzbereich sind die Harmonischen des RS dominant. Die daraus resultierende Differenz wurde als Skalierungsfaktor auf alle synthetisierten RS (nur das Fugensignal) angewendet. Beim PKW wurden die Signale um ca. 2 dB nach unten skaliert, beim LKW um ca. 2,5 dB nach oben (Mittelwert aus beiden Kanälen). Die Angleichung erfolgte mit den Daten der Simulationen mit einer 1 m hohen Böschung.

4.8. Vergleich Messung-Synthese

Für den Vergleich wurden die gemittelten Spektren über die Dauer der Vorbeifahrt (check) verwendet. Mittels der Welch-Methode wurde die Spektralleistungsdichte für gemessene und synthetisierte Signale bestimmt. Es werden auch die Vergleich mit den beiden in MS2 (also

nach den Wahrnehmungstests) gemessenen Rumpelstreifen RS12 (600 mm, 7mm) und RS13 (400 mm) dargestellt.

PKW

Abb. 4-8 zeigt den Vergleich zwischen Synthese und Messung. Die Übereinstimmung ist sehr gut, vor allem für eine 1 m hohe Böschung (dies wurde später auch verwendet), die am besten auch den tatsächlichen Gegebenheiten in diesem Querschnitt entspricht. Die Verbreiterung der Harmonischen entsteht durch die Dopplerverschiebung. Der Effekt der Böschung in der Simulation ist nicht homogen, um 500 Hz bewirkt die höhere Böschung eine Erhöhung der Schallpegel, im Bereich von etwa 300 Hz eine Erniedrigung, insgesamt sind der L_{Aeq} und der L_{Ceq} aber sehr ähnlich.

Abb. 4-9 zeigt den Vergleich Messung-Synthese bei RS1 (600 mm). Auch hier ist die Übereinstimmung unter 1000 Hz sehr gut, zwischen 1000 und 1300 Hz kommt es aber zu größeren Abweichungen. In der Simulation zeigt die Querschnittsgeometrie keinen Effekt. Eine mögliche Erklärung für den Unterschied ist daher die einzelne Fuge die für diesen Streifen einen etwas schärferen Übergang in Längsrichtung aufweist und auch etwas tiefer gefräst ist (ca. 2-3 mm tiefer als RS0a).

Bei RS4 (Abb. 4-10) zeigen sich größere Probleme über einen großen Frequenzbereich, verursacht vermutlich durch die Geometrie dieser senkrecht gefrästen Fuge. Der

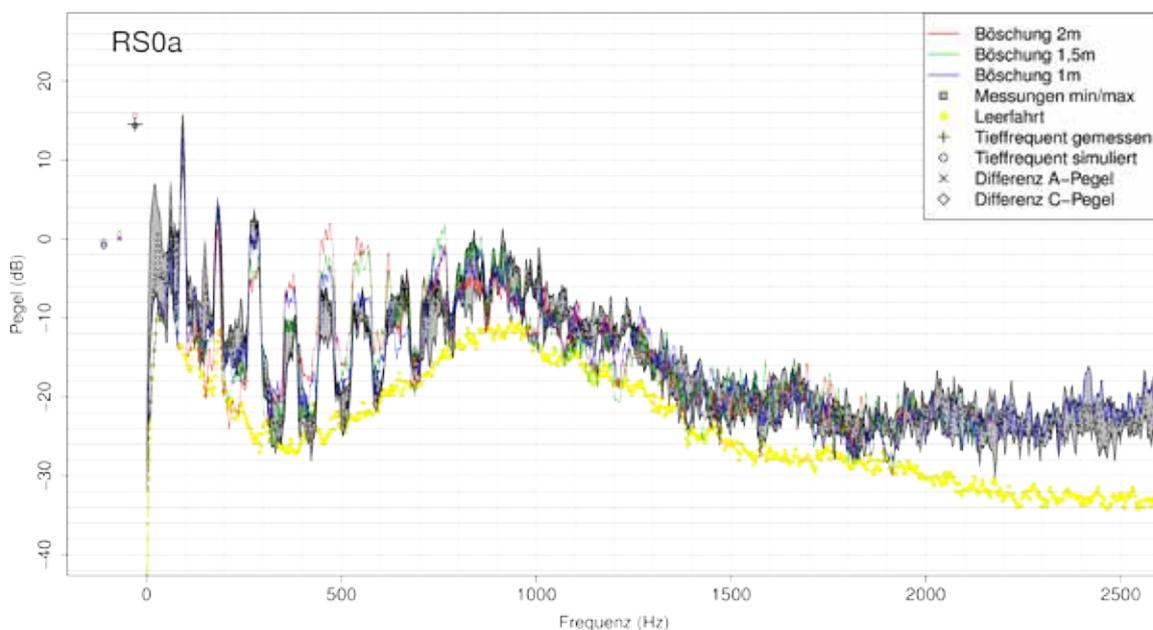


Abb. 4-8: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des PKW über RS0a (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

hochfrequente Anteil aus dem gemessenen ist hier deutlich zu hoch, es wurde aber davon abgesehen diesen zu korrigieren, da unklar war, was hier ein guter Kompromiss sein könnte. Abb. 4-11 zeigt RS5 (600 mm Sinus). Dieser wird nur der Vollständigkeit halber gezeigt, da die Synthese nicht im Test verwendet wurde.

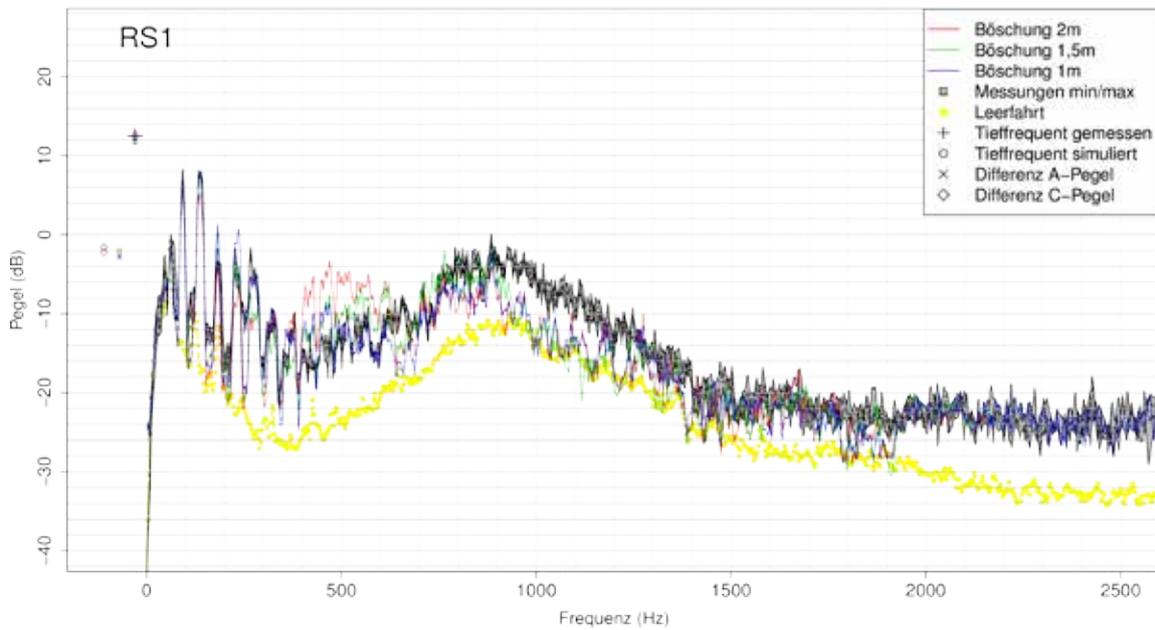


Abb. 4-9: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des PKW über RS1 (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

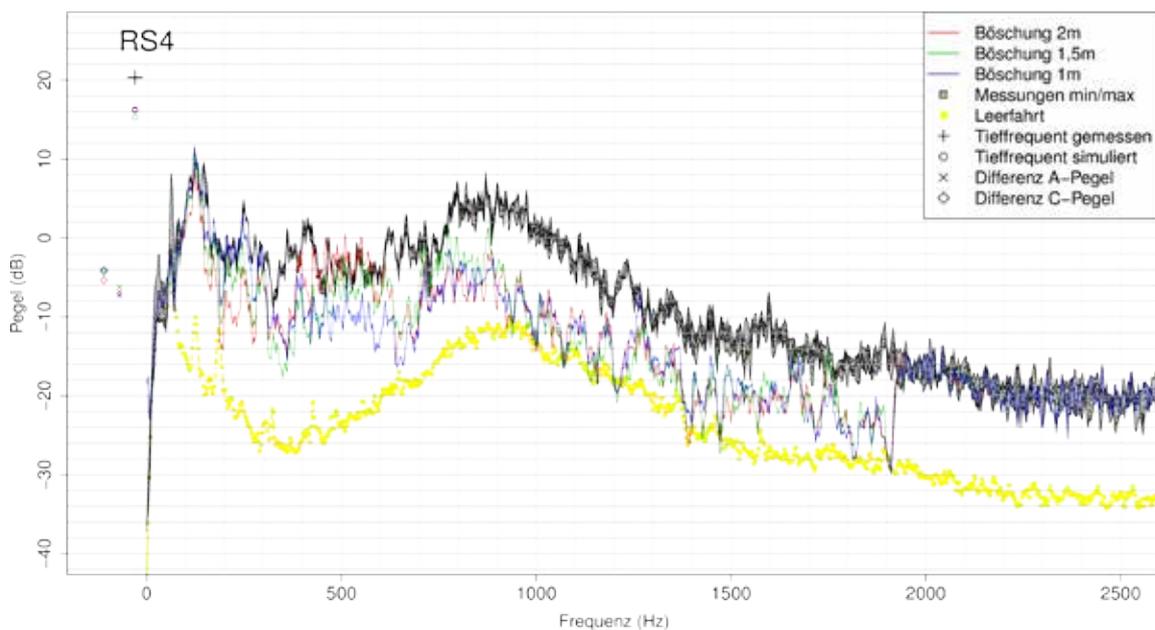


Abb. 4-10: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des PKW über RS4 (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

Bei RS7 (300 mm Sinus, gewölbt, Abb. 4-12) ergab sich wieder eine sehr gute Übereinstimmung mit leichten Abweichungen im Bereich zwischen ca. 900 und 1200 Hz. Die beiden Streifen aus Testfeld 2 (RS13 und RS14, Abb. 4-13 und Abb. 4-14) zeigen sehr unterschiedliche Ergebnisse. RS12 (600 mm) wird deutlich in der Wirkung überschätzt

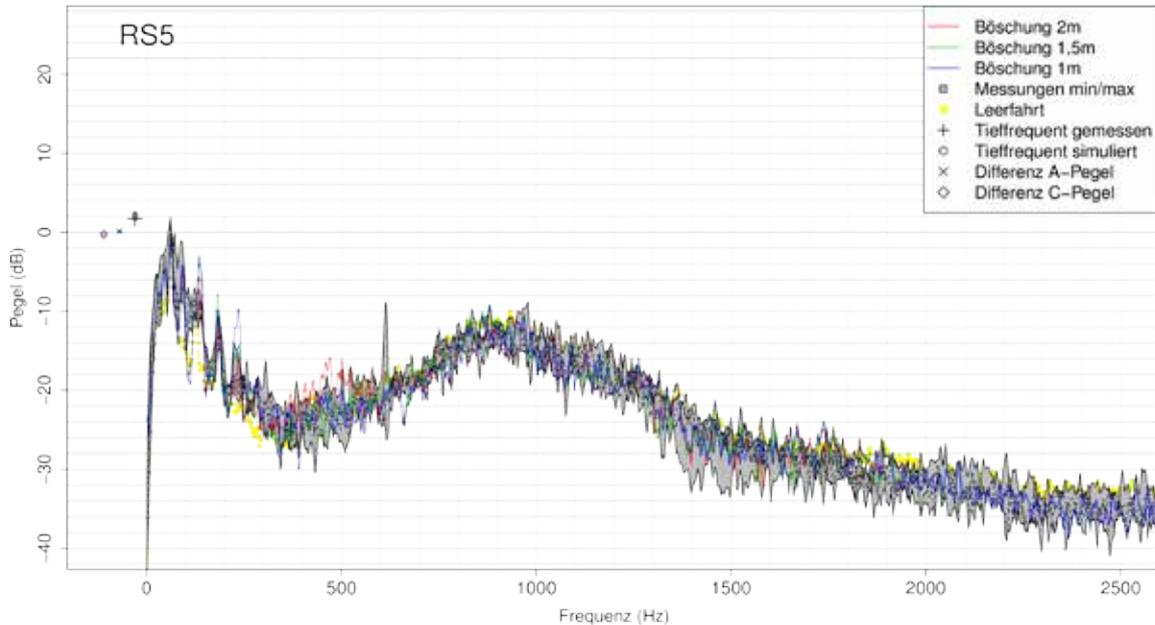


Abb. 4-11: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des PKW über RS5 (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

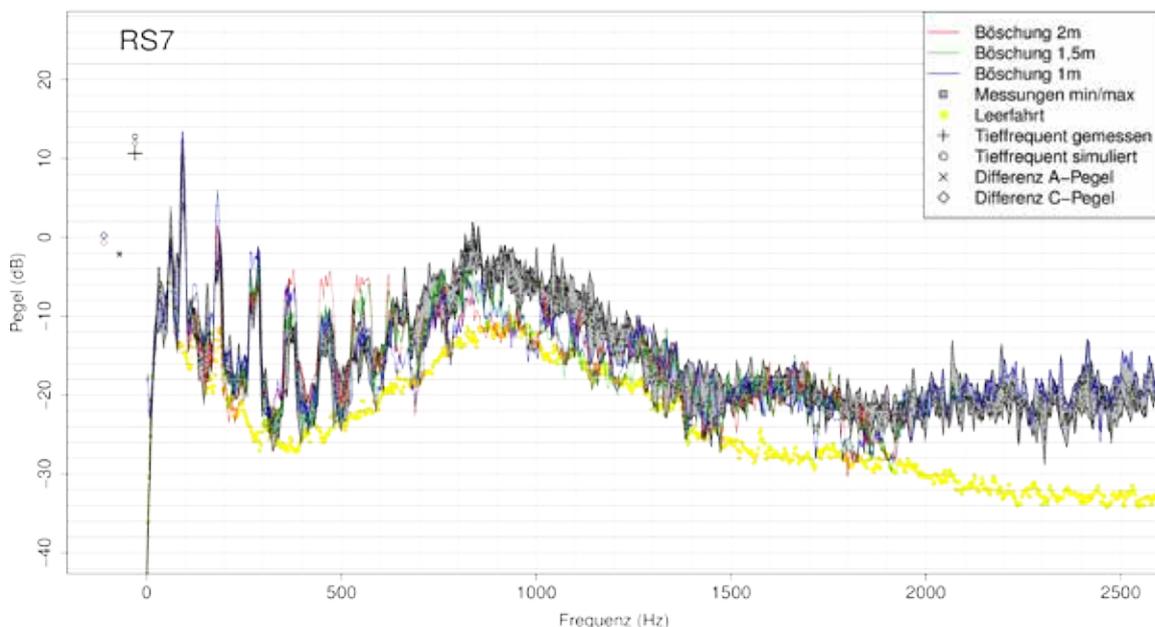


Abb. 4-12: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des PKW über RS7 (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

(sowohl unter als auch über 2000 Hz) wogegen RS13 (400 mm) prinzipiell gut übereinstimmt, allerdings ist hier das hochfrequente Geräusch zu hoch angesetzt.

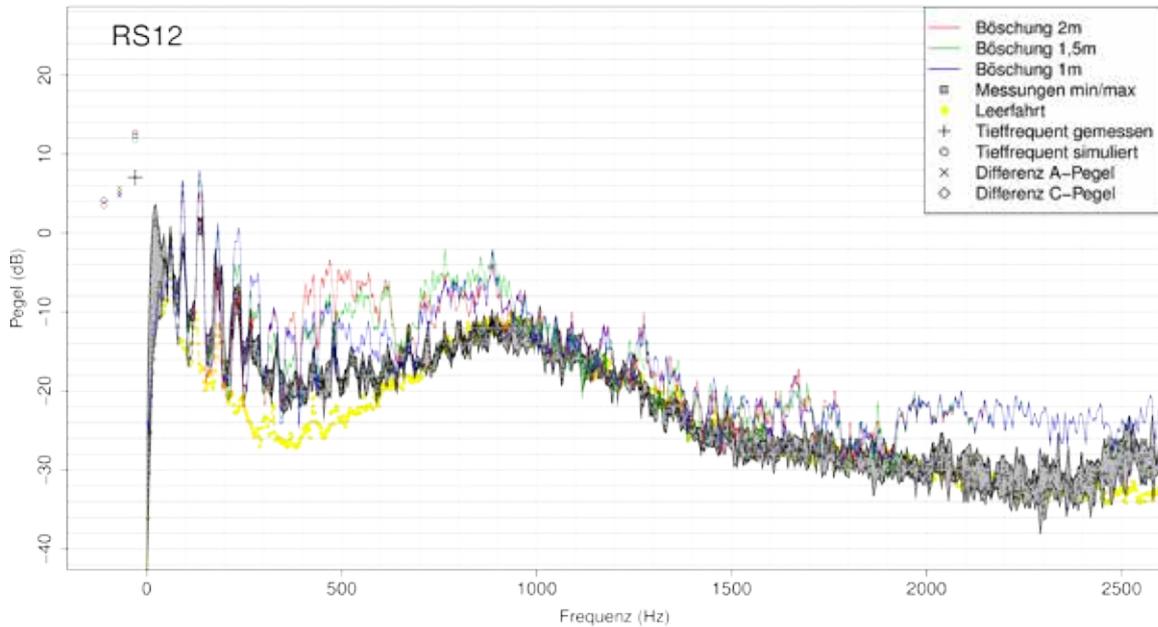


Abb. 4-13: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des PKW über RS12 (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

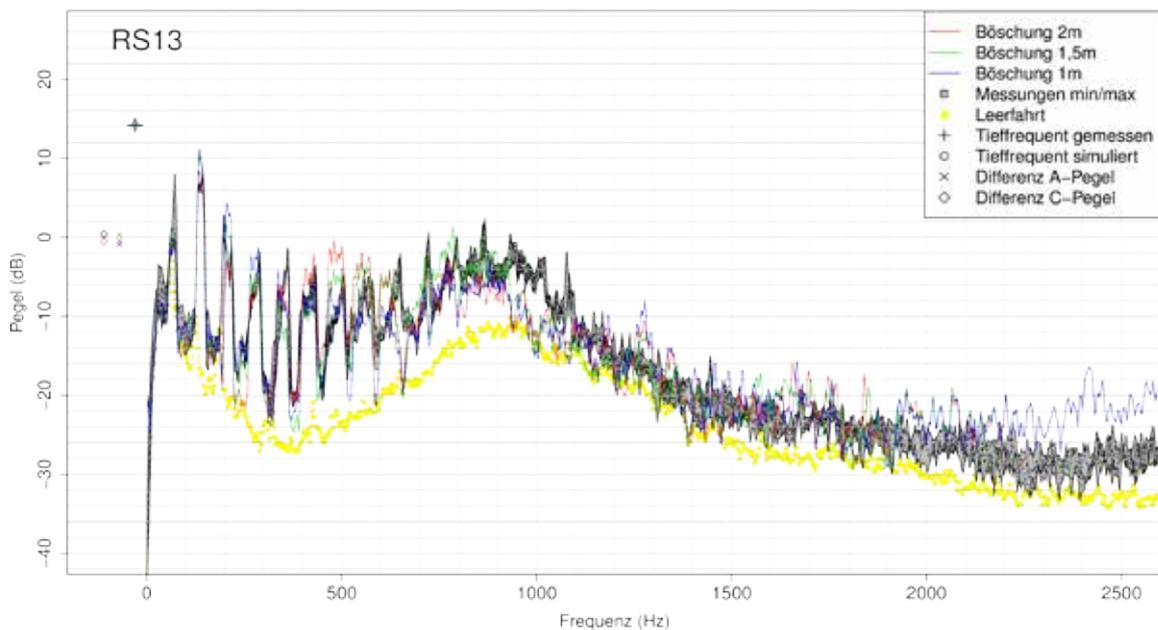


Abb. 4-14: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des PKW über RS13 (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

LKW

Beim LKW sind die Abweichungen insgesamt geringer, dies liegt auch an der, relativ gesehen, geringeren Wirkung. Abb. 4-15 (RS0a) und Abb. 4-16 (RS1) passen beide sehr gut mit der Messung zusammen mit leichten Abweichungen bei RS1 bei ca. 500 Hz.

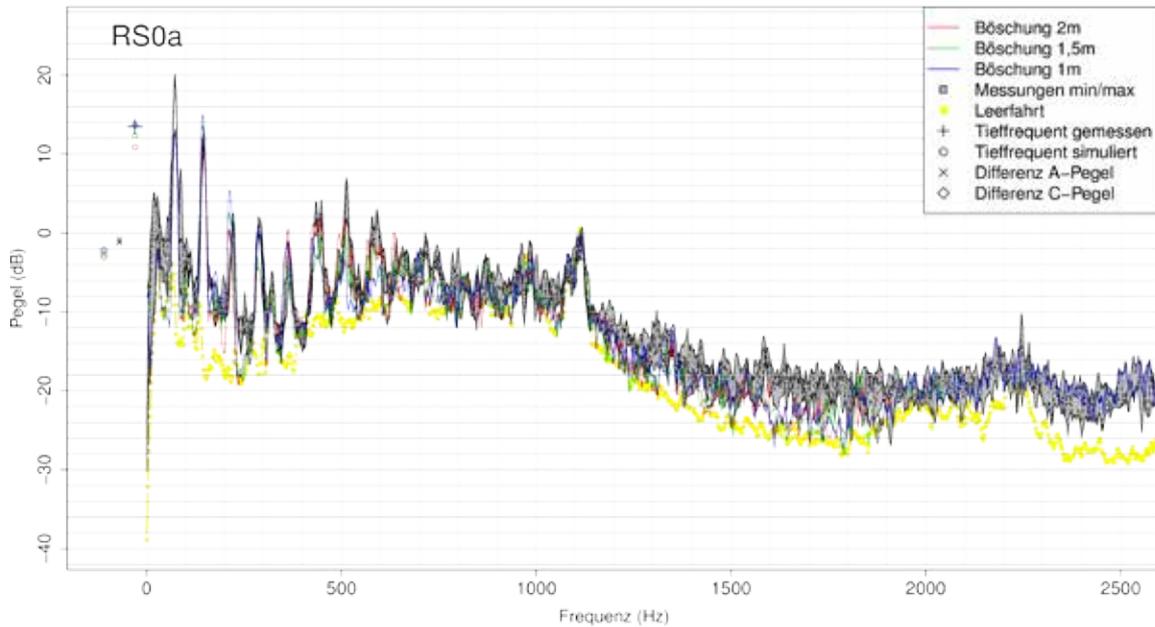


Abb. 4-15: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des LKW über RS0a (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

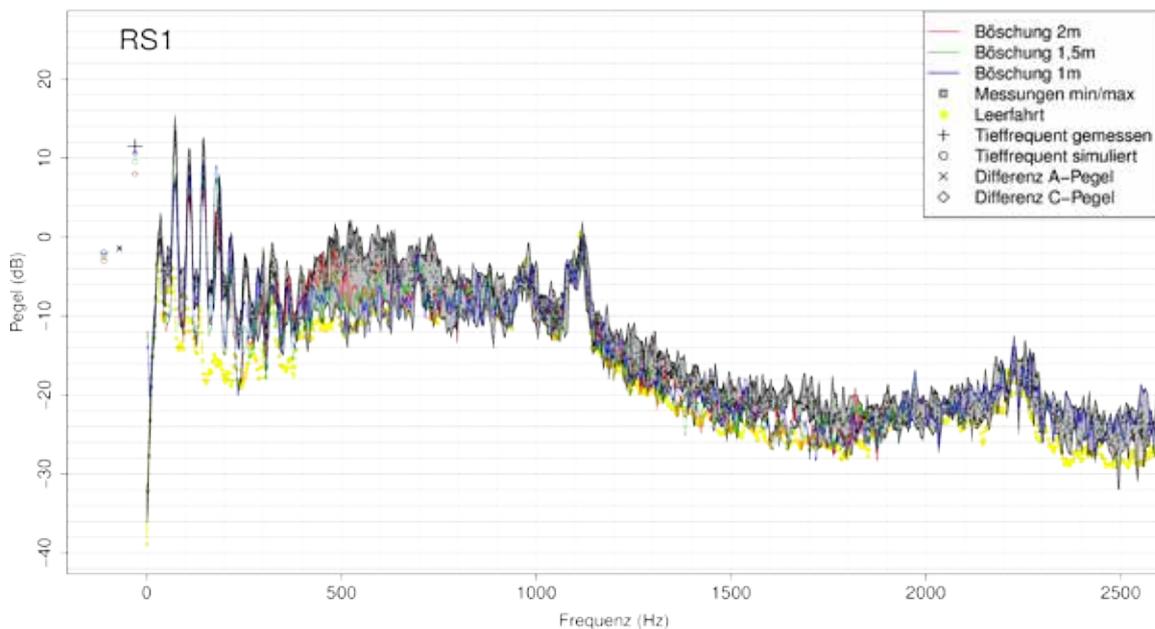


Abb. 4-16: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des LKW über RS1 (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

Bei RS4 (Abb. 4-17) zeigt sich im Bereich von ca. 300 bis 700 Hz eine stärkere Abweichung die so ähnlich auch beim PKW zu beobachten war. Beim LKW spielt die Kante prinzipiell eine geringere Rolle, daher ist unklar ob dies vielleicht auch mit der Sequenz der RS zusammenhängt.

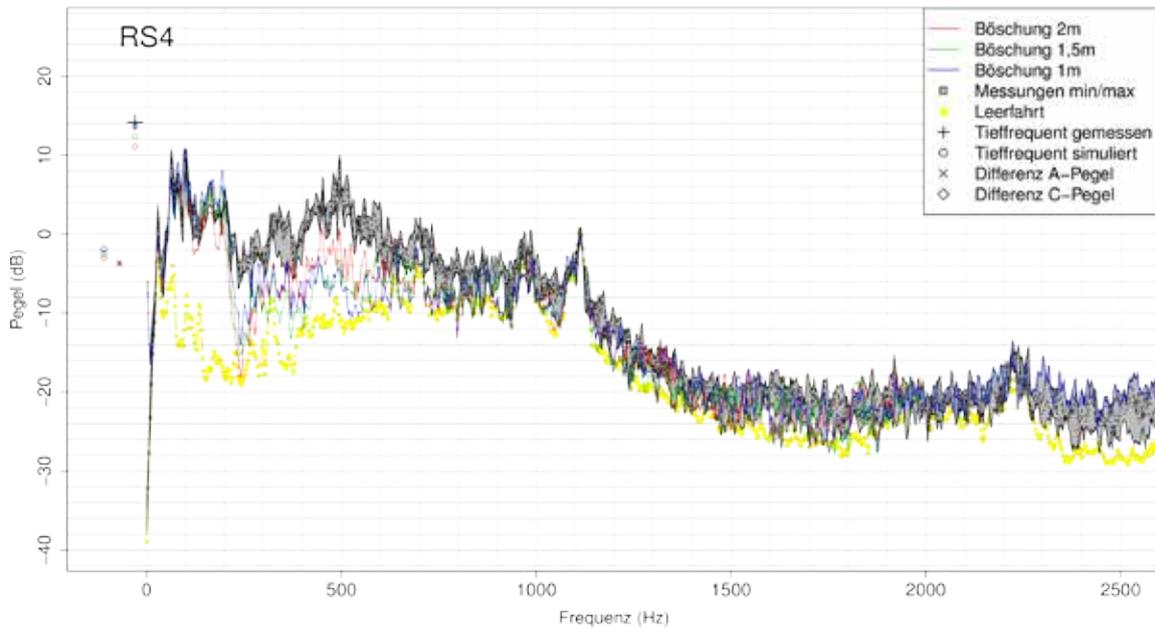


Abb. 4-17: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des LKW über RS4 (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

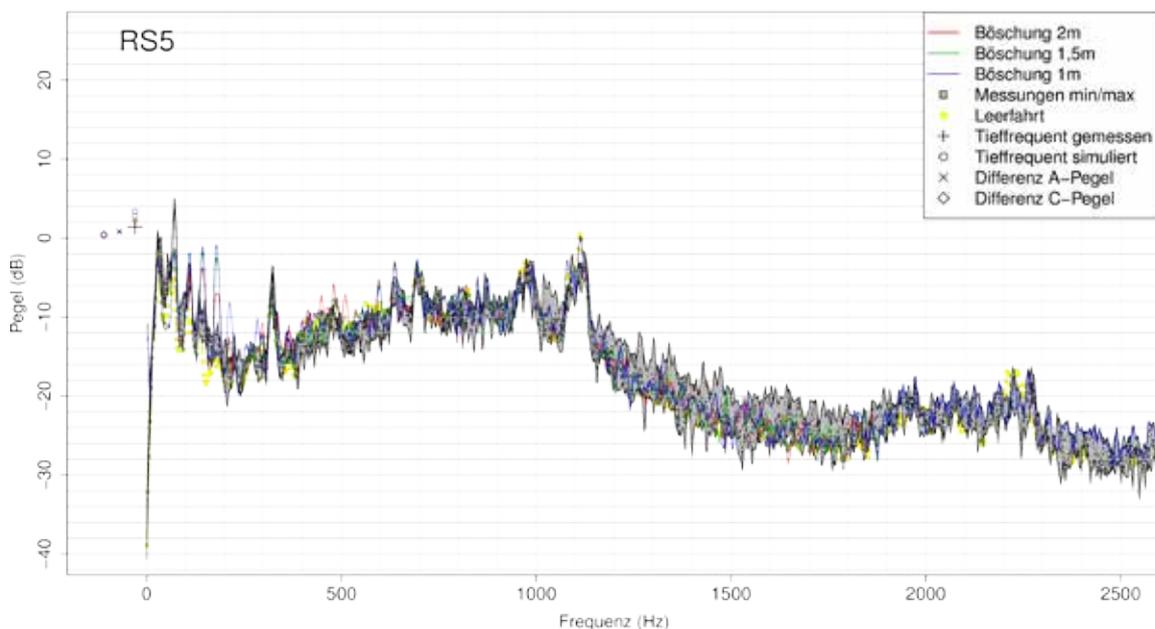


Abb. 4-18: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des LKW über RS5 (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

Vor allem bei RS5 aber auch bei RS7 (Abb. 4-18 und Abb. 4-19) werden die schmalbandigen Anregungen teilweise etwas überschätzt.

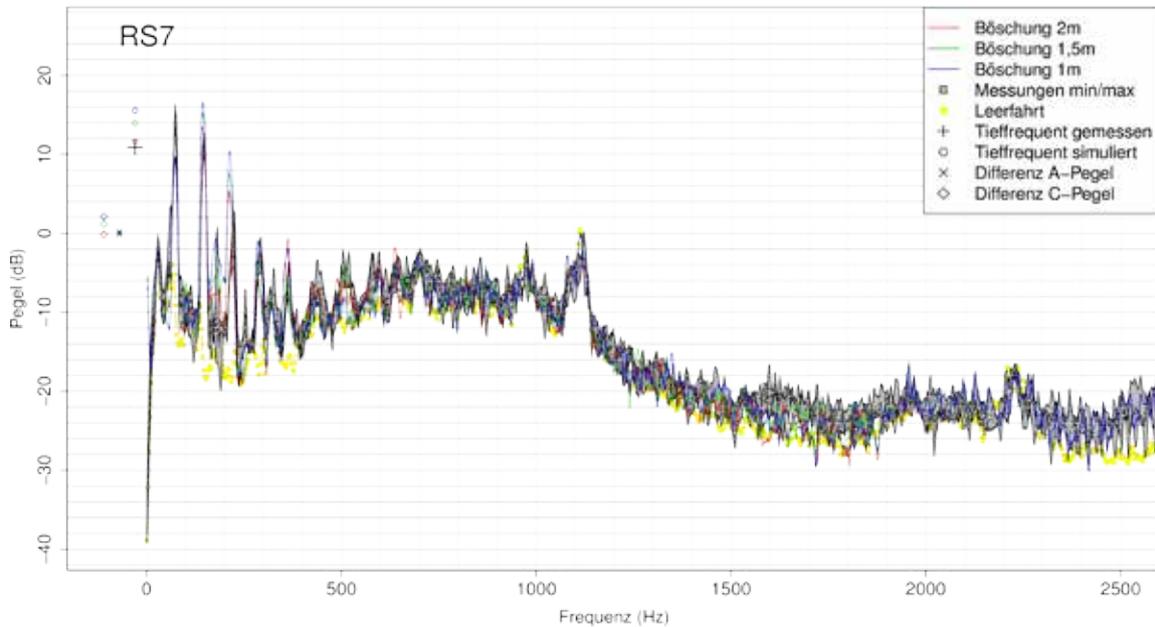


Abb. 4-19: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des LKW über RS7 (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

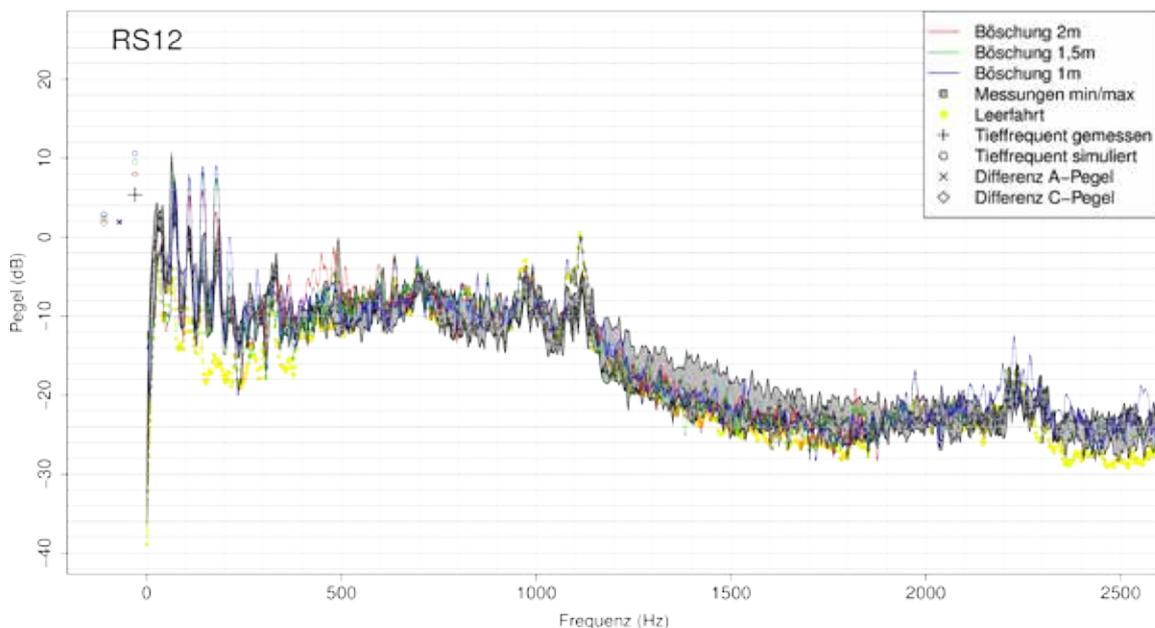


Abb. 4-20: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des LKW über RS12 (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

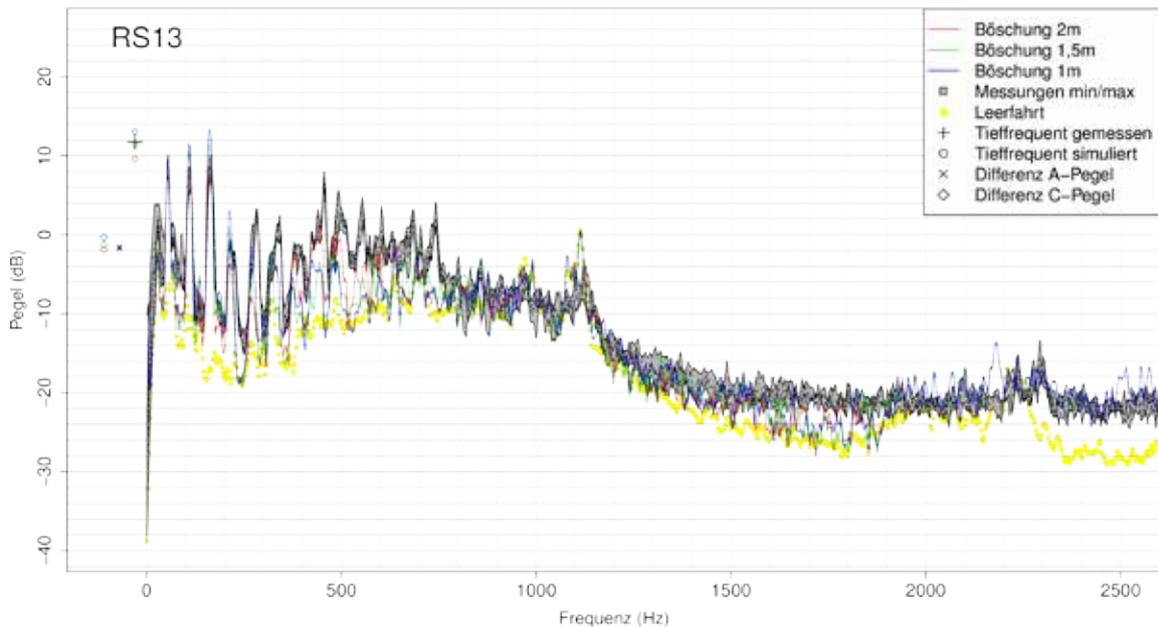


Abb. 4-21: Gemitteltes Spektrum bei 5 gemessenen Vorbeifahrten des LKW über RS13 (linkes Ohr am Kunstkopf) und Synthese bei verschiedenen Böschungshöhen. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

Abb. 4-20 (RS12) und Abb. 4-21 (RS13) zeigen ebenfalls eine Überschätzung der durch den RS produzierten harmonischen unter 400 Hz. Die Unterschiede im L_{Aeq} und L_{Ceq} sind aber gering. Beim RS13 ist aber eine leichte Unterschätzung um ca. 500 Hz zu beobachten.

5. SIMULATION INNENGERÄUSCH

Die grundsätzlichen Schritte der Synthetisierung von Überfahrtsgeräuschen im Innenbereich waren ähnlich wie im Außenbereich, allerdings war im Innenbereich keine Berechnung der Schallausbreitung notwendig und es wurden direkt die Messungen mittels Kunstkopf zur Modellierung verwendet. Abb. 5-1 stellt den Ablauf und die einzelnen Teile der Synthese der Rumpelstreifen im Innenraum dar. Die Beschreibung der einzelnen Teile erfolgt im weiteren Verlauf dieses Kapitels.

5.1. Einzelfugensignal beim PKW

Aufgrund des relativ dominanten Fahrgeräusches konnten im Gegensatz zum Außenbereich die Einzelfugensmessungen nicht zur Synthese verwendet werden. Vor allem beim LKW war das Fugensignal nur sehr schwer bis gar nicht identifizierbar, beim PKW konnten zwar unter Verwendung verschiedener schmalbandiger Bandsperrern die Motormoden unterdrückt werden, weitere Maßnahmen um das Fahrgeräusch zu reduzieren (Non-linear spectral

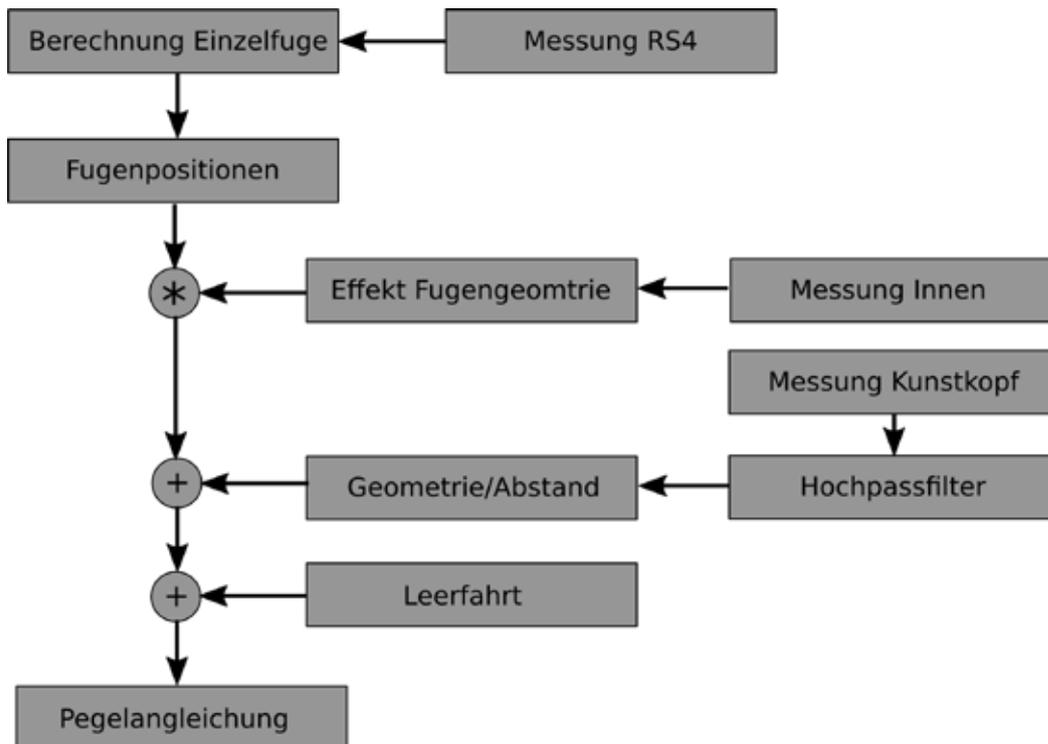


Abb. 5-1: Ablauf der Erstellung der synthetischen Innengeräusche

subtraction) führten aber zu Problemen mit hörbaren Phasenartefakten (Musical Noise), die teilweise durch Mittelung über mehrere Überfahrten reduziert werden konnten. Beim LKW führte dieser Ansatz nicht zum Ziel.

Daher wurde, um eine einheitliche Vorgangsweise bei beiden Fahrzeugen zu haben, ein anderer Ansatz gewählt.

Inverse Filterung

Aus den besten Überfahrten des Zufallsstreifen RS4 (beste Überdeckung über die gesamte Überfahrt, siehe Abschnitt 6.3) wurden mittels Entfaltung die Impulsantwort abgeleitet. Dazu wurde die räumliche Fugensequenz über die Geschwindigkeit in eine Pulsfolge umgerechnet. Die Geschwindigkeit wurde in einem engen Bereich (95 - 105 km/h beim PKW, 78 – 83 km/h beim LKW) in 0,1 km/h-Schritten variiert um die beste Korrelation mit dem Messsignal zu erreichen. Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wurde die Aufnahme zuerst von 48 kHz auf 4 kHz hinuntergesampelt. Es wurde ein lineares Gleichungssystem der Form $y=Ax$ aufgestellt, wo y das Messsignal darstellt, x die herzuleitende Impulsantwort (Einzelfugensignal) und A eine Matrix die in jeder Zeile einen Ausschnitt der Pulsfolge beinhaltet, der pro Zeile um ein Sample verschoben ist.

Die Lösung des Gleichungssystems (pinv-Funktion in Matlab) resultiert in der Einzelfugenantwort des Fahrzeugs. Es wurde die gesamte Fugenantwort in einem Schritt bestimmt, d.h. die abgeleitete Sprungantwort beinhaltet alle Achsen (sofern ein Signal vorhanden war). Die Sprungantwort wurde für jeden Kunstkopfkanaal (linkes und rechtes Ohr) getrennt bestimmt.

Aufgrund der Vorgehensweise handelt es sich hier bereits um eine Mittelung über 166 Fugen, daher wurde hier keine weitere Mittelung über mehrere Überfahrten vorgenommen, um nicht eine zu starke Reduktion höherfrequenter Anteile zu riskieren.

Abb. 5-2 zeigt die Sprungantworten aus verschiedenen guten Überfahrten. Der Abstand der vertikalen Linien ist der zeitliche Abstand zwischen erster und zweiter Achse beim PKW bei

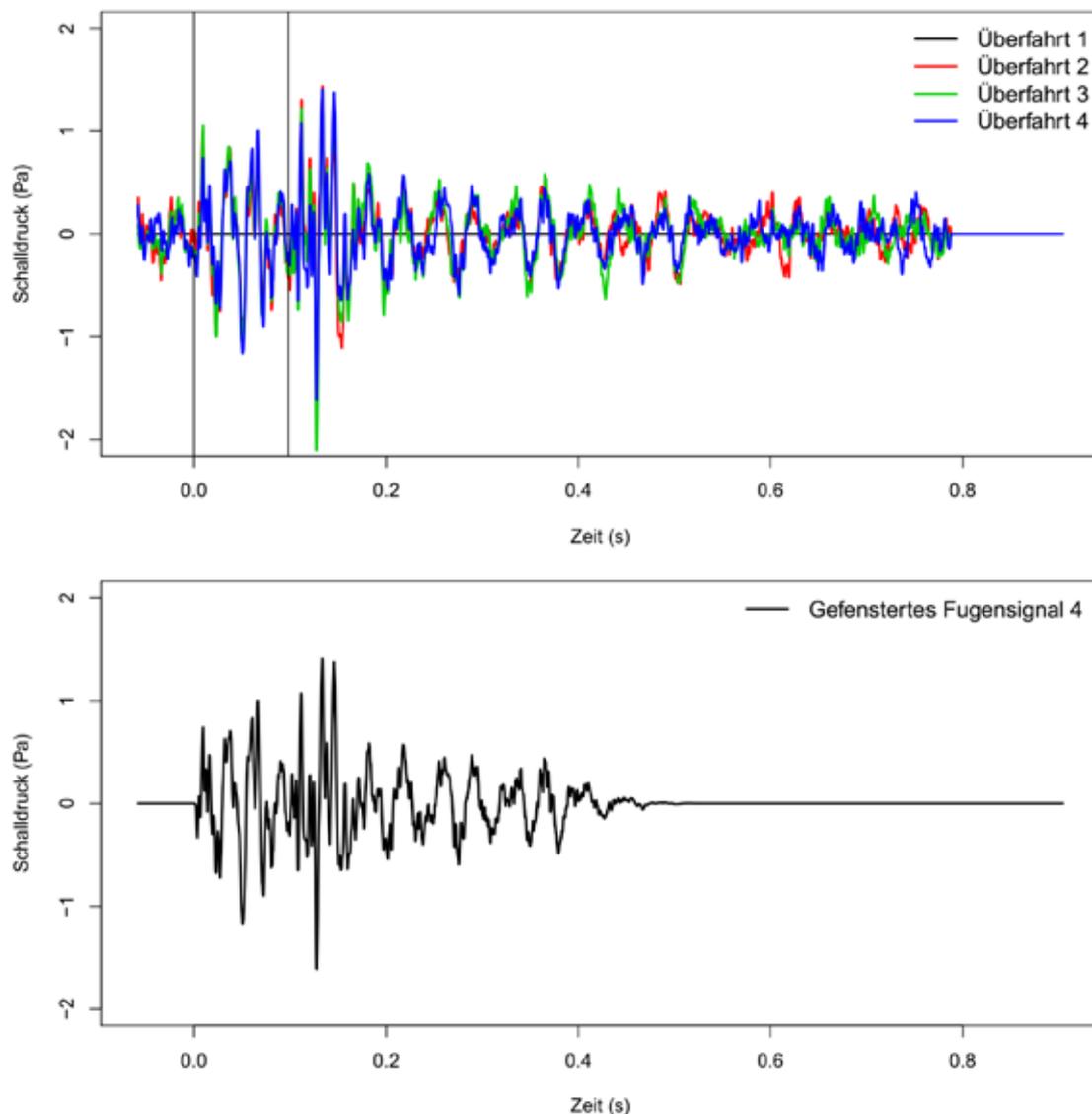


Abb. 5-2: Sprungantwort aus dem RS4-Signal beim PKW ungefenstert (oben) und gefenstert (unten)

100 km/h. Um das Innengeräusch vorher und nachher zu beseitigen, wurde die Sprungantwort gefenstert (Cosinus-Fenster, 0.4 ms am Anfang, 20 ms am Ende).

5.2. Einzelfugensignal beim LKW

Die Vorgehensweise beim LKW war ident, es zeigte sich aber kein eindeutiges Signal der beiden hinteren Achsen (Abb. 5-3, oben). Daher wurde beim LKW nur das klar identifizierbare Signal der Vorderachse verwendet, um einen zu starken Einfluss des Grundgeräusches in der Impulsantwort zu verhindern (Abb. 5-3, unten). Die Fensterung wurde mit 0,4 ms am Anfang und 2 ms am Ende durchgeführt.

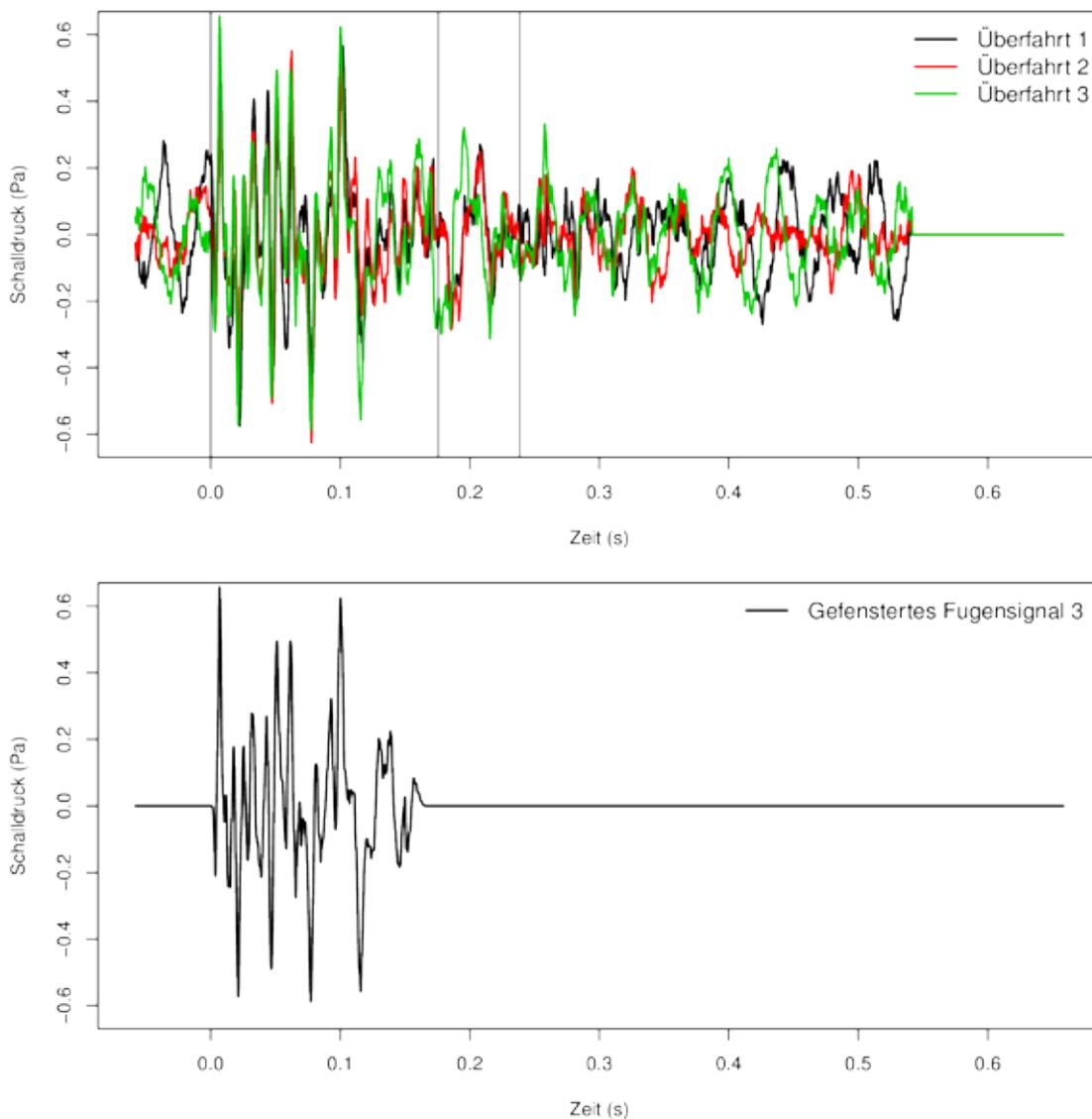


Abb. 5-3: Sprungantwort aus dem RS4-Signal beim LKW ungefenstert (oben) und gefenstert (unten)

5.3. Synthese

Die grundsätzliche Synthese des RS-Signals erfolgte wie schon im Außenbereich durch Faltung mit einer Impulsfolge die der Fugenabfolge entsprach. Der räumliche Eindruck wurde dadurch erzeugt, dass die Erstellung des Fugensignals für links und rechts mit der für den jeweiligen Kanal bestimmten Sprungantwort erfolgte.

5.4. Einfluss der Fugengeometrie

Prinzipiell erfolgte die Modifikation in Abhängigkeit der Fugengeometrie ähnlich wie beim Außensignal, es gab aber gewisse Unterschiede in den Details. Erstens wurde beim LKW anstatt 2000 Hz bei 1500 Hz abgeschnitten (3000 Hz Abtastfrequenz), da darüber hinaus keine RS-Anteile festgestellt wurden (dadurch war auch ein Hinzufügen des hochfrequenten RS-Signals beim LKW innen nicht notwendig). Außerdem wurde das Hintergrundgeräusch hier nicht abgezogen, da die harmonischen deutlich herauskamen und auch keine Frequenzverschiebung auftrat. Weiters wurde die gesamte Überfahrt verwendet.

Die Segmentlänge für die Einhüllende war 300 ms (Hamming-Fenster) mit 10 ms Verschiebung pro Schritt. Auf eine zeitliche Glättung der Einhüllenden wurde aufgrund der höheren Stationarität im Fahrzeug verzichtet.

Es wurden wie schon beim Außensignal die Differenzen der zeitlich gemittelten Filterkurven gebildet und gemittelt. Für den PKW wurde als Basis die Fuge RS0a verwendet, da die Synthese und Messung am besten zusammenpassten. Der Unterschied von RS0a zu RS0b konnte beim PKW mittels der oben genannten Methode nur schlecht nachgebildet werden (die harmonischen Komponenten liegen relativ weit auseinander, dies kann bei der Interpolation zu Problemen führen), daher wurde stattdessen der Unterschied zwischen den Spektren von RS4 gemessen und synthetisiert verwendet, um einen Filter zu erzeugen. Dieser wurde dann für RS4, RS1 und RS0b angewendet. Der Rest (RS5, RS7) und andere Varianten (z.B. für RS11-RS14) wurden mittels der beschriebenen Differenzen gefiltert.

Beim LKW war das synthetisierte Signal ähnlicher zu RS0b, es wurde aber auch hier zuerst der Unterschied zu RS4 korrigiert. Danach wurden von RS0b ausgehend Korrekturen für Sinus (RS7, 400 mm Sinus) usw. durchgeführt. Aufgrund der enger zusammen liegenden harmonischen Anteile gab es hier keine Probleme mit den Filterkurven.

5.5. Hochfrequente Anteile

Auch im Innenbereich zeigten sich beim PKW starke hochfrequente Anteile (über 2000 Hz), welche bei den synthetisierten Geräuschen nicht auftraten, aber einen deutlichen

Klangunterschied verursachten. Es wurden daher auch diese Geräusche wie schon beim Außensignal in die synthetisierten Überfahrten übernommen. Um zum Beispiel die Komponente für den späteren RS12 zu erzeugen, wurde der HF-Anteil bei RS0b und RS0a verglichen und das HF-Signal von RS1 dementsprechend skaliert. Beim LKW war dies aufgrund der fehlenden HF-Anteile nicht notwendig.

5.6. Pegelanpassung an Referenzstreifen

Die Synthese und die Ausbreitungsrechnung sind mit Unsicherheiten behaftet und daher wurde noch eine Pegelanpassung im tieffrequenten Bereich unter 1000 Hz durchgeführt. Dafür wurde bis zu 950 Hz (etwas oberhalb der 9. Harmonische beim PKW bei Überfahrt des RS0a) der Unterschied in der Energie zwischen normaler Vorbeifahrt und RS-Fahrt und Synthese des RS0a berechnet. In diesem Frequenzbereich sind die Harmonischen des RS dominant. Die daraus resultierende Differenz wurde als Skalierungsfaktor auf alle synthetisierten RS (nur das Fugensignal) angewendet. Für den PKW waren das im Mittel ca. 2,1 dB und für den LKW ca. 1,3 dB.

5.7. Vergleich Messung-Synthese

Einfluss des Fugenabstands

Der Fugenabstand der gefrästen RS weicht geringfügig (zwischen 5 mm und 10 mm) vom nominellen Wert ab. Die Synthese zeigte sich hier sehr sensitiv, vor allem im PKW. Abb. 5-4 und Abb. 5-5 zeigen den Unterschied zwischen 307 und 300 mm Fugenabstand. Hier fällt die dritte Harmonische auf, die bei 307 mm sehr gut mit der Messung übereinstimmt, bei 300 mm hingegen deutlich erhöht ist. Dies soll nur darstellen, wie empfindlich das System hier reagiert. Nimmt man z.B. RS0a (Abb. 5-6), ist der Unterschied zur Messung deutlich geringer (über 10 Fugen gemessen war der Abstand bei RS0a ca. 10 mm geringer als bei RS0b, d.h. 1 mm Unterschied). Ein ähnlicher Effekt tritt auch beim LKW bei RS0b auf, allerdings bei ca. 300 Hz und 500 Hz.

Die Darstellungen sollen auch zeigen, dass z.B. der Unterschied durch verschiedene Fensterungsvarianten (grün vs. blau) und auch aus verschiedenen RS4-Überfahrten gewonnen Fugensignale (jeweils 3 grüne und 3 blaue Linien) eher gering und nicht systematisch ist. Bei der grünen Linie wurden vordere und hintere Achse z.B. getrennt simuliert. Weiters ist auch die Abweichung der tieffrequenten Anteile (Abschnitt 0) dargestellt

(schwarzes + gegenüber farbigen Kreisen am linken Rand). Diese Differenz wurde dann zur Pegelanpassung verwendet.

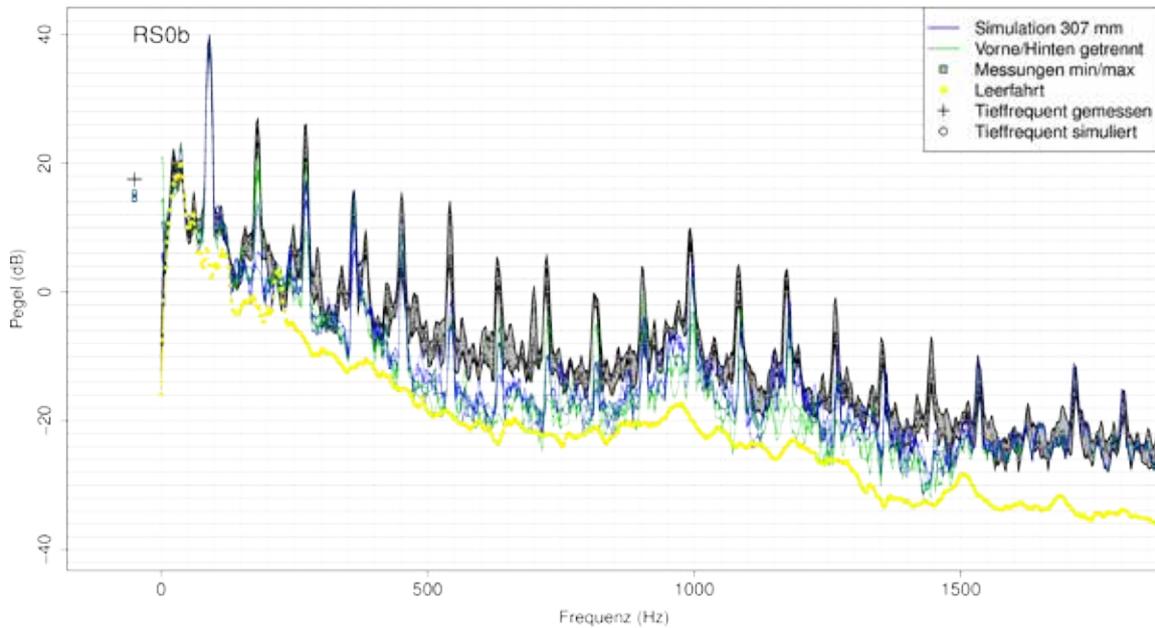


Abb. 5-4: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS0b (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese mit 307 mm vor der Pegelanpassung.

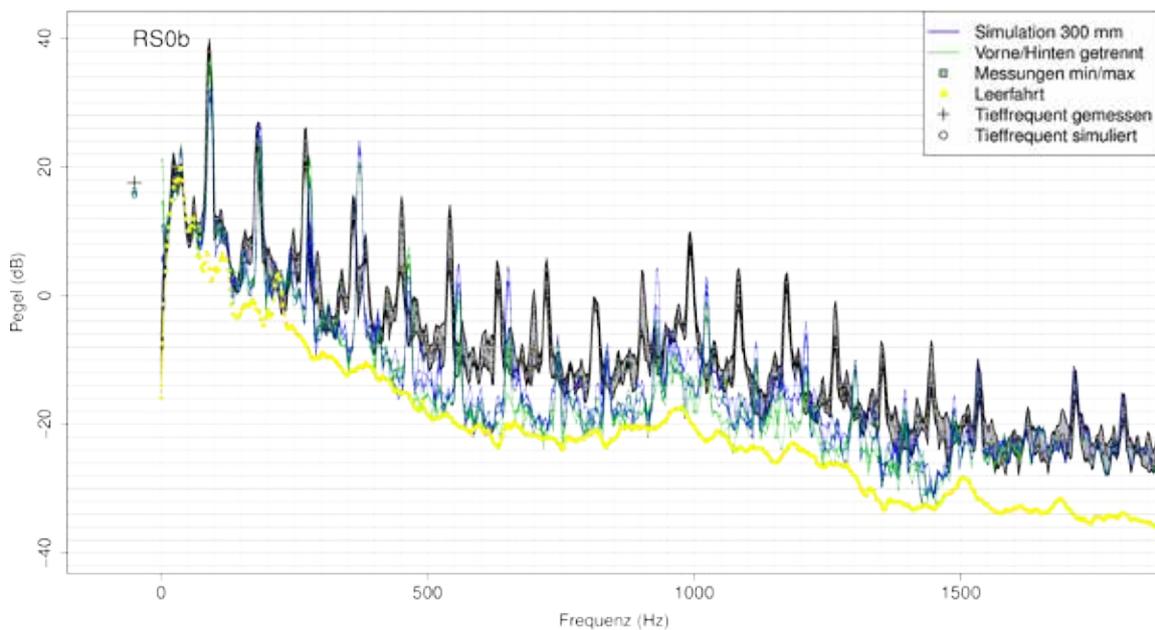


Abb. 5-5: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS0b (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese mit 300 mm vor der Pegelanpassung.

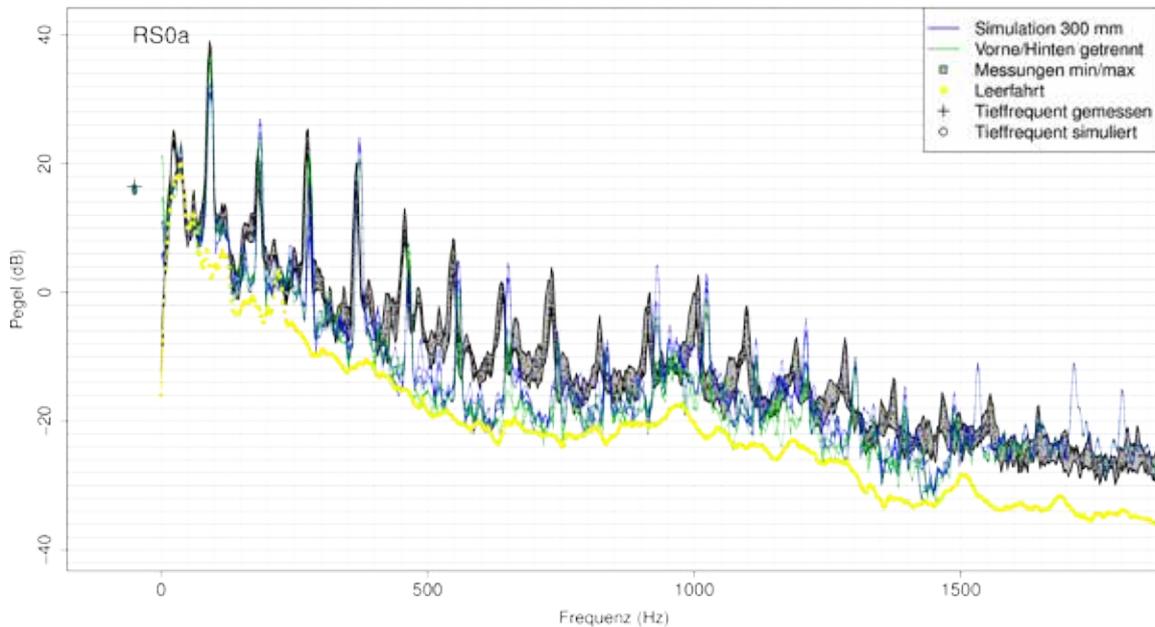


Abb. 5-6: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS0a (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese mit 300 mm vor der Pegelanpassung.

PKW, Messserie 1

Abb. 5-7 - Abb. 5-12 stellen die verschiedenen Messungen in MS1 und die zugehörigen Synthesen dar. Die Synthesen der 300 mm Streifen RS0a, RS0b und RS7 (Abb. 5-7, Abb. 5-8 und Abb. 5-12) zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messungen, mit

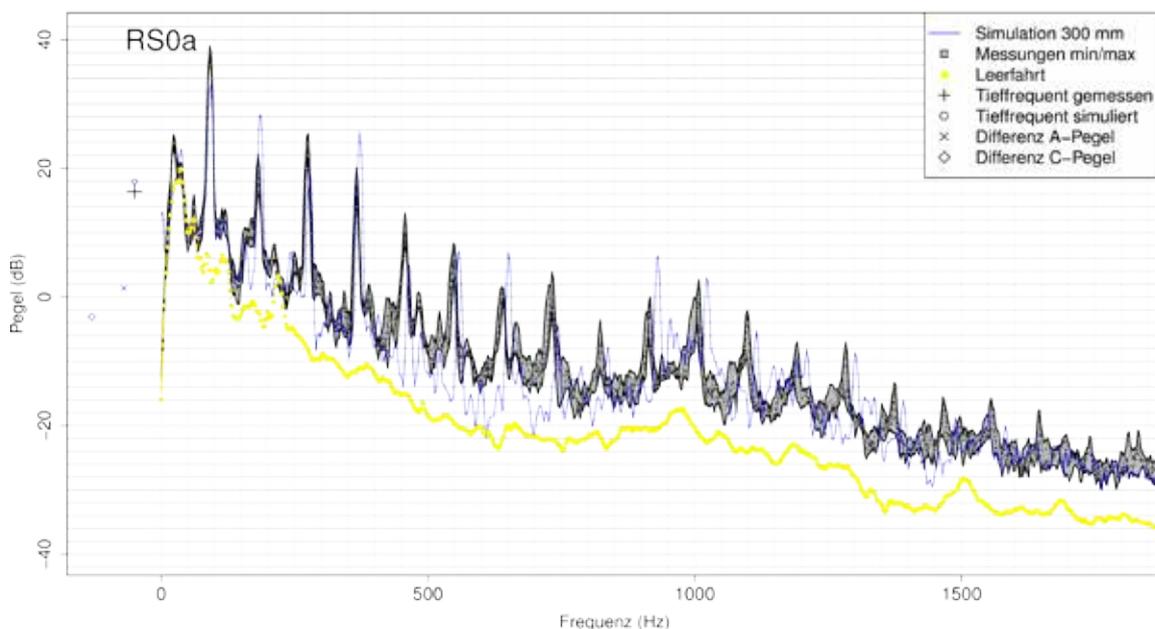


Abb. 5-7: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS0a (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

teilweise leichten Überschätzungen des A-Pegels. Auffällig ist die 3. Harmonische bei ca. 360 Hz die teilweise deutlich zu hoch ist. Dies gilt auch für RS1 (Abb. 5-9). Die hohe Empfindlichkeit des Systems gegenüber kleinen Veränderungen des Fugenabstands wurde bereits illustriert.

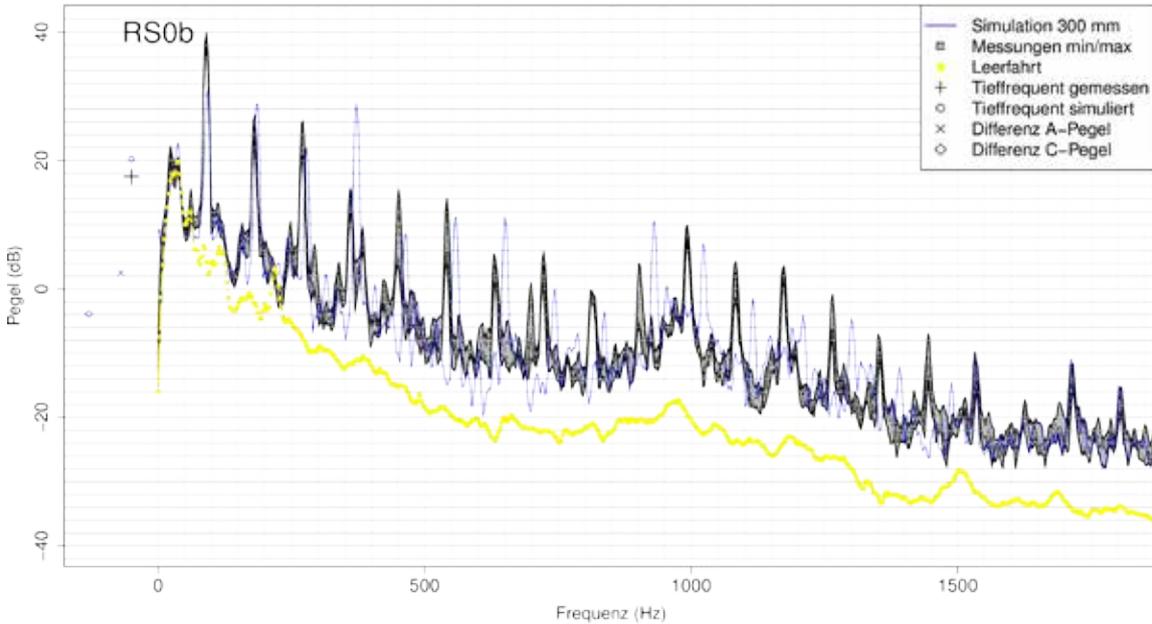


Abb. 5-8: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS0b (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

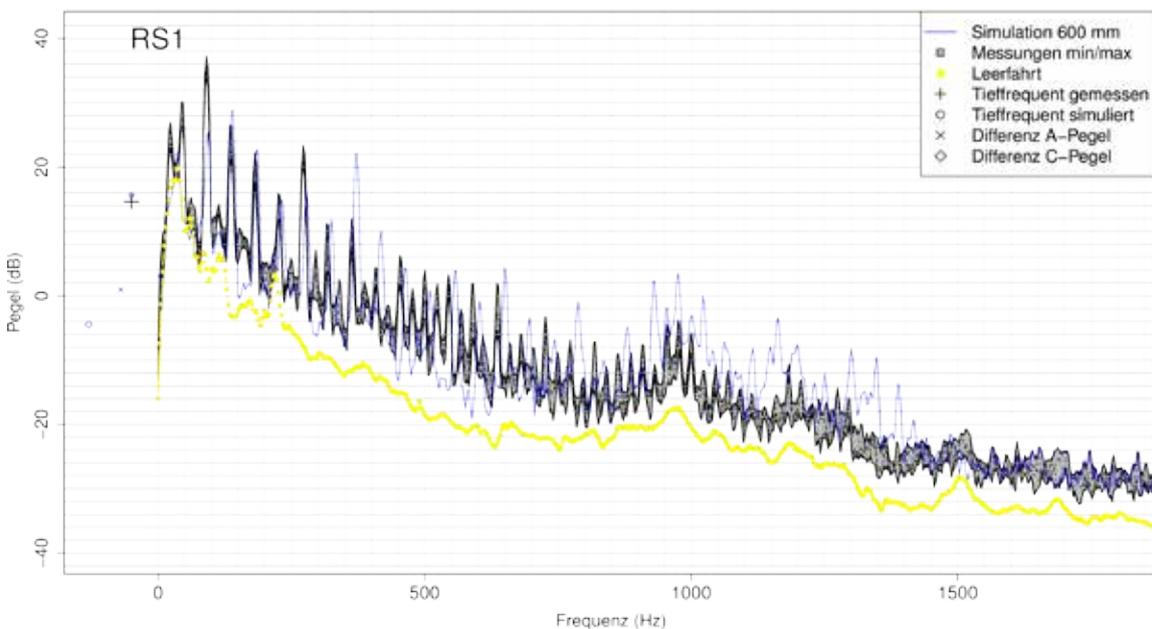


Abb. 5-9: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS1 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

Bei RS5 (600 mm Sinus, Abb. 5-11) sind die RS-Anteile deutlich zu hoch, diese Synthese wurde aber nicht im Test verwendet. RS4 (Abb. 5-10) stimmt wiederum sehr gut mit der Messung überein.

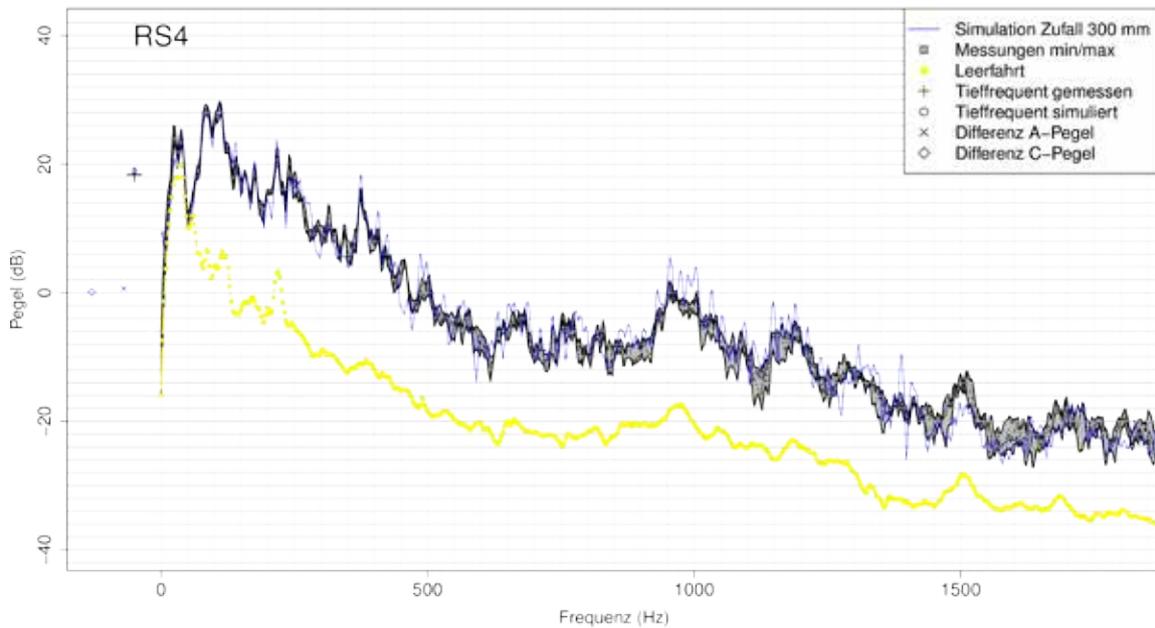


Abb. 5-10: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS4 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

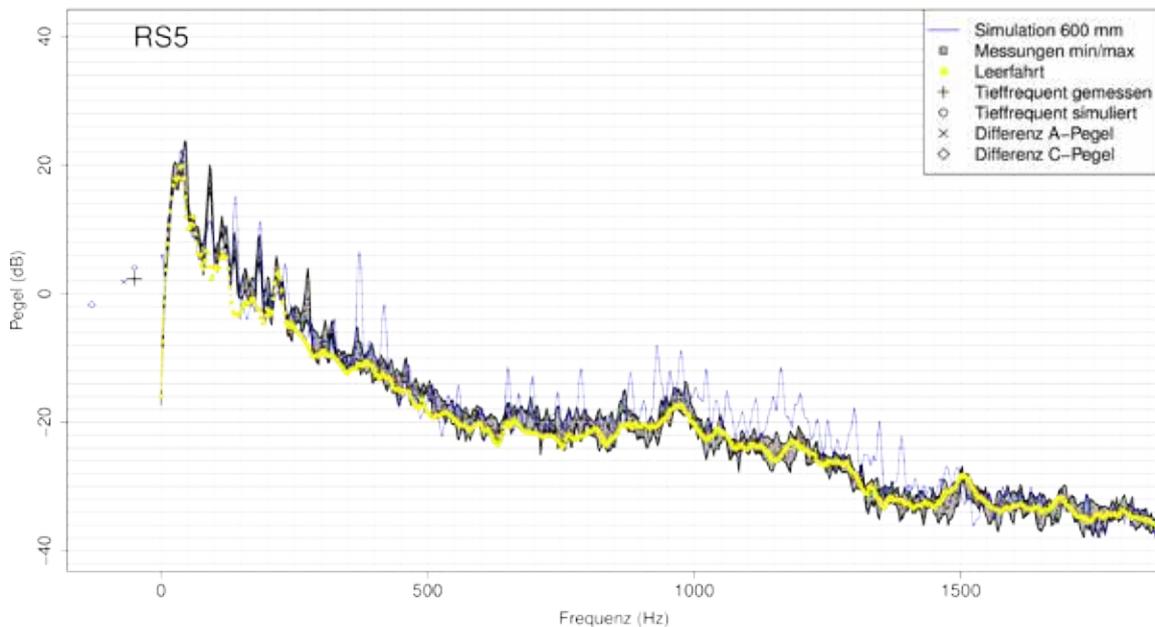


Abb. 5-11: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS5 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

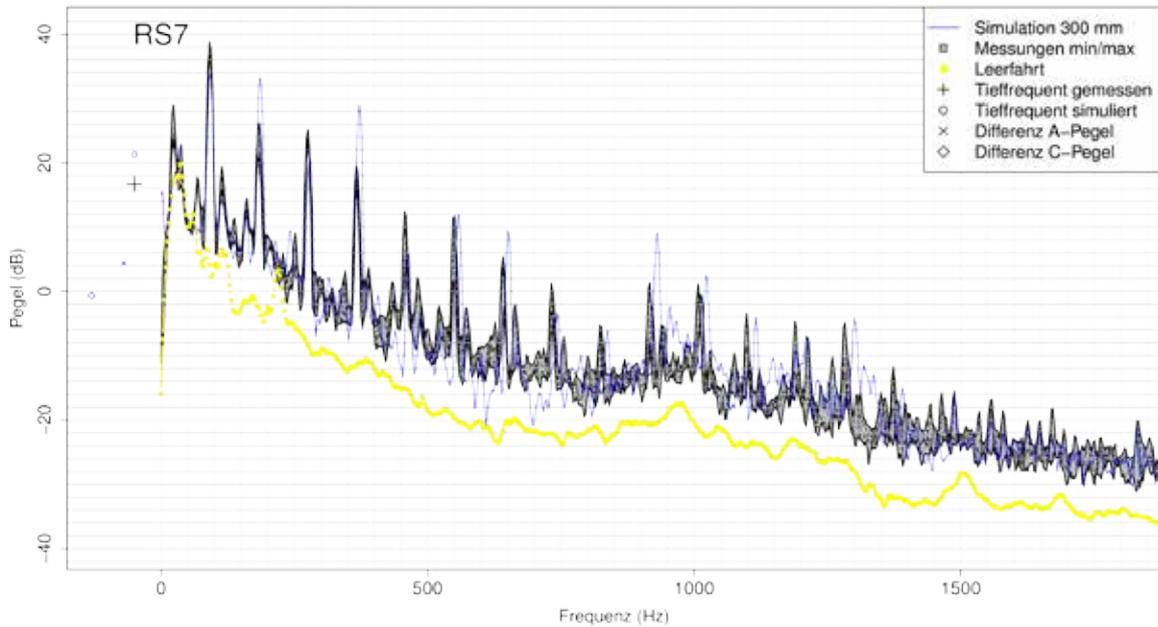


Abb. 5-12: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS7 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

PKW, Messserie 2

Im Allgemeinen waren die Innenmessungen im PKW gut reproduzierbar, es gab nur leichte Abweichungen zwischen den Messserien. Daher werden im Folgenden nur die neuen Streifen im Detail verglichen (ohne RS8 - RS10 die sich ähnlich wie RS5 und RS6 verhalten).

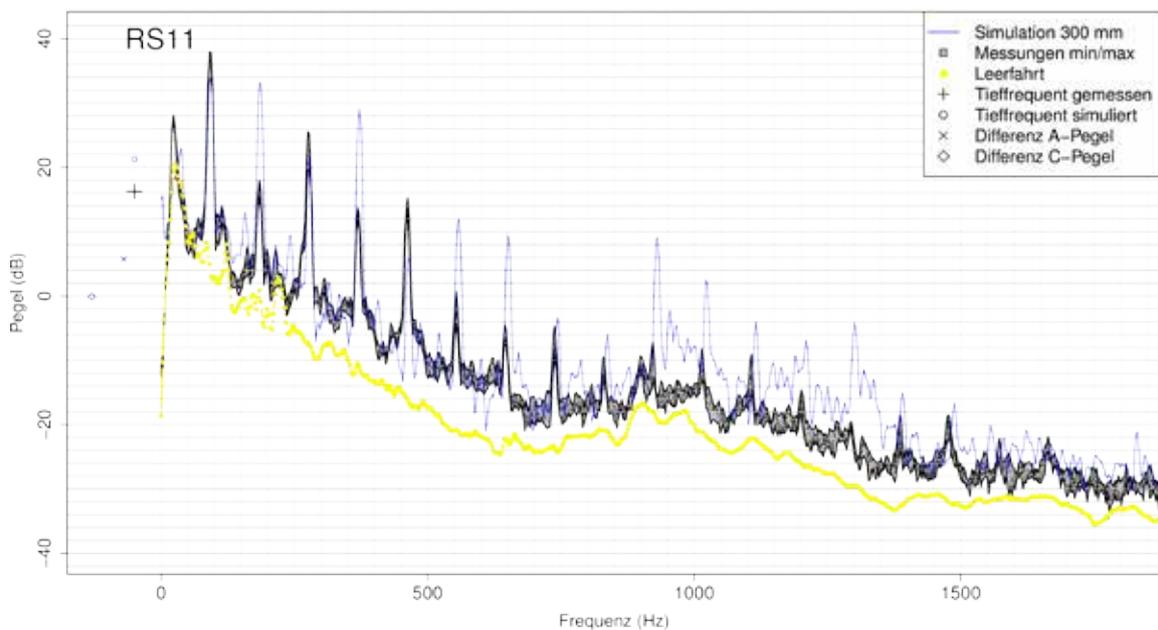


Abb. 5-13: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS11 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

Zusammenfassend werden die RS-Anteile beim PKW bei den neuen Streifen überschätzt, wobei hier bei allen RS ein höherer Pegel zwischen 1000 und 1500 Hz auftritt. Darunter zeigen zwar RS11 (Abb. 5-13) und RS12 (Abb. 5-14) teilweise erhöhte Pegel, es fällt aber vor allem der RS13 (400 mm, Abb. 5-15) auf, bei dem konsistent die Pegel der

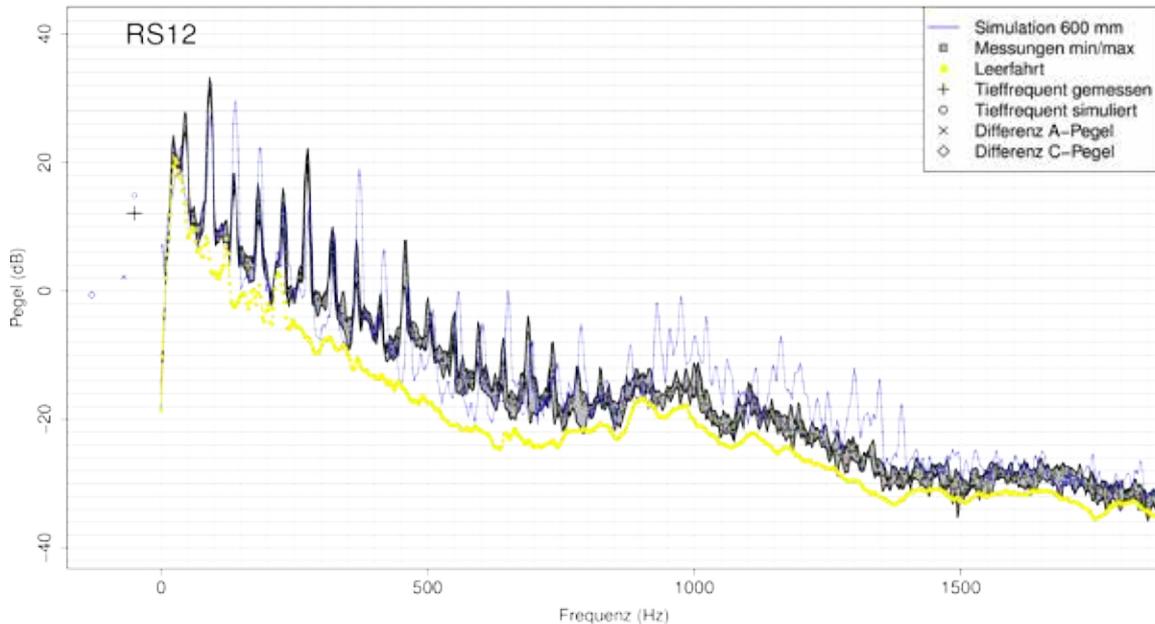


Abb. 5-14: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS12 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

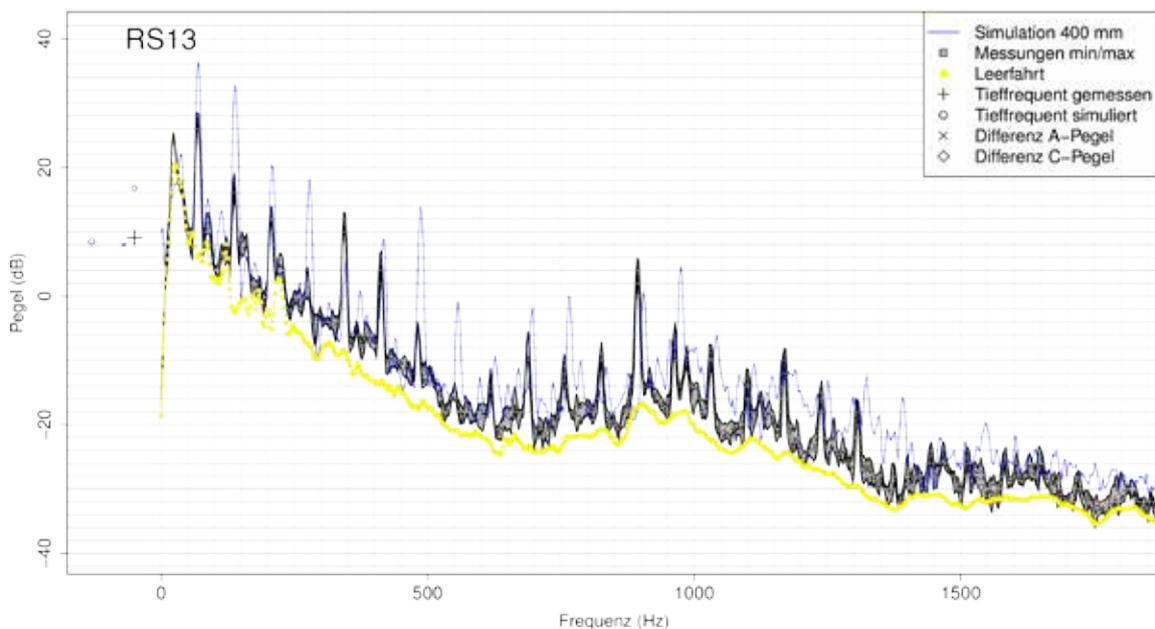


Abb. 5-15: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS13 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

Harmonischen deutlich zu hoch ausfallen. Dies wird nochmals in Kapitel 7 im Detail für Pegel und psychoakustische Maße besprochen. RS14 (600 mm Zufall, Abb. 5-16) stimmt wiederum sehr gut überein.

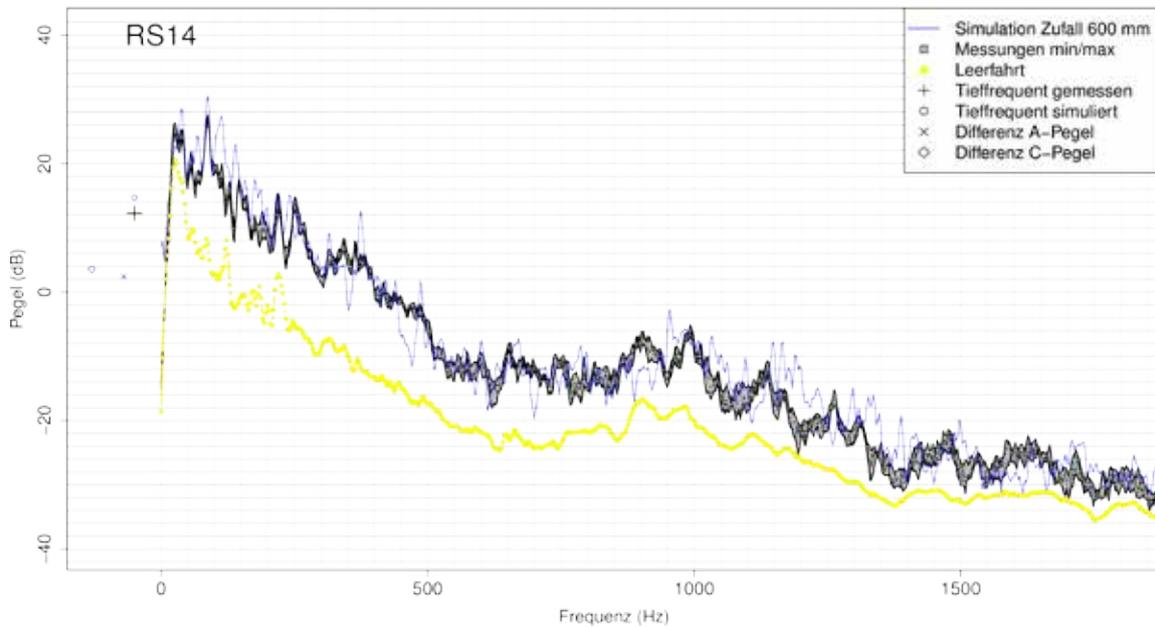


Abb. 5-16: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des PKW über RS14 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

LKW, Messserie 1

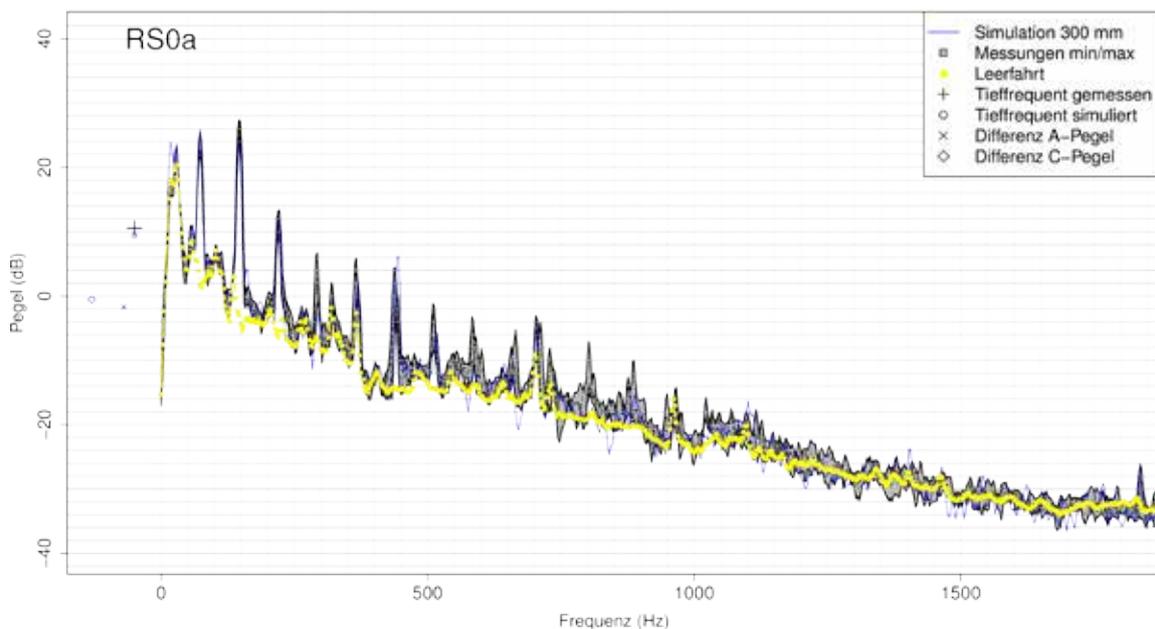


Abb. 5-17: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS0a (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

Beim LKW ergab sich ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Synthese wie in Abb. 5-17 bis Abb. 5-22 zu sehen ist. Die auffälligste Abweichung sind die bereits erwähnten erhöhten Pegel der beiden Harmonischen im Bereich von ca. 500 Hz, die aber sehr abhängig vom Fugenabstand sind.

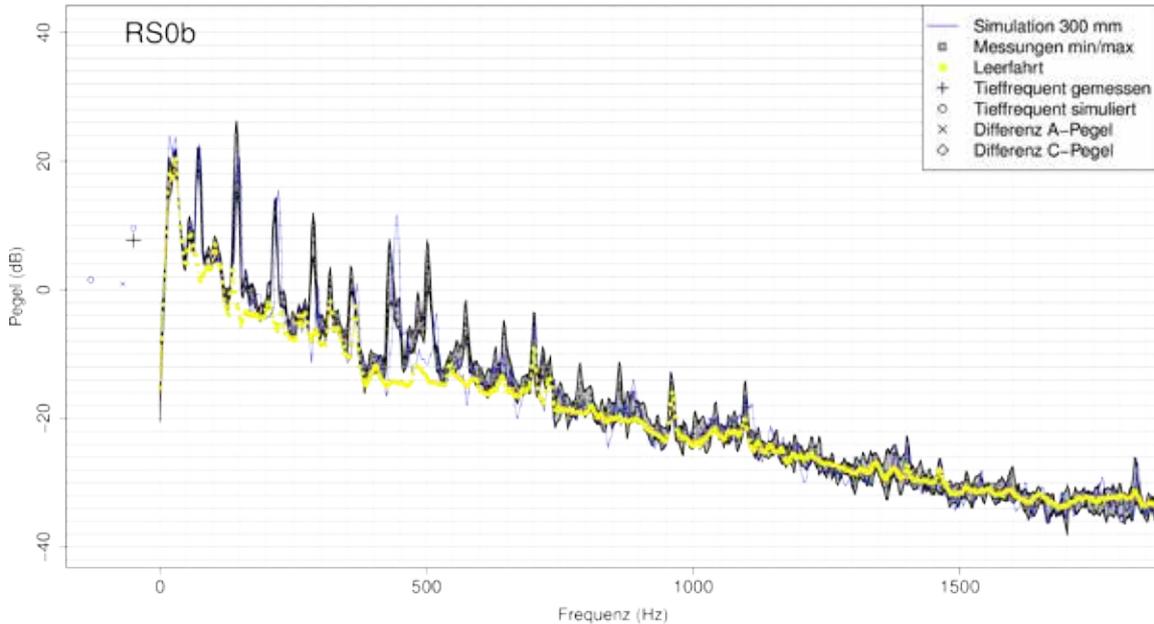


Abb. 5-18: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS0b (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

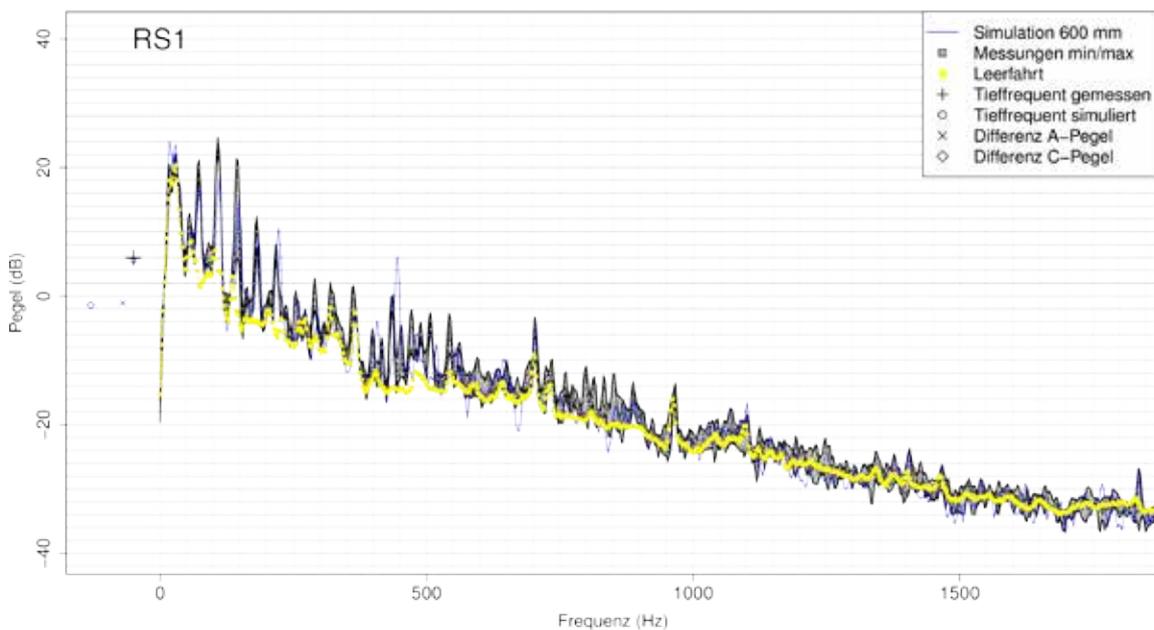


Abb. 5-19: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS1 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

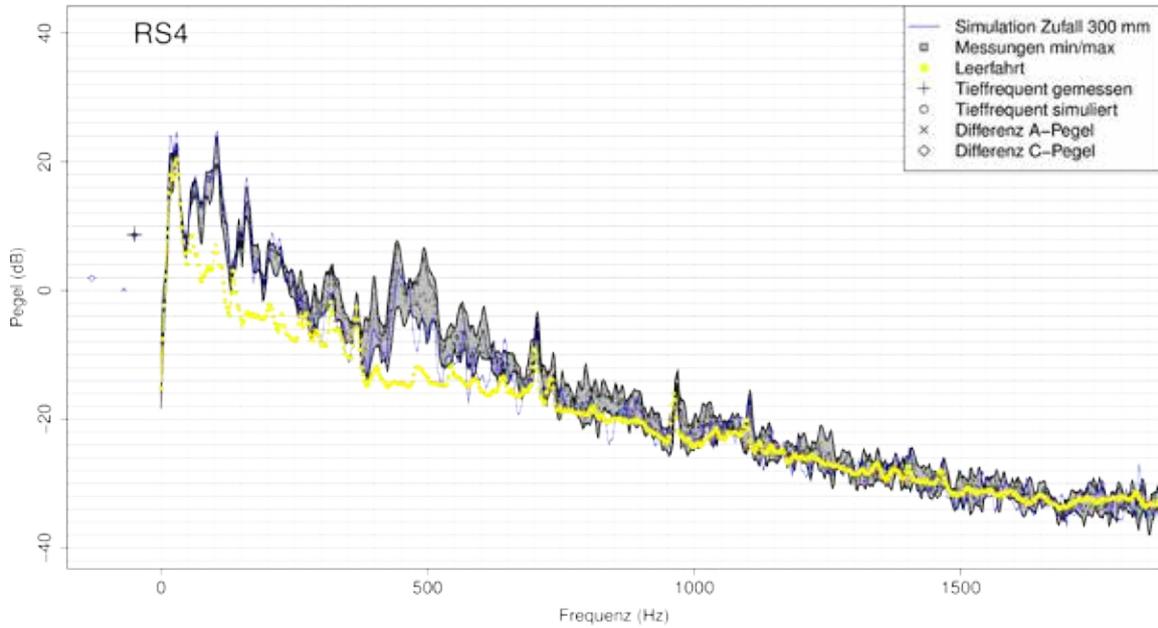


Abb. 5-20: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS4 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

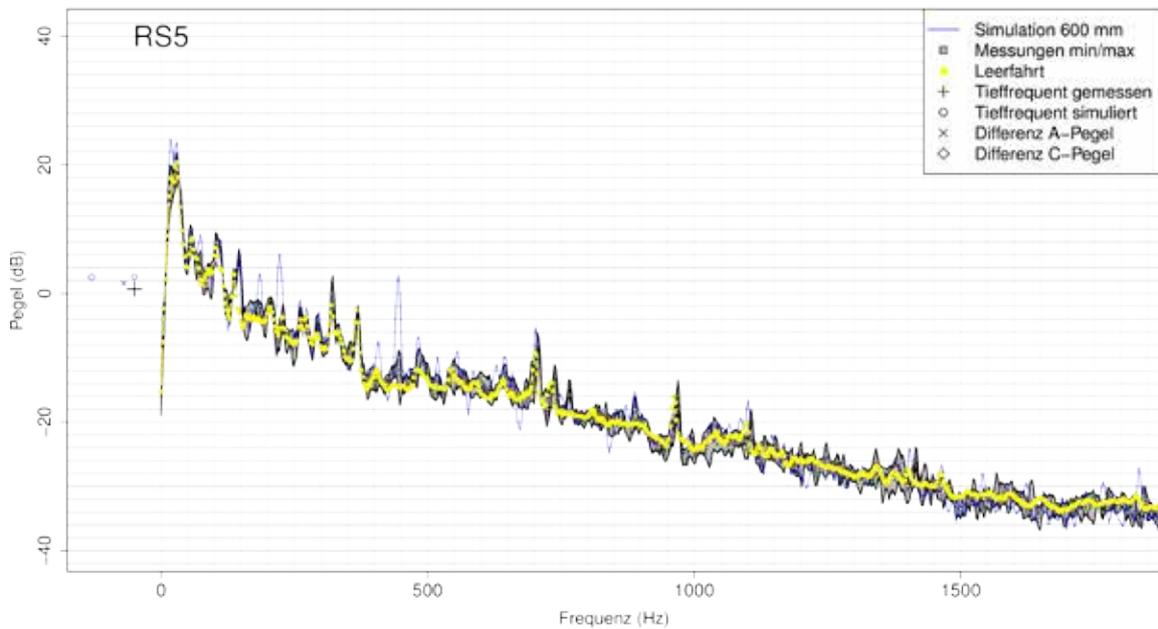


Abb. 5-21: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS5 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

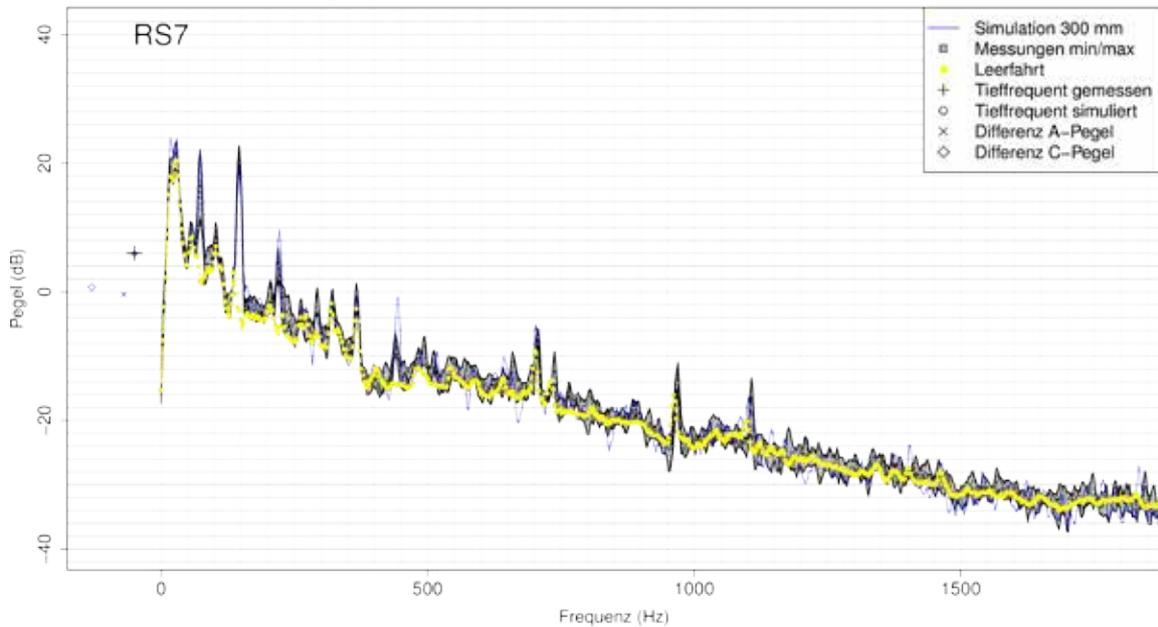


Abb. 5-22: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS7 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

LKW, Messserie 2

Auffällig ist in Messserie 2 die Komponente bei ca. 150 Hz, die bei RS0b, RS1 und RS7 (Abb. 5-25 und Abb. 5-27) die im Gegensatz zu Messserie 1 de facto verschwunden ist (Unterschied ca. 20 dB) welche auch bei RS12 in der Synthese deutlich zu hoch ausfällt

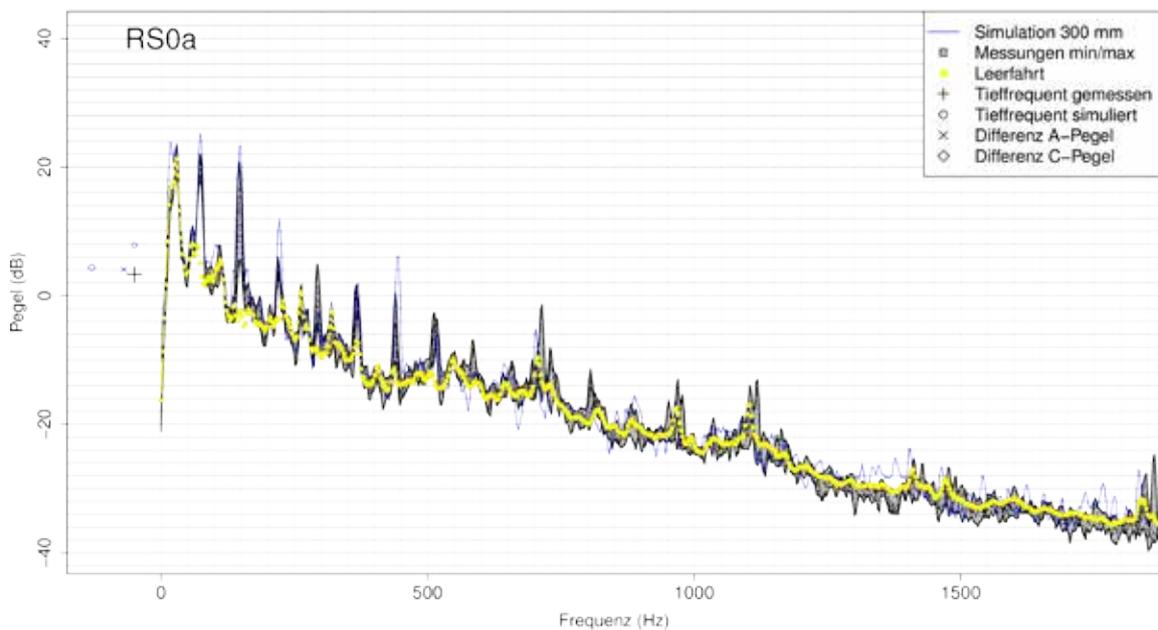


Abb. 5-23: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS0a (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

(Abb. 5-29). Bei RS0a und RS11 zeigt sich eine hohe Variabilität. Bei RS0a fällt eine Schwächung einiger schmalbandiger Anteile im Bereich 400 bis ca. 1000 Hz auf, was zu einer Senkung des A-Pegels führt (Differenz Simulation-Messung positiv)

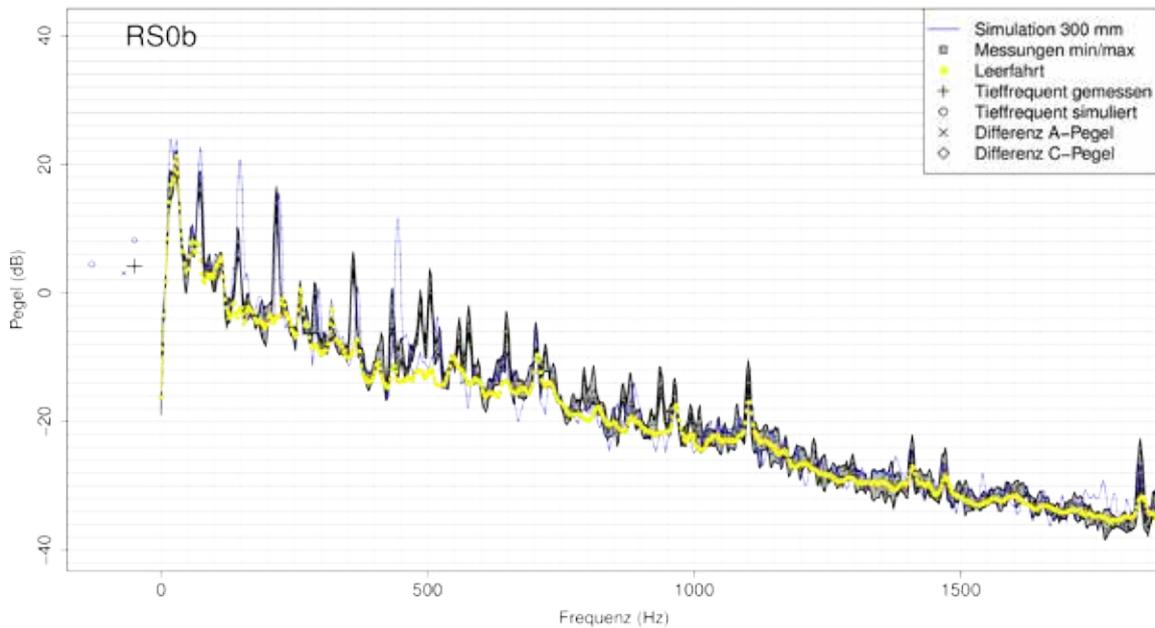


Abb. 5-24: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS0b (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

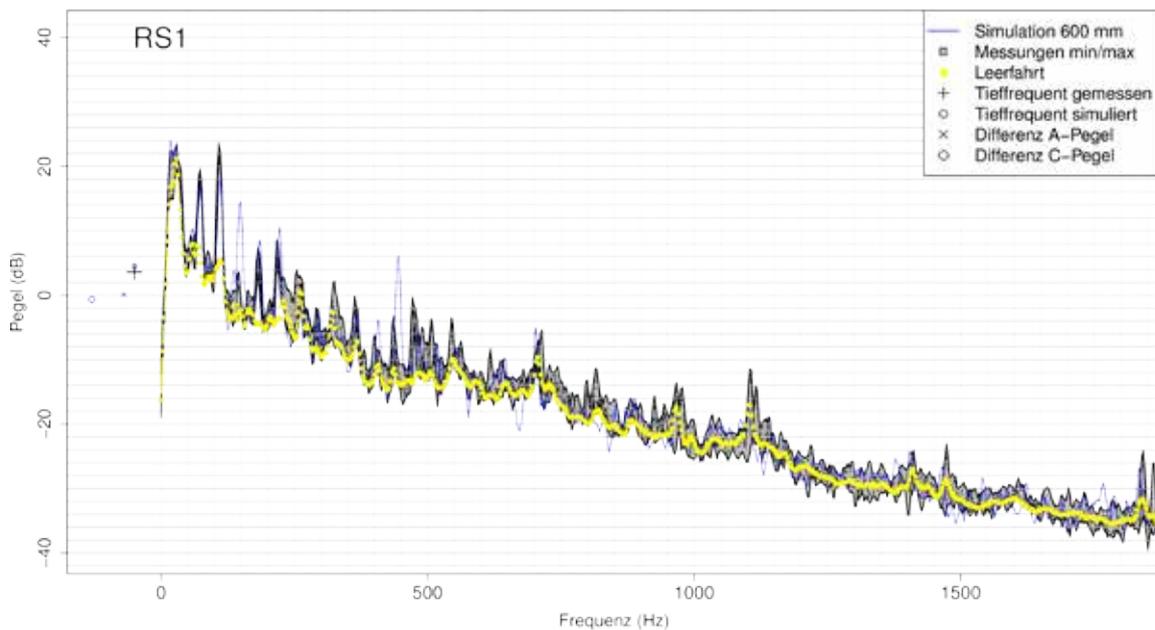


Abb. 5-25: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS1 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

Bei RS13 ist in einem ähnlichen Frequenzbereich (2. Harmonische, ca. 165 Hz) eine starke Anregung vorhanden und insgesamt sind die Harmonischen auch im höheren Frequenzbereich deutlich stärker.

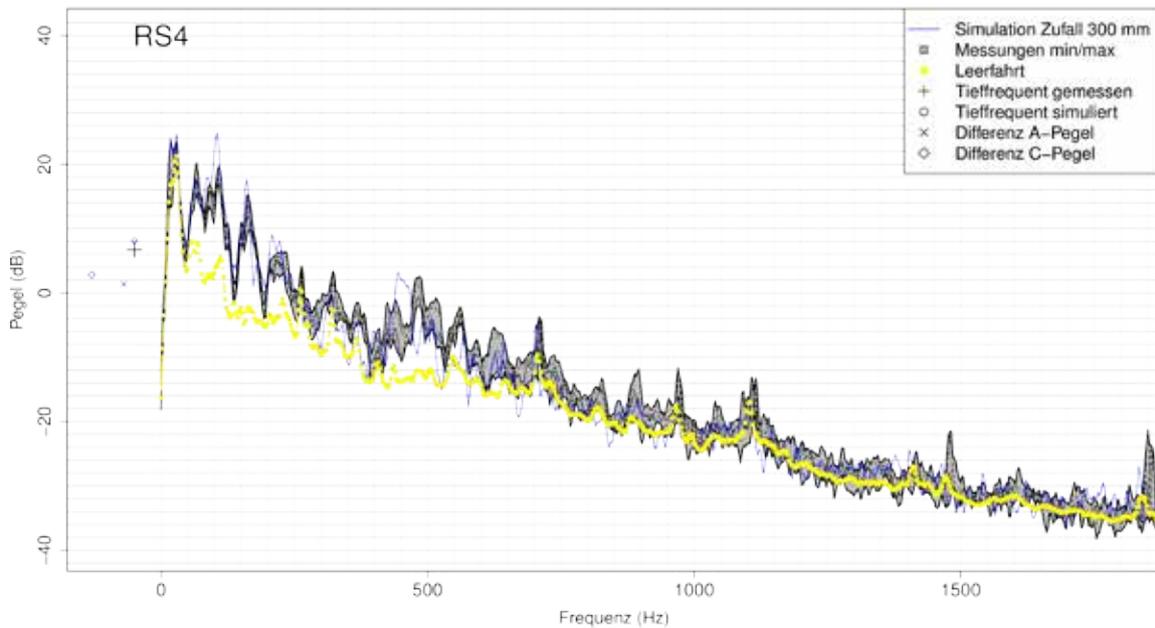


Abb. 5-26: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS4 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

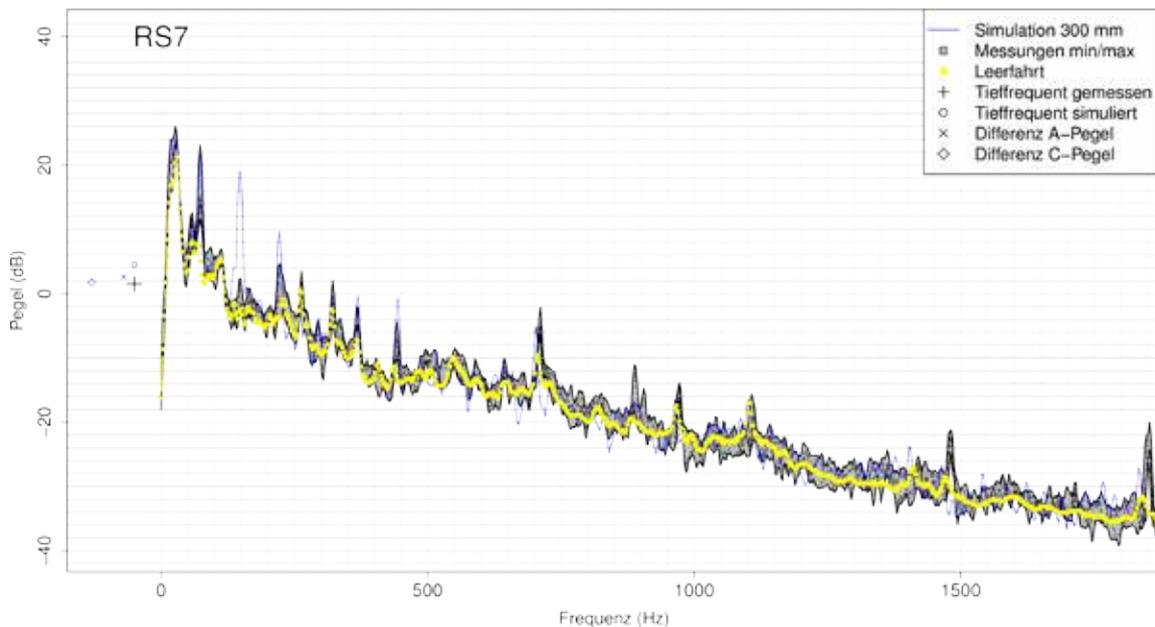


Abb. 5-27: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS7 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

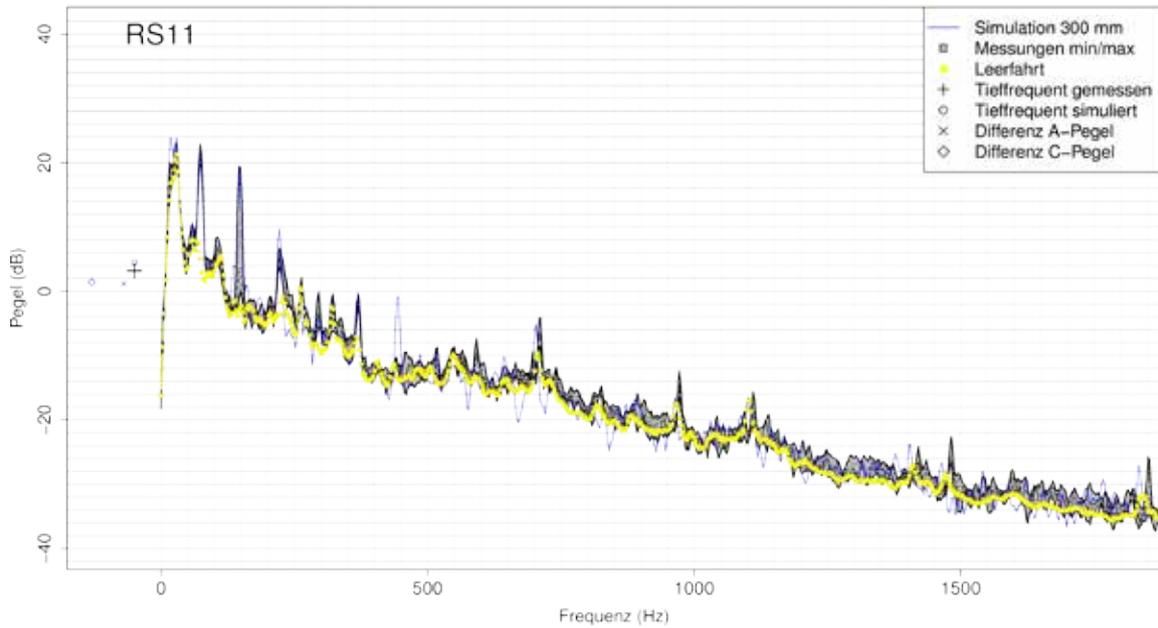


Abb. 5-28: : Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS11 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

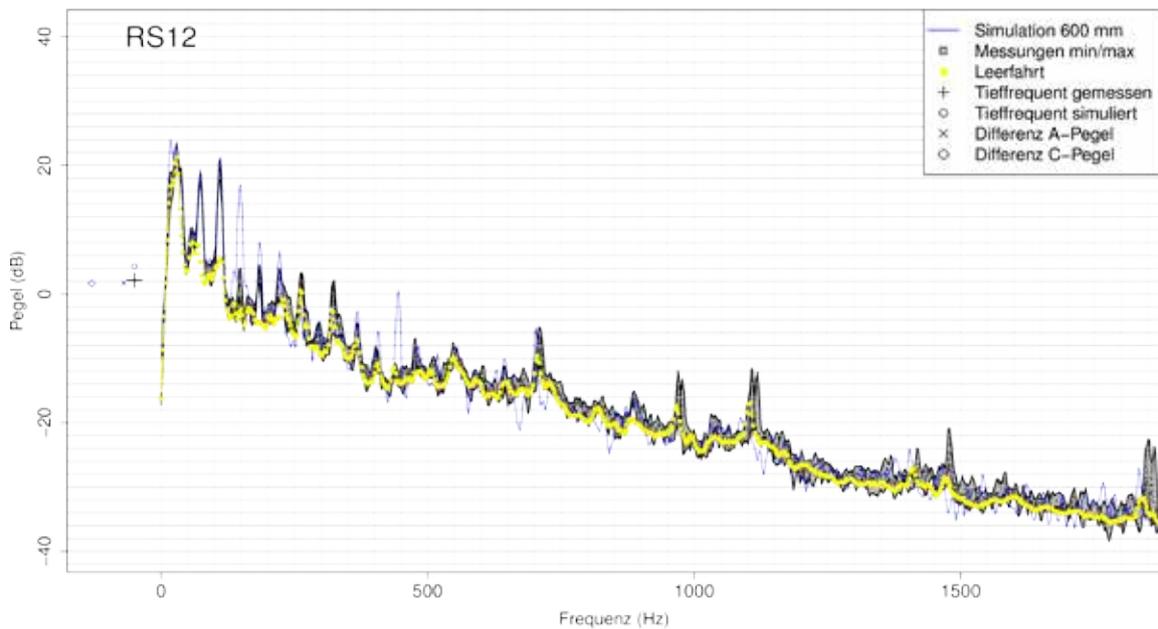


Abb. 5-29: Gemitteltetes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS12 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

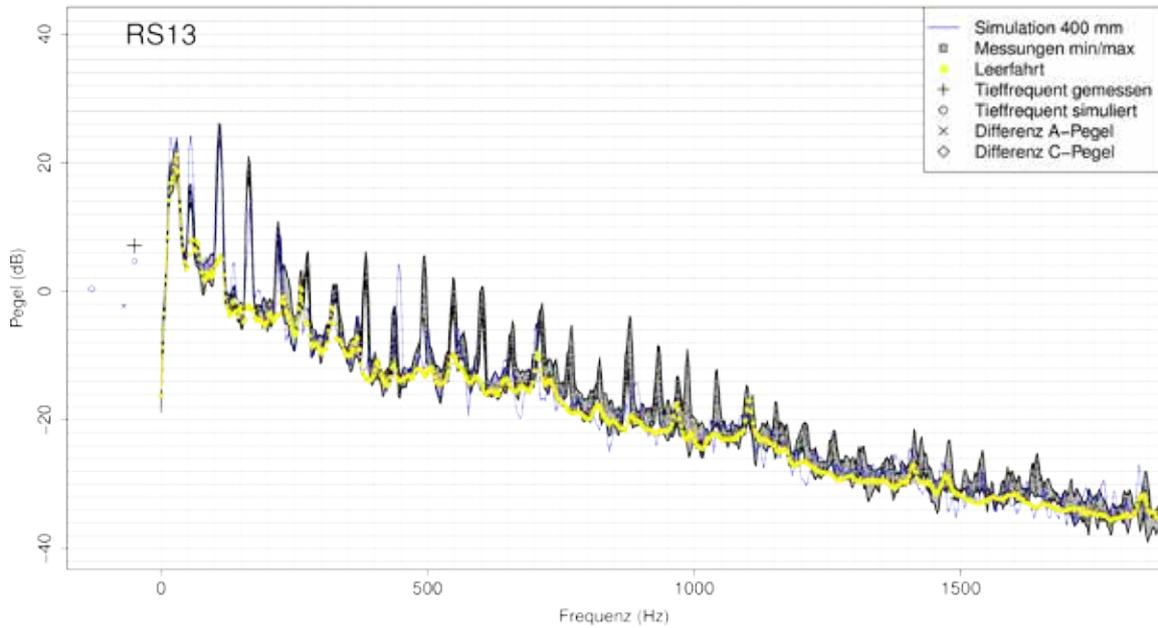


Abb. 5-30: Gemittelttes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS13 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

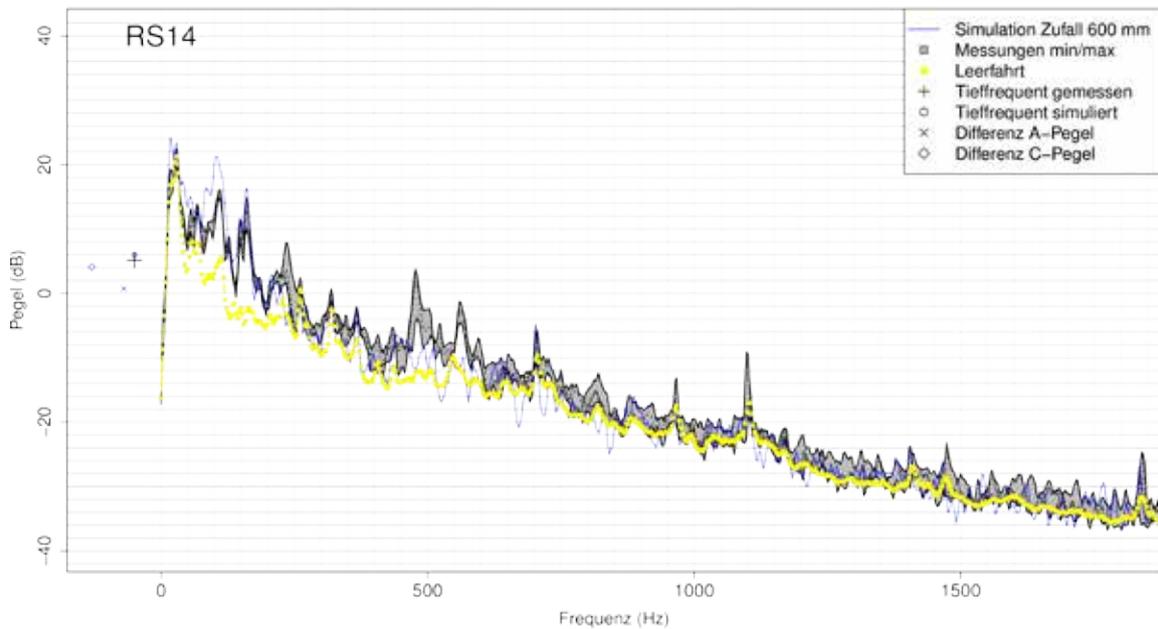


Abb. 5-31: Gemittelttes Spektrum bei 5 gemessenen Überfahrten des LKW über RS14 (rechtes Ohr am Kunstkopf) und Synthese. Die Fahrt ohne Rumpelstreifen ist ebenfalls dargestellt

6. WAHRNEHMUNGSTESTS

6.1. Probandenauswahl

Für die Wahrnehmungstests wurden Personen aus dem Fundus bisheriger Probanden des Projektpartners ISF (Probandenpool) kontaktiert.

Bei der Auswahl von Probanden wurde darauf geachtet, annähernd eine Gleichverteilung zwischen weiblichen und männlichen Personen sicherzustellen. Das zulässige Alter der Probanden wurde zudem auf 18 bis 40 Jahre begrenzt, um Effekte aufgrund der altersabhängigen Verringerung der Hörschwelle ausschließen zu können. Außerdem wurde vorausgesetzt, dass den Probanden keine Beeinträchtigung der Hörfähigkeit bekannt ist.

Für die Wahrnehmungstests standen in Summe 16 normalhörende Probanden zur Verfügung, wobei 9 weiblich und 7 männlich waren. Das durchschnittliche Alter betrug $26 \pm 5,5$ Jahre. Falls keine Daten vorhanden waren wurde die Hörschwelle mittels eines Hörtests im Frequenzbereich zwischen 125 und 8000 Hz ermittelt. Normalhörend wurde definiert als eine maximale Erhöhung der Hörschwelle von 25 dB gegenüber der Referenzhörschwelle. Eine Person hatte eine einseitige Überschreitung der Schwelle von ca. 1 dB bei 8000 Hz, was aber innerhalb der Schwankungsbreite für die Schwellenbestimmung lag, weswegen diese in die Studie mitaufgenommen wurde.

6.2. Testdesign

Lästigkeitsbeurteilung

Für die Lästigkeitsbeurteilung wurde eine freie Größenschätzung durchgeführt [24] [25]. Diese unterscheidet sich von anderen Größenschätzungen dadurch, dass keine Referenzskala vorgegeben ist (z.B. von gar nicht bis sehr lästig). Dadurch lässt sich keine absolute Lästigkeit ableiten sondern nur die Änderung der Lästigkeit als Funktion experimenteller Parameter. Dies ist keine Einschränkung, da das Hauptinteresse der Studie der Veränderung der Empfindung bei Veränderung der akustischen Parameter gilt. Weiters ist die Angabe einer absoluten Lästigkeit im Labor an sich problematisch, da diese vom vorgegebenen Bereich des verwendeten Stimulusmaterials abhängen kann.

Bei der freien Größenschätzung können die Probanden den Zahlenbereich frei wählen, einzige Vorgabe ist, dass eine doppelt empfundene Lästigkeit als doppelt so hoher Zahlenwert abgebildet werden soll und dass Zahlen kleiner gleich 0 nicht zulässig sind. Es ist daher immer möglich, eine größere Lästigkeit anzugeben, falls ein Stimulus lästiger ist als alle bisherigen.

Im Testdesign wurden alle verschiedenen gemessenen Bedingungen und die in Tab. 6-1 angeführten synthetisierten Stimuli verwendet. Es wurden 4 Durchläufe durchgeführt, wobei in jedem Durchlauf jeder Stimulus mit einer Länge von 2,38 s (PKW) bzw. 2,97 s (LKW) zweimal enthalten war. Dadurch wurde jede Bedingung achtmal getestet. Zwischen den Durchläufen mussten die Probanden mindestens 5 Minuten Pause machen.

Dringlichkeitsbeurteilung

Für die Dringlichkeit wurden die verschiedenen Bedingungen beim Innengeräusch (siehe Kapitel 5) von den Probanden auf einer vorgegeben Skala beurteilt. Die Skala bestand aus 5 Hauptkategorien (überhaupt nicht, wenig, mittelmäßig, sehr und äußerst dringlich). Weiters war jeweils eine Zwischenstufe möglich, daher gab es insgesamt 9 Stufen. Die Verwendung einer absoluten vorgegebenen Skala wurde hier der freien Skala vorgezogen, da hier die Beurteilung der Veränderung durchgeführt wurde, und diese auch gar nicht vorhanden sein oder als nicht vorhanden beurteilt werden kann. Daraus ergibt sich automatisch ein vorgegebener Nullpunkt der bei der Lästigkeit so nicht vorhanden ist.

Die Dauer der Stimuli betrug einheitlich 2,5 s, wobei 0,7 s zu Beginn des Stimulus reines Fahrgeräusch und erst die darauffolgenden 1,8 s das eigentliche Rumpelstreifengeräusch beinhalteten, was in etwa der Dauer der (kürzeren) Überfahrt des PKW entspricht. Für die verwendeten Stimuli wurden aus jeweils einer Realisierung des Reaktionszeittest (siehe nächster Abschnitt) pro Fahrzeug die entsprechenden Segmente herausgeschnitten.

Wie schon bei der Lästigkeitsbeurteilung wurde jede Bedingung achtmal beurteilt und die Aufteilung in Durchläufe war ident zu ebenjener Aufgabe. Die verwendeten Bedingungen sind in Tab. 6-1 angeführt.

Reaktionszeit

Der Reaktionszeittest war im Aufbau deutlich unterschiedlich von den beiden anderen Tests. Hier war ein dauerndes Fahrgeräusch vorhanden und in Abständen die zufällig zwischen 3 und 7,5 Sekunden variierten, wurden Rumpelstreifengeräusche jeweils mit einer Länge von 1,2 s vorgespielt. Die Probanden mussten dann so schnell wie möglich die Leertaste auf der Tastatur drücken.

Die Probanden mussten außerdem währenddessen eine Aufgabe bewältigen, die darin bestand einem sich zufällig bewegenden Kreis mit der Maus zu folgen [13]. Dies wurde dadurch erschwert, dass die Aufgabe mit der nichtdominanten Hand durchgeführt werden musste, d.h. bei Rechtshändern die linke Hand, bei Linkshändern wurde nachgefragt, mit

welcher Hand typischerweise die Maus benutzt wird. Die Aufgabe musste dann mit der anderen Hand durchgeführt werden. Ziel dieser Aufgabe war es, die Probanden sowohl kognitiv als auch motorisch zu beschäftigen, um dadurch eine ähnliche Situation wie im Straßenverkehr zu simulieren. Das Programm wurde mit der Programmiersprache Java erstellt und ausführlich getestet.

Da das Fahrgeräusch dauernd vorhanden war, mussten PKW und LKW in diesem Test getrennt betrachtet werden. Pro Fahrzeug wurden 6 Durchläufe durchgeführt, jeder davon beinhaltete 54 Rumpelstreifengeräusche und dauerte ca. 6 Minuten. Die resultierenden 12 Durchläufe waren für alle Probanden gleich, wurden aber in zufälliger, und pro Proband unterschiedlicher, Reihenfolge präsentiert.

Um die durchgehenden Stimuli zu erzeugen wurden aus den Überfahrten möglichst lange Segmente ohne Rumpelstreifen am Anfang oder Ende der Überfahrt definiert. Diese wurden beim PKW mit einem Hoch- und Tiefpassfilter (Grenzfrequenz 2000 Hz) geteilt.

Die Abfolge aller Stimuli (jeweils 2 Wiederholungen pro Bedingung) wurde pro Durchgang randomisiert und die Abstände (Ende des RS zu Anfang des nächsten) zufällig zwischen 3,5 und 7 Sekunden variiert.

Mit dieser Information wurde ein durchgehendes Hintergrundsignal generiert, indem zufällig ausgewählte Hintergrundgeräuschsegmente so geschnitten wurden dass sie 0,8 s nach Beginn einer Rumpelstreifenfahrt begannen und 0,8 s nach Beginn der nächsten Überfahrt endeten. Mittels 5 ms langen linearen Rampen erfolgte ein gleitender Übergang zwischen den Abschnitten. Beim PKW wurde dieser Vorgang für das Hoch- und Tiefpassgefilterte Signal exakt gleich durchgeführt.

Die synthetisierten RS-Geräusche (ohne hochfrequenter Komponente beim PKW) wurden an den vordefinierten Stellen zum Hintergrundgeräusch addiert (beim PKW zum tieffrequenten Signal. Beim PKW wurde der hochfrequente Anteil am Beginn des RS ebenfalls mittels eines gleitenden Überganges mit 5 ms langen linearen Rampen eingeblendet und das reine Hintergrundgeräusch ausgeblendet, da dieses sonst doppelt vorhanden gewesen wäre¹.

Bei den gemessenen Überfahrten wurden die gesamten Signale (bei LKW und PKW gleich) mit der gleichen Vorgehensweise eingeblendet.

¹ Durch einen Indizierungsfehler wurde beim ersten Stimulus jedes Durchganges beim PKW das HF-Hintergrundsignal um 0,4 Sekunden zu spät ausgeblendet. Ein Einfluss auf Reaktionszeiten kann zwar nicht gänzlich ausgeschlossen werden, jedoch gibt es keine Anzeichen einer solchen Beeinflussung.

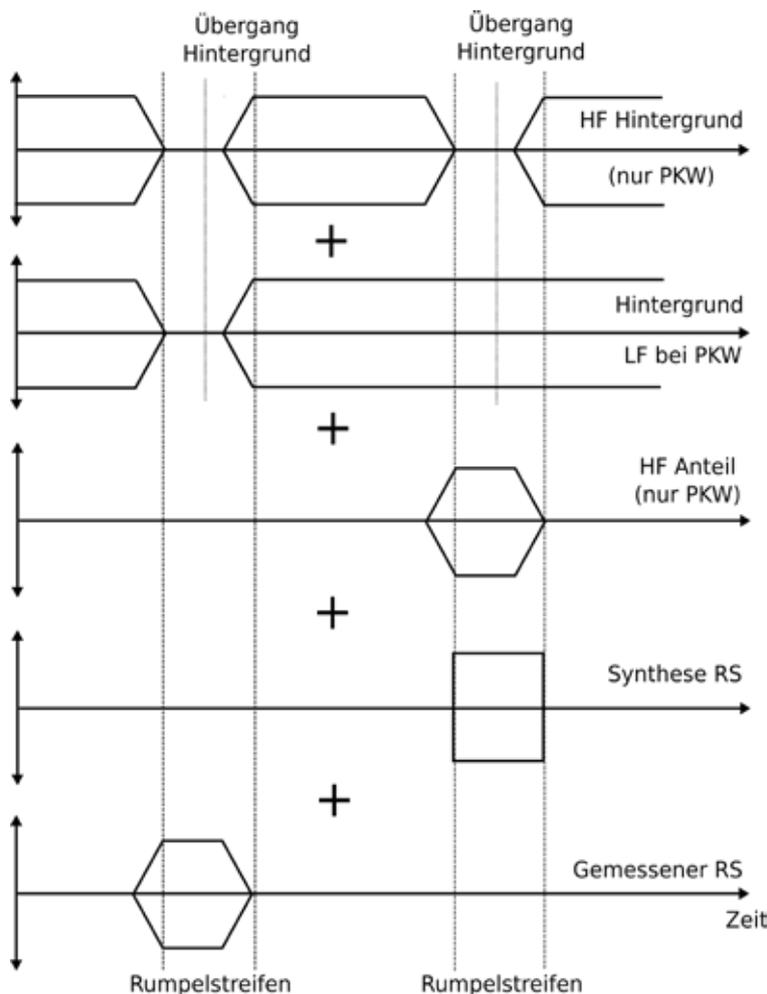


Abb. 6-1: Schema zur Erstellung der im Reaktionszeittest verwendeten Stimuli für gemessene und synthetisierte Überfahrten. Die Rampen mit 5 ms Dauer sind zur besseren Sichtbarkeit deutlich übertrieben dargestellt.

6.3. Selektion der Stimuli

Aufgrund des hohen Messaufwandes durch die relativ langen Intervalle zwischen den Überfahrten ist die Auswahl repräsentativer Überfahrten aufgrund akustischer Kriterien schwierig, da nur eine begrenzte Anzahl von Messungen durchgeführt werden konnte. Es wurde daher ein anderer Ansatz unter Verwendung des Überdeckungsgrades, also eines nicht-akustischen Parameters gewählt.

Für die Wahrnehmungstests wurde jene Überfahrt eines bestimmten Streifens verwendet, der den besten Überdeckungsgrad hatte. Da bei guter Überdeckung der Effekt des Rumpelstreifens hoch ist, stellt dies eine Art Maximalwirkung dar.

Im Außenbereich wurde eine gute Überfahrt als eine möglichst gute und gleichmäßige Überdeckung angenommen. Dafür wurde der gesamte Überdeckungsgrad über den

Bezeichnung	Abstand	Muster	Fugenprofil	Innen	Außen	Skalierung	Anmerkung
RS0a	300	Regelmäßig	a	X	X	I,A	
RS0b	300	Regelmäßig	b	X			
RS7	300	Regelmäßig	s	X	X		
Z300	300	Zufällig	a	X	X	I,A	
ZP300	300	Zufällig	a	X	X		Periode 4 Fugen
ZP300_1	300	Zufällig	a		X		Periode 20 Fugen
RS4	300	Zufällig	b	X		I	
R400	400	Regelmäßig	a	X	X	I,A	
S400	400	Regelmäßig	s	X	X		
Z400	400	Zufällig	a	X	X		
ZP400	400	Zufällig	a	X	X		Periode 3 Fugen
ZP400_1	400	Zufällig	a		X		Periode 15 Fugen
R600	600	Regelmäßig	a	X	X	I,A	
RS1	600	Regelmäßig	b	X		I	
Z600	600	Zufällig	a	X	X		

Tab. 6-1: Synthetische Varianten die im Test verwendet wurden

Mittelwert der Quadrate der aus den Videos gewonnenen Grade am Anfang, in der Mitte und am Ende der Überfahrt gewählt. Der Sinn dieser Berechnung liegt in der durch das Quadrieren erfolgten stärkeren Gewichtung geringerer Überdeckung (Optimum bei 0, Streifen verfehlt ist ± 5). Daher wird hier z.B. eine Überfahrt mit Überdeckung 0, 0 und 3 (schlechte Überdeckung am Ende) schlechter gewertet als 1, 0, -1.²

Im Innenbereich ist die Veränderung des Fahrgeräusches ausschlaggebend, daher erfolgte hier die Auswahl anhand der Überdeckung am Beginn der Überfahrt.³

Weiters wurden in den Wahrnehmungstests die in Tab. 6-1 aufgelisteten, synthetischen Varianten verwendet.

Die meisten der synthetisierten Varianten sind Variationen der regelmäßigen oder zufälligen Fugenabfolge. Das Fugenprofil „b“, also ein eher senkrecht gefrästes konnte nur im Innenraum synthetisiert werden, war aber nur zu Vergleichszwecken vorhanden, da aus den akustischen Daten ein erhöhter Pegel im Außenbereich zu erwarten war.

² Durch einen Fehler im Verarbeitungsskript wurden für das Außensignal des RS2 bei PKW und LKW und des RS6 beim PKW die zweitbesten Vorbeifahrten verwendet. Ein Vergleich des L_{Aeq} zeigt jedoch keine Auffälligkeiten.

³ Durch einen Fehler im Verarbeitungsskript wurde für das Innensignal des RS1 beim PKW die zweitbeste Überfahrt verwendet. Ein Vergleich des L_{Aeq} zeigt jedoch keine Auffälligkeiten.

Die ZP-Variante wurde eingefügt, um zu testen ob eine zufällige Variation auf dem Formrad und eine damit einhergehende Periodisierung über 3 (400 mm) oder 4 (300 mm) eine mögliche Variante darstellen kann, die maschinell leicht herzustellen ist. ZPXXX_1 hingegen lag die Hypothese zugrunde, dass das Menschliche Gehör bei ca. 4 Hz sehr empfindlich gegenüber Modulationen ist (entspricht nur ca. einer Periode von 6 m da abhängig von der Geschwindigkeit) und daher potentiell als unangenehm empfunden werden könnte. Dies wäre wichtig wenn sich eine eventuelle maschinelle Fertigung einer Pseudozufallssequenz mit einer größeren Periode als machbar ergäbe.

6.4. Testdurchführung

Die Lästigkeitsbewertung, die Dringlichkeitsbeurteilung und die Reaktionszeittests wurden von den 16 Probanden im Zeitraum von 17. März bis 3. Mai 2017 absolviert. Für die Durchführung der Tests wurde ein reflexionsarmer Raum des Partners ISF mit einem Hintergrundpegel von 17 dB(A) genutzt (siehe Abb. 6-2), um sicherstellen zu können, dass die Testpersonen bei der Wiedergabe und Bewertung der Stimuli nicht durch Störgeräusche beeinflusst werden.

Das verwendete Testsystem zur Beurteilung der Lästigkeit und der Dringlichkeit besteht aus einem Windows 7 basierten PC, welcher für die Darstellung des Testprotokolls auf dem Bildschirm, für die Dateneingabe per Maus und per Tastatur und die Ansteuerung der akustischen, gehörrichtigen Wiedergabe dient. Letzteres erfolgt über einen programmierbaren, digitalen Equalizer (PEQ V von Head Acoustics), welcher über eine USB-Schnittstelle mit dem PC verbunden ist und einem offenen, dynamischen Kopfhörer (HD 650



Abb. 6-2: Wahrnehmungstests - Schallkammer des Projektpartners ISF (links) und Symbolfoto eines Probanden während der Testdurchführung (rechts)

von Sennheiser). Um eine pegeltreue Wiedergabe sicherzustellen, sind die Kopfhörer gemeinsam mit dem Equalizer kalibriert.

Für die Reaktionstests wurde eine andere, umgebaute Tastatur mit einem zweipoligen Anschluss verwendet, bei welcher mittels einer 5V-Spannungsversorgung der Kontaktschluss bei Betätigung der Leertaste als TTL-Impulse ausgegeben wurde. Zusätzlich wurde einer der beiden TTL-Digitalausgänge des Equalizer PEQ V genutzt, um zu Beginn eines jeden Rumpelstreifengeräusches, mit welchen an variierenden Zeitpunkten das Fahrgeräusches überlagert wurde, eine eindeutige digitale Kennung auszugeben. Beide TTL-Signale wurden logisch mit einem ODER-Gatter verknüpft und über den Digitaleingang des Aufzeichnungssystem DIC24 (Head Acoustics) mit einer Abtastrate von 8 kHz aufgezeichnet. Eine anschließende, automatisierte Auswertung der aufgezeichneten Digitalsignale erlaubte daher die präzise Zeitbestimmung zwischen den Anfängen der Rumpelstreifengeräusche und den Leertastenbetätigung durch die Probanden.

Benutzerschnittstelle

Für möglichst automatisiert ablaufende Wahrnehmungstests wurde für die Lästigkeits- und Dringlichkeitsbewertung eigens eine Benutzerschnittstelle in Microsoft Visual C++ 2012 entsprechend der funktionalen Anforderung aus dem Testdesign (siehe Kap. 6.2) implementiert. Die Schnittstelle übernimmt die selbstständige Wiedergabe der jeweiligen Stimuli (durch Aufruf des externen Programms HEAD Audio Recorder V7.00.300 zur Ansteuerung des digitalen Equalizers), erlaubt die Eingabe für die Bewertung der von dem Probanden empfundenen Lästigkeit und speichert die subjektiven Bewertungen strukturiert ab.

Im Gegensatz dazu waren zur der Ermittlung der Reaktionszeiten nur wenige, aber dafür deutlich längere Audiosamples erforderlich (vgl. Kap. 6.2). Aufgrund dessen wurden die Audiowiedergabe jedes Stimulus, wie auch das eigens entwickelte Programm, welches die Aufmerksamkeit des Probanden an sich ziehen soll, vor jedem Testlauf manuell gestartet. Die Aufzeichnung des TTL-Signals zur Ermittlung der Reaktionszeiten lief hingegen während des gesamten Reaktionstests ohne Unterbrechung.

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

- Numerische Bewertung der Lästigkeit eines Stimulus für Größenskalierung
Der zu bewertende Stimulus wird zu Beginn des Einzeltests automatisch wiedergegeben (siehe Abb. 6-3, links). Um Richtungseffekte der Vorbeifahrt ausschließen zu können,



Abb. 6-3: Bildschirmmasken der Größenschätzung während der Wiedergabe des Stimulus (links) und bei Möglichkeit zur Bewertung (rechts)

werden linker und rechter Kanal zufällig vertauscht. Erst nachdem der Stimulus vollständig abgespielt wurde, kann der Proband die Lästigkeit durch Eingabe einer frei wählbaren, nicht negativen Dezimalzahl mit maximal 8 Stellen bewerten (siehe Abb. 6-3, rechts). Durch Anklicken des Knopfs „Weiter“ oder durch Drücken der „Enter“-Taste kann - nachdem eine gültige Bewertung eingegeben wurde - der Einzeltest abgeschlossen werden, sodass entsprechend dem konfigurierten Testskript der nächste Einzeltest gestartet, eine Pause eingeleitet oder das Programmende erreicht wird.

- Bewertung der Dringlichkeit mittels einer 9-stufigen Bewertungsskala

Die Benutzerschnittstelle und der Ablauf sind mit Ausnahme der Bewertungseingabe ident, wie bei der Bewertung der Lästigkeit. Anstatt der Eingabe einer Zahl erfolgt die Bewertung hier jedoch mit einem Schieberegler mit 5 Hauptstufen der Dringlichkeit („Überhaupt nicht“, „Wenig“, „Mittelmäßig“, „Sehr“ und „Äußerst“) und 4 Zwischenstufen.

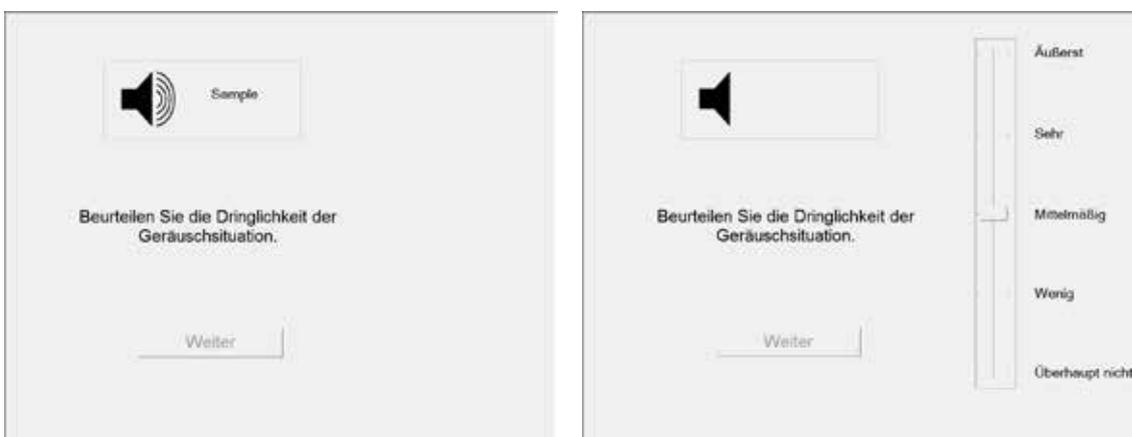


Abb. 6-4: Bildschirmmasken der Dringlichkeitsbewertung mit 9-stufigem Schieberegler während der Wiedergabe des Stimulus (links) und bei Möglichkeit zur Bewertung (rechts)

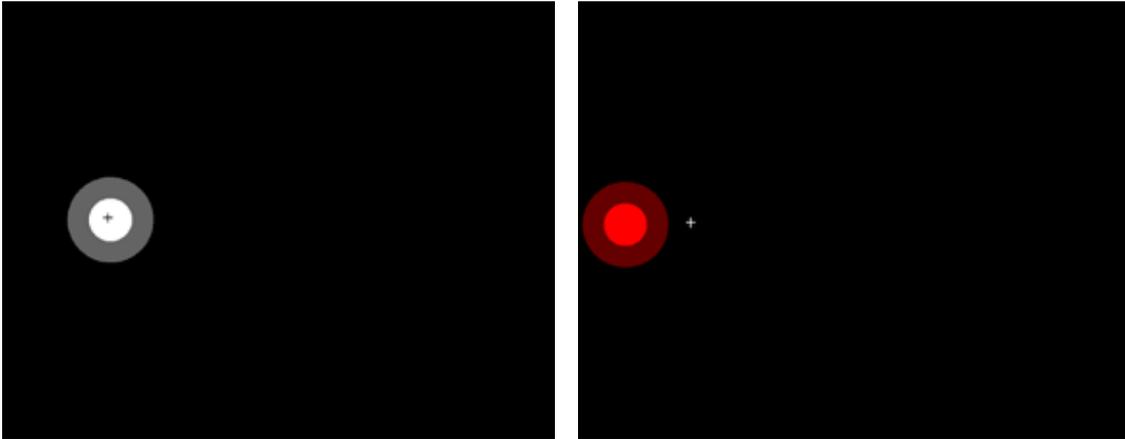


Abb. 6-5: Bildschirmfotos der Aufgabe von Probanden während des Reaktionstests, mit dem Mauszeiger einen sich bewegenden Kreises zu folgen: solange sich der Mauszeiger innerhalb des Kreises befindet erscheint dieser weiß (links), ansonsten wechselte die Farbe als optisches Signal dieses unerwünschten Zustandes auf Rot (rechts)

Um vorzeitige Bewertungseingaben ausschließen zu können, erscheint der Schieberegler erst nach vollständiger Wiedergabe des jeweiligen Stimuli in Mittenstellung am Bildschirm (siehe Abb. 6-4, links und rechts). Der Proband hat die Möglichkeit entweder mit der Maus, oder mit den Pfeiltasten „aufwärts“ und „abwärts“ die gewünschte Bewertung abzugeben. Der Knopf „Weiter“ dient auch hier zum Abschluss der Eingabe, um zu verhindern, dass direkt nach einer Stimuluswiedergabe (unabsichtlich) die Bewertung ohne Eingabe der Dringlichkeitsstufe abgeschlossen werden kann, wird dieser Knopf erst anwählbar, sobald der Schieberegler zumindest um eine Zwischenstufe bewegt wurde.

- Ermittlung der Reaktionszeiten bei Auftreten eines Rumpelstreifengeräusches während der Fahrt

Der Proband hat entsprechend des Testdesigns (siehe Kap. 6.2) während der Testläufe mit dem Mauszeiger in Form eines Kreuzes mit der nicht-dominanten Hand einem sich am Bildschirm bewegenden Kreis zu folgen. Solange sich der Zeiger innerhalb des Kreises befindet, erscheint der Kreis weiß (siehe Abb. 6-5, links). Befindet er sich jedoch außerhalb, ändert sich die Farbe des Kreises auf Rot, um dem Proband diesen unerwünschten Zustand optisch anzuzeigen (siehe Abb. 6-5, rechts). Die Bewegungen des Kreises und des Mauszeigers wurden protokolliert, um bei etwaigen Auffälligkeiten in der Auswertung der Reaktionszeiten die Aufmerksamkeit des betroffenen Probanden besser einschätzen zu können.

Während dieser Aufgabe, welche ein gewisses Maß an Aufmerksamkeit erfordern, wurden dem Probanden die akustischen Stimuli von im Fahrzeuginneren auftretenden Fahrgeräuschen und an zufälligen Zeitpunkten überlagerten Rumpelstreifengeräuschen

vorgespielt. Bei Wahrnehmung eines solchen Rumpelstreifengeräusches hatte der Proband die Leertaste der vor ihm liegenden Tastatur mit der dominanten Hand zu drücken. Das wiedergegebene Audiosignal wird davon nicht beeinflusst bzw. läuft der Test ohne Unterbrechung weiter.

Testablauf

Entsprechend des Testdesigns gliedert sich der Wahrnehmungstest in die drei Blöcke Lästigkeitsbeurteilung, Dringlichkeitsbeurteilung und Reaktionszeitbestimmung, welche von den Probanden nacheinander zu absolvieren waren. Für eine einheitliche Instruktion der Probanden wurde für jeden der Blöcke zunächst eine schriftliche Anleitung vorgelegt (siehe Anhang C). Diese umfassten im jeweils eine kurze Beschreibung der konkreten Aufgabe und eine Erläuterung der Benutzerschnittstelle bzw. der Eingabemöglichkeiten.

Im Detail wurde bei der Lästigkeitsbeurteilung der Proband informiert, dass die Stimuli entsprechend der empfundenen Lästigkeit mit Zahlen zu beurteilen sind, wobei der Begriff Lästigkeit wie folgt allgemein definiert wurde, um das gleiche Verständnis bei allen Probanden hervorzurufen:

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

Für die Beurteilung der Dringlichkeit wurde dem Proband mitgeteilt, dass er sich in einem Auto befindet und sich plötzlich das Innengeräusch ändern wird. Der Proband sollte die Veränderung des Geräusches anhand einer 9-teiligen Skala dahingehend beurteilen, wie dringend es erachtet wird, darauf zu reagieren. In einem Probedurchgang konnte der Proband die Aufgabe üben, hier wurde der prinzipielle akustische Bereich abgedeckt.

Das gleiche Szenario einer plötzlichen Änderung des Innengeräusches wurde dem Probanden auch für die Bestimmung der Reaktionszeiten vorgegeben. Jedoch sollte der Proband bei Wahrnehmung einer Änderung des Innengeräusches so schnell wie möglich die Leertaste der Tastatur drücken. Zudem wurde die Aufgabe (Verfolgung eines sich am Bildschirm bewegenden Kreises mit dem Mauszeiger) erklärt, die der Proband während der Testläufe durchzuführen hatte.

Nach Durchsicht der Instruktionen wurden vor jedem Block nochmals der Inhalt, sowie offene Fragen mit dem Testbetreuer besprochen. Vor Testbeginn eines Blocks war zudem ein

kurzer Trainingslauf vorgesehen, um sicherzustellen, dass die Testaufgabe auch korrekt verstanden wurde.

Die Lästigkeitsbeurteilung und die Dringlichkeitsbeurteilung bestanden aus 4 Unterblöcken, welche im Allgemeinen in 12 bis 20 Minuten von den Probanden absolviert werden konnten. Die Reaktionszeitbestimmung war hingegen entsprechend der Durchläufe in 12 Unterblöcke gegliedert, welcher aufgrund der Stimuluslänge ca. 6 Minuten dauerte.

Um die Konzentration der Probanden zu fördern, waren zwischen den Unterblöcken der Lästigkeits- und Dringlichkeitsbestimmung Pausen mit einer Länge von mindestens 5 Minuten vorgesehen. Bei den Reaktionstests wurde aufgrund der deutlich kürzen Dauer der einzelnen Durchläufe die minimale Pausenlänge auf 2 Minuten gesenkt.

6.5. Datenaufbereitung

Lästigkeit

Bei diesem Test kam es vor, dass Probanden sich vertippten. Wenn solche Fehler gemeldet wurden (insgesamt 13 über 7 Probanden verteilt), und diese eindeutig nachvollziehbar waren (11 Fälle), wurde eine Korrektur der Daten vorgenommen und protokolliert. In 2 Fällen wurde der Wert auf 0 gesetzt, da nicht mehr klar war welcher Wert beabsichtigt war. Weiters waren 2 Fälle mit nicht gemeldeten 0-Eingaben vorhanden. Diese 4 Datenpunkte konnten nicht verwendet werden. Insgesamt war der Anteil an den 7424 Urteilen sehr gering.

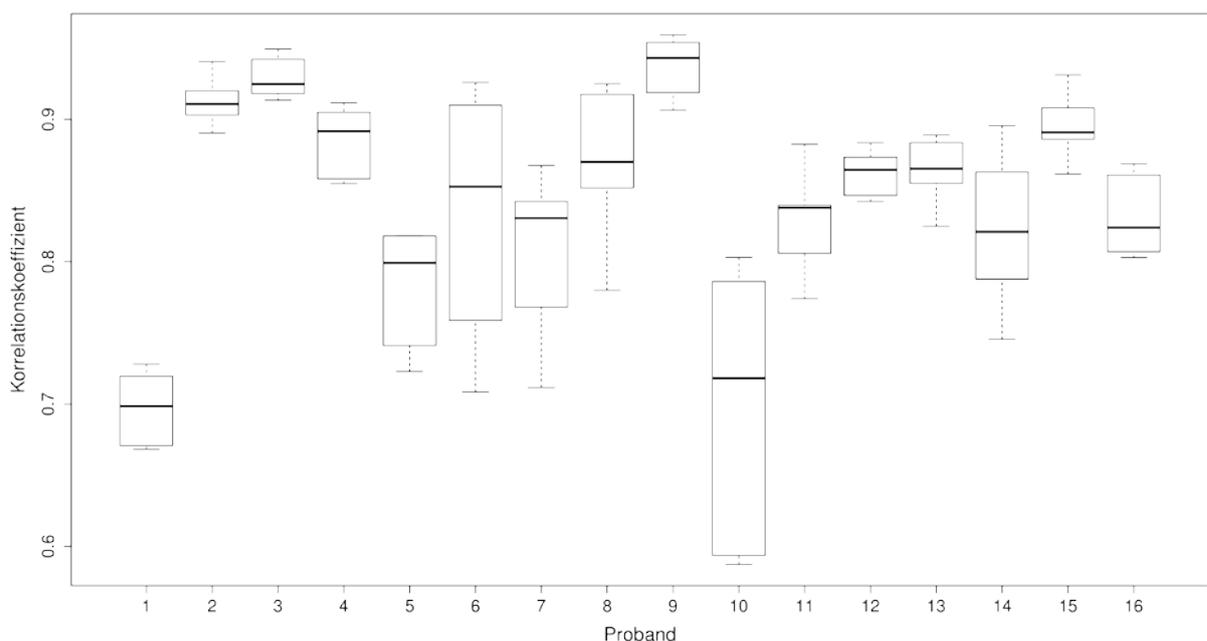


Abb. 6-6: Korrelationen der Probandenurteile zwischen den Durchgängen

Die Urteile wurden zur Basis 2 logarithmiert, d.h. eine Steigerung der log-Lästigkeit um 1 bedeutet eine Verdoppelung. Eine Ausreißerdetektion (Mittelwert \pm 3-facher Standardabweichung) pro Bedingung und Proband ergab keine weiteren Ausreißer.

Abb. 6-6 zeigt die Korrelationen über die vier Durchgänge (alle 6 möglichen Kombinationen) pro Proband, wobei hier die zwei Wiederholungen pro Bedingung und Durchgang gemittelt wurden. Insgesamt sind die Urteile über die Wiederholungen sehr konsistent.

Für die weitere Analyse wurde, um den Einfluss möglicher Extremwerte zu minimieren, pro Proband und Bedingung der Median berechnet und der Mittelwert über alle mittleren Urteile pro Proband abgezogen um die Daten zu normalisieren (z.B. [20] und [24]). Für den Gruppenmittelwert wurden diese probandenspezifischen Urteile pro Bedingung über die Probanden gemittelt.

Dringlichkeit

Bei der Beurteilung der Dringlichkeit kamen keine Rückmeldungen bzgl. falscher Eingaben. Die vorgegebene Skala wurde in Zahlenwerte umgewandelt (von 1 für „gar nicht“ bis 9 für „extrem“). Danach erfolgte die Verarbeitung der Daten ähnlich wie bei der Lästigkeit, mit dem einzigen Unterschied, dass anstatt des Medians hier der Mittelwert verwendet wurde. Dies hat den Grund, dass durch Mittelung die Daten sich kontinuierlicher verteilen, da beim Median die gemittelten Werte in Schritten von 0,5 steigen. Auch bei der Dringlichkeit wurden keine Ausreißer detektiert. Weiters erfolgte keine Normierung, da die Skala vorgegeben war.

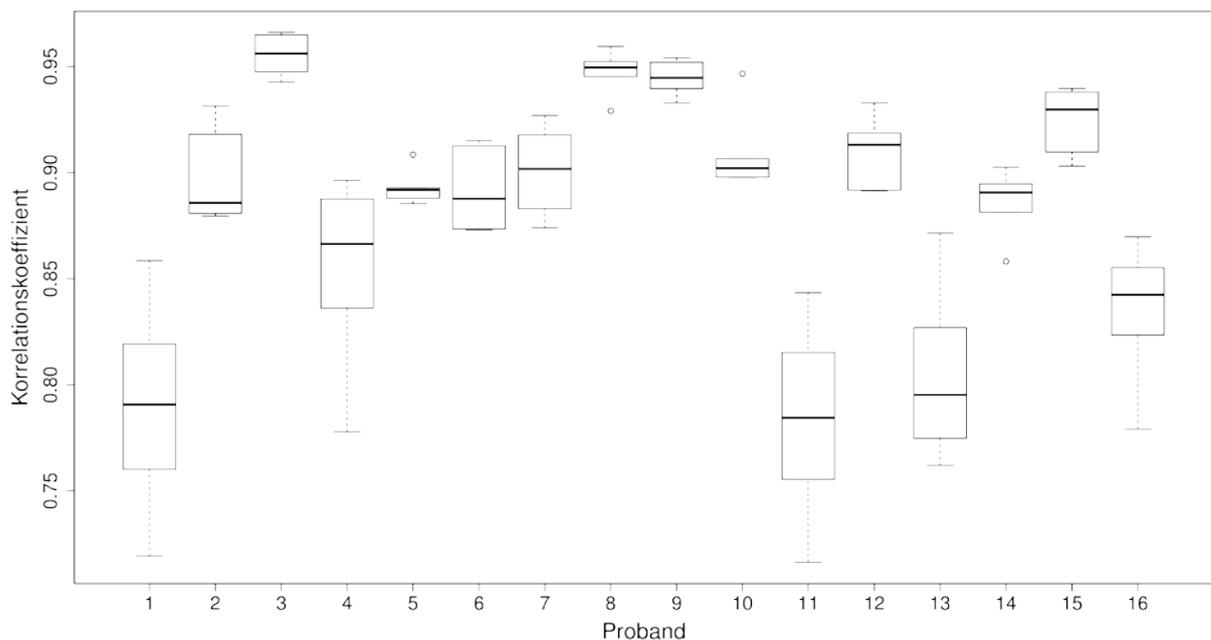


Abb. 6-7: Korrelationen der Probandenurteile für die Dringlichkeit zwischen den Durchgängen

Abb. 6-7 zeigt die Korrelation (Rangkorrelation nach Spearman) über die Durchgänge, auch hier wurden die zwei Wiederholungen innerhalb eines Durchgangs gemittelt. Es zeigt sich, dass die Urteile sehr gut reproduzierbar sind.

Reaktionszeit

Insgesamt wurden 10368 Stimuli vorgespielt. Eine Reaktion war innerhalb einer gewissen Zeit zu erwarten. Ist die Reaktion zu schnell kann dies ein Antizipationseffekt sein, oder auch ein irrtümliches Drücken aufgrund einer kleinen Veränderung vor dem Rumpelstreifen. Daher wurden Antworten die innerhalb von 100 ms erfolgten ausgeschlossen (17 Fälle). Weiters wurden Antworten die nach Ende der Rumpelstreifenüberfahrt erfolgten, ebenfalls als nicht reagiert bewertet (198 Fälle größer als 1,2 s). Gar keine Reaktion erfolgte in 775 Fällen. Aus den verbleibenden Antworten wurden Ausreißer mittels Mittelwert und 3-facher Standardabweichung detektiert (16 Fälle).

Wenn in einer Bedingung (ein RS bei einem bestimmten Fahrzeug) von einem Probanden in weniger als der Hälfte der Fälle reagiert wurde, wurde für diesen Proband und diese Bedingung keine Reaktionszeit bestimmt (dadurch wurden weitere 15 Fälle aus der Mittelung ausgeschlossen). Die 4 Bedingungen in denen so gut wie keine Reaktionen erfolgten (ohne RS bei LKW und PKW und RS5 bzw. RS6 beim LKW) machen 768 Fälle aus.

Bei den Reaktionszeiten ist keine so hohe Reproduzierbarkeit zu erwarten, da hier verschiedene Einflussfaktoren mitspielen. Einerseits variiert die Konzentration aufgrund des Ablenkungstasks, weiters wird die Taste nicht immer exakt gleich gedrückt und das Ansprechen der Tastatur beinhaltet auch gewisse Unsicherheiten. Werden systematisch die Daten in zwei Hälften (jeweils 3 Durchgänge) aufgeteilt und die Korrelation über alle Aufteilungen betrachtet, so variiert beim PKW der über die Personen der Median der Korrelationen zwischen 0,2 und 0,8 und beim LKW zwischen 0,1 und 0,7, wobei ein Proband den Median der Korrelationen bei 0 hat. Die Korrelationen sind daher wie zu erwarten deutlich geringer als bei den Beurteilungstests.

7. ERGEBNISSE

7.1. Schall – außen

PKW

Abb. 7-1 zeigt mittels Boxplots die Verteilung verschiedener akustischer Parameter der Kunstkopfmessung der Überfahrten des PKW. Das Rechteck (Box) stellt hier die beiden mittleren Quartilen dar, d.h. die Grenzen markieren 25 % und 75 % der aufsteigend sortierten Daten. Die dicke horizontale Linie stellt den Median dar. Die von der Box ausgehenden Linien geben den Zahlenbereich der restlichen Daten an und sind maximal 1,5-mal so lange wie die Höhe der Box. Datenpunkte die außerhalb dieses Bereichs liegen werden als einzelne Punkte dargestellt. S_A ist die Schärfe nach Aures, S_D die Schärfe nach DIN, R entspricht der Rauigkeit, T der Tonalität und SW der Schwankungsstärke. L_N ist der Lautstärkepegel in phon, umgerechnet aus der Lautheit. L_{N5} entspricht dem Lautstärkepegel der 5 % der Zeit überschritten wird, L_{N50} entspricht dem Median.

Beim PKW zeigt sich der Zufallsstreifen mit 300 mm (RS4) als der lauteste Streifen (4-5 dB mehr im L_{Aeq} und 3-4 Phon mehr im L_{N5} als der nächste Streifen). Die 300 mm Streifen (RS0a, RS2, RS3) zeigen hier sehr ähnliche Schalldruck- und Lautstärkepegel, auch mit Sinusprofil und gewölbter Trommel (RS7). RS2 (Kegel mit tiefer Seite Richtung Fahrbahn) zeigt einen um etwa 2 dB erhöhten Pegel gegenüber RS3 (entgegengesetzter Kegel), was gegen die ursprüngliche Hypothese, nämlich den Schall wegzulenken, spricht.

Bei 600 mm spielt das Fräsprofil in Längsrichtung eine große Rolle. RS1 mit ca. 10 mm Tiefe und einem konventionellen, wenig gerundeten, Profil ist deutlich lauter als RS5 und RS6, wobei diese auch etwas flacher gefräst sind (7 mm). Bei RS12 wurde der Streifen nicht gleichförmig gefräst, das erste Drittel ist deutlich tiefer. Trotzdem ist der Gesamtpegel im Außenbereich ähnlich dem normalen Rollgeräusch (L_{N5} ist um ca. 3 Phon erhöht und damit etwas lauter als die Sinusfräsungen). Wie aus Abb. 7-2 ersichtlich, ist der L_{Aeq} am Anfang des Streifens zwar um ca. 2 dB höher als am Ende, der Unterschied ist aber nicht auffällig gegenüber anderen gemessenen Streifen (z.B. RS1, RS4). Eine mögliche Ursache für diesen fehlenden Unterschied ist, dass die Fugen aufgrund ihrer Tiefe stärker abgerundet sind und daher ein „sanfteres“ Profil darstellen als der etwas weniger tiefe RS1 (siehe Abb. 2-9). Der 400 mm Streifen (RS13, 7 mm) ist vergleichsweise laut und bewegt sich im Bereich der 300 mm Streifen, die Schärfe ist allerdings deutlich reduziert. RS12 und vor allem RS13 wurden bei teilweise etwas lebhafterem Wind gemessen. Die grünen und roten Balken zeigen einzelne Vorbeifahrten bei starkem (rot) und schwachem Wind (grün). Es zeigt sich

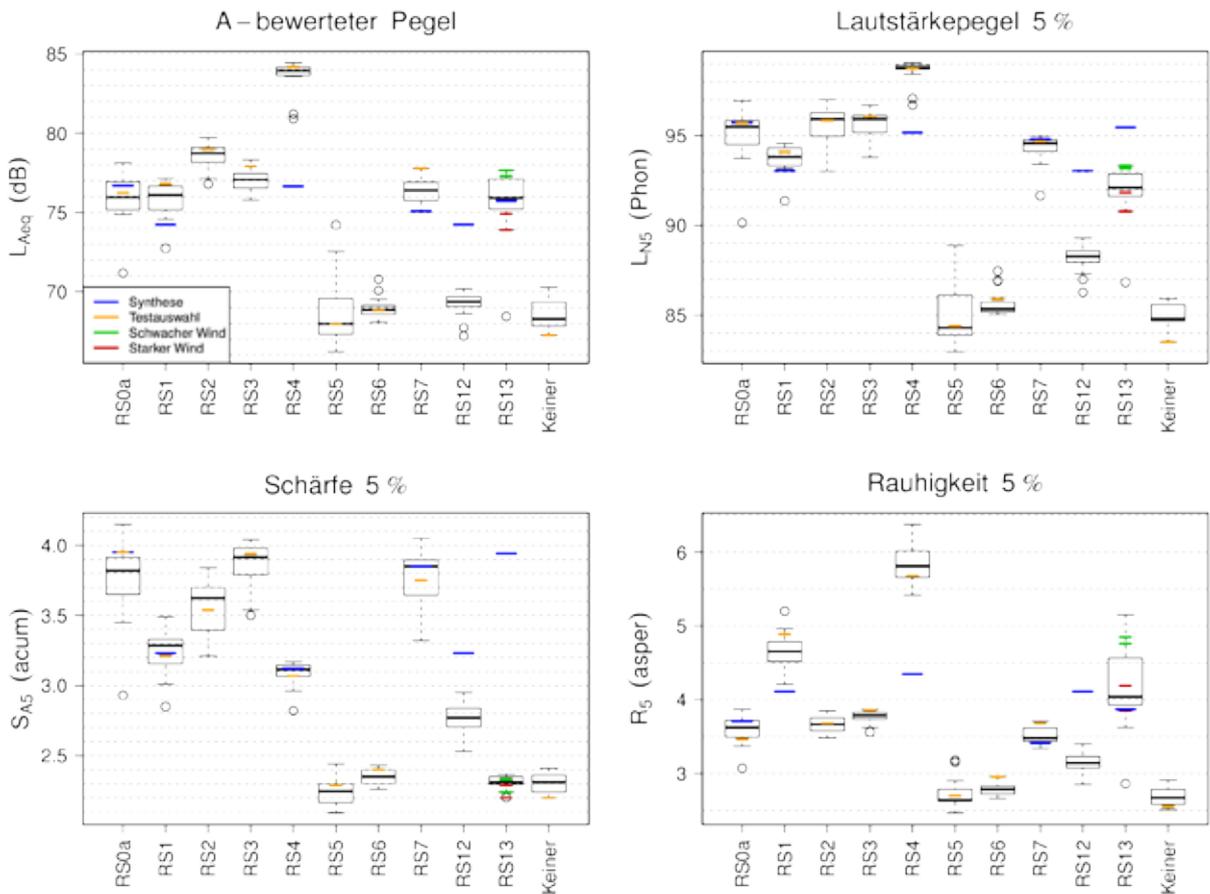


Abb. 7-1: Verteilung akustischer und psychoakustischer Parameter des Außengeräusches der gesamten Überfahrt beim PKW (alle Überfahrten, Kunstkopf 25 m) inklusive der für die Tests ausgewählten (orange) und synthetisierten (blau) Geräusche. Für RS13 werden auch verschiedene Windverhältnisse (rot für stärkeren und grün für schwächeren Wind) dargestellt

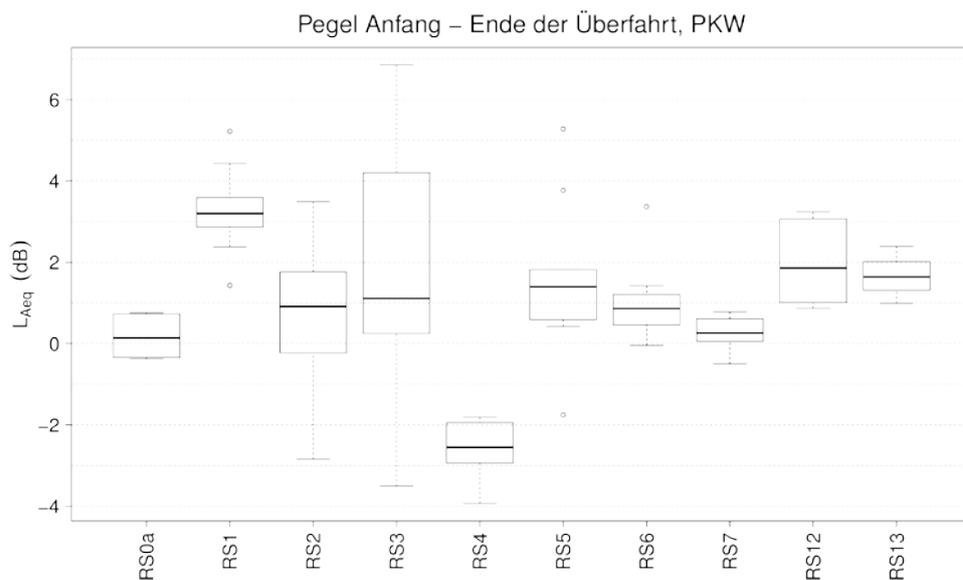


Abb. 7-2: Vergleich des Pegels am Anfang und am Ende der Überfahrten, PKW

ein etwas reduzierter Pegel und Rauigkeit bei stärkerem Wind, da die Windrichtung von den Mikrofonen weg zur Straße hin war, wobei dieser Unterschied zumindest zum Teil wahrscheinlich auch durch unterschiedliche Überdeckung bedingt ist.

Die orangen Linien zeigen die jeweiligen nach dem Überdeckungsgrad ausgewählten Vorbeifahrten die im Wahrnehmungstest verwendet wurden. Diese befinden sich eher im oberen Pegelbereich der Messungen außer bei RS5 wobei die Ausreißer nach oben durch erhöhten Verkehr, der sich bei diesem sehr leisen Streifen besonders stark auswirkt, verursacht wurden. Die zufällige Auswahl der Fahrt ohne Rumpelstreifen resultierte hier in der Wahl der Fahrt mit der geringsten Emission, der Unterschied zum Median beträgt aber nur etwa 1 dB(A).

Die blauen Linien in Abb. 7-1 markieren die jeweiligen Parameter der korrespondierenden synthetischen Rumpelstreifen. Wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, entsprachen die synthetisierten Stimuli eher einer leicht abgerundeten Fugengeometrie wie in RS0a. Dies führt zu beträchtlichen Abweichungen bei RS4 dessen Fugenprofil ja durch die rein vertikale Bewegung der Frästrommel das „schärfste“ Profil darstellt (sehr ähnlich dazu ist RS0b). Es gibt durch diese Vorgehensweise bei der Synthese auch keine Unterscheidung zwischen RS1 und RS12, wobei das Signal eher den Eigenschaften des RS12 entsprechen hätte sollen, der Pegel wurde aber deutlich überschätzt. Sowohl bei RS12 und vor allem bei RS13 wurde vor allem die Schärfe in der Synthese deutlich überschätzt. Dies liegt wahrscheinlich an den hochfrequenten Anteilen die bei der Synthese aus der Aufnahme von RS0a beigefügt wurden, bei den Überfahrten des RS12 reduziert sind und bei RS13 aber gänzlich zu fehlen scheinen (Abb. 7-3 und Abb. 7-4). Dieser Effekt ist wahrscheinlich auch für die erhöhte Lautheit beim synthetisierten RS13 verantwortlich, während der A-Pegel deutlich besser übereinstimmt.

Abb. 7-5 zeigt die Verteilung weiterer Parameter des Außengeräusches. Der L_{Ceq} ist vergleichbar mit dem L_{Aeq} , allerdings ist hier z.B. RS12 etwas erhöht im Vergleich zu RS5 und RS6 aufgrund der stärkeren Gewichtung der tiefen Frequenzen. Der Effekt des Windes ist ähnlich, und auf ca. 3 dB beschränkt. Die Tonhaltigkeit ist bei RS13 (400 mm) besonders hoch.

Abb. 7-6 zeigt den Schalldruckpegel als Funktion des Überdeckungsgrades für die Rumpelstreifen in Testfeld 1. Die Bestimmung des Überdeckungsgrades ist in Abschnitt 3.5 beschrieben. Für die Analyse der gesamten Überfahrten wurden der RMS (root mean square) der Überdeckungsgrade am Anfang, in der Mitte und am Ende bestimmt (dies führt zu einer stärkeren Betonung geringer Überdeckungen, siehe auch Abschnitt 6.3). Das

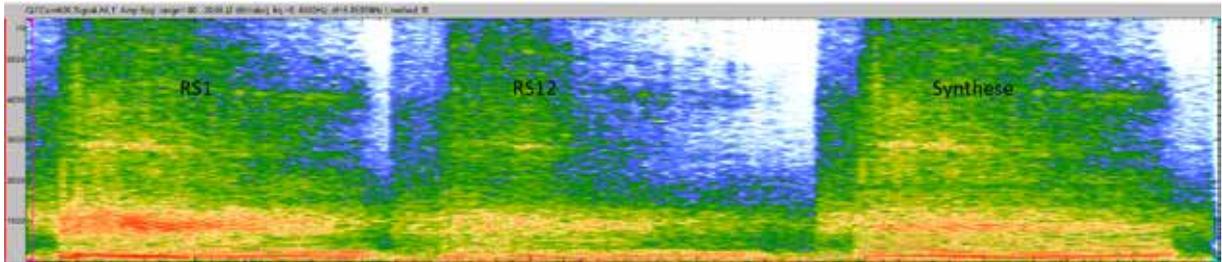


Abb. 7-3: Spektrogramme für RS1, RS12 und den synthetisierten RS1/RS12

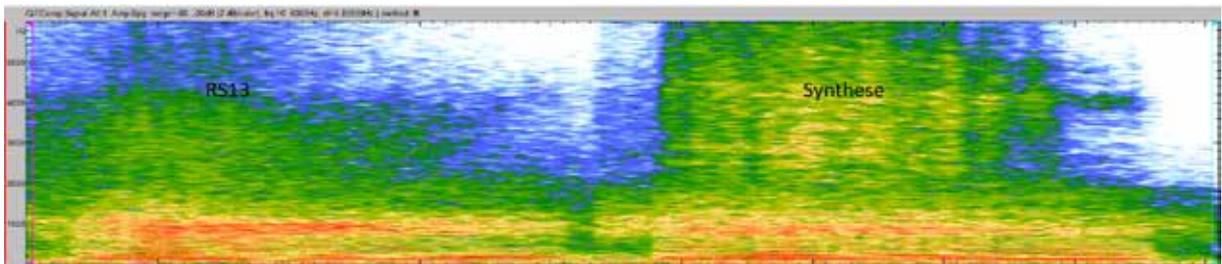


Abb. 7-4: Spektrogramme für RS13 und den synthetisierten RS13

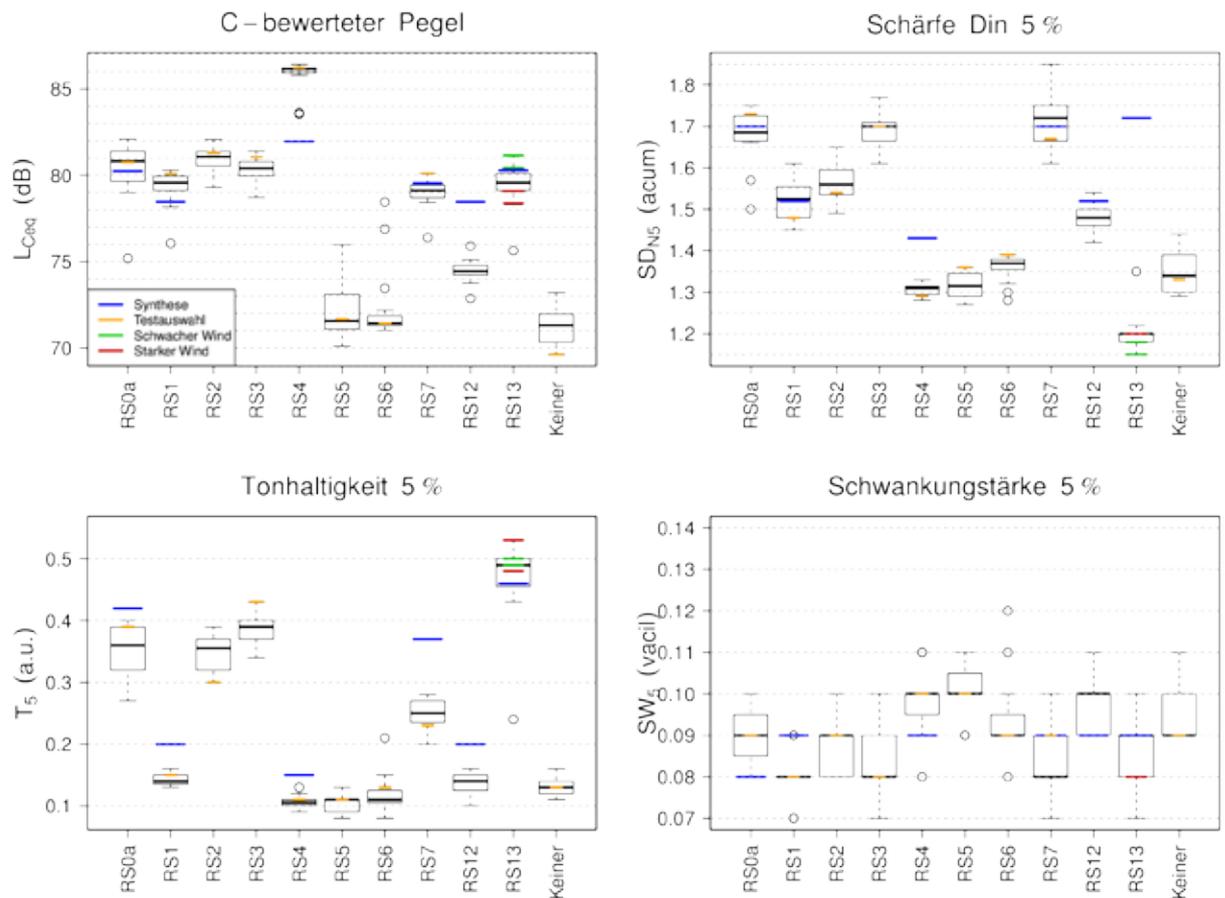


Abb. 7-5: Weitere akustische und psychoakustische Parameter des Außengeräusches beim PKW, Kunstkopf 25 m

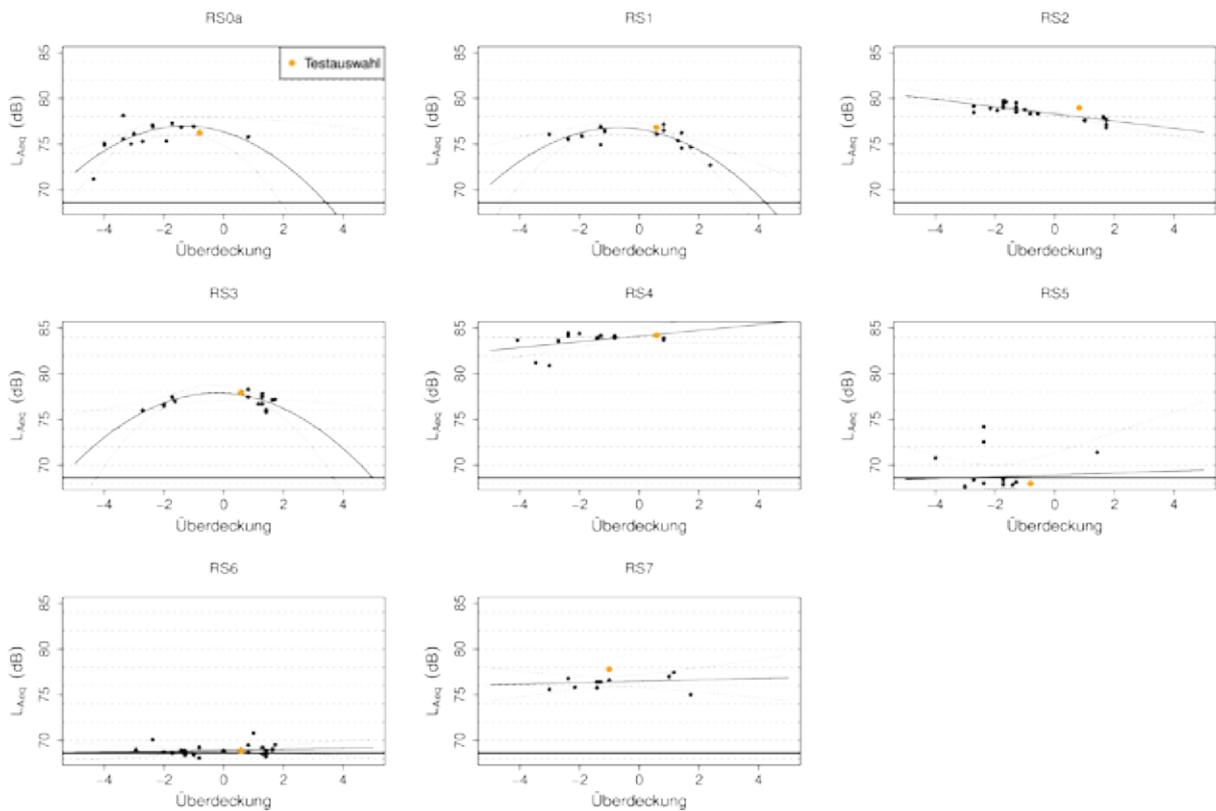


Abb. 7-6: A-bewerteter Schalldruckpegel als Funktion der Überdeckung, Testfeld 1, PKW, Kunstkopf

Vorzeichen ergibt sich über die vorzeichenbehaftete Summe der Quadratischen Grade. Die horizontale Linie markiert den mittleren Pegel einer Vorbeifahrt ohne Rumpelstreifenüberfahrt.

Es wurden lineare Modelle mit dem Überdeckungsgrad und dem quadratischen Überdeckungsgrad erstellt. Die durchgezogene Linie ist die geschätzte Funktion, die gepunkteten Linien das 95%-Konfidenzintervall für diese mittlere Linie. Bis zu einem Überdeckungsgrad von ± 2 zeigen sich nur geringfügige Effekte von ca. 1 dB, darüber hinaus sind allerdings zum Teil sehr wenige bis gar keine Überfahrten vorhanden. Bei RS2 ergibt sich ein linearer Trend zu niedrigen Pegeln rechts von der Mitte, dort wo die Fuge weniger tief ist. Die Kurve für RS3 scheint hingegen nicht zuverlässig, da hier im Bereich um 0 keine Daten vorhanden sind. Die Ausreißer bei RS5 sind durch hohes Verkehrsaufkommen bedingt. Die Abbildung zeigt auch, dass der Fehler bei der Auswahl bei RS2 und RS6 (zweitbeste Überdeckung) keinen wesentlichen Unterschied verursacht.

Abb. 7-7 zeigt ebenfalls den L_{Aeq} der Kunstkopfmessungen als Funktion der Überdeckung. Bei RS12 zeigt sich nur ein geringer Effekt, bei RS13 scheint dieser größer zu sein, aber hier

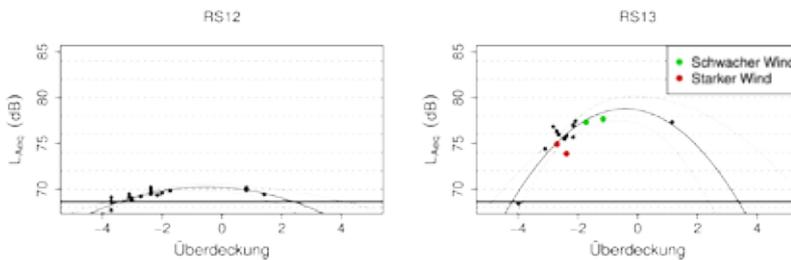


Abb. 7-7: A-bewerteter Schalldruckpegel als Funktion der Überdeckung, Testfeld 2, PKW, Kunstkopf

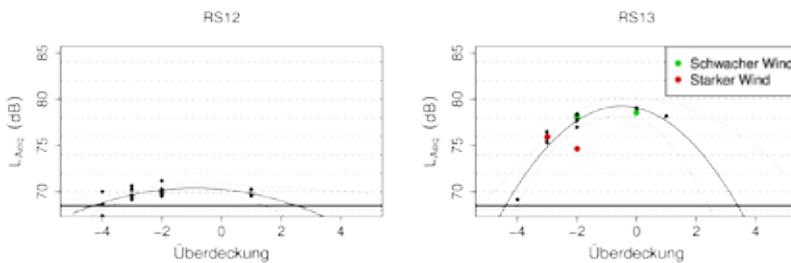


Abb. 7-8: A-bewerteter Schalldruckpegel als Funktion der Überdeckung, Testfeld 2, PKW, Kunstkopf, mittleres Segment

spielt auch die etwas erhöhte Streuung aufgrund der Windverhältnisse mit. Die farbigen Symbole markieren hier die gleichen Vorbeifahrten wie in Abb. 7-1 und Abb. 7-5.

Abb. 7-8 zeigt dieselben Vorbeifahrten wie schon in Abb. 7-7, allerdings diesmal den L_{Aeq} des mittleren 0,5 s langen Segments (d.h. das Fahrzeug befand sich im Mikrofonquerschnitt). Der Überdeckungsgrad ist hier der in der Mitte des RS bestimmte Grad. Es ergibt sich durch den Wind eine etwas größere Streuung, wobei hier der Überdeckungsgrad auch eine Rolle spielt und der Effekt in etwa bei 2-3 dB liegt.

Emissionsmessungen

Zusätzlich zu den 2 geplanten Streifen wurden noch weitere fünf Streifen im Testfeld 2 gefräst. Bei vier dieser Streifen (600 mm Sinus RS9, RS10, 600 mm Zufall RS14 und 300 mm Sinus RS11) wurden nur Emissionsmessungen in 7,5 m durchgeführt (RS8 ist im Außenbereich aufgrund der sehr geringen Frästiefe nicht interessant). Abb. 7-9 zeigt den Vergleich mit den anderen Streifen. In 7,5 m sind die Vorbeifahrten deutlich stärker von der Position des Fahrzeugs in Fahrtrichtung abhängig, daher wurden die Daten aus dem mittleren Segment der Überfahrt gewonnen, d.h. hier befindet sich das Fahrzeug im Bereich des Mikrofonquerschnitts.

Auch hier ist noch ein Effekt des Windes auszumachen, allerdings beträgt dieser nur mehr ca. 2,5 dB und liegt im Streuungsbereich der anderen Messungen. Prinzipiell sind diese

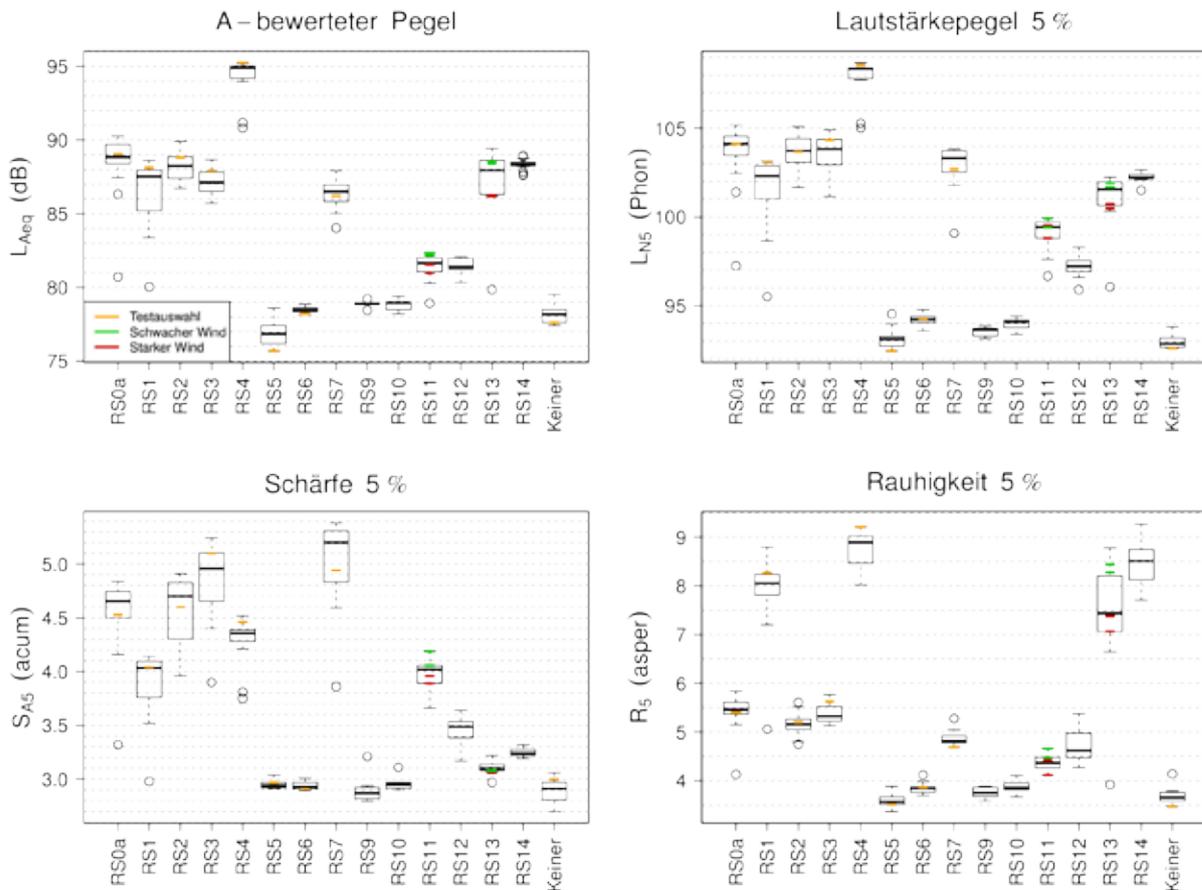


Abb. 7-9: Akustische und psychoakustische Parameter des Außengeräusches beim PKW, Mikrofon 7,5 m, 0,5 s langes, mittleres Vorbeifahrtssegment

Daten sehr ähnlich zu den Kunstkopfdaten. RS9 und RS10 erhöhen, wie zu erwarten, den Emissionspegel nicht, da das Sinusprofil sehr flach und ähnlich dem von RS6 ist. RS11 (300 mm Sinus mit flacher Frästrommel) ist verglichen mit RS7 (gewölbt) deutlich leiser. Das Fräsprofil von RS7 war aufgrund der Wölbung der Frästrommel schwer abzuleiten, allerdings war die nominelle Tiefe 10 mm und dadurch deutlich tiefer als RS11. Das Längsprofil des RS7 ist im Grunde sehr ähnlich zu RS0a, bei dem einfach die Spitze gekappt wurde, d.h. es wurde nicht die volle Tiefe ausgefräst (nur ca. 7-8 mm). Für RS14 wurde die gleiche Fugenabfolge wie für RS4 verwendet, allerdings mit doppeltem Fugenabstand (daher nur die erste Hälfte der Fugen) und nur 7 mm tief. Hier sieht man dass es im Vergleich zu RS4 deutlich leiser ist, aber trotzdem zu der laueren Gruppe von RS zählt.

Abb. 7-10 zeigt wiederum ein ähnliches Bild zur Immission für den L_{Ceq} und die Tonhaltigkeit. Interessant ist, dass die Tonhaltigkeit von RS11 etwas höher ist als die von RS7, wogegen das Verhalten bei den Pegeln umgekehrt ist.

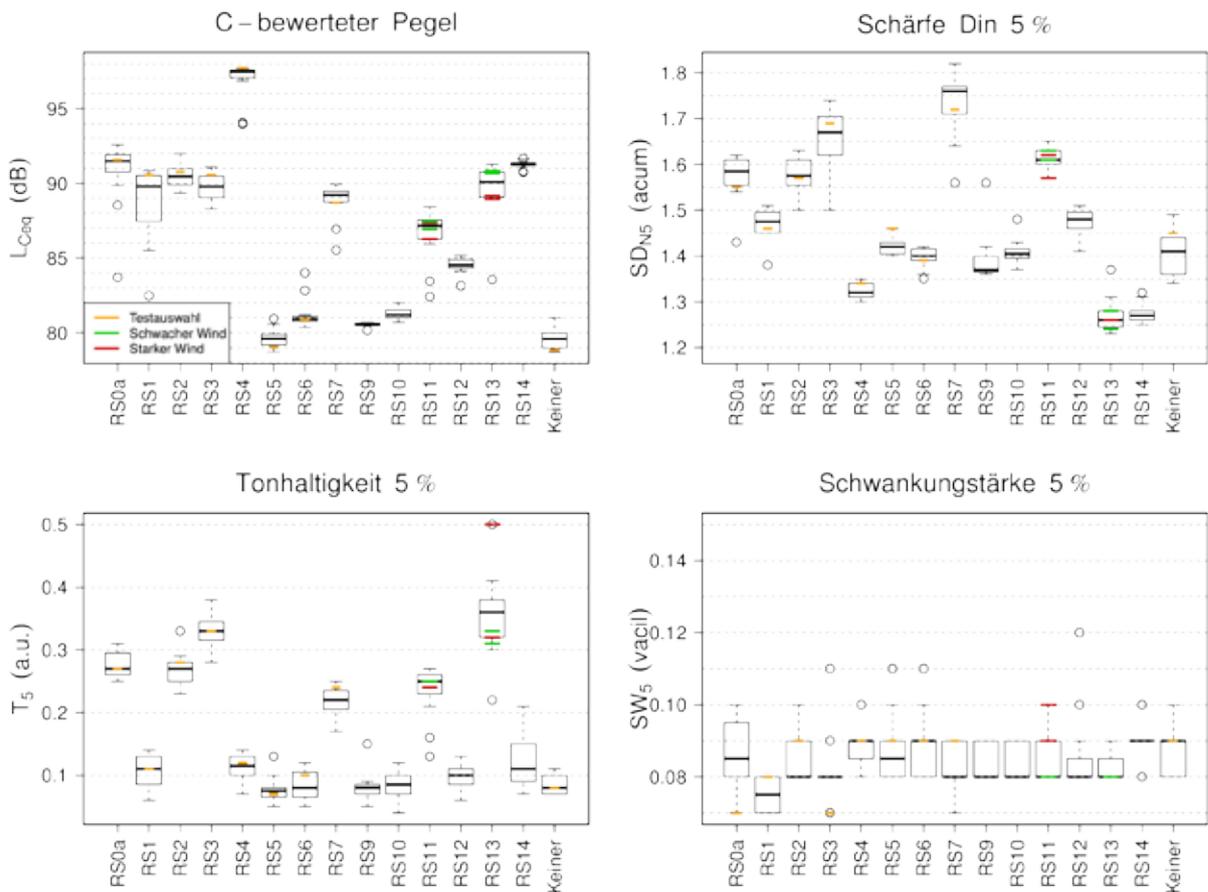


Abb. 7-10: Weitere akustische und psychoakustische Parameter des Außengeräusches beim PKW, Mikrofon 7,5 m

Wie schon zuvor beim Kunstkopf befinden sich auch hier die Pegel der ausgewählten Vorbeifahrten im oberen Pegelbereich der jeweiligen Rumpelstreifenfahrten.

LKW

Abb. 7-11 zeigt die Verteilung der akustischen Parameter beim LKW in 25 m Entfernung. Es sind alle Überfahrten dargestellt, durch eine Einschränkung der Überdeckung auf ± 3 verschwinden einige der Ausreißer (Kreise), die Änderungen sind aber gering. Der LKW ist, wie zu erwarten, bei normalen Vorbeifahrten deutlich lauter (75 dB vs. 69 dB beim PKW). Die Pegelunterschiede zu den Rumpelstreifen sind beim LKW aber geringer, die maximale Erhöhung des Medians des L_{Aeq} beträgt 6 dB (15 dB beim PKW). Auch beim LKW produziert der Zufallsstreifen RS4 die höchsten Schalldruckpegel und Lautstärkepegel er hebt sich aber nicht so stark ab wie beim PKW und der L_{Aeq} ist beim LKW insgesamt geringer als beim PKW (81 vs. 84 dB). Im Gegensatz zum PKW scheint die gewölbte Frästrommel hier einen größeren Unterschied zu verursachen (2 dB RS0a vs. RS7) was vermutlich durch die

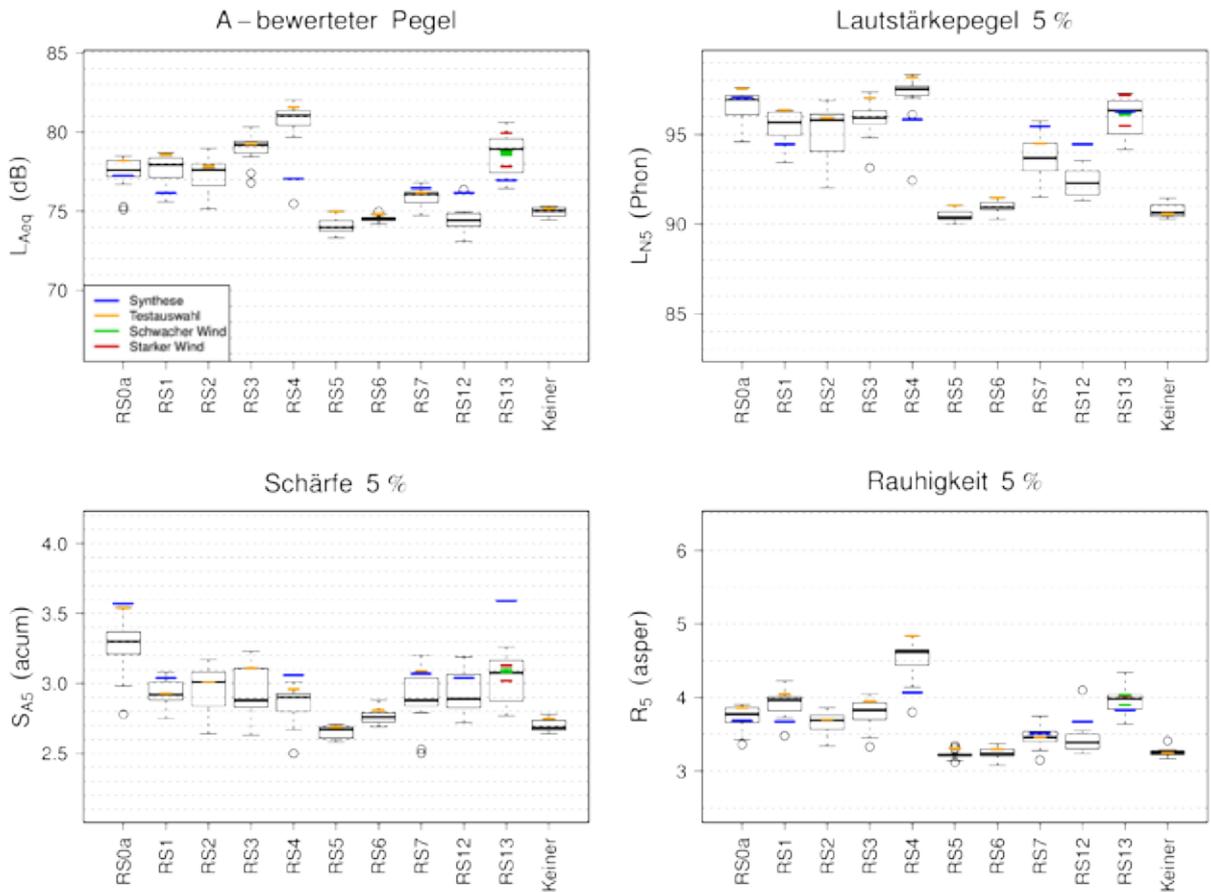


Abb. 7-11: Verteilung akustischer und psychoakustischer Parameter des Außengeräusches der gesamten Überfahrt beim LKW (alle Überfahrten, Kunstkopf 25 m) inklusive der für die Tests ausgewählten (orange) und synthetisierten (blau) Geräusche. Für RS13 werden auch verschiedene Windverhältnisse (rot für stärkeren und grün für schwächeren Wind) dargestellt.

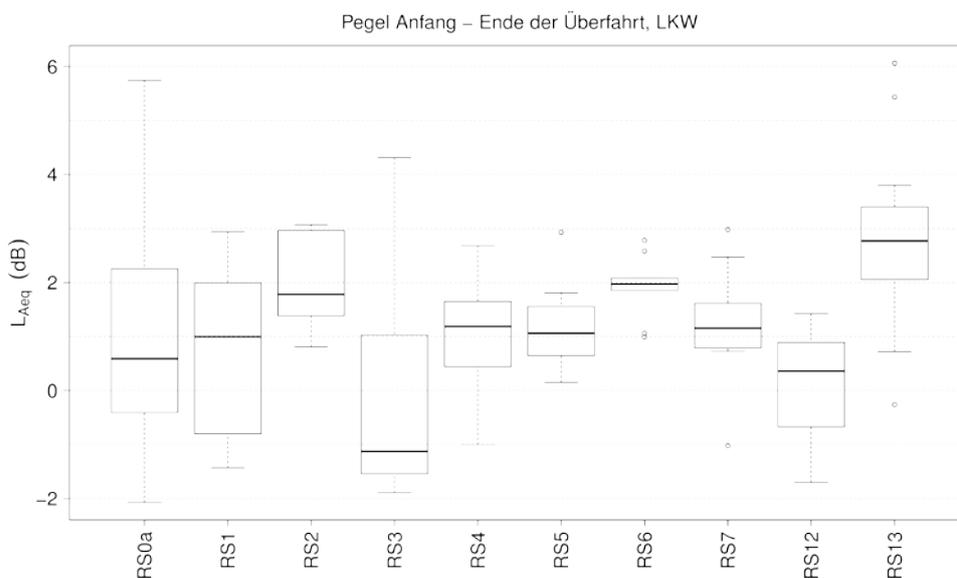


Abb. 7-12: Vergleich des Pegels am Anfang und am Ende der Überfahrten, LKW

breiteren Reifen, die im flachen Bereich - die Profiltiefe nimmt zu Rand hin ab – aufliegen, erklärbar ist. Bei den Kegelförmigen Fräsungen (RS2, RS3) ergibt sich interessanterweise ein gegenteiliges Bild, RS2 hat geringere Pegel als RS3.

600 mm Sinusfräsungen aber auch RS12 verursachen nur geringe Veränderungen in Pegel und Lautheit. Auch beim LKW scheint es keinen systematischen Unterschied zwischen den tiefen und flachen Fräsungen bei RS12 zu geben (Abb. 7-12). Bezüglich des Windes gibt es beim LKW keine systematischen Tendenzen, dies legt nahe dass der Gesamteffekt relativ gering war. Auch beim LKW befinden sich die aufgrund der Überdeckung ausgewählten Testsamples im oberen Pegelbereich (orange Linien).

Beim LKW passen die Parameter der synthetisierten Stimuli (blaue Linien) gut mit den Messungen zusammen, prinzipiell sind aber beim LKW die Wertebereiche deutlich kleiner. Es wurde aber auch hier bei RS13 die Schärfe deutlich überschätzt.

Abb. 7-13 zeigt, dass die Unterschiede zwischen RS2 und RS3 beim C-Pegel geringer sind und stärker streuen. Die Tonhaltigkeit ist, wie erwartet, bei den 300 mm Streifen hoch im

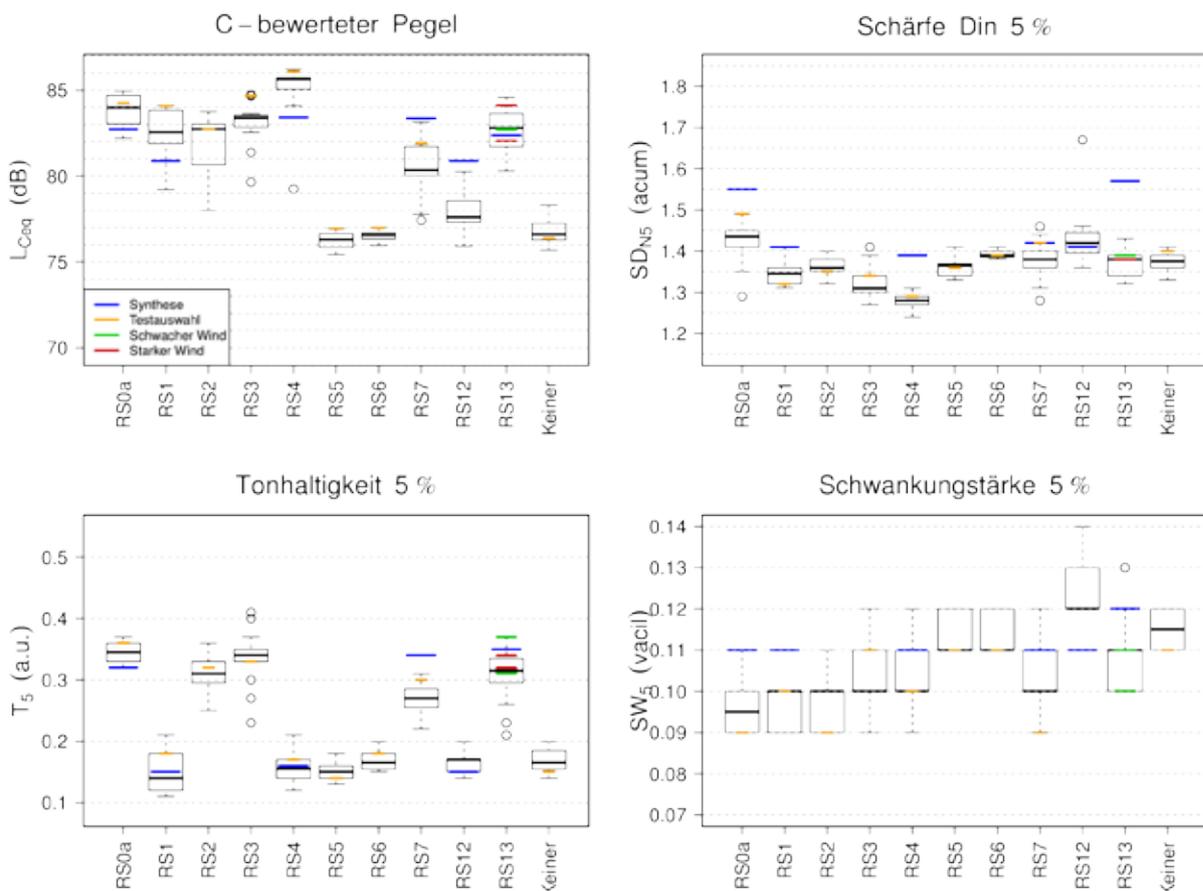


Abb. 7-13: Weitere akustische und psychoakustische Parameter des Außengeräusches beim LKW, Kunstkopf 25 m

Gegensatz zu dem Zufallsstreifen und den 600 mm Streifen. Bei RS13 (400 mm) ist dieser Parameter ebenfalls deutlich erhöht.

Abb. 7-14 zeigt den Schalldruckpegel als Funktion des Überdeckungsgrades (RMS, siehe auch PKW) für den LKW und die Rumpelstreifen in Testfeld 1. Es wurden lineare Modelle mit dem Überdeckungsgrad und dem quadratischen Überdeckungsgrad erstellt. Die durchgezogene Linie ist die geschätzte Funktion, die gepunkteten Linien das 95%-Konfidenzintervall. Bezogen auf die Gesamtpegeländerung scheinen die Effekte etwas ausgeprägter zu sein als beim PKW, wobei aufgrund der beim LKW höheren Abweichungen von der Idealspur der Vergleich schwierig ist. Auch hier hat die Auswahl des RS2 (zweitbeste Überdeckung) keinen wesentlichen Unterschied verursacht.

Abb. 7-15 zeigt die beiden in 25 m gemessenen RS im Testfeld 2. Zumindest RS13 hat einen ausgeprägten Effekt des Überdeckungsgrades (siehe auch Abb. 7-16 für das mittlere Segment der Überfahrt). Dies kann ein Ergebnis der breiteren Fuge sein, nämlich das bei schmaler Fuge (300 mm) der Reifen nie richtig im Streifen läuft und daher auch bei guter Überdeckung der Pegel etwas geringer bleibt. Der Ausreißer bei RS12 (über 76 dB) rührt von verstärktem Verkehrsaufkommen bei dieser Überfahrt her. Es befanden sich mehrere

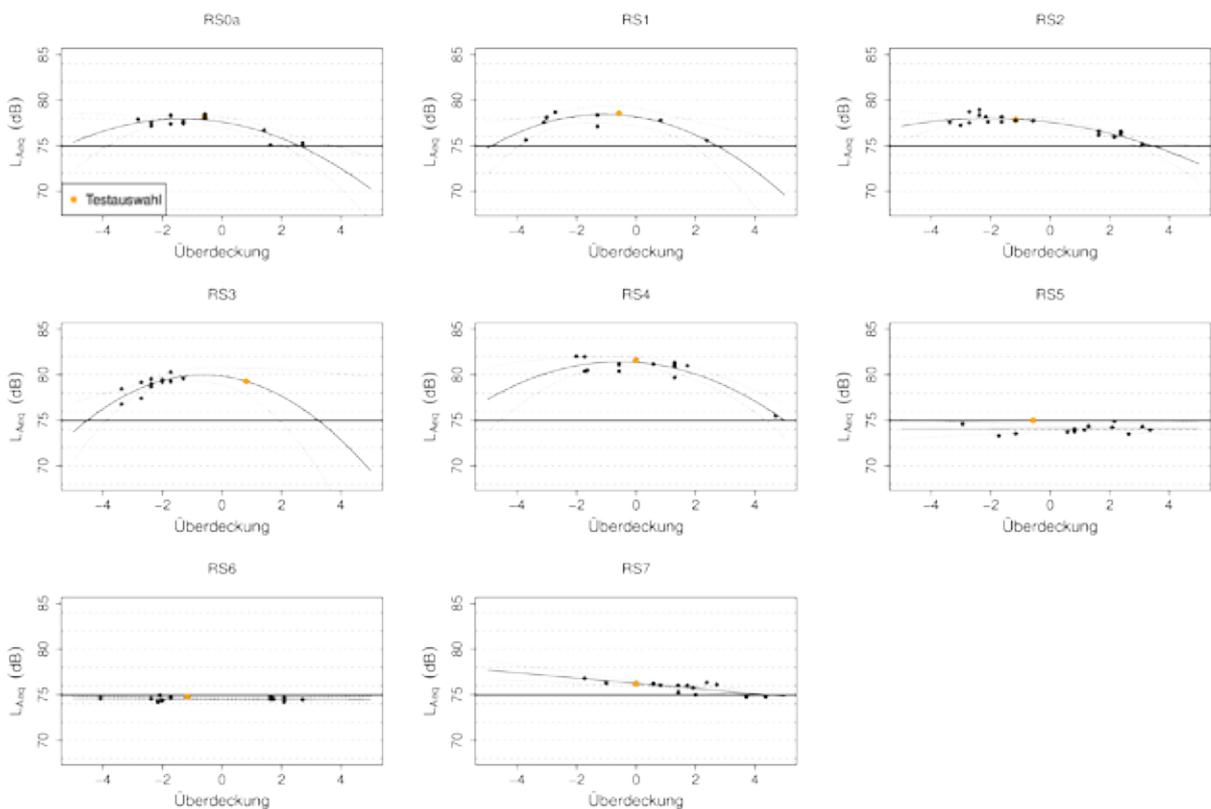


Abb. 7-14: A-bewerteter Schalldruckpegel als Funktion der Überdeckung, Testfeld 1, LKW, Kunstkopf

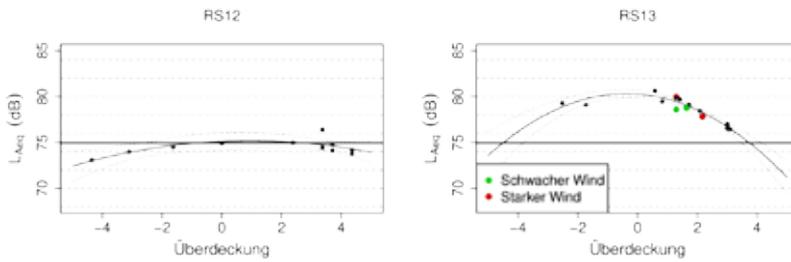


Abb. 7-15: A-bewerteter Schalldruckpegel als Funktion der Überdeckung, Testfeld 2, LKW, Kunstkopf

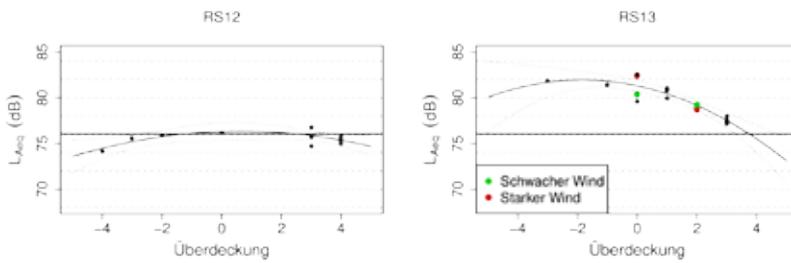


Abb. 7-16: A-bewerteter Schalldruckpegel als Funktion der Überdeckung, Testfeld 2, LKW, Kunstkopf, mittleres Segment

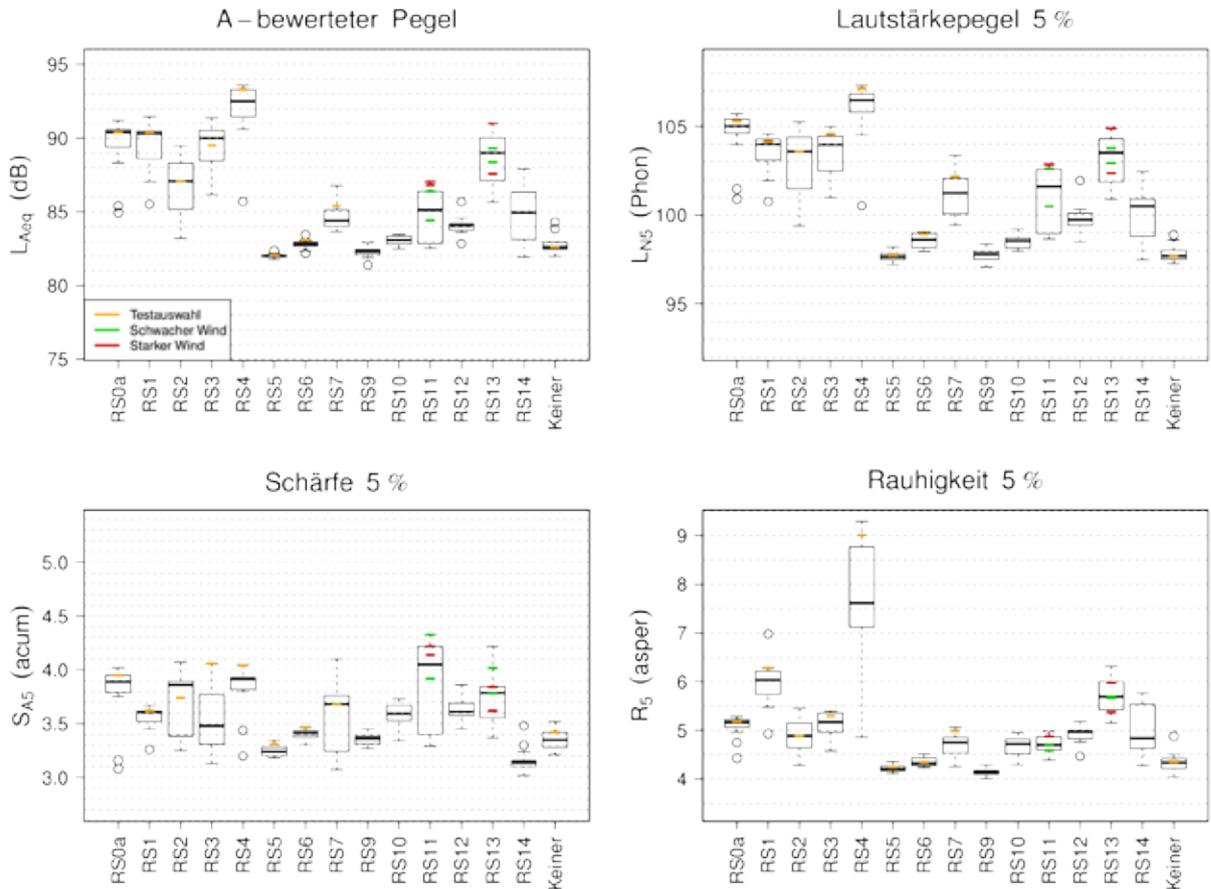


Abb. 7-17: Akustische und psychoakustische Parameter des Außengeräusches beim LKW, Mikrophon 7,5 m

Fahrzeuge inklusive eines weiteren LKW in unmittelbarer Nähe, die Abweichung ist allerdings nur in der gesamten Überfahrt auffällig (vgl. Abb. 7-16). Bzgl. der Windsituation sind die Daten beim LKW weniger deutlich, die verschiedenen Bedingungen stechen hier nicht heraus. Einerseits erfolgte Einschätzung der Windbedingungen durch die Person die die Messung durchführte, andererseits erfolgten die Überfahrten von LKW und PKW nicht gleichzeitig. Wie aus den Daten ersichtlich, spielte auch der Verkehr eine Rolle, aufgrund der geringen Vorbeifahrtspegel beim PKW mehr als beim LKW. Aus den Daten kann daher davon ausgegangen werden, dass der Effekt des Windes daher wohl unter 3 dB liegt.

Emissionsmessungen

Bei den vier weiteren Streifen im Testfeld 2 (600 mm Sinus RS9, RS10, 600 mm Zufall RS14 und 300 mm Sinus RS11) zeigt der Vergleich dass, wie zu erwarten, RS9 und RS10 keine Erhöhung des A-Pegels verursachen, auch der Lautstärkepegel bleibt unverändert. RS12 ist um ca. 2 dB höher und RS13 ist im Bereich der 300 mm RS Streifen aus Testfeld 1. Der Wind scheint hier keinen konstanten Einfluss auf die Parameter zu haben. Der 600 mm

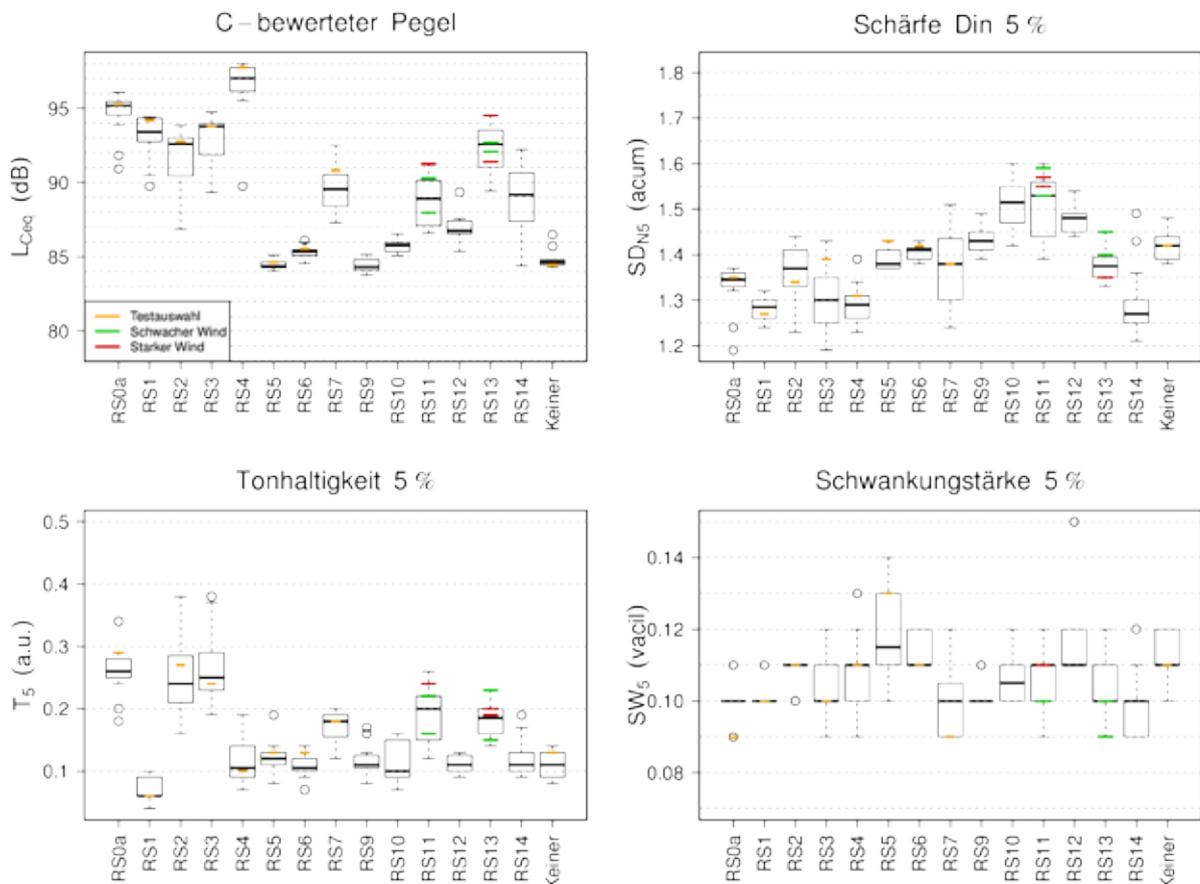


Abb. 7-18: Weitere akustische und psychoakustische Parameter des Außengeräusches beim LKW, Mikrofon 7,5 m

Zufallsstreifen (RS14) und der 300 mm Sinusstreifen (RS11) sind beide bzgl. des Pegels (A und C, Abb. 7-18 und Abb. 7-18) ähnlich, bei psychoakustischer Schärfe und Rauigkeit ergeben sich leichte Unterschiede.

Die beiden Ausreißer bei den Fahrten ohne RS stellen den Pegel der jeweils in Q7 und Q8 durchgeführten Fahrt dar. Bei beiden Fahrten war relativ starker Verkehr vorhanden, allerdings weichen die Kunstkopfmessungen in Q7 nicht von den Messungen ohne RS in Q3 ab, dies kann aber wiederum am Wind und/oder an der höheren Böschung in Q3 liegen.

Die große Streuung bei RS14 entsteht durch die große Streuung bei der Überdeckung (Überdeckungen von 1-4).

Abschätzung RS0b

In Testfeld 1 gab es noch einen weiteren Rumpelstreifen mit 300 mm Abstand und 10 mm Profiltiefe und einem nicht abgerundeten Profil (RS0b). Im Außenbereich wurden hier keine Messungen durchgeführt, da aus den Messungen der Nachbarquerschnitte abzulesen war, dass dieser Streifen zumindest beim PKW deutlich erhöhte Pegel verursacht.

Abb. 7-19 illustriert diesen Effekt. Es wurde für RS0b die Messungen in Q1, für RS0a die Messungen in Q2 und für RS4 die Messungen in Q3 (also im jeweils nachfolgenden Messquerschnitt) in 25 m herangezogen. Es wurde manuell die letzte Sekunde segmentiert und von diesem Segment wurde der L_{Aeq} bestimmt. Es zeigt sich beim PKW eine deutliche Erhöhung des L_{Aeq} bei RS0b gegenüber RS0a von im Schnitt ca. 4 dB. Dies lässt darauf

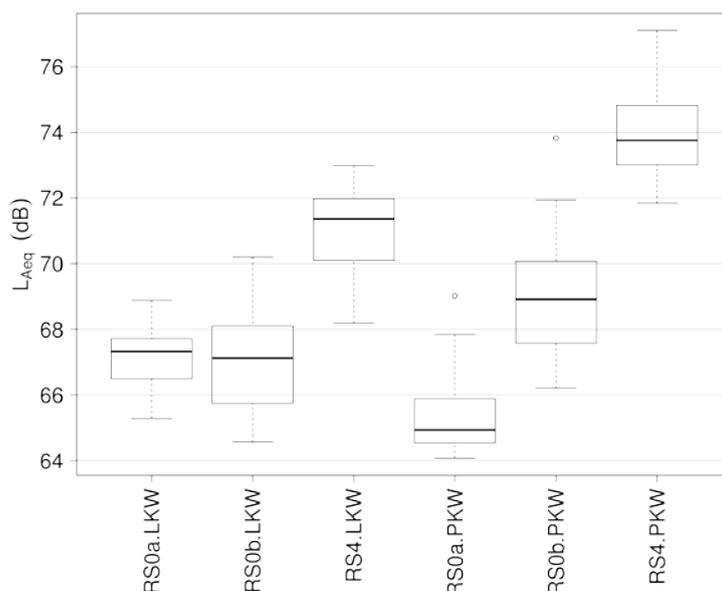


Abb. 7-19: Verteilung des L_{Aeq} im angrenzenden Querschnitt in der letzten Sekunde der Überfahrt

schließen, dass ein markanter Teil der extremen Erhöhung des Pegels beim RS4 beim PKW auf die Fugengeometrie, die der des RS0b sehr ähnlich ist, zurückzuführen ist. Beim LKW scheint wenn dann nur ein geringer Unterschied vorhanden zu sein, was wiederum gut mit dem Vergleich RS0a und RS4 zusammenpasst. Betrachtet man RS4, so kommt noch einmal eine Pegelerhöhung von ca. 4 dB dazu. Hier muss angemerkt werden, dass aufgrund der unterschiedlichen Böschungshöhe und der größeren Distanz zum Mikrofon (ca. 61-87 beim PKW, 61-82 beim LKW) Unsicherheiten auftreten, weswegen wahrscheinlich hier die Gesamtunterschied etwas größer als in 25 m und 7,5 m im Querschnitt sind. Bei höheren Böschungen sollte die Absorption des Bodens geringer werden, was zu einem höheren Pegel in größeren Entfernungen führen kann (vgl. Unterschied RS4 und RS0a in 7,5 m in Abb. 7-9 und 25 m in Abb. 7-1).

Effekt der Fugengeometrie und des Fugenabstandes

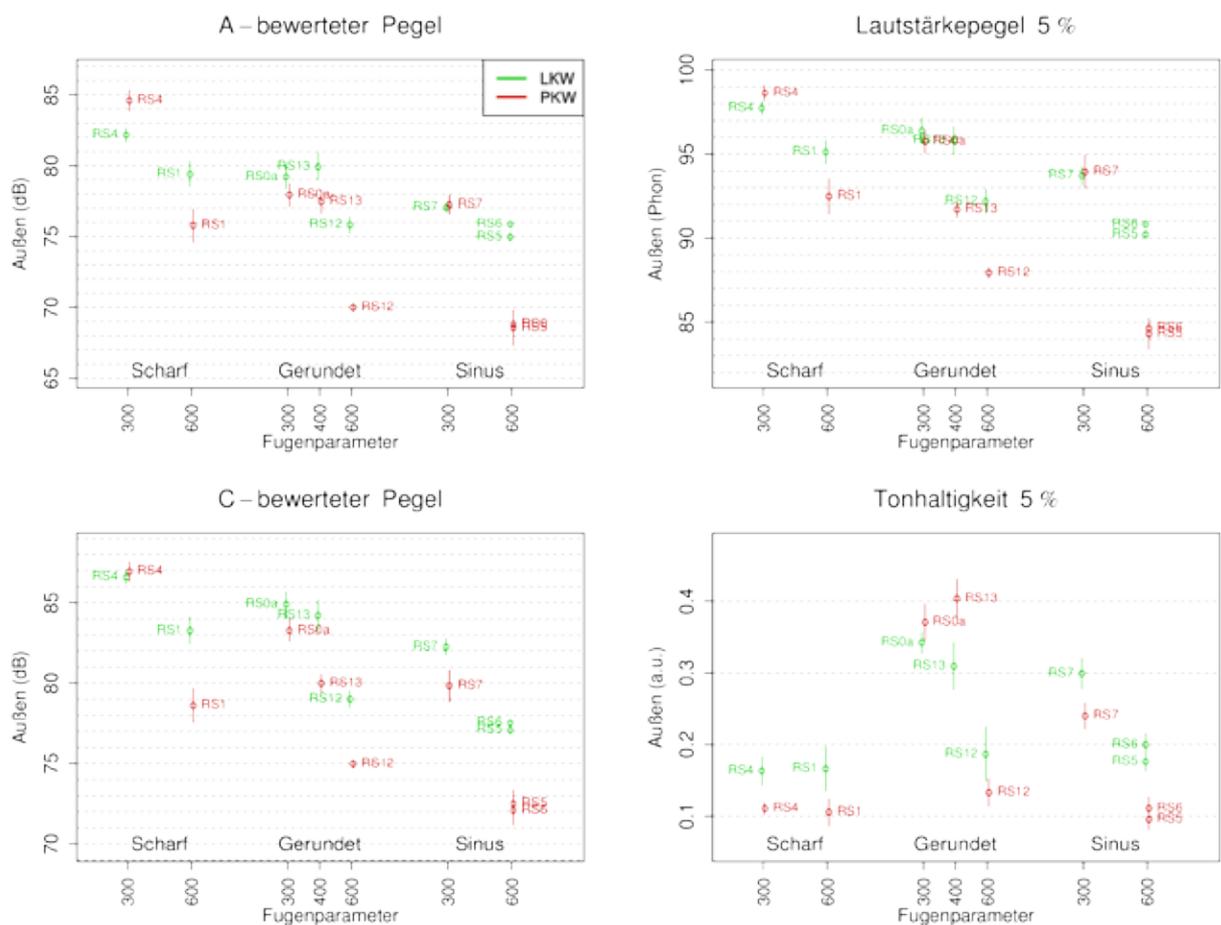


Abb. 7-20: Akustische Parameter des Außengeräusches in 25 m (Kunstkopf) als Funktion der Fugengeometrie, mittleres Segment, Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt

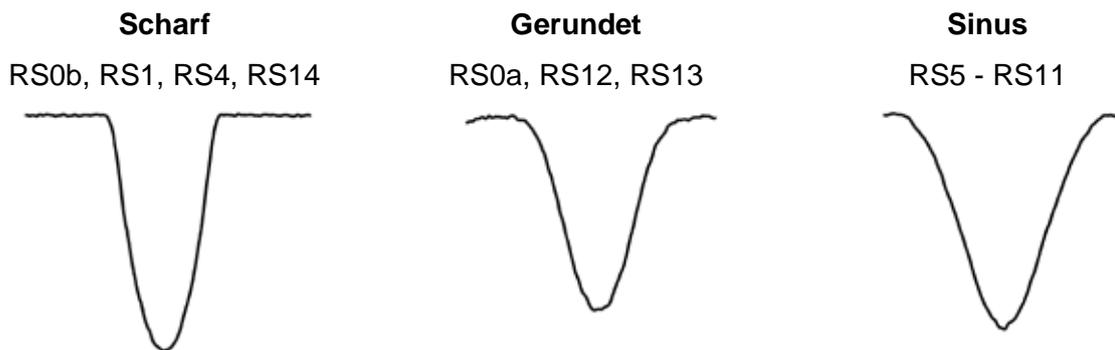


Abb. 7-21: Grobe Einteilung nach Fugengeometrie. Von links nach rechts: scharf (z.B. RS0b), gerundet (z.B. RS0a), Sinus (z.B. RS7)

Abb. 7-20 zeigt die Abhängigkeiten der akustischen Parameter nochmals als Funktion verschiedener Fugenparameter. Die Fehlerbalken zeigen das 95 % Konfidenzintervall aus einer t-Statistik auf die Einzelmessungen angewendet, d.h. diese Intervalle sollen als *Orientierung* bzgl. der Zuverlässigkeit der Mittelwerte dienen, es wurden hier aber keine statistischen Modelle verwendet die eine Aussage über die statistische Signifikanz zulassen. Wichtig zu erwähnen ist, dass nur eine grobe Klassifizierung möglich ist, da Fugentiefe und Fugenform nicht gut voneinander zu trennen sind (Abb. 7-21). „Scharf“ bedeutet, dass der Übergang von Fahrbahn zur Fuge keine oder nur eine sehr geringe Abrundung hat, wogegen bei „Gerundet“ eine merkliche Abrundung besteht. Sinusprofile sind jene, bei denen keine erkennbare horizontale Fläche zwischen den Fugen existiert. Aus dieser Abbildung ist erkennbar, dass sowohl beim LKW als auch beim PKW der Pegel mit dem Fugenabstand abnimmt, allerdings fällt, wie schon erwähnt, der 400 mm RS etwas aus der Reihe durch einen ähnlichen oder sogar leicht erhöhten Wert gegenüber 300 mm (die Tendenzen treten ebenso beim konventionellen Mikrofon in 25 m auf). Ein möglicher Unsicherheitsfaktor ist, die schwierige Klassifizierung, da bei RS13 die Fuge etwas schwächer abgerundet ist und sich kein einheitliches Bild ergibt (L_{N5} vs L_{Aeq} vs L_{Ceq}). In dieser Darstellung fällt auch die extrem hohe Tonhaltigkeit beim PKW bei RS13 besonders auf.

Abb. 7-22 zeigt die Parameter in 7,5 m Entfernung, d.h. inklusive RS9, RS10, RS11 und RS14. Hier zeigen sich eindeutigeren Tendenzen beim Fugenabstand, auch bei 400 mm. RS13 (Q7 in Testfeld 2) fällt sowohl im L_{Aeq} als auch im L_{Ceq} um ca. 1 dB beim PKW und 1-2 dB beim LKW gegenüber RS0a. Da die Windrichtung von den Mikrofonen weg war, sollte ein eventueller Effekt des Windes entgegengesetzt ausfallen, d.h. die Pegel in größeren Entfernungen sollten stärker abfallen. Eventuelle Windgeräusche sollten sich auch stärker im L_{Ceq} aller Messungen zeigen. Eine Möglichkeit wäre ein Effekt des Bodens oder der

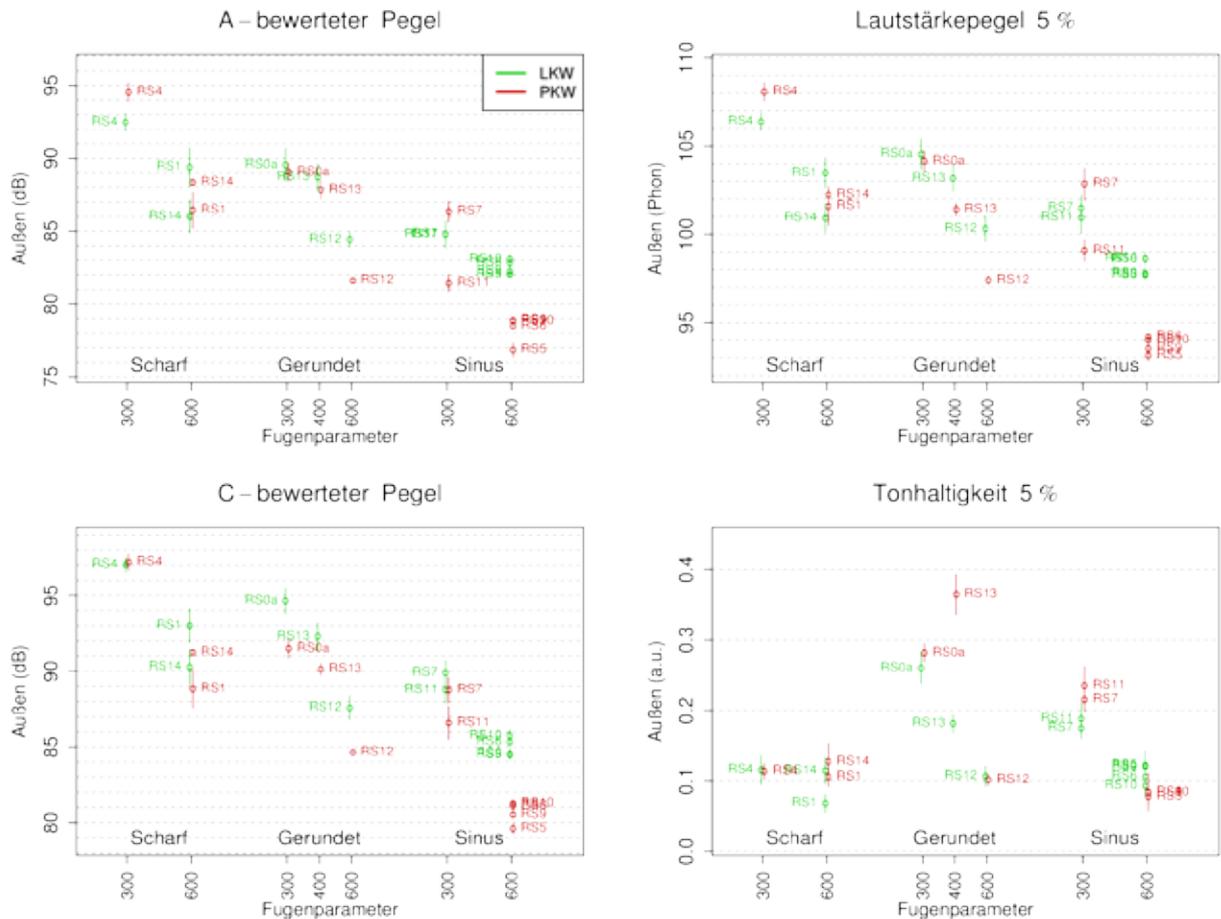


Abb. 7-22: Akustische Parameter des Außengeräusches in 7,5 m als Funktion der Fugengeometrie, mittleres Segment, Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt

Geometrie des Messquerschnittes (eine etwas schwächere Dämpfung im höherfrequenten Bereich), aus den vorliegenden Daten ist es allerdings nicht möglich dies festzustellen.

Ein interessanter Effekt ist auch noch die Pegelabnahme von RS7 zu RS11 (gewölbt, 10 mm vs gerade, 7 mm tief) die beim PKW im Mittel ca. 5 dB(A) und 2-3 dB(C) beträgt. Der Unterschied von RS4 zu RS14 ist schwierig einzuordnen, hier ist sowohl ein Effekt des Abstandes als auch der Fugentiefe verantwortlich.

7.2. Schall - innen

PKW

Abb. 7-23 zeigt die Verteilung verschiedener (psycho)akustischer Parameter des Innengeräusches. Die grauen Boxplots zeigen die Parameter der ersten Messserie in der nur Testfeld 1 gemessen wurden. Die grünen Boxen zeigen die Verteilung der Parameter aus der zweiten Messung (daher beide Testfelder). Die Parameter wurden aus 0,5 s langen

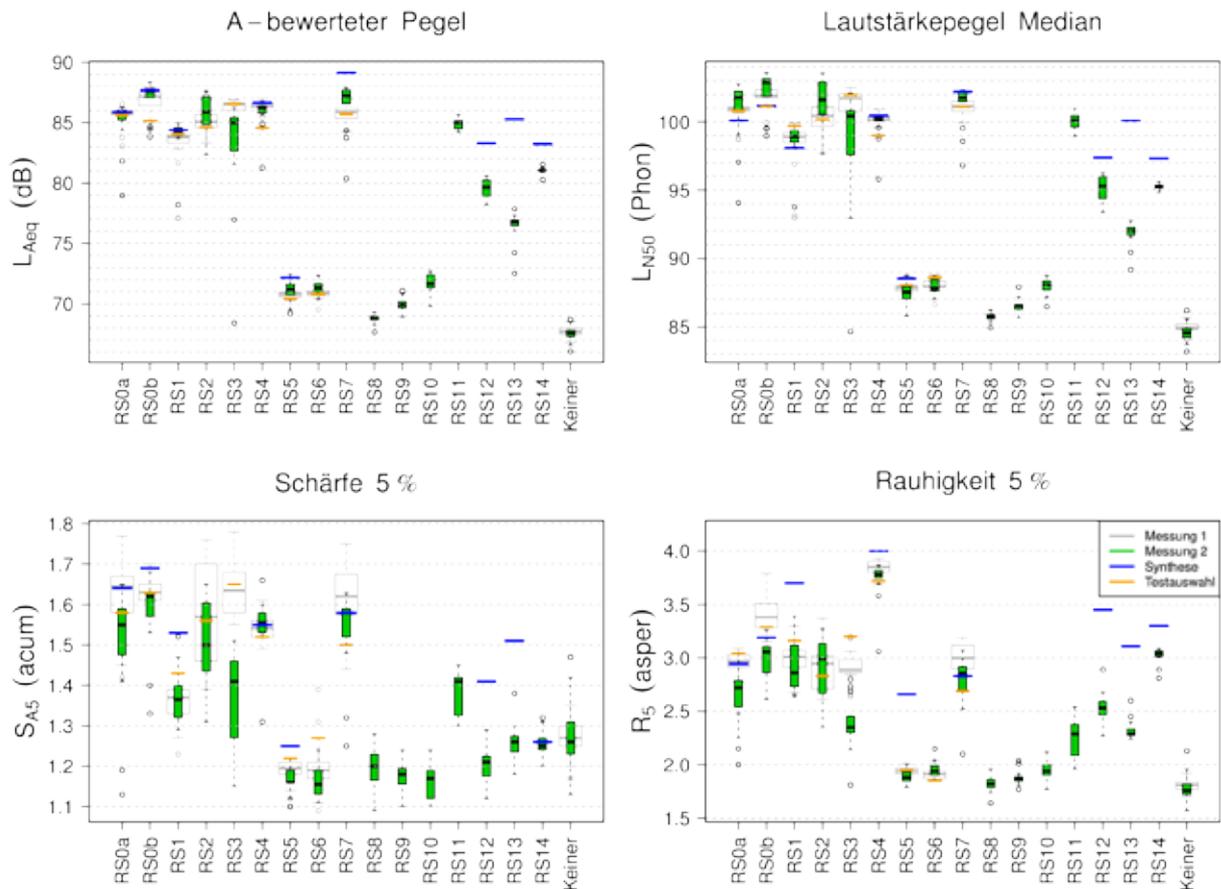


Abb. 7-23: Verteilung akustischer und psychoakustischer Parameter des Innengeräusches beim PKW, Kunstkopf, 0,5 s in der Mitte des Streifens

Segmenten bestimmt, welche aus der Mitte der Teststreifenüberfahrten extrahiert wurden. Dadurch werden einerseits Unsicherheiten durch die Segmentierung vermieden. Gleichzeitig stellen die Parameter eine Art Maximalwirkung dar, da nur der eingeschwingene Zustand betrachtet und die zeitliche Dynamik des Einschwingvorgangs ausgeblendet wird. Dies ist jedoch nicht nachteilig, da in der Realität Rumpelstreifen in einem spitzen Winkel angefahren werden, weshalb die erfassten, transienten Übergänge nicht repräsentativ, sondern vielmehr die Maximalwerte, die bei voller Überdeckung des Reifens nach kurzer Zeit auftreten, ausschlaggebend sind.

Es gibt hier eine gute Übereinstimmung der beiden Messungen (die Pegelunterschiede im Median sind meist kleiner als 1 dB). Blaue Linien stellen die Parameter der im Wahrnehmungstest verwendeten synthetisierten Geräusche dar, orange die im Test verwendeten Samples. Durch die Methode zur Wahl des Testsamples (beste Überdeckung am Anfang des Streifens und wenn gleich dann zufällig) ist bei RS0b und auch bei RS4 das verwendete Geräusch eher am unteren Ende des Pegelbereichs, für diese Streifen stellen die Daten aus den Wahrnehmungstests also eher konservative Schätzungen dar.

Bei Betrachtung des Schallpegels aber auch der anderen Parameter zeigt sich, dass sämtliche Rumpelstreifen mit sinusförmigem Längsprofil und 600 mm Abstand (RS5, RS6, RS8, RS9, RS10) nur sehr gering vom Grundgeräusch abweichen. Bei 300 mm Abstand, egal ob Sinus (RS7, RS11) oder konventionelles Profil (RS0a, RS0b, RS2, RS3) ergeben sich beträchtliche Erhöhungen des Schalldruckpegels im Innenraum von 15 – 20 dB. Die Richtung der kegelförmigen Fräsungen (RS2 vs. RS3) scheinen hier nur geringfügige Veränderungen zu verursachen (in MS2 ca. 1 dB), wobei die Unterschiede in der zweiten Messung etwas größer und umgekehrt ausfallen als in der ersten. Bei konventionellen Profilen mit 600 mm zeigt sich eine Pegelsenkung um 4 dB, wenn die Fugentiefe von ca. 11 mm auf ca. 7 mm verringert wird (RS1 auf RS12).

Bei RS12 ist wichtig, den Effekt der im Verlauf des RS unterschiedlichen Fräsung zu betrachten. Abb. 7-24 zeigt die Pegelunterschiede im L_{Aeq} zwischen dem Anfang und dem Ende der Überfahrt (0,1-0,6 s und ebenso vor dem Ende). RS12 sticht hier nicht hervor, es scheint dass die tiefe Fräsung auch im Innenraum nicht mehr Lärm produziert, weder beim PKW noch beim LKW.

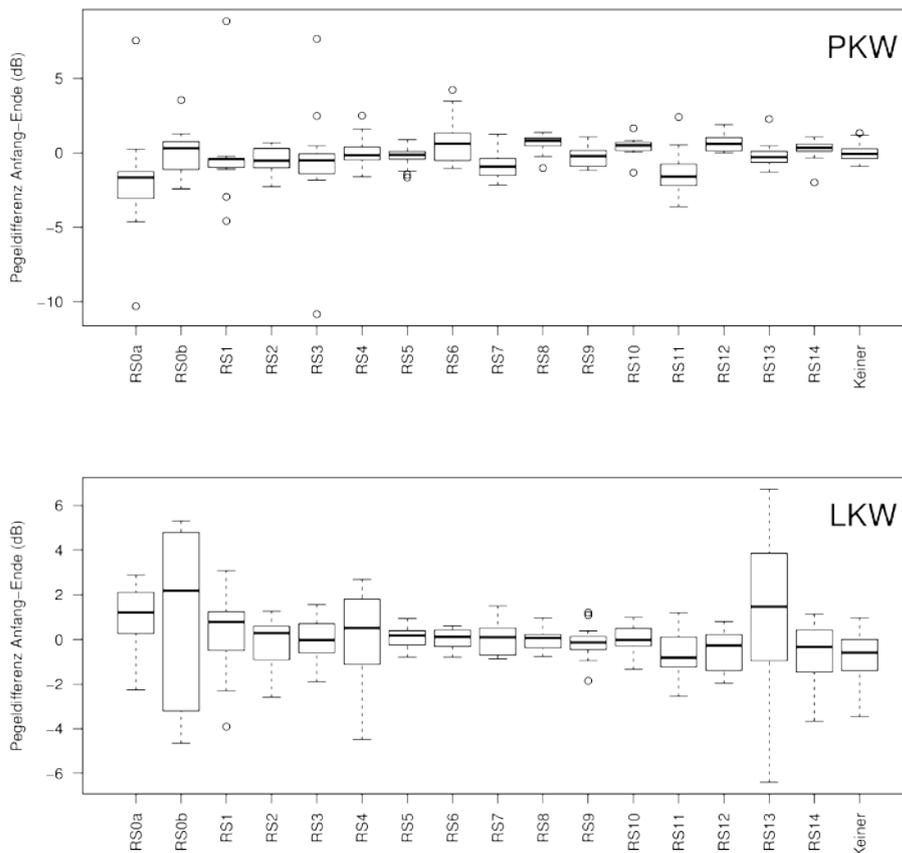


Abb. 7-24: Unterschied zwischen 0,5 s am Anfang und am Ende des jeweiligen RS

Wird der Abstand auf 400 mm gesetzt (RS13) sinkt interessanterweise der Pegel nochmals ab. Dies ist unerwartet, da von einem zumindest im Bereich zwischen 300 und 600 mm monoton abfallenden Pegel oder aufgrund der Synthese im LKW zumindest von einem ähnlichen Pegel bei 300 und 400 mm ausgegangen wurde. Für bestimmte Schritte der Synthese künstlicher Innengeräusche wurde diese Gleichmäßigkeit auch vorausgesetzt, was aber nur zum Teil die großen Abweichungen erklären kann.

Der Zufallsstreifen mit 300 mm mittlerem Abstand (RS4) liegt bzgl. des Pegels und der Lautheit im Bereich der regelmäßigen Streifen mit 300 mm Fugenabstand, die Rauigkeit ist hingegen etwas erhöht. Wird der mittlere Fugenabstand des Zufallsstreifens auf 600 mm erhöht und die Frästiefe auf ca. 7 mm verringert, ergibt sich eine Pegelsenkung um 5 dB (LN5 um 5 Phon) und auch Schärfe und Rauigkeit sinken.

Abb. 7-23 zeigt die Verteilung aller Überfahrten. Werden diese auf Überfahrten eingeschränkt wo der Streifen relativ gut getroffen wurde (Überdeckungsgrad in der Mitte der Überfahrt ≤ 3), ergeben sich beim PKW keine starken Veränderungen, außer dass der

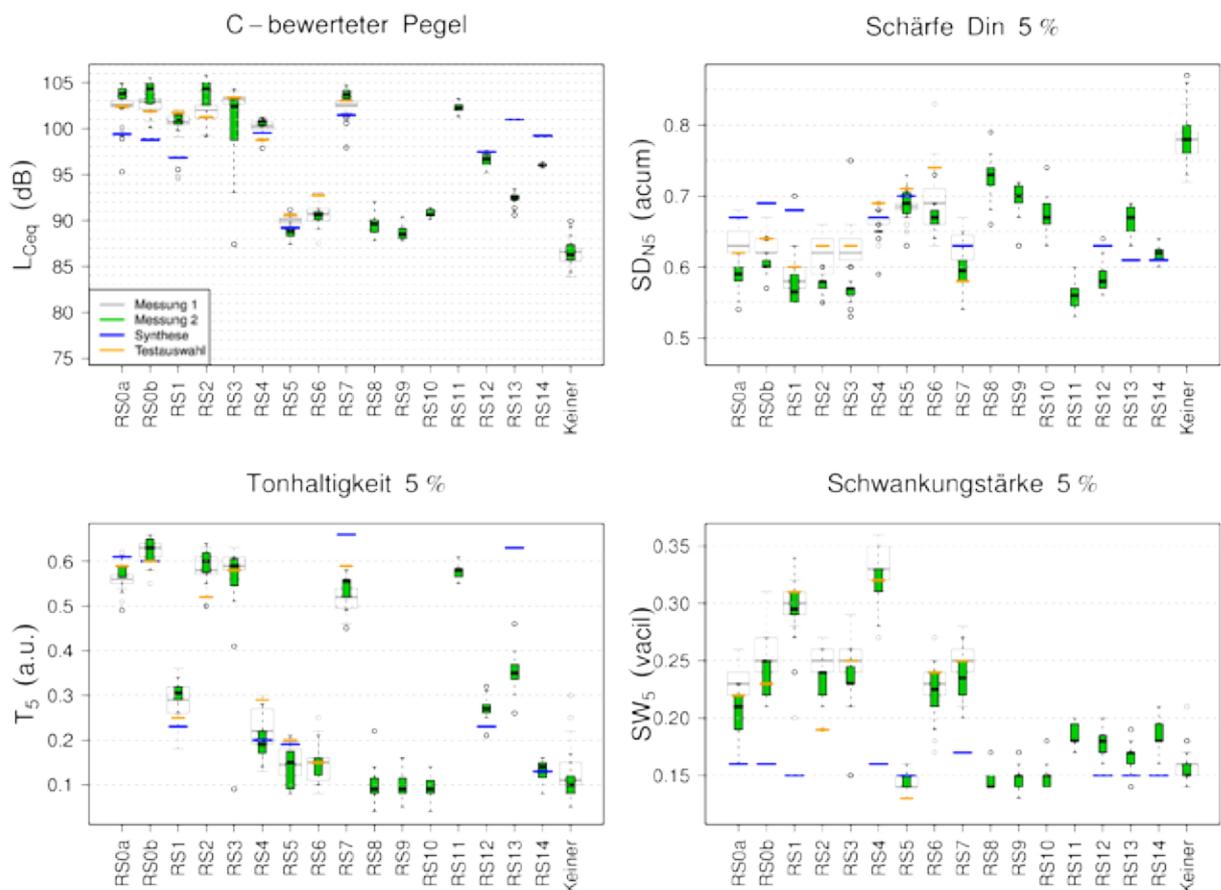


Abb. 7-25: Verteilung weiterer akustischer und psychoakustischer Parameter des Innengeräusches beim PKW, Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt

Großteil der in Abb. 7-23 erkennbaren Ausreißer (kleine Kreise) dadurch verschwindet. Der PKW ist also relativ unempfindlich gegenüber der Positionierung des Reifens in der Fuge.

Abb. 7-25 zeigt die Verteilung weiterer Parameter als Funktion des Rumpelstreifens (hier nur mit Überdeckungsgrad ≤ 3). Beim C-bewerteten Schalldruckpegel ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der A-Bewertung. Interessant ist vor allem die Tonhaltigkeit. Hier ist klar ersichtlich, dass regelmäßige Fräsmuster erwartungsgemäß zu einer Erhöhung der Tonhaltigkeit führen, vor allem bei kurzen Abständen. 600 mm und auch Pseudozufallsstreifen weisen allerdings eine deutlich geringere Tonhaltigkeit auf.

Abb. 7-26 zeigt den Effekt der Überdeckung im Detail. Es sind beide Messserien farblich kodiert dargestellt (MS1 zur besseren Sichtbarkeit schwarz, MS2 grün). Es wurden lineare Modelle mit der Überdeckung und der quadratischen Überdeckung ermittelt. Der Mittelwert und 95%-Konfidenzintervall des Modells sind dargestellt. Überdeckung und akustische Parameter wurden aus dem mittleren Segment genommen (die Testauswahl erfolgte nach der Überdeckung am Anfang, daher kann die Überdeckung in diesen Abbildungen größer sein). Man sieht hier, dass der Effekt der Überdeckung im Vergleich zur Streuung nur in den Extrembereichen relevant ist (der systematische Effekt zwischen 3 und -3 ist im Bereich von maximal 2 dB). Das quadratische Modell für RS3 (Kegel nach außen geneigt) scheint hier

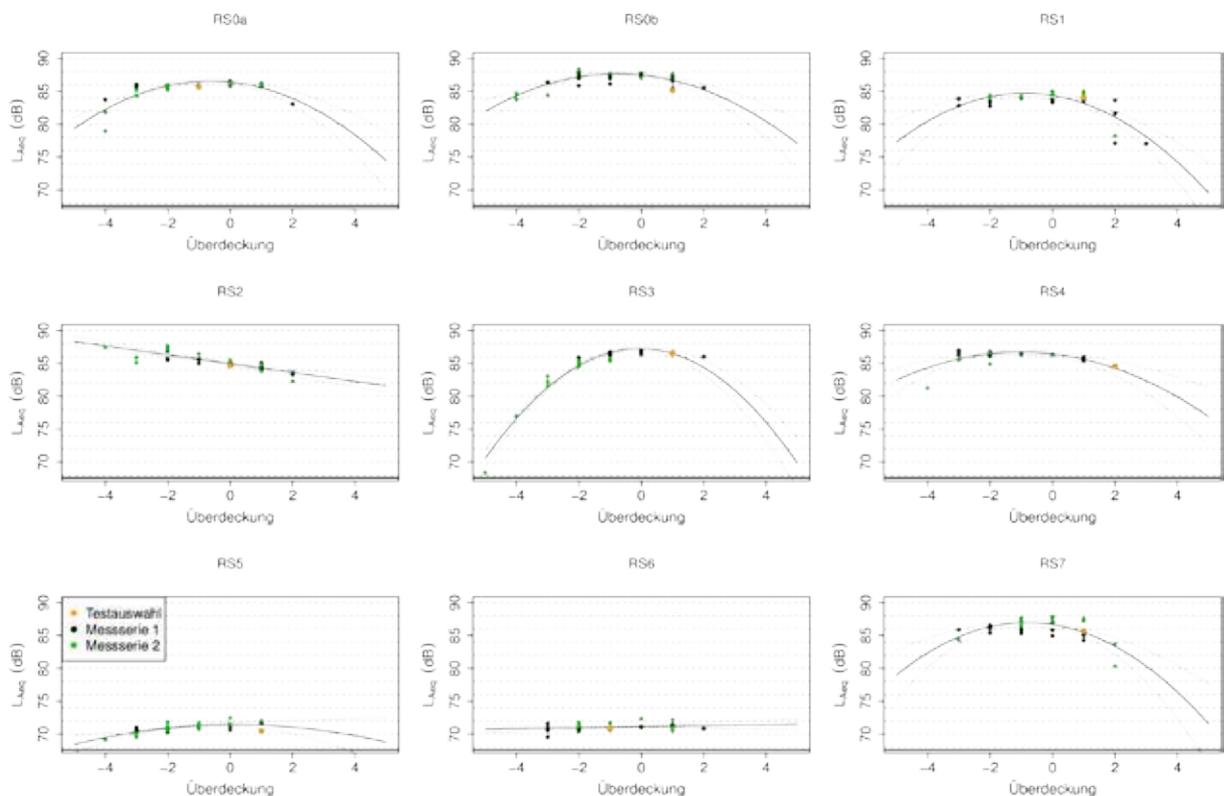


Abb. 7-26: A-bewerteter Schalldruckpegel als Funktion der Überdeckung beim PKW auf Teststrecke 1, mittleres Segment

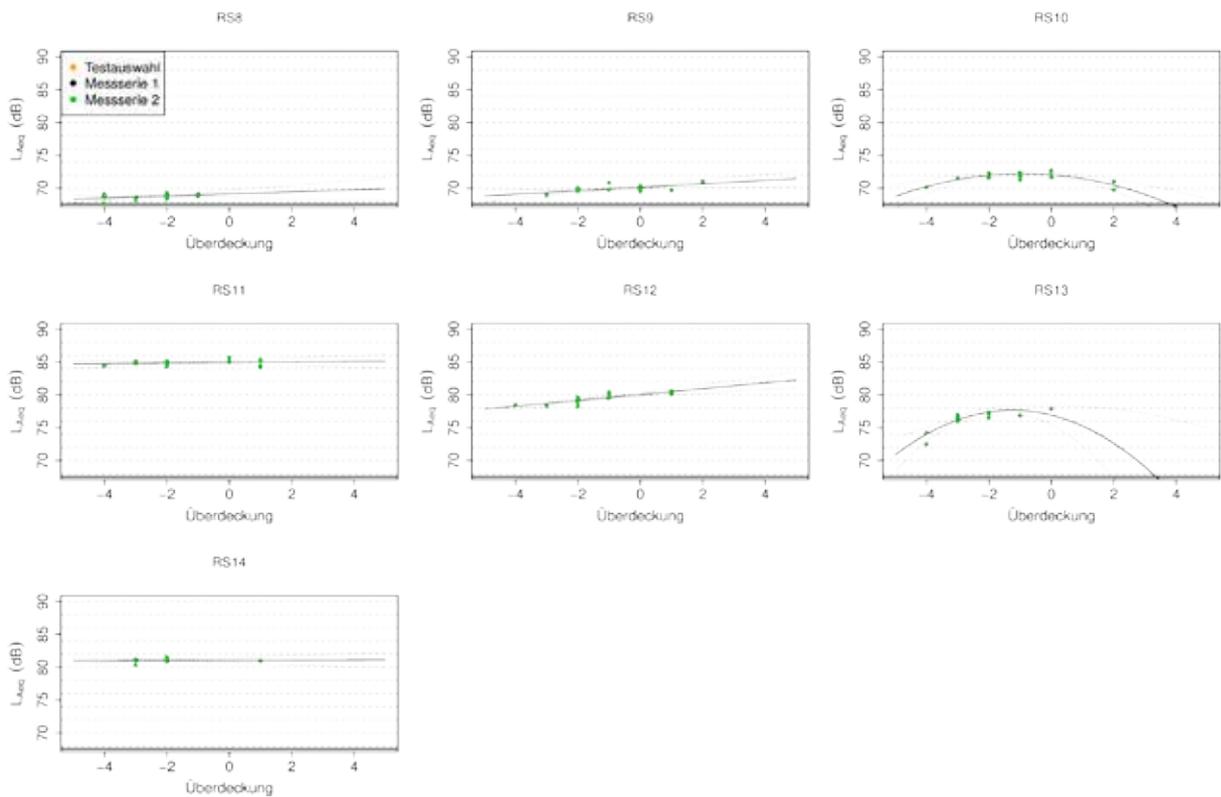


Abb. 7-27: A-bewerteter Schalldruckpegel als Funktion der Überdeckung beim PKW auf Teststrecke 2, mittleres Segment

nicht sehr zuverlässig zu sein für schlechtere Überfahrten im positiven Bereich, da hier keine Daten vorhanden sind. Allgemein ist anzumerken, dass die Extrapolation auf Bereiche in denen keine Daten vorhanden sind, immer kritisch ist und bei Polynomen sehr instabil sein kann. Die Ergebnisse für Testfeld 2, dargestellt in Abb. 7-27, sind in den Tendenzen vergleichbar mit jenen aus Testfeld 1.

LKW

Wie in einigen früheren Studien angedeutet, fallen die akustischen Effekte im LKW deutlich geringer aus (Abb. 7-28). Waren es beim PKW bis zu 20 dB Unterschied im A-Pegel so sind es beim LKW maximal 10 dB bei ähnlichem A-Pegel des Grundgeräusches (69 vs. 68 dB, linke obere Grafik). Die 600 mm Sinusstreifen fallen hier durch noch geringere Unterschiede von maximal 1 dB auf. Wie später in den Ergebnissen des Wahrnehmungstests ausgeführt, sind diese Streifen (RS5 und RS6) beim LKW akustisch nicht mehr zuverlässig erkennbar. Es fällt allerdings auf, dass in Messserie MS2 von dem 300 mm breiten RS6 auf den 350 mm breiten RS10 eine leichte Pegelerhöhung im Median von ca. 1 dB zu beobachten ist. Dies ist ein Indiz für eine bessere Wirkung breiterer Streifen, da diese beiden Streifen sehr ähnlich in Geometrie und Tiefe sind.

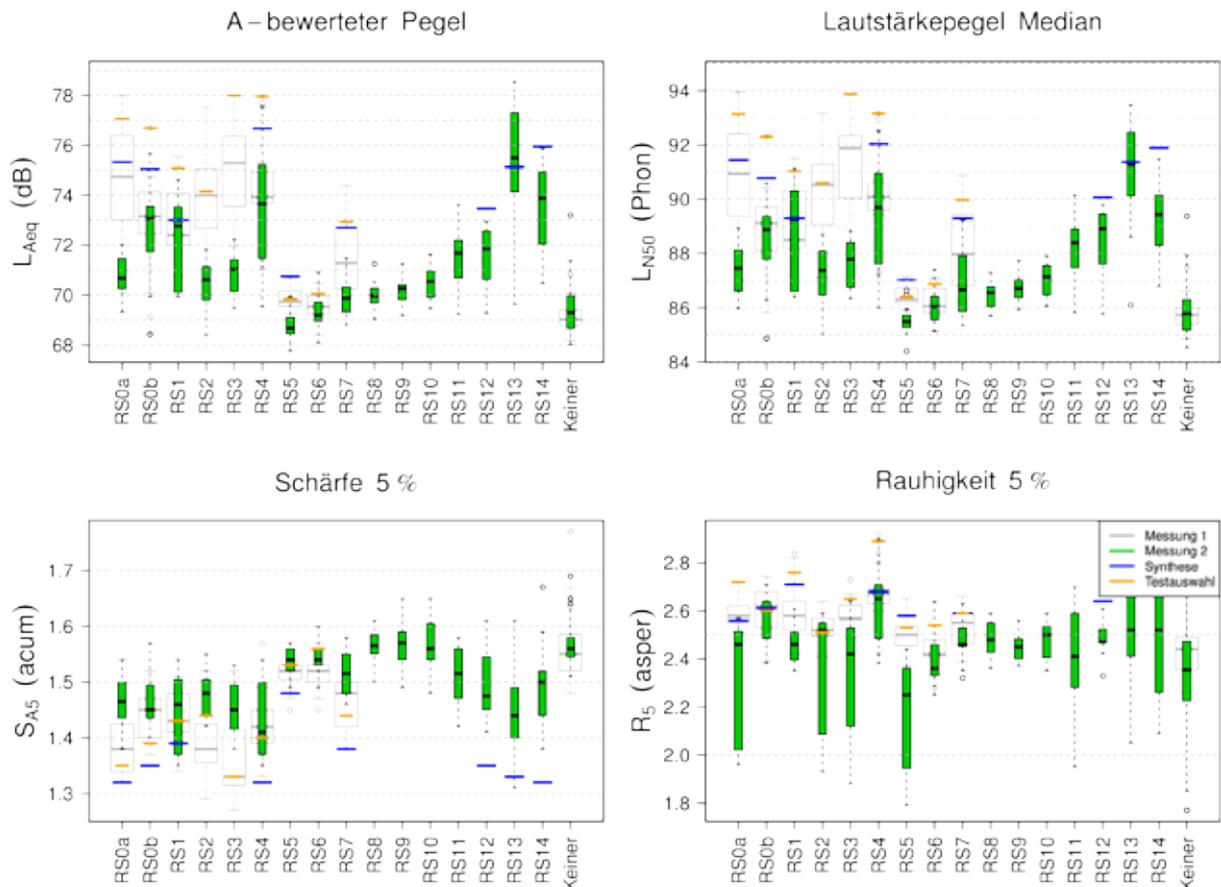


Abb. 7-28: Verteilung akustischer und psychoakustischer Parameter des Innengeräusches beim LKW

Auffällig ist hier, dass der 400 mm RS beim LKW im Schnitt lauter ist als 300 oder 600 mm Varianten mit ähnlicher Fräsgeometrie. Dies ist insbesondere interessant, als hier der Effekt genau entgegengesetzt dem Effekt beim PKW ist (auch die Modellvorhersagen in blau stimmen hier deutlich besser überein). Daher stellt sich natürlich die Frage, wie fahrzeugspezifisch solche Effekte sein können. Dies kann aber im Zuge dieser Arbeit nicht im Detail beantwortet werden.

Bei den kegelförmigen RS aber auch bei RS0a ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Kampagnen erkennbar (bis zu 4 dB im Median) und insgesamt sind die Pegel bei der zweiten Messserie beim LKW geringer mit Ausnahme von RS1, RS0b und RS4.

Die Auswahl der Geräusche für die Wahrnehmungstest (orange) liegt auch hier eher im oberen Bereich der Ergebnisse aus MS1.

Auch bei Einschränkung der Überfahrten auf Messungen mit guter Überdeckung (≤ 3) zeigen sich ähnliche Ergebnisse wobei die Effekte im Schnitt größer sind (Abb. 7-29).

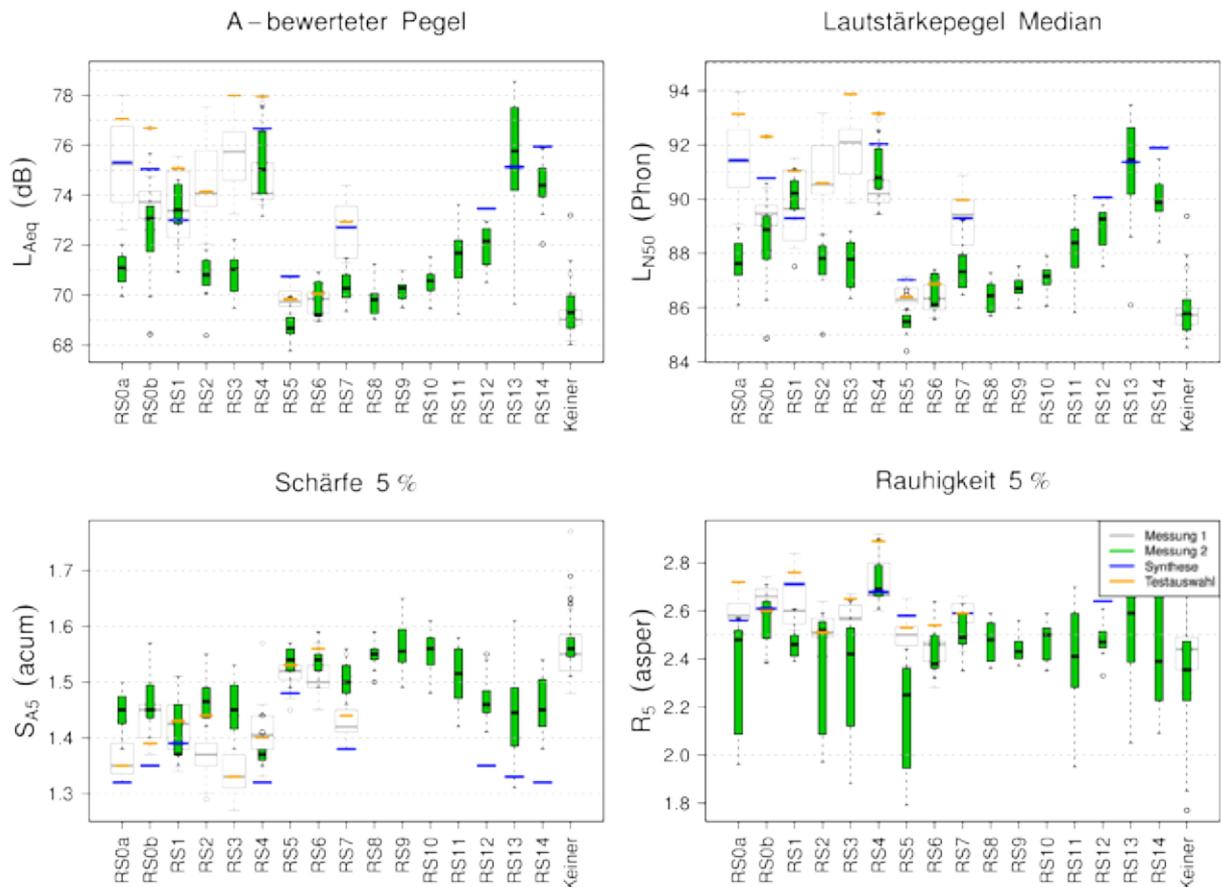


Abb. 7-29: Verteilung akustischer und psychoakustischer Parameter beim LKW mit guter Überdeckung (max. 3)

Abb. 7-30 zeigt dass auch beim LKW A- und C-Pegel ähnliche Unterschiede aufweisen. Weiters ist ersichtlich dass die Tonhaltigkeit wesentlich weniger stark erhöht wird als beim PKW, wobei der 400 mm RS besonders gut akustisch zu koppeln scheint.

Ein detaillierter Überblick ist in Abb. 7-31 und Abb. 7-32 zu sehen. Hier zeigt sich sehr deutlich der Unterschied zwischen den beiden Messungen bei RS0a, RS2, RS3 und, etwas geringer, auch bei RS7. Es ist unklar wodurch diese Unterschiede verursacht werden, es fällt aber auf das all diese Streifen ein eher runderes oder abgerundetes Profil haben wogegen RS0b, RS1 und RS4 eher „schärfere“ Übergänge aufweisen.

Die Effekte der Überdeckung sind hier aufgrund der breiteren Reifen deutlich ausgeprägter als beim PKW aber auch als beim LKW im Außenbereich. Zwischen 0 und 3 treten hier Unterschiede von bis zu 3 dB auf, und dies bei ohnehin geringem akustischen Effekt. Aus den Messdaten scheint es, dass die Effekte bei den breiten Streifen etwas geringer sind, wobei hier die Datenlage keine endgültige Schlussfolgerung zulässt (z.B. RS14). Es zeigen sich hier auch sehr gut die Unterschiede zwischen den Messkampagnen (RS2, RS3, RS0a und etwas geringer RS7).

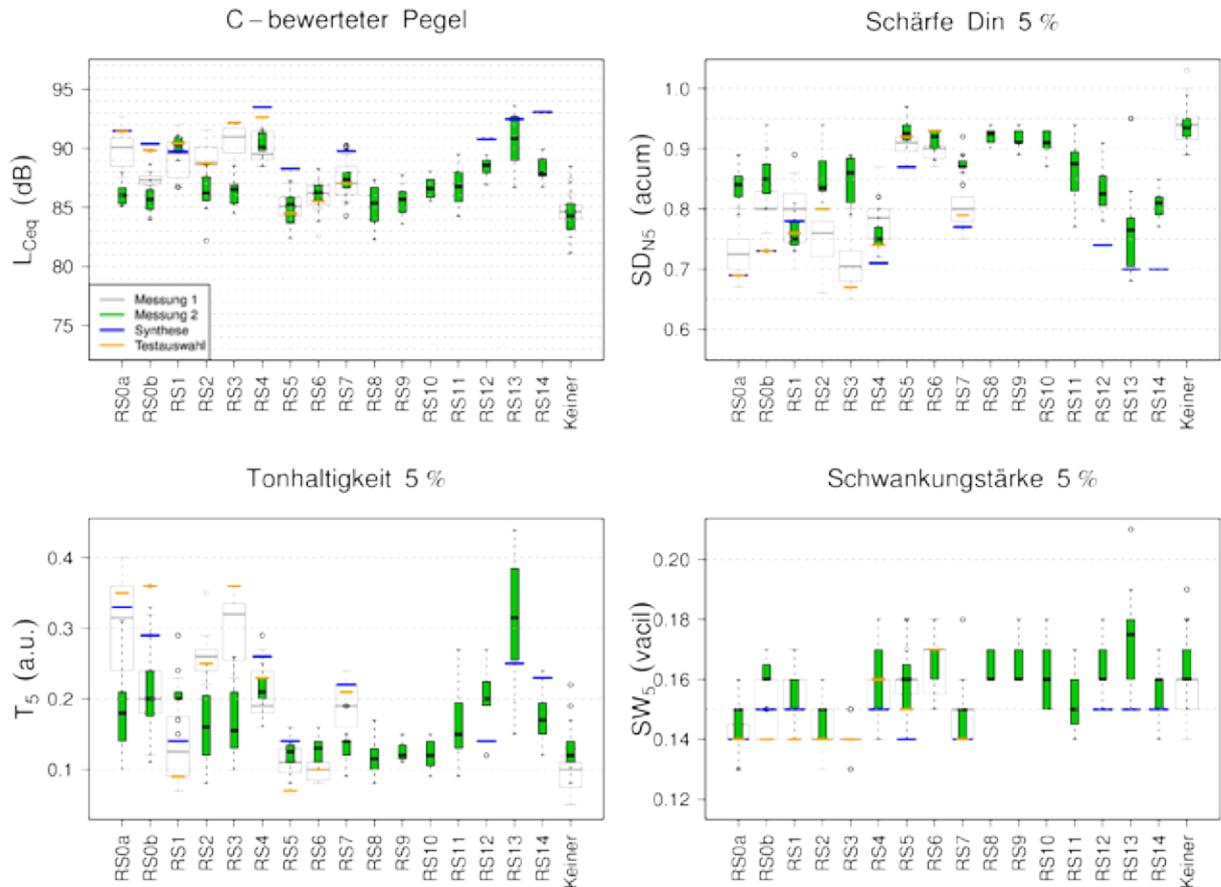


Abb. 7-30: Verteilung weiterer akustischer und psychoakustischer Parameter beim LKW mit guter Überdeckung (max. 3)

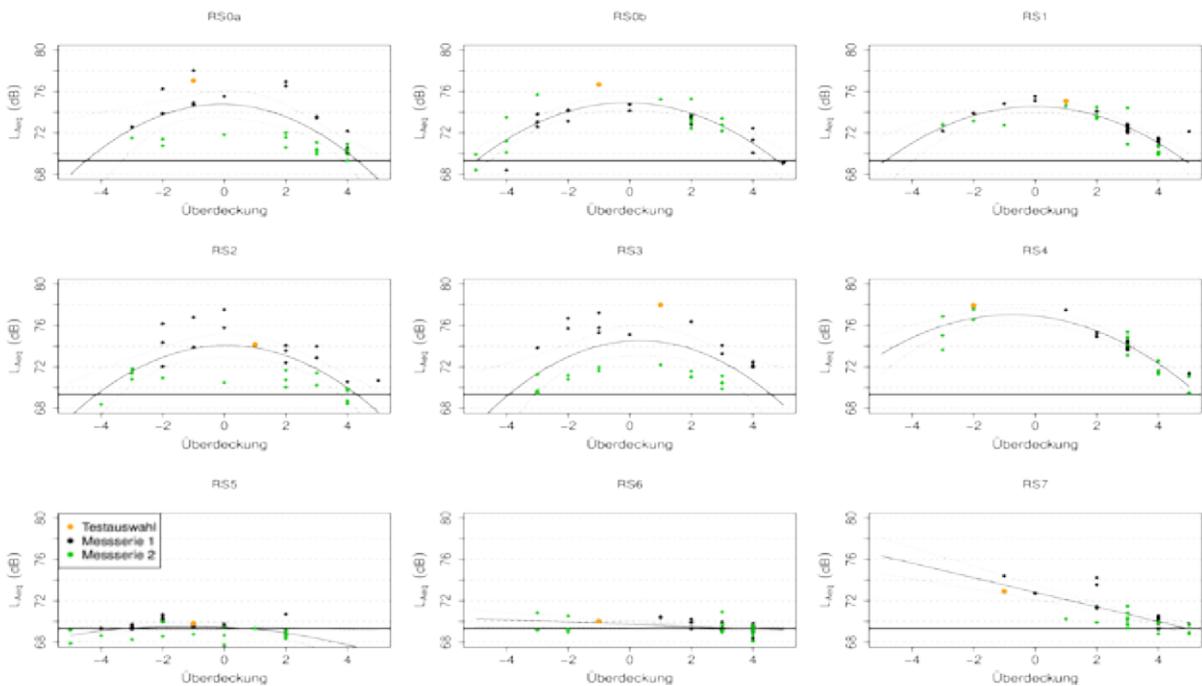


Abb. 7-31: A-bewerteter Schalldruckpegel als Funktion der Überdeckung beim LKW auf Teststrecke 1, mittleres Segment

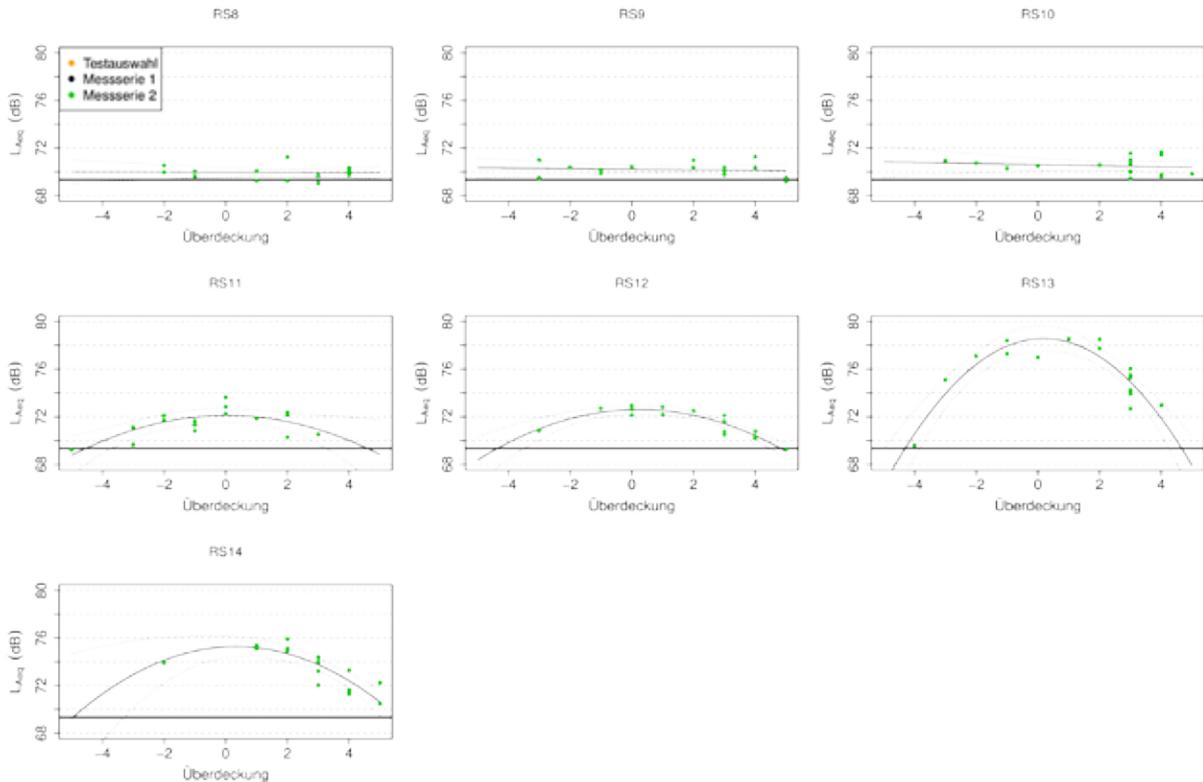


Abb. 7-32: A-bewerteter Schalldruckpegel als Funktion der Überdeckung beim LKW auf Teststrecke 2, mittleres Segment

Effekt der Fugengeometrie und des Fugenabstandes

Abb. 7-33 stellt die Ergebnisse der Innenraummessungen mittels des Kunstkopfes als Funktion der Fugengeometrie und des Abstandes dar. Hier ist der Unterschied in der Wirkung bei PKW und LKW offensichtlich. Der Effekt des Fugenabstandes scheint beim Auto sehr klar auf, allerdings passen hier, wie bereits erwähnt, die Daten des RS13 nicht ins Bild (ebenso wenig aber mit gegenteiligem Effekt beim LKW). Beim Sinusstreifen ist der Effekt des Abstandes beim PKW extrem. Beim PKW läge in den synthetisierten Daten L_{Aeq} bei 400 mm Sinus bei etwa 82 dB, nimmt man die 8 dB Fehler bei RS13 dazu, wäre dieser bei ca. 74 dB, allerdings ist dies nur eine sehr grobe Schätzung. 71 – 72 dB beim LKW scheinen allerdings realistisch.

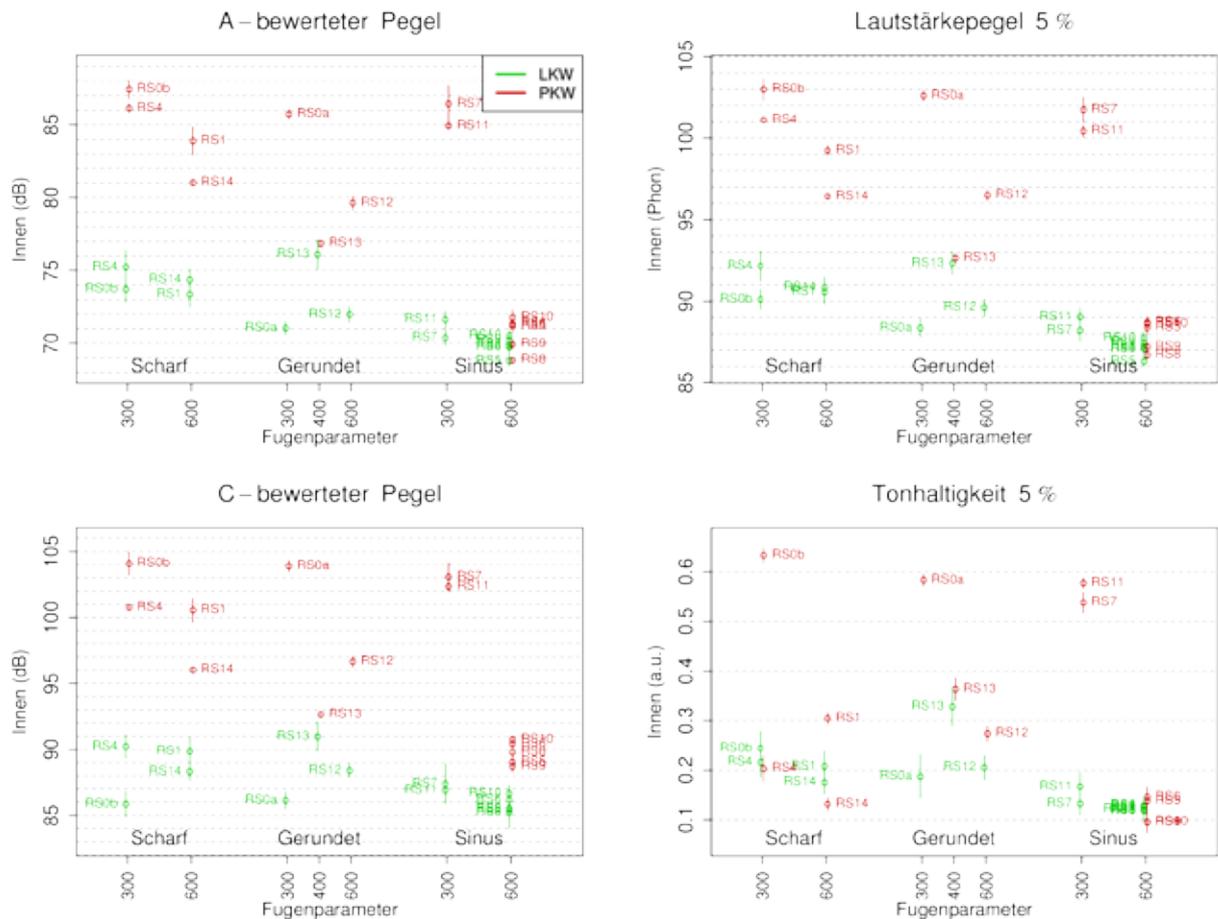


Abb. 7-33: Akustische Parameter als Funktion der Fugegeometrie, mittleres Segment Innen, Kunstkopf mit guter Überdeckung (max. 3). Es sind nur Daten aus Messserie 2 dargestellt.

7.3. Wahrnehmung Außen - Lästigkeit

Im Außenbereich ist es wichtig, die Belästigung oder auch Lästigkeit der Rumpelstreifen zu reduzieren.

Abb. 7-34 zeigt die den Median der logarithmischen Lästigkeitsurteile (Basis 2) der verschiedenen Rumpelstreifen. Die Daten wurden pro Proband so normalisiert, dass das mittlere logarithmische Lästigkeitsurteil 0 beträgt (siehe auch Abschnitt 6.5). Die Bezeichnung der synthetisierten Geräusche wurde aus Tab. 6-1 übernommen. Die angehängte Zahl gibt die Pegelverschiebung an. Wichtig ist, dass bei den Fahrten ohne RS das Signal skaliert wurde (0 bis 9 beim LKW und 0 bis 15 dB beim PKW) und bei den RS nur der Fugenteil (beim PKW auch der hochfrequente Anteil) skaliert wurde, nicht aber das Grundgeräusch.

Eine Senkung um eins bedeutet daher, dass die Probanden im Schnitt die halbe Lästigkeit empfunden haben. Die Fehlerbalken zeigen das Konfidenzintervall des Medians das mit

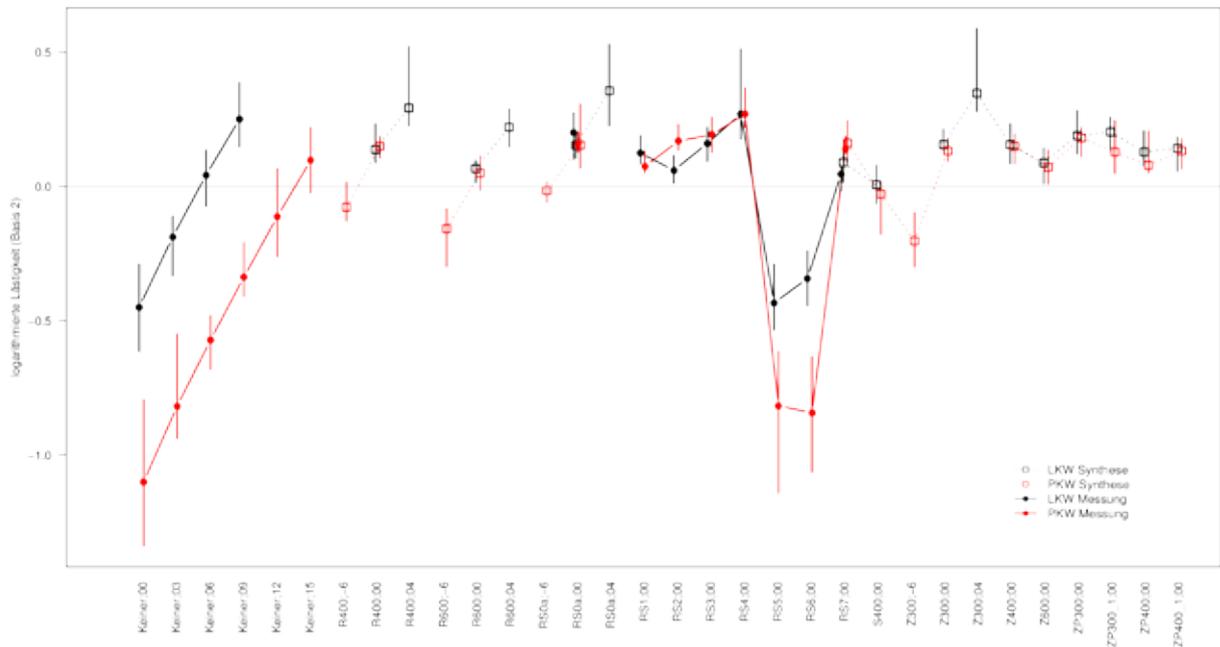


Abb. 7-34: Wahrgenommene Lästigkeit für die verschiedenen Rumpelstreifen

einem Bootstrapping-Verfahren (R Package „boot“) berechnet wurde. Der Einfachheit halber werden diese logarithmischen Urteile im Weiteren als Lästigkeitsurteile oder Lästigkeit bezeichnet. Ohne Rumpelstreifen besteht ein deutlicher Unterschied zwischen LKW und PKW. Dieser bleibt weitgehend gleich wenn der Pegel der Vorbeifahrt erhöht wird. Ein ähnlicher Unterschied zeigt sich auch bei den Rumpelstreifen RS5 und RS6 (Sinus 600 mm mit gewölbter und gerader Frästrommel).

Im Vergleich zu diesen Unterschieden sind die Unterschiede zwischen den Fahrzeugen bei anderen Rumpelstreifen eher gering bis nicht vorhanden. Die Abschwächung der synthetischen RS-Signale um 6 dB beim PKW (aufgrund des unveränderten überlagerten reinen Vorbeifahrtsgeräusch sind das 4,1 - 4,8 dB Abschwächung im Gesamtsignal) und die Erhöhung um 4 dB (1,7 – 2,3 dB Erhöhung im Gesamtsignal) beim LKW scheinen einen etwas geringeren Unterschied in der wahrgenommenen Lästigkeit zu verursachen als eine vergleichbare Pegelveränderung im reinen Vorbeifahrtssignal (bezogen auf die tatsächlichen Pegelveränderungen bei den RS).

Vergleich Simulation-Messung

Für weitergehende statistische Analysen ist es interessant festzustellen, ob die synthetisierten Stimuli den gemessenen entsprechen. Hierfür wurde eine RM-ANOVA gerechnet mit RS (RS0a, RS0b, RS1, RS4, RS7), Messung vs. Simulation und Fahrzeug

(PKW, LKW) als Faktoren. Eine eventuelle Verletzung der Spherizität wird durch die Greenhouse-Geisser-Korrektur (GG, [26]) miteinbezogen. Im Falle von signifikanten Faktoren oder Interaktionen werden alle möglichen Kombinationen mittels gepaarter t-tests getestet [27] [28]. Die p-Werte der multiplen Vergleiche werden danach Bonferroni-korrigiert, d.h. der p-Wert wird mit der Anzahl der Tests multipliziert.

Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied in der Lästigkeit zwischen Messung und Simulation (gemessene Signale sind lästiger als simulierte, $p < 0,0001$) aber auch eine signifikante Interaktion zwischen Rumpelstreifen und dem Faktor Messung ($p < 0,0001$, GG). Post-hoc Tests auf alle paarweisen Interaktionen ergaben, dass Interaktionen RS0a und RS7 mit RS4 (Pseudozufall, $p < 0,005$, Bonf.) und RS0a und RS7 mit RS1 signifikant sind ($p < 0,03$, Bonf.), da hier der Unterschied zwischen Simulation und Messung augenscheinlich am größten ist. Dies ist zum Teil auf die Fugengeometrie zurückzuführen. Die Synthese im Außenbereich (eigentlich Z300 und R600, Tab. 6-1) ist für die Fugengeometrie von RS0a repräsentativ, RS4 verhält sich aber akustisch vor allem beim PKW durch die fehlende Abrundung aufgrund der Herstellung des Streifens deutlich anders (siehe Abb. 7-35). Für RS1 gilt ähnliches, Z600 entspricht eigentlich eher RS12, der aber erst im zweiten Testfeld gefräst wurde.

Weiters ist auch die Interaktion zwischen Fahrzeug und Rumpelstreifen signifikant ($p = 0,007$, GG). Hier ist die Interaktion zwischen RS1 vs. RS7 ($p = 0,01$) signifikant welche durch den größeren Unterschied zwischen LKW und PKW bei RS7 (gewölbter Sinus 300 mm) erklärt werden kann. Bei der Interpretation des signifikanten Effekts der Rumpelstreifen ist daher Vorsicht geboten.

Der Effekt der Rumpelstreifen ist signifikant ($p < 0,0001$, GG). Es zeigt sich, dass RS0a signifikant lästiger ist als RS1 ($p = 0,001$ Bonf.) und dass RS4 ebenfalls signifikant lästiger ist als RS1 ($p = 0,0004$ Bonf.) und auch lästiger als RS7 ($p = 0,001$ Bonf.). Weiters ist auch noch RS0a lästiger als RS7 ($p = 0,004$, Bonf.). Die signifikanten Interaktionen mit dem Faktor

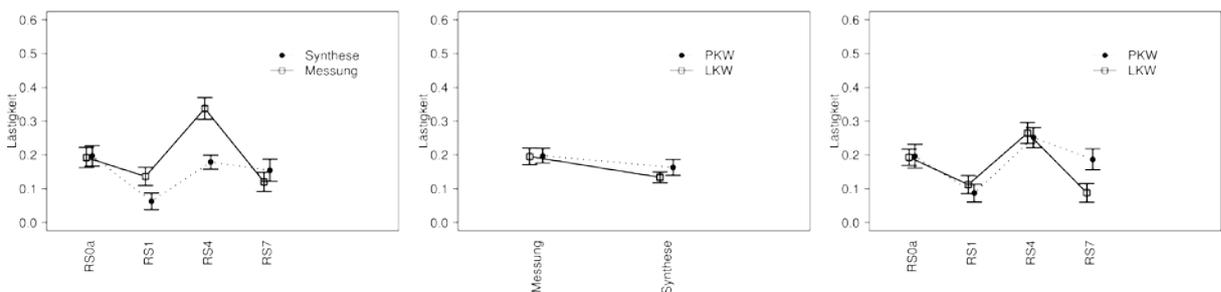


Abb. 7-35: Interaktionen der Lästigkeit zwischen Fahrzeugtyp, Messung-Synthese und Rumpelstreifen. Die Fehlerbalken zeigen den Standardfehler.

Messung spielen hier keine Rolle, da die Interaktionen nur quantitativ sind, d.h. nur die Größe aber nicht die Richtung des Effekts der Rumpelstreifen vom Faktor Messung abhängt. Der signifikante Effekte $RS1 < RS7$ ist aufgrund der Interaktionen nicht interpretierbar. Zusammenfassend heißt das, dass die simulierten Rumpelstreifen nur teilweise den gemessenen Rumpelstreifen entsprechen. Dies ist insofern nicht überraschend, als vor allem die Streifen RS1 und RS4 deutlich von RS0a abweichende Profile haben und dies in der Synthese nicht berücksichtigt wurde, da von einer erhöhten Lästigkeit ausgegangen werden konnte (vergleiche Abb. 7-19). Ein weiteres Problem ist die teilweise größere Abweichung zwischen Vorhersagen aus der Synthese und den Messungen in MS2 (RS12 und RS13). Eventuelle Unterschiede zwischen verschiedenen simulierten RS würden daher nur bedingt mit den tatsächlichen Streifen zusammenhängen. Trotzdem können die Lästigkeitsurteile zusammengefasst werden, um den Einfluss verschiedener (psycho)akustischer Merkmale auf die Lästigkeit zu untersuchen. Die synthetisierten Streifen erweitern hier den Bereich der akustischen Parameter.

Lästigkeit vs. Akustik

Der Lautstärkepegel hat sich in bisherigen Untersuchungen [20] [24] als ein guter Deskriptor der Lästigkeit herausgestellt. Dieser ist, ähnlich wie der Schalldruckpegel, ein logarithmisches Maß, in diesem Falle der Lautheit. Die Lautheit wiederum ist ein Maß für die empfundene Lautstärke eines akustischen Stimulus. Wird die Lästigkeit als Funktion des

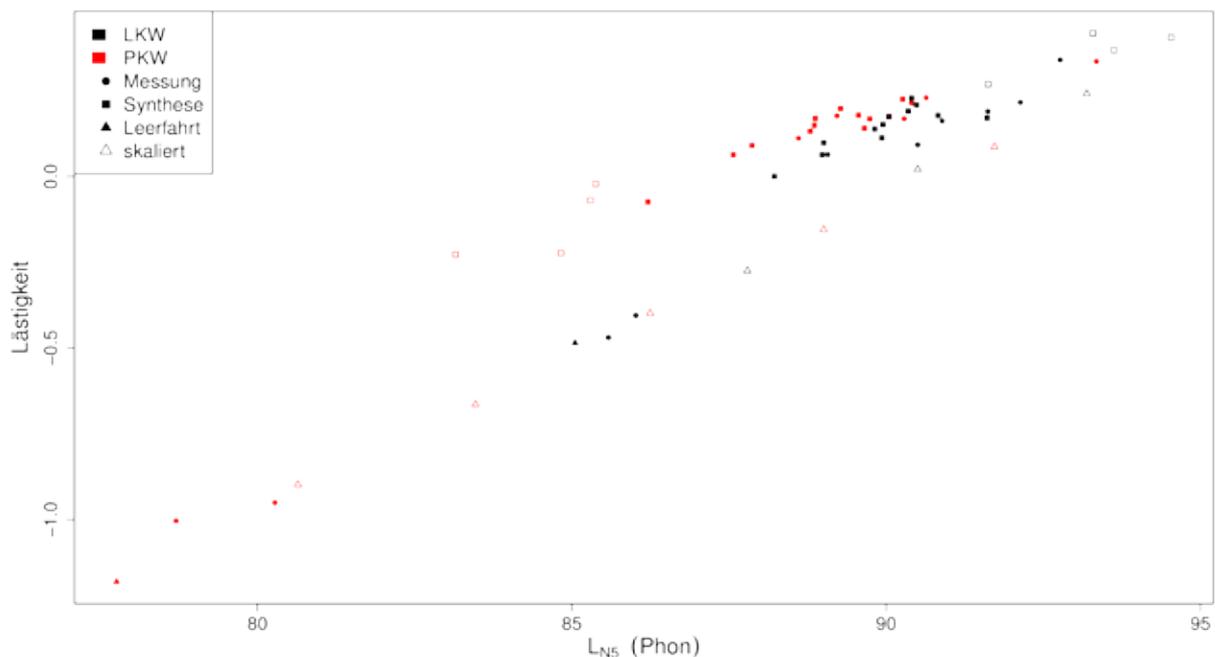


Abb. 7-36: Lästigkeit in Abhängigkeit des Lautstärkepegels

Lautstärkepegels (in diesem Fall des L_{N5}) betrachtet, ergibt sich das in Abb. 7-36 gezeigte Bild.

Dargestellt sind die zuerst pro Proband und danach über die Probanden gemittelten logarithmischen Lästigkeitsurteile (jeder Punkt stellt das mittlere Urteil pro Bedingung über alle Probanden dar). Es scheint, dass sich hier PKW (rote Symbole) und LKW (schwarze Symbole) selbst bei unterschiedlich skalierten Vorbeifahrten ohne RS-Überfahrt bei verschiedenen Pegeln (Dreiecke) nicht mehr klar unterscheiden, d.h. auf einer Linie liegen. Interessant ist auch, dass Leerfahrten (aber auch die 600 mm Sinusstreifen) bei gleichem Lautstärkepegel (d.h. bei gleicher Lautheit) deutlich anders beurteilt werden als Fahrten mit Rumpelstreifen (egal ob gemessen oder synthetisch). Dadurch ist auch klar, dass hier ein lineares Modell das nur die Lautheit berücksichtigt zu kurz greift um ein Gesamtmodell für die Rumpelstreifen zu erhalten, da bei weiterer Verminderung des RS-Effektes die erhöhte Lästigkeit wieder auf das Niveau einer normalen Vorbeifahrt abfallen muss.

Bei gleichem A-Pegel (L_{Aeq}) ist die Verschiebung in der Lästigkeit noch größer (Abb. 7-37).

Um die relevanten akustischen Größen für die Modellierung der RS-Signale zu bestimmen, wurde ein schrittweises Verfahren verwendet, in dem ein lineares Modell der Lästigkeit sukzessive erweitert wird, dabei aber auch reduziert werden kann. Es wird das sogenannte Bayes Information Criterion (BIC, [29]) als Maß für die Güte des Modells verwendet. Beim BIC wird sowohl der Fehler als auch die Komplexität des Modells berücksichtigt. Dies ist wichtig, da ein komplexeres lineares Modell nie schlechter sein kann als ein einfacheres

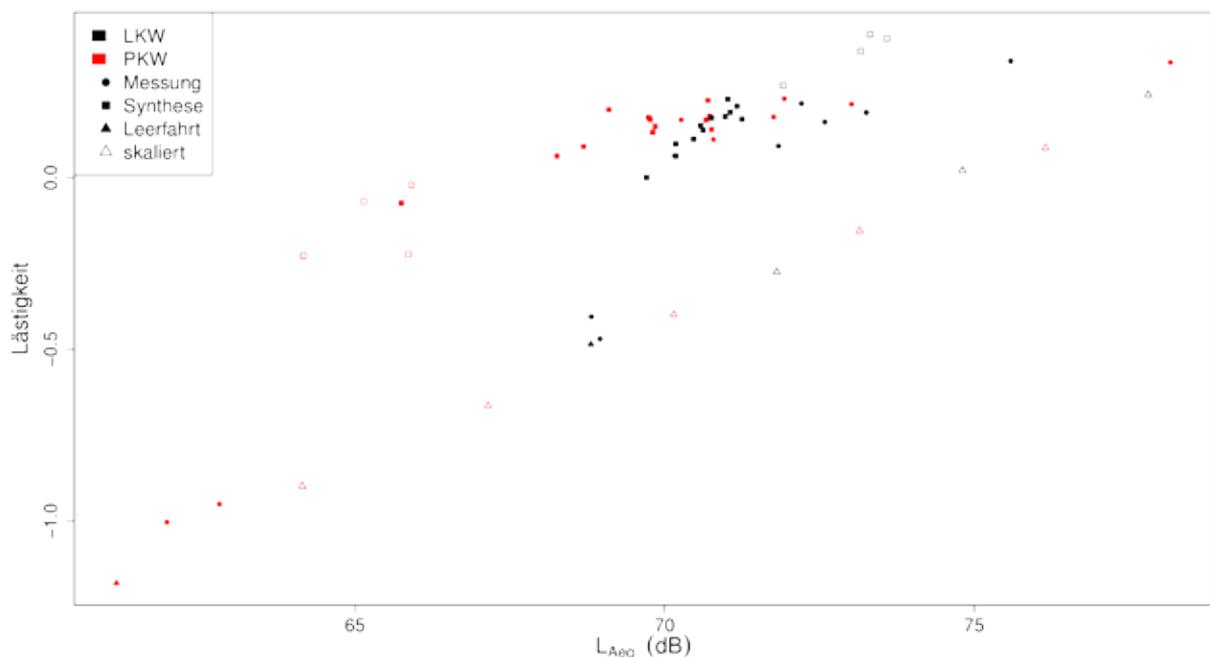


Abb. 7-37: Lästigkeit in Abhängigkeit des L_{Aeq}

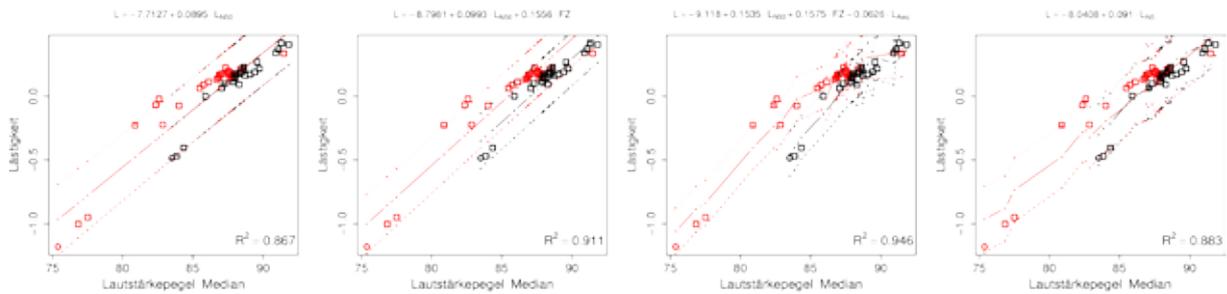


Abb. 7-38: Schrittweises Verfahren zur Auswahl der akustischen Deskriptoren

Modell (vorausgesetzt das komplexe Modell beinhaltet alle Variablen des einfachen Modells), allerdings besteht ab einer gewissen Komplexität (hohe Anzahl erklärender Variablen) die Gefahr des Overfittings, das Modell ist dann zu stark an die Daten angepasst und daher schlechter verallgemeinerbar.

Ein schrittweises Verfahren mit folgenden Größen wurde auf die Rumpelstreifensignale und die unskalierten Vorbeifahrtssignale angewendet: L_{Aeq} , L_{Ceq} , Differenz aus L_{Aeq} und L_{Ceq} und sowohl Median als auch die 5% Grenze von Lautstärkepegel (L_N), Rauigkeit (R), Schärfe nach Aures (S_A) und DIN (S_D), Schwankungsstärke (SW) und Tonhaltigkeit (T).

Aus der Analyse ergibt sich ein Modell aus dem Median des Lautstärkepegels (L_{N50}), dem Fahrzeugtyp und dem A-bewerteten Dauerschallpegel (L_{Aeq}). Der L_{N50} erklärt 87 % der Varianz (Abb. 7-38), der Fahrzeugtyp weitere 4 % und der L_{Aeq} noch einmal etwas weniger als 4 %.

Das endgültige Modell sieht daher folgendermaßen aus:

$$\text{Lästigkeit} = 0,1535 \cdot L_{N50} - 0,06259 \cdot L_{Aeq} + 0,1575 \cdot FZ - 9,118$$

Hier hat die Variable FZ den Wert 1 für einen LKW und 2 für den PKW. Durch die Möglichkeit, dass das Modell im Zuge der Selektion auch vereinfacht werden kann zeigt sich, dass der L_{N5} für sich genommen die Daten am besten erklärt (88 %), im Zuge der Verfeinerung des Modells aber wieder herausfällt.

Lästigkeit und Überdeckung

Das im vorigen Abschnitt entwickelte Vorhersagemodell kann nun auf die Messdaten aller Streifen angewendet werden (konkret mittels L_{N50} , L_{Aeq} und Fahrzeugtyp). Wichtig zu erwähnen ist, dass die Stimuli im Wahrnehmungstest um 6 dB nach unten skaliert waren, da die tatsächlich gemessenen Signale teilweise sehr laut waren und dies nur zu einer

schnelleren Ermüdung der Probanden führt. Daher wurden auch hier die akustischen Deskriptoren für die in ihrer Amplitude reduzierten Signale bestimmt.

Mittels des Modellfehlers kann auch ein Intervall angegeben werden in dem sich die Vorhersage mit 95 % Wahrscheinlichkeit befindet. Diese Intervalle sind auch in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Abb. 7-39 und Abb. 7-40 zeigen die Vorhersagen für die Lästigkeit als Funktion der Überdeckung in Testfeld 1 und Testfeld 2 (grüne Punkte) und die Fehlerbalken der

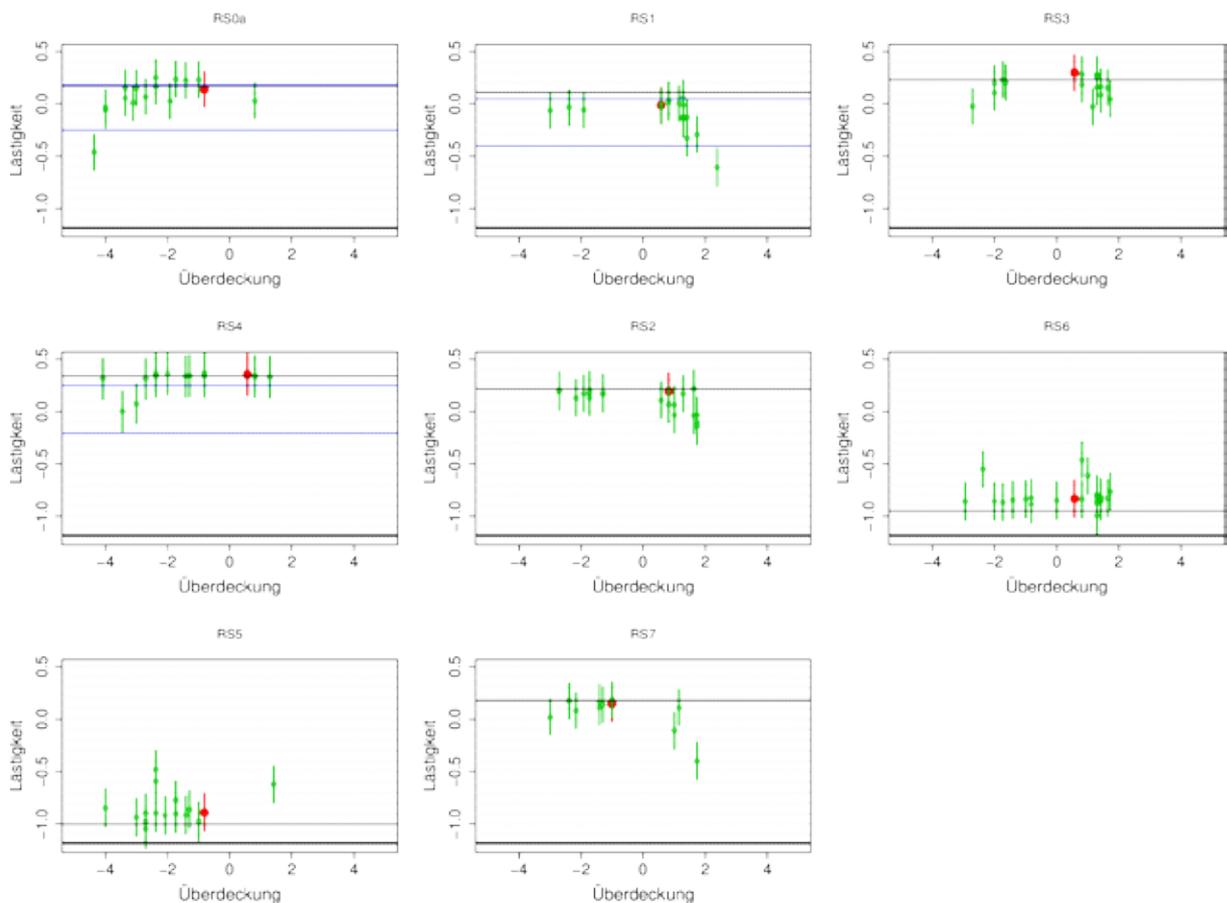


Abb. 7-39: Lästigkeit des PKW als Funktion der Überdeckung (Testfeld 1)

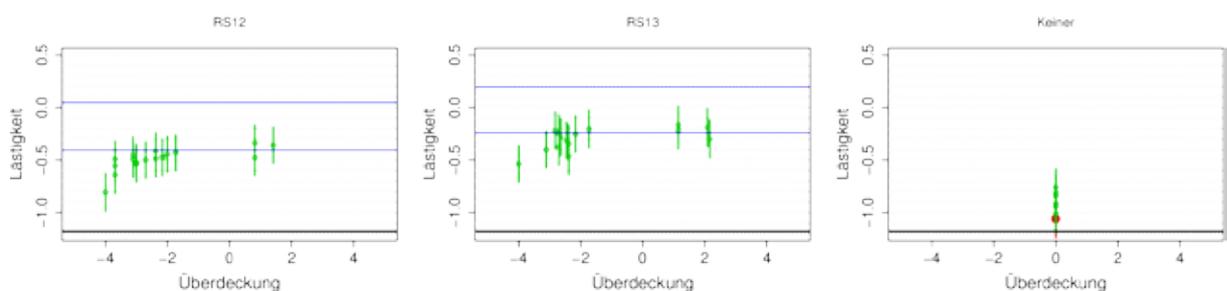


Abb. 7-40: Lästigkeit des PKW als Funktion der Überdeckung (Testfeld 2)

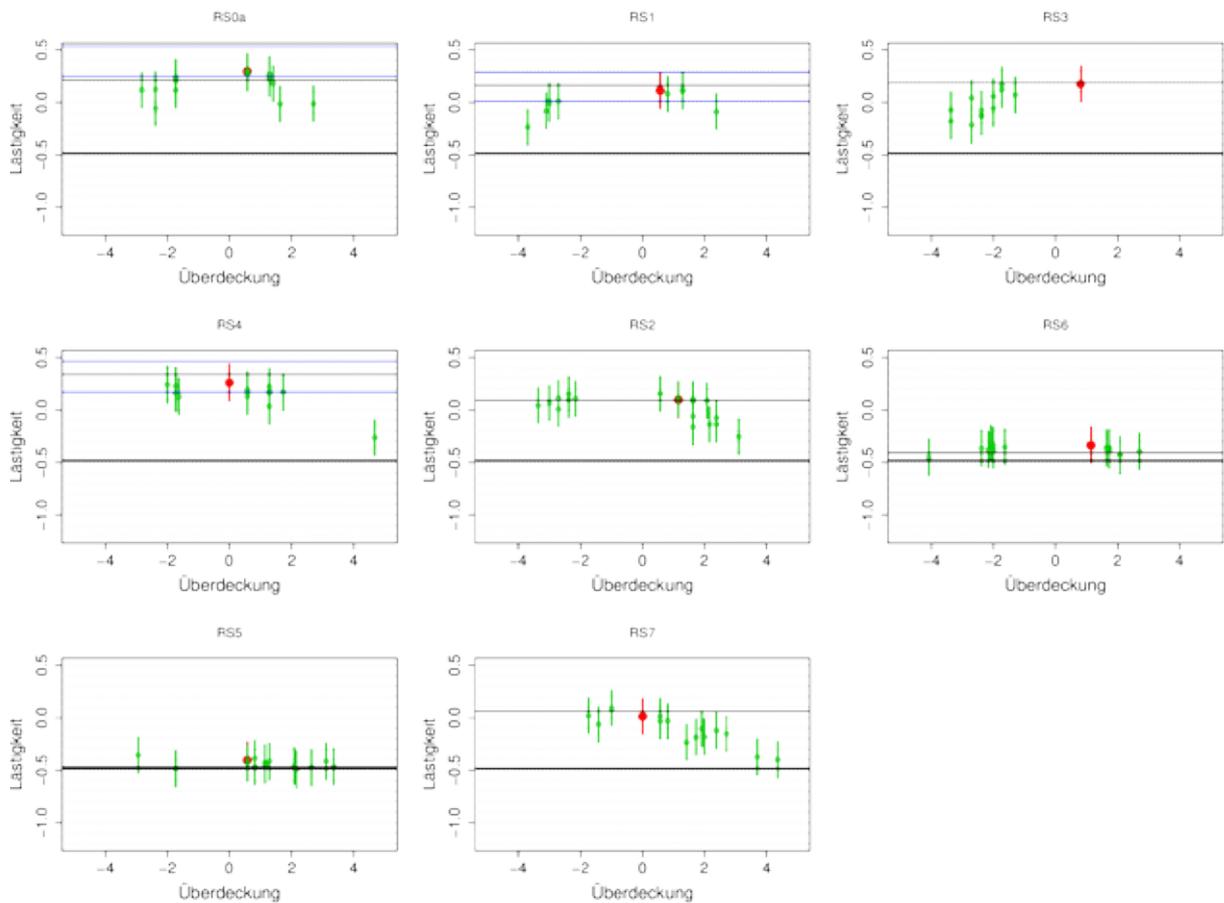


Abb. 7-41: Lästigkeit des LKW als Funktion der Überdeckung (Testfeld 1)

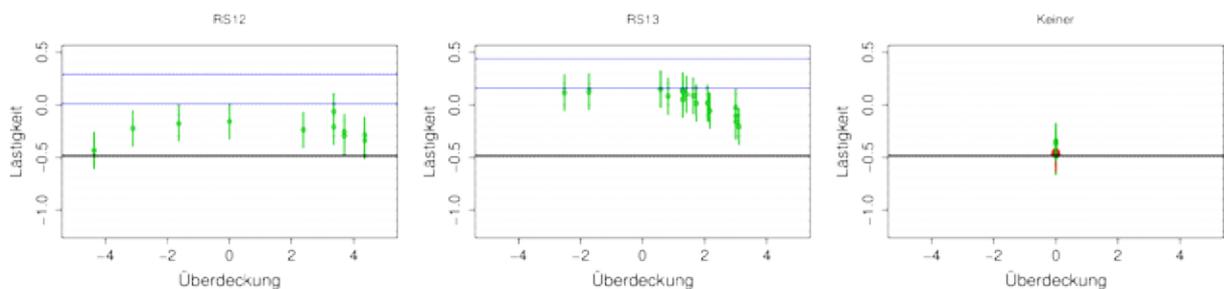


Abb. 7-42: Lästigkeit des LKW als Funktion der Überdeckung (Testfeld 2)

Vorhersage (grüne Linie). Der rote Punkt entspricht der Vorhersage der im Test verwendeten Überfahrt, die schwarze Linie der tatsächlichen Bewertung. Die blauen Linien zeigen die Vorhersagen für die im Test verwendeten synthetischen Stimuli (inklusive der 6 dB Abschwächung des RS Signals).

Bei RS1 und RS7 ist ein deutlicher Abfall der Lästigkeit zu beobachten, wenn der Überdeckungsgrad schlechter wird, bei diesen Vorbeifahrten ist der L_{Aeq} und auch der L_{N50} etwas stärker abgesenkt. Wie aufgrund des Vergleichs der akustischen Parameter der

Messungen zu erwarten, wird die Lästigkeit für RS12 und RS13 durch die synthetischen Stimuli stark überschätzt, hier zeigt sich bei den um 6 dB abgeschwächten Signalen eine bessere Übereinstimmung.

Abb. 7-41 und Abb. 7-42 zeigen wie zuvor die Vorhersagen für die Lästigkeit, diesmal beim LKW inklusive der um 4 dB erhöhten Signale. Auch hier sind gewisse Effekte des Überdeckungsgrades vorhanden. RS12 und RS13 passen hier besser mit den Vorhersagen zusammen, auch wenn es vor allem bei RS12 noch immer eine leichte Überschätzung gibt.

7.4. Wahrnehmung Innen – Dringlichkeit

Beim Innenraumsignal wurde die wahrgenommene Dringlichkeit der Änderung des Signals bewertet.

Abb. 7-43 zeigt die Unterschiede in der Beurteilung der wahrgenommenen Dringlichkeit für die getesteten Rumpelstreifen und Fahrzeuge. Es ist klar erkennbar, dass die Beurteilung der Dringlichkeit beim LKW im Schnitt deutlich geringer ausfällt als beim PKW. Aufgrund der akustischen Parameter war dieses Ergebnis zu erwarten. Die Nullbedingung, d.h. kein Rumpelstreifen ist bei beiden Fahrzeugtypen deutlich unter RS0a (ca. 7 Stufen bei PKW, ca. 3 beim LKW).

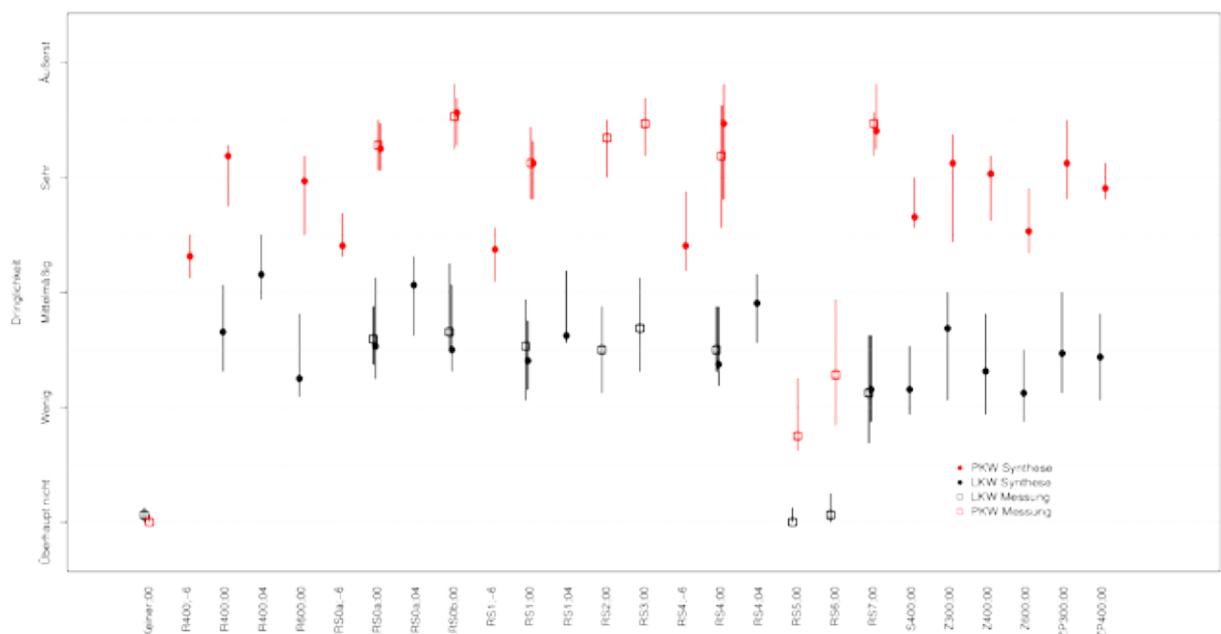


Abb. 7-43: Dringlichkeit der verschiedenen Rumpelstreifen für PKW und LKW

Vergleich Simulation-Messung

Wie schon für die Lästigkeitsurteile ist es auch für die Dringlichkeit wichtig festzustellen, ob die synthetisierten Stimuli den gemessenen entsprechen. Hierfür wurde eine RM-ANOVA gerechnet mit RS (RS0a, RS0b, RS1, RS4, RS7), Messung vs. Simulation und Fahrzeug (PKW, LKW) als Faktoren. Der Haupteffekt Messung vs. Simulation ist nicht signifikant, d.h. im Mittel wurde kein signifikanter Unterschied gefunden.

Der Effekt des Fahrzeugs ist signifikant ($p < 0,0001$), allerdings ist auch die Interaktion zwischen Messung und RS sowie zwischen Messung und Fahrzeug signifikant ($p = 0,013$). Dies bedeutet, dass der Unterschied zwischen PKW und LKW bei Simulation und Messung, wenn auch nur geringfügig (Abb. 7-44, mittlere Grafik), unterschiedlich ist. Dies ändert aber nichts am prinzipiellen Effekt des Fahrzeuges. Anstatt der verbalen Skala werden hier Zahlen von 1 (überhaupt nicht dringlich) bis zu 9 (äußerst dringlich) dargestellt.

Der Unterschied zwischen den Rumpelstreifen ist signifikant ($p = 0,0007$ GG), aber auch hier gibt es signifikante Interaktionen. Der Effekt des Rumpelstreifens ist teilweise vom Fahrzeug abhängig ($p = 0,0002$ GG), wobei im post-hoc-Test aller paarweisen Interaktionen alle Unterschiede die den 300 mm Sinus beinhalteten, signifikant waren ($p \leq 0,007$ Bonf.). Der Sinus ist im LKW hier weniger dringlich als andere Streifen während er im PKW dringlicher wirkt. Der Effekt ist in Abb. 7-44 relativ klar ersichtlich. Im post-hoc-Test der Haupteffekte bleiben somit die geringfügig erhöhte Dringlichkeit von RS0b verglichen mit RS0a (300 mm, unterschiedliche Fuge, $p < 0,0001$ Bonf.) und RS1 (600 mm, $p < 0,0001$ Bonf.) erhalten. Genau genommen kann auch der signifikante Effekt dass der RS0b dringlicher als RS7 ist ($p < 0,0001$ Bonf.), interpretiert werden, da zwar die Interaktion RS und Fahrzeug signifikant ist, der RS0b aber in beiden Fahrzeugen dringlicher wirkt als der RS7.

Der Effekt der Rumpelstreifen ist aber auch abhängig davon, ob Messung oder Simulation verglichen werden ($p = 0,004$ GG). Der post-hoc Test ergab hier eine Interaktion sowohl

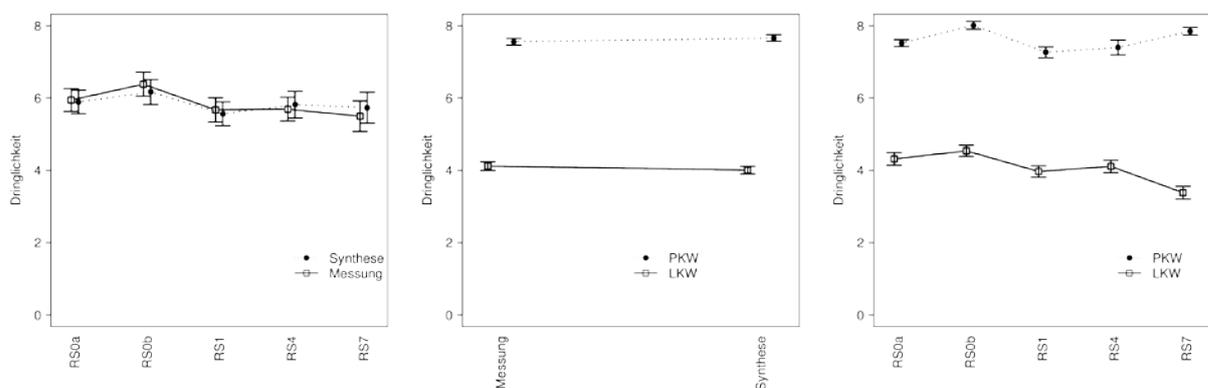


Abb. 7-44: Vergleich zwischen gemessenen und synthetisierten Überfahrten

zwischen RS0b und RS4 ($p=0,017$ Bonf.) als auch zwischen RS0b und RS7 ($p=0,006$ Bonf.). Zusammenfassend zeigen sich gewisse Unterschiede zwischen Simulation und Messung, allerdings beeinflussen diese nicht die Interpretation der relevanten Effekte für diese Auswahl an getesteten Rumpelstreifen.

Diese Analyse gilt aber nur für die in MS1 erhobenen Daten. Es ist klar, dass die Abweichungen z.B. bei RS0a im LKW in MS2 aber auch die starken Unterschied bei RS13 (400 mm) aber auch bei RS12 (600 mm) und RS14 (Zufall, 600 mm) im PKW eine direkte Interpretation der Dringlichkeitswerte für synthetisierte Streifen verhindern. Wie schon bei der Lästigkeit gilt auch hier, dass die verschiedenen synthetischen Signale den akustischen Bereich der Wahrnehmungstests erweitern und daher ein Einordnen der in Testfeld 2 erhobenen Daten besser möglich machen.

Dringlichkeit vs. Akustik

Die vorangegangene Analyse legt nahe, dass die synthetischen und gemessenen Daten gemeinsam in dieser Analyse verwendet werden können. Da die Probanden hier die Änderung des Geräuschs beurteilen, wird für die akustischen Deskriptoren die Differenz auf die Überfahrten ohne RS (Leerfahrten) gebildet, notiert als z.B. ΔL_{Aeq} .

Bei den Innenraumgeräuschen wurden Klangbeispiele erzeugt, bei denen 0,7 s lang das normale Fahrgeräusch zu hören war und dann der Rumpelstreifen für 1,2 s. Die verschiedenen akustischen und psychoakustischen Parameter wurden für die weiteren Analysen für den gesamten Rumpelstreifenteil der Klangbeispiele berechnet (also 0,7 s nach Beginn bis 1,9 s), da die Probanden die Änderung zum Fahrgeräusch beurteilen sollten.

Mittels eines stufenweisen Verfahrens (siehe im Abschnitt zur Lästigkeit 7.3) ergab sich folgendes Modell:

$$D = 1.4675 + 0,8783 \cdot \Delta L_{N50} - 0,3681 \cdot \Delta L_{N5} - 2,5252 \cdot \Delta S_{A5} - 0,1029 \cdot \Delta L_{Ceq}$$

Dieses Modell erklärt ca. 97 % der Varianz der Daten.

Abb. 7-45 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Median des Lautstärkepegels (L_{N50}) bezogen auf den L_{N50} ohne Rumpelstreifen und der wahrgenommenen Dringlichkeit. Diese beschreibt schon alleine ca. 96 % der Daten (Abb. 7-46). Der Zugewinn an erklärter Varianz durch die drei zusätzlichen Deskriptoren ist daher relativ gering (1–2 %). Interessant ist, dass LKW und PKW hier nicht gesondert sondern gemeinsam betrachtet werden können, da der Fahrzeugtyp nicht als relevanter Faktor erkannt wurde. Dies lässt vermuten, dass auch die Messungen in anderen Fahrzeugen beurteilt werden können.

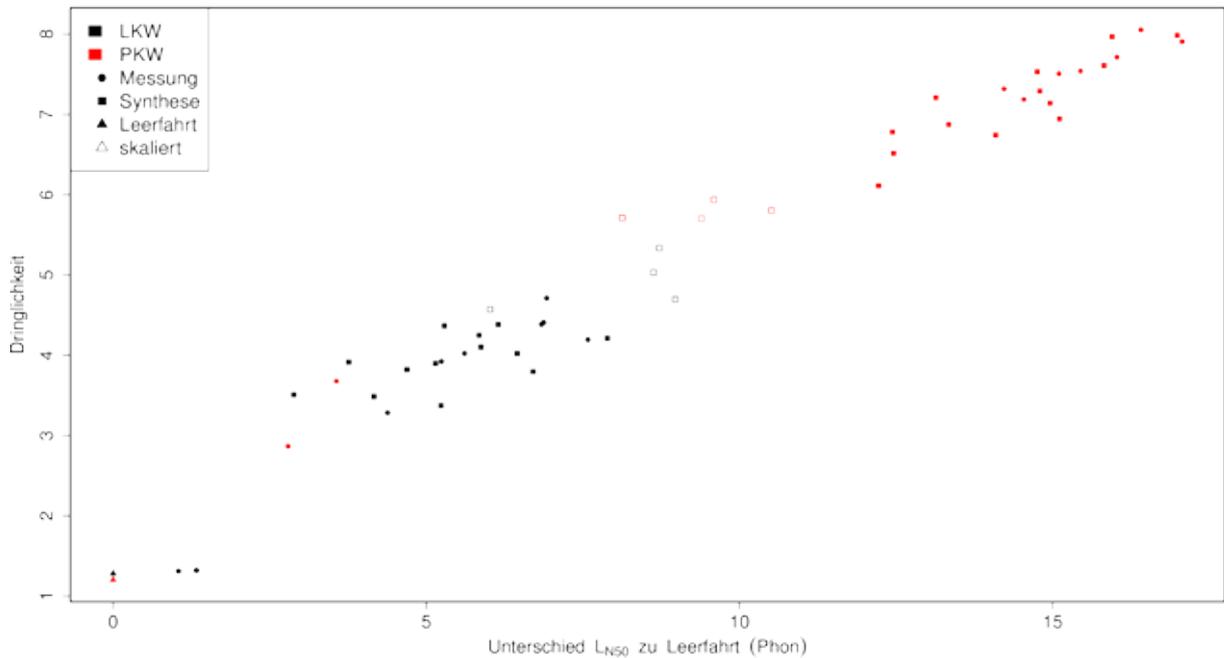


Abb. 7-45: Dringlichkeit als Funktion der Differenz des medianen Lautstärkepegels

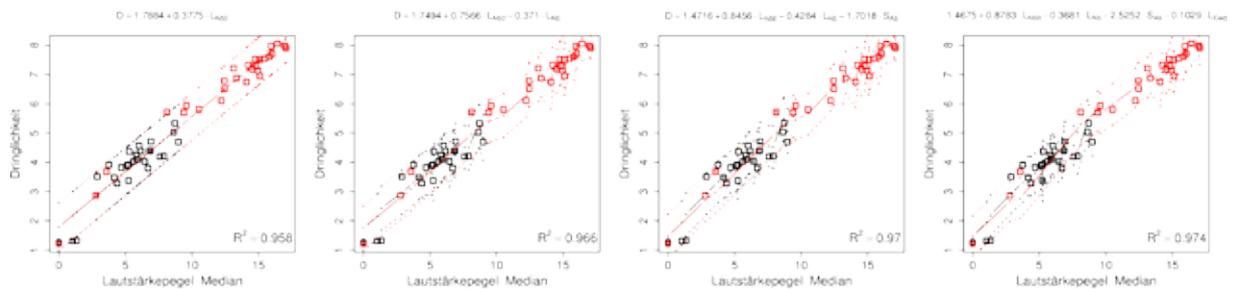


Abb. 7-46: Lineares Modell zur Beschreibung der Dringlichkeit

Bei den im LKW akustisch nicht wirksamen Sinustreifen zeigt das Modell die größte Abweichung.

Dringlichkeit und Überdeckung

Aus diesem Modell ist es nun auch möglich, Vorhersagen für die anderen Messungen durchzuführen und in Abhängigkeit zum Beispiel vom Überdeckungsgrad zu betrachten.

Abb. 7-47 zeigt den Einfluss der Überdeckung (Anfang der Überfahrt) auf die wahrgenommene Dringlichkeit wenn man das Vorhersagmodell aus dem vorangegangenen Abschnitt zugrunde legt. Auch hier wurden die akustischen Parameter von Beginn des Segments bis 1,2 s nach Beginn berechnet. Die Unsicherheit in der Segmentierung bei MS1 kann hier gewisse Schwankungen verursachen.

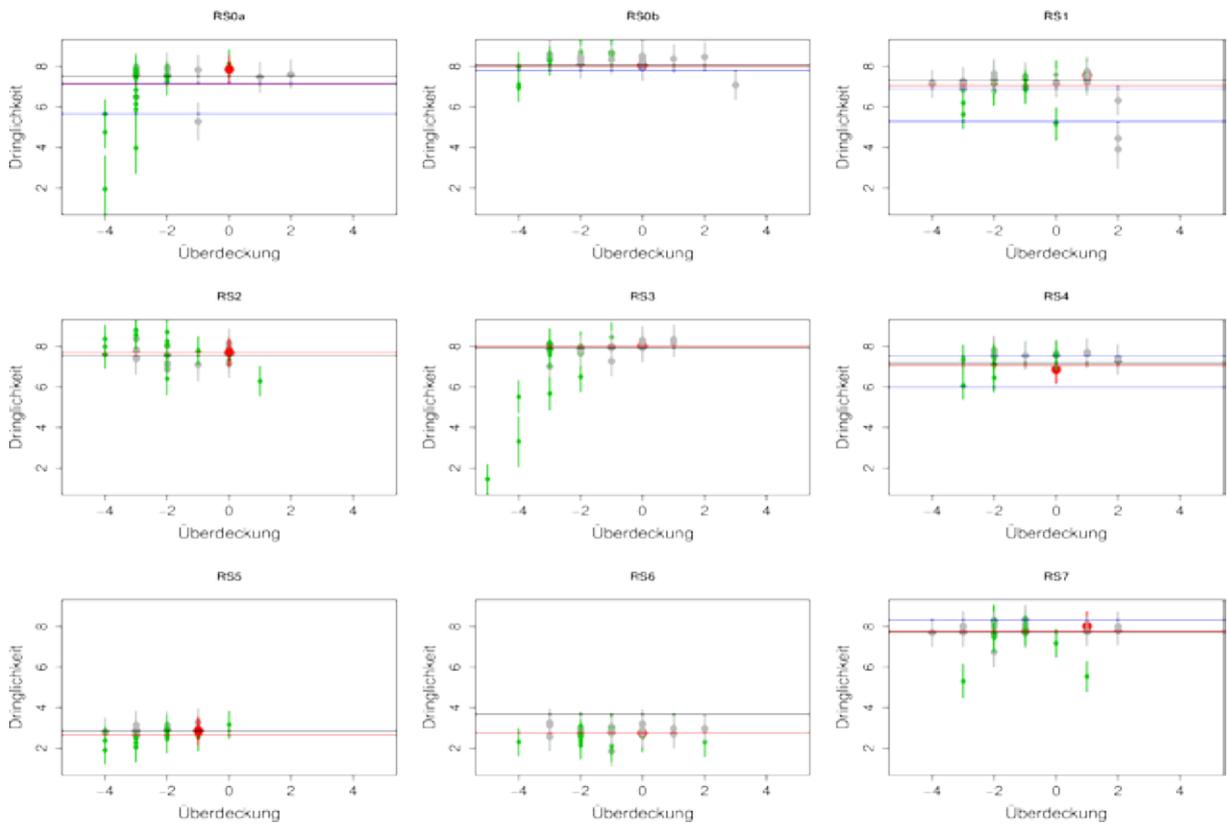


Abb. 7-47: Dringlichkeit im PKW als Funktion der Überdeckung (Teststrecke 1)

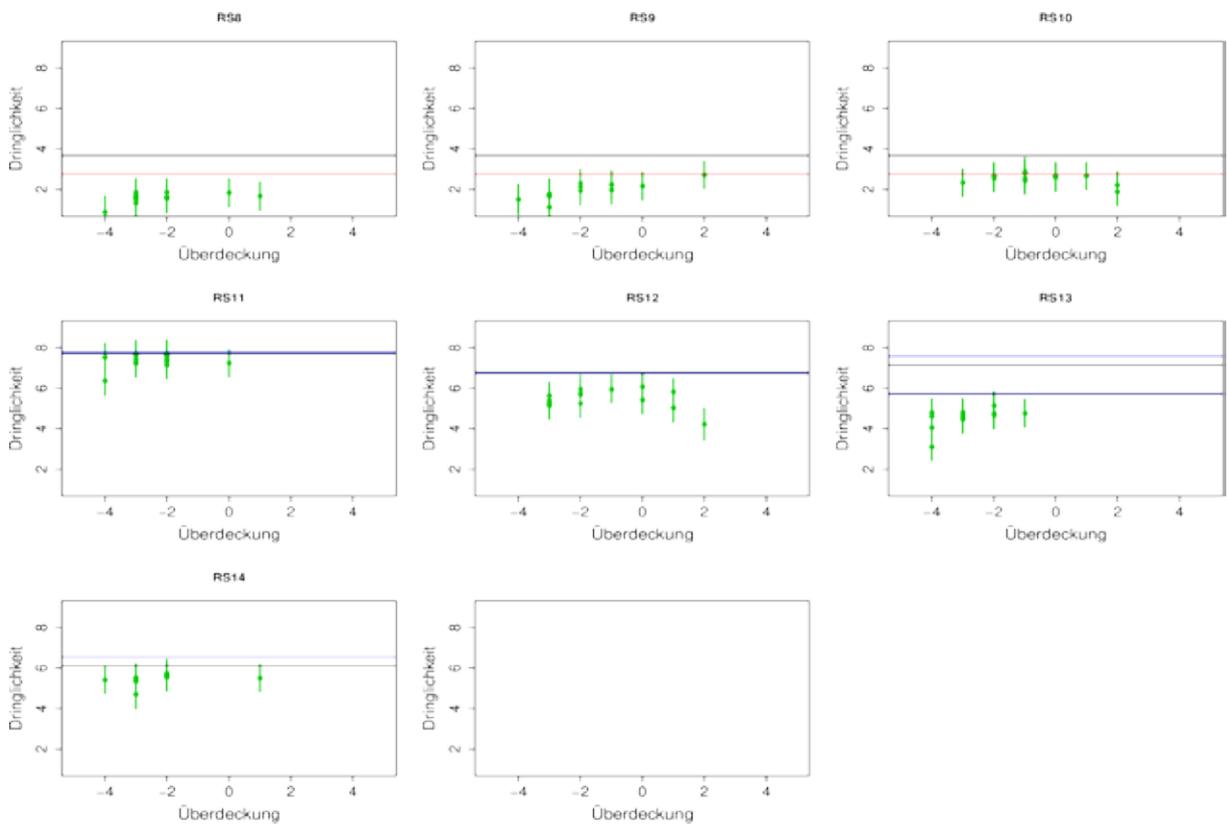


Abb. 7-48: Dringlichkeit im PKW als Funktion der Überdeckung (Teststrecke 2)

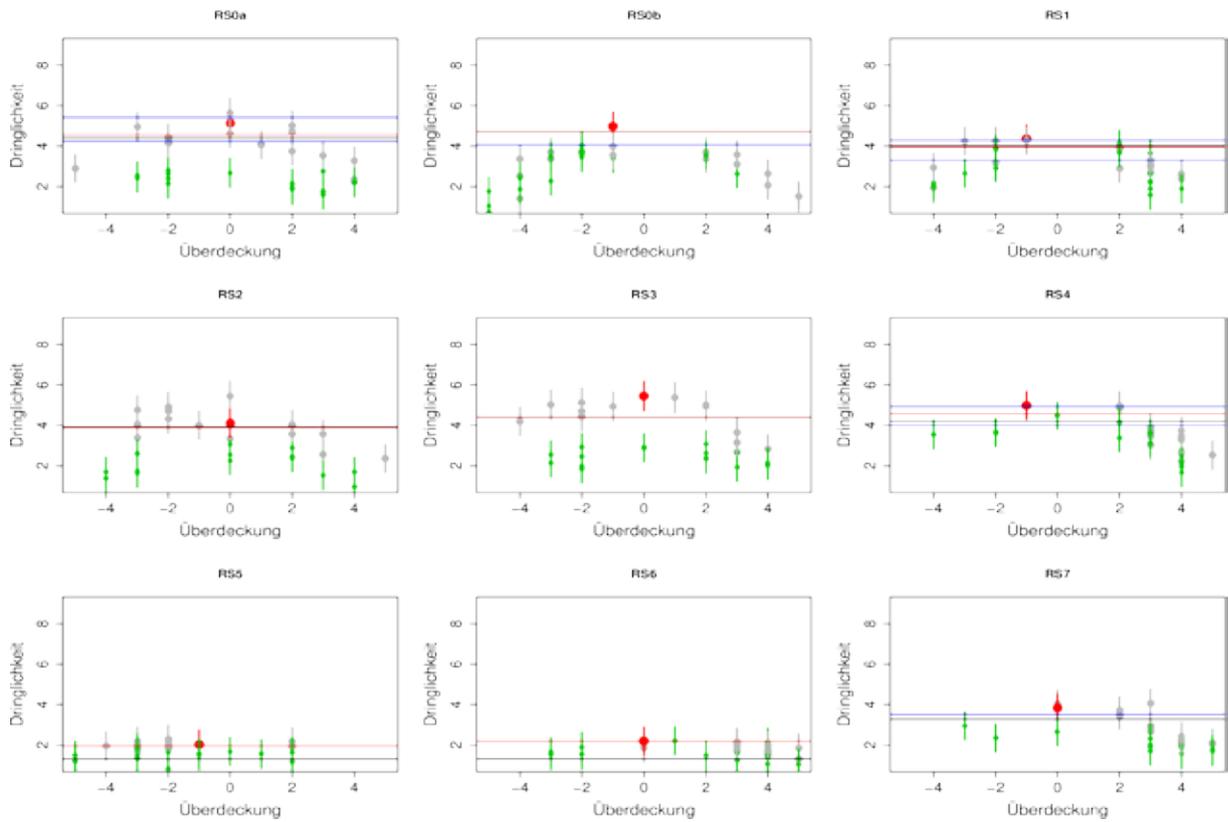


Abb. 7-49: Dringlichkeit im LKW als Funktion der Überdeckung (Teststrecke 1)

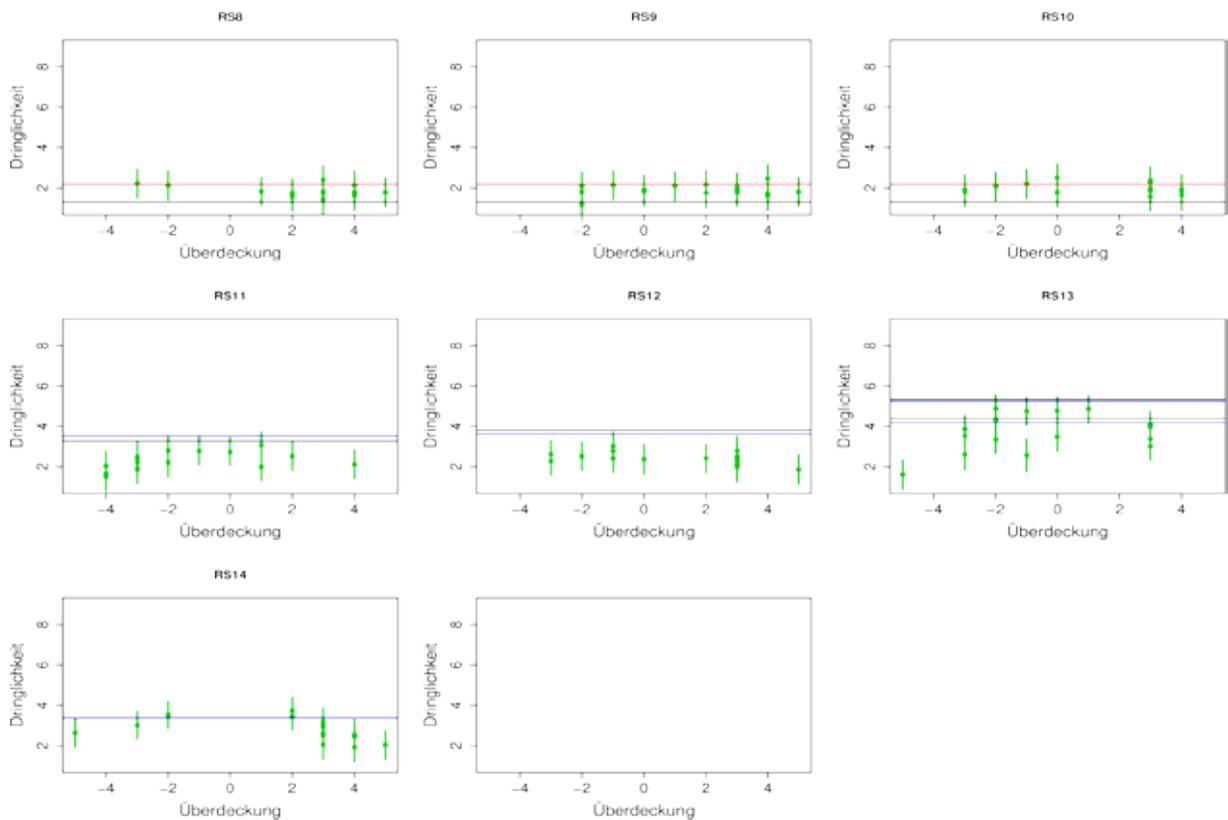


Abb. 7-50: Dringlichkeit im LKW als Funktion der Überdeckung (Teststrecke 2)

Bis auf einige Ausreißer ist die Vorhersage im Bereich $-3 \leq \text{Überdeckung} \leq 3$ konstant. Messserie 1 und 2 zeigen geringfügige Unterschiede. Wichtig ist anzumerken, dass die rote Linie die Vorhersage aufgrund des jeweiligen im Test verwendeten Soundsamples darstellt (diese wurden nochmals genauer segmentiert), wogegen die Vorhersagen auf den ursprünglichen Segmentierungen basiert (roter Punkt ist die Überfahrt die für den Test ausgewählt wurde). Dadurch ergeben sich leichte Unterschiede in den akustischen Parametern und im Weiteren Unterschiede in der vorhergesagten Dringlichkeit. Bei RS1 wurde ja beim PKW die zweitbeste Überfahrt ausgewählt, dies zeigt aber keine große Abweichung gegenüber der Fahrt mit besserer Überdeckung.

Die blauen Linien markieren die Vorhersage für die (wenn vorhandenen) synthetisierten Stimuli. Bei RS0a markiert die untere blaue Linie die Vorhersage für -6 dB. Da die Bestimmung des Überdeckungsgrad nur punktuell erfolgte, können hier natürlich gewisse Schwankungen entstehen, speziell da das Modell verschiedene akustische Größen kombiniert.

Abb. 7-48 stellt die gleiche Information für die in Testfeld 2 gefrästen Rumpelstreifen dar. Hier zeigt sich das Problem mit der Synthese von RS13 (400 mm) der deutlich weniger Geräusche im Fahrzeug erzeugt als im Modell. Die um 6 dB abgeschwächte Variante (blaue und schwarze untere Linie) passt hier eindeutig besser, obwohl diese die Dringlichkeit noch immer leicht überschätzt. RS11 (300 mm Sinus, 7 mm), RS12 (600 mm RS, 7 mm) und RS14 (Zufall, 600 mm im Mittel, RS, 7 mm) hingegen stimmen sehr gut mit den im Test abgeleiteten Urteilen überein. RS10 entspricht in etwa der Vorhersage für RS6 (rote Linie), für die flacheren RS9 und RS8 sinkt die Dringlichkeit noch einmal ab.

Die in der akustischen Betrachtung der Innenraummessungen beim LKW festgestellten Unterschiede zwischen den beiden Messkampagnen schlagen sich natürlich auch in der Vorhersage der Dringlichkeit nieder, da das Modell ja auf Lautstärke- und Schalldruckpegeln basiert. Es zeigen sich auch klare Tendenzen einer Abnahme der Dringlichkeit wenn der Streifen schlechter getroffen wird.

Die Vorhersagen für das Testfeld 2 passen beim LKW mit den synthetisierten Urteilen auch bei RS13 gut zusammen (blaue Linien). Die Unterschiede zwischen RS8, RS9 und RS10 fallen hier deutlich geringer aus.

7.5. Reaktionszeit

Eine wichtige Frage bei der Reaktionszeit ist, ob die Testpersonen auf alle Rumpelstreifen reagiert haben.

Zuverlässigkeit der Reaktion

Abb. 7-51 zeigt die durchschnittliche Anzahl der Reaktionen pro Proband wobei 12 bedeutet, dass auf alle Wiederholungen reagiert wurde. Reaktion bedeutet hier dass innerhalb der Darbietungszeit (1,2 s) die Leertaste gedrückt wurde. Die Vierecke markieren den Median der Anzahl der Reaktionen auf die jeweilige Bedingung. Die vertikalen Linien zeigen den Bereich von 15 Probanden an. Dies ist wichtig anzumerken, da eine Person hier stark abweichende Daten mit sehr vielen fehlenden Reaktionen produziert hat (durch x markiert). Die dicken horizontalen Linien stellen eine Schätzung des unteren Quartils dar, d.h. ein Viertel der Werte liegt unter diesem Wert. Für weitere Analysen wurde dieser Proband ausgeschlossen, da auch der Median der Reaktionszeit dieser Person um mehr als die dreifache Standardabweichung vom Mittelwert der Mediane aller 16 Probanden abweicht.

Es zeigt sich, dass, mit wenigen Ausnahmen, sehr zuverlässig auf die Rumpelstreifen reagiert wurde. Es ist auch klar, dass auf die Null-Bedingung (kein Rumpelstreifen) so gut wie nie reagiert wurde (eine einzige von 192 möglichen Reaktionen), ebenso wenig allerdings auf die 600 mm Sinusstreifen im LKW (10 bei RS5 und 3 bei RS6 unter 1,2 Sekunden). Im PKW wurde im Schnitt etwa einmal auf RS5 und RS6 nicht reagiert.

Betrachtet man die Reaktionswahrscheinlichkeit als Funktion der Pegeländerung (siehe Abb. 7-52) sieht man, dass 3 dB ein guter Wert sind, allerdings unter Laborbedingungen. Darunter wird eine Reaktion vermutlich nicht sehr zuverlässig auftreten.

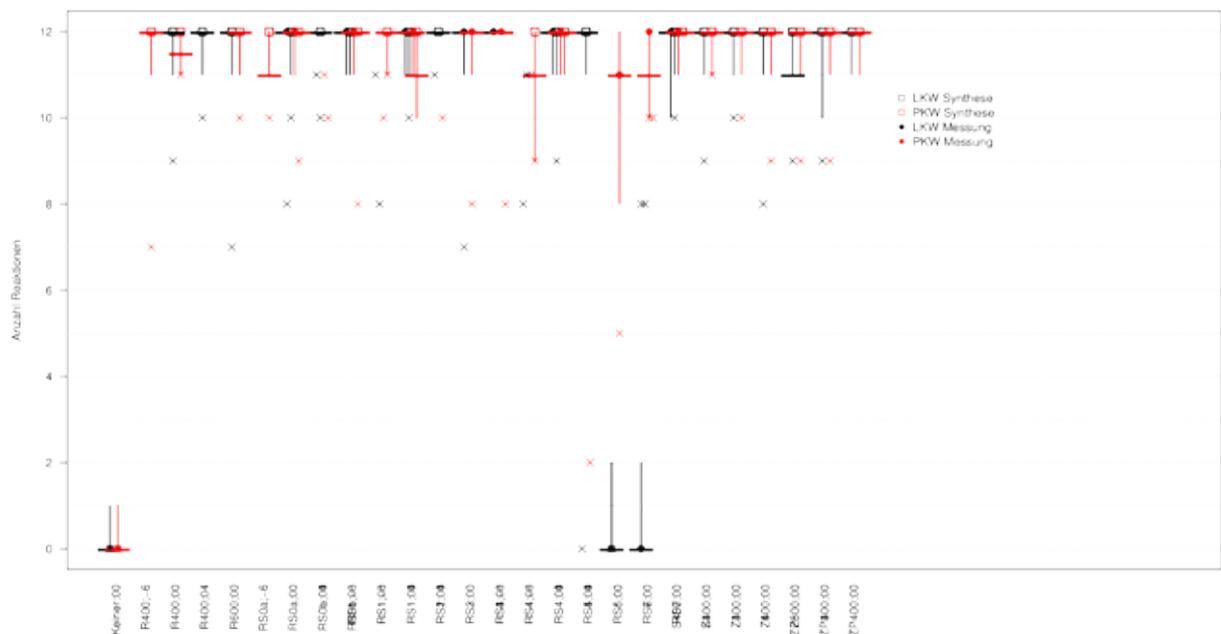


Abb. 7-51: Verteilung der Anzahl der Reaktionen über die Probanden und Bedingungen

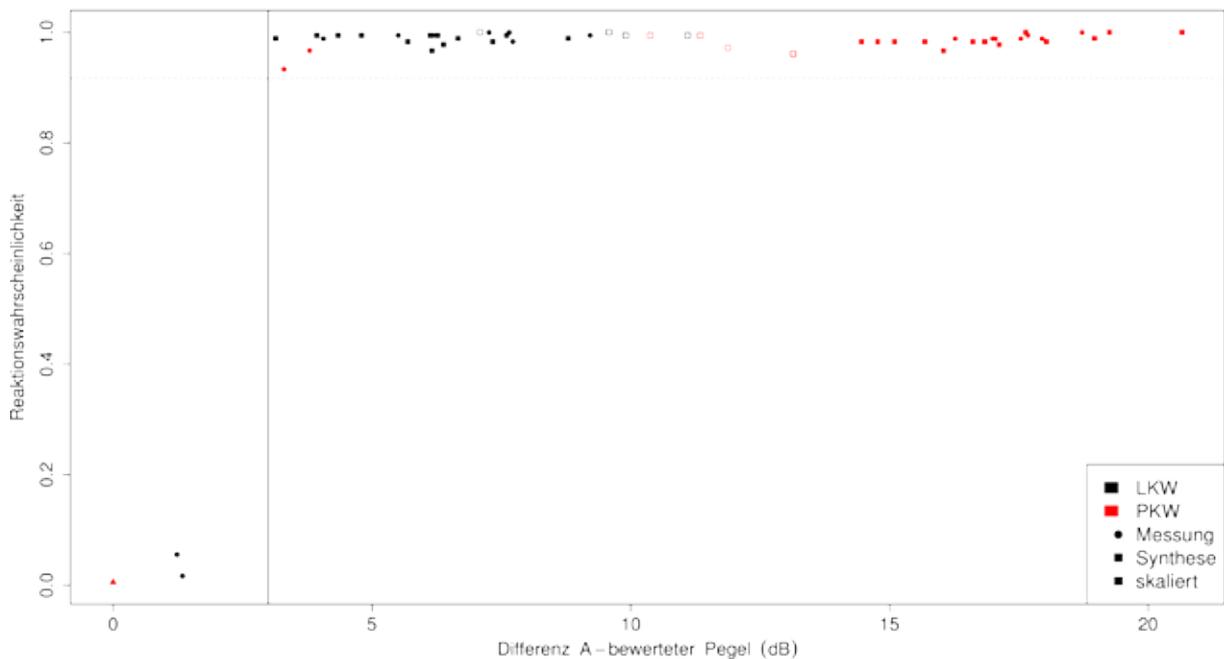


Abb. 7-52: Mittlere Wahrscheinlichkeit einer Reaktion in Abhängigkeit der Änderung des L_{Aeq} ohne Proband mit extremen Ausreißern

Die beiden roten Punkte knapp über 3 dB sind RS5 und RS6. Bei RS5 haben 8 Probanden einmal nicht reagiert und 1 Proband hat in vier Fällen nicht reagiert. Bei RS6 waren es vier Probanden die jeweils einmal ausgelassen haben und ein Proband mit zwei fehlenden Antworten.

Über 5 dB tritt eine Reaktion sehr zuverlässig auf. Ein etwas auffälliger Punkt ist bei ca. 13 dB der mit -6 dB skalierte synthetische RS4 (Zufallsstreifen 300 mm). Bei diesem haben 5 Probanden einmal nicht reagiert und ein Proband dreimal. Im Detail betrachtet zeigt sich hier einmal gar keine Antwort, eine zu frühe und eine Reaktion auf das Ende des Geräusches.

Aufgrund der Datenlage ist es schwierig, hier eine Aussage zu treffen, aber es könnte sein, dass das rauschähnliche RS-Signal bei zu geringer Änderung nicht mehr so klar wahrgenommen wird. Ein mögliches weiteres Indiz ist die tendenziell etwas stärker abfallende Dringlichkeit im Gegensatz zu den anderen um -6 dB skalierten Streifen. Allerdings zeigt die Reaktionszeit keine Auffälligkeiten und ist sogar eher kurz (Abb. 7-53).

Reaktionszeiten

Bei der Auswertung der Reaktionszeiten hat sich herausgestellt, dass die Veränderung innerhalb einer Kategorie im Bereich der Unsicherheit der Segmentierung bei den gemessenen Signalen liegt. Daher ist die Reaktionszeit bei diesen Signalen mit Vorsicht zu interpretieren. Bei den synthetischen Signalen ist die Reaktionszeit klar definiert als Zeit

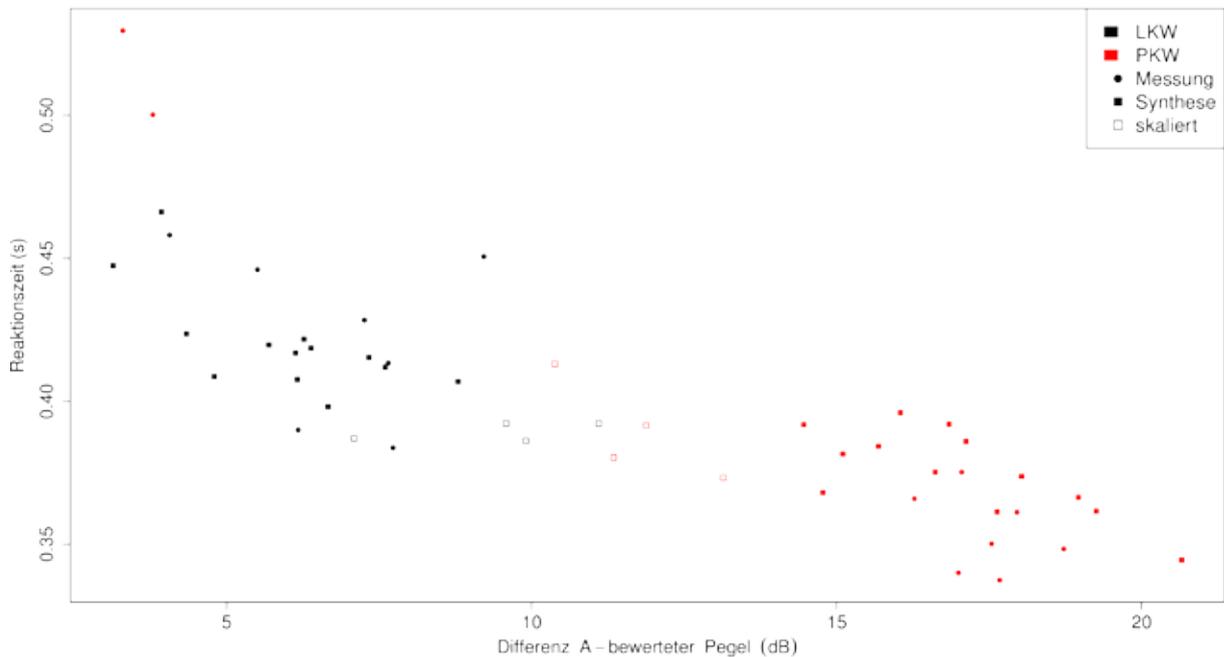


Abb. 7-53: Reaktionszeit als Funktion der Differenz des L_{Aeq}

zwischen Beginn des RS-Signals und der Reaktion. In der Realität kann jedoch eine gewisse Unsicherheit zwischen LKW und PKW auftreten, da vom Auftreffen am Rumpelstreifen bis zur Veränderung des Innenraumgeräusches eine gewisse Verzögerung auftreten wird, die beim LKW unter Umständen aufgrund der größeren Wege höher sein kann.

Abgesehen von diesen Unsicherheiten ist klar, dass ein Zusammenhang zwischen Reaktionszeit und Pegeländerung besteht, dieser ist aber über den gesamten Pegelbereich nicht-linear (Abb. 7-53).

Man kann sehen, dass die Reaktionszeiten der gemessenen Geräusche teilweise abweichen. Bei den beiden 600 mm Sinusstreifen beim PKW ist die Abweichung so groß, dass davon ausgegangen werden kann, dass hier ein deutlicher Anstieg der Reaktionszeit erfolgt, der nicht nur durch eine Abweichung bei der Segmentierung erklärt werden kann. Beim LKW ist aufgrund der wenigen Reaktionen keine Schätzung der Reaktionszeit für diese Bedingungen vorhanden.

In Abb. 7-54 zeigt sich, dass über 5 dB ein linearer Zusammenhang die Daten sehr gut beschreibt. Die Reaktion wird um ca. 3,6 ms schneller pro dB Pegelanstieg. Es sind auch die gemessenen Reaktionszeiten für den PKW bei 600 mm Sinus eingezeichnet, und diese weichen schon deutlich vom Trend ab (auch wenn man hier eine gewisse Unsicherheit miteinbeziehen muss). Beim LKW ist bei niedrigen Pegelanstiegen unter 5 dB die Abweichung nicht so drastisch, doch tendenziell steigt die Reaktionszeit an.

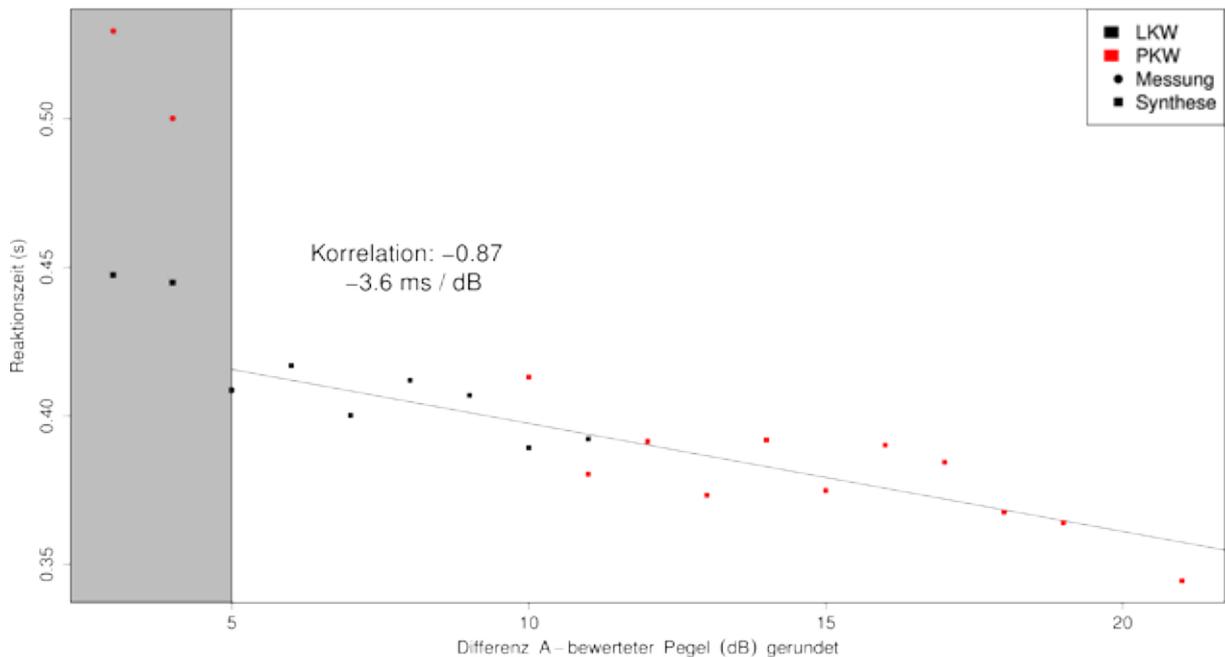


Abb. 7-54: Reaktionszeit als Funktion der Differenz des L_{Aeq} für synthetisierte RS-Signale in Schritten von 1 dB gemittelt (15 Probanden)

Eine wichtige Einschränkung ist, dass hier der L_{Aeq} des gesamten Rumpelstreifenabschnittes Signals (Rumpelstreifenüberfahrten wurden für 1,2 s dem Fahrgeräusch überlagert) verwendet wurde, die meisten Reaktionen finden aber deutlich früher statt. Da der L_{Aeq} aufgrund der energetischen Mittelung von größeren Amplituden stärker beeinflusst wird, entsprechen auch hier die Pegelwerte eher den erreichbaren Amplituden und die genaue Art und Dauer der Anstiege spielt eine untergeordnete Rolle.

Effekt des Radios

Nimmt man die 5 dB im L_{Aeq} als einen groben Richtwert an, zeigt sich ein Problem, wenn im LKW z.B. der Radio eingeschaltet ist. Hier kann aufgrund zweier Messungen im Stillstand mit eingeschaltetem Radio eine grobe Abschätzung gegeben werden.

Bei „normaler“ Lautstärke (von Fahrer und der die Messung durchführenden Person als solches im Stillstand ohne Motor eingeschätzt) schwankte der L_{Aeq} berechnet über 1 s lange Abschnitte im Zeitraum von etwa 1 min zwischen 70 und 80 dB. Wenn z.B. 73 dB als Richtwert angenommen werden, würde eine energetische Summierung (69 dB L_{Aeq} für fahrenden LKW ohne Radio) ca. 74,5 dB ergeben. Bei einer Erhöhung des Rumpelstreifens um 5 dB beträgt der Pegel 74 dB ohne Radio und 76,5 dB mit Radio, also nur noch eine effektive Erhöhung um ca. 2,5 dB. Bei z.B. 8 dB RS-Anstieg wären es ca. 4 dB.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass dies nur eine sehr simple Betrachtungsweise ist. Es werden weder Maskierungseffekte noch unter Umständen unterschiedliche Frequenzbereiche der unterschiedliche Komponenten berücksichtigt. Trotzdem zeigt dies ein gewisses Problem der akustischen Wirkung von Rumpelstreifen auf, wenn das Umgebungsgeräusch deutlich an Intensität zunimmt.

7.6. Beschleunigung

Frequenzbewertete Beschleunigung

Abb. 7-55 zeigt die nach ISO 5349-1 bewerteten Lenkradbeschleunigungen und die nach ISO 2631-1 bewerteten Sitzbeschleunigungen der beiden Fahrzeuge. Für Wahrnehmbarkeit wird in der ISO 2631-1 die Bewertung des Maximums der bewerteten RMS-Beschleunigung über alle 3 Achsen verlangt. Für die grauen Boxen wurden die Beschleunigungen direkt vom Signal ermittelt, für die farbigen Boxen wurde zuerst ein Hochpassfilter mit einer

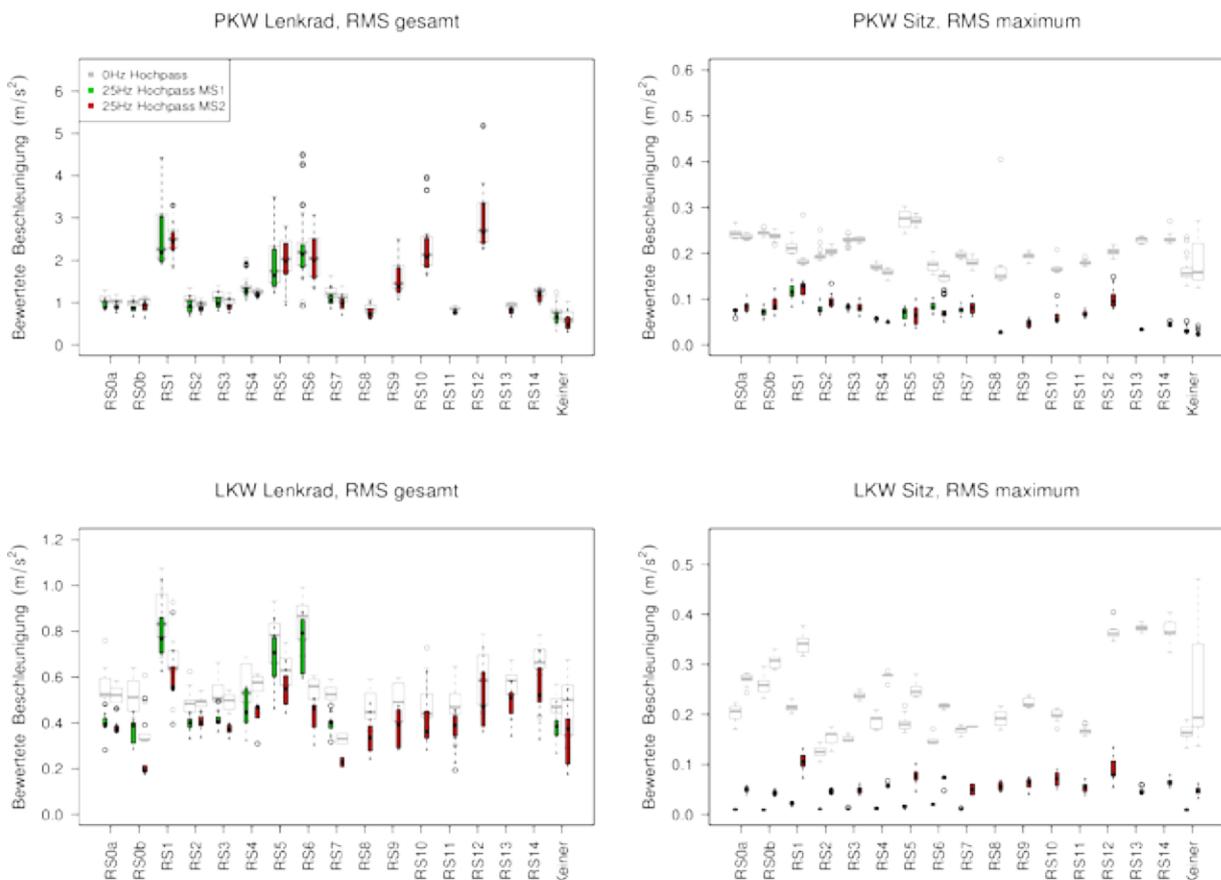


Abb. 7-55: Bewertete Lenkrad- und Sitzbeschleunigungen (Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt, gesamte Überfahrt) Für die Sitzbeschleunigung wird die Verteilung der Maxima der 3 Schwingungsachsen dargestellt (siehe ISO 2631-1)

Grenzfrequenz von 25 Hz angewendet. Diese gefilterten Werte sind daher streng genommen keine Normwerte mehr, allerdings tritt aufgrund der stärkeren Gewichtung der tieffrequenten Schwingungen das Problem auf, dass die höherfrequenten Schwingungen die durch die RS erzeugt werden in der Grundvibration untergehen. Dies ist vor allem beim Sitz und beim LKW der Fall.

Beim LKW-Sitz ist bei den gefilterten Beschleunigungswerten vor allem die links/rechts-Beschleunigung dominierend, seltener die vor/zurück-Beschleunigung. Es ist hier ein klarer Unterschied zwischen MS1 und MS2 erkennbar, die erhöhte seitliche Vibration ist hier schon in der Grundschiwingung vorhanden, wenn überhaupt, so sind hier nur die Vibrationen bei 600 mm RS erhöht gegenüber der Grundschiwingung. Beim PKW sind die Tendenzen etwas stärker (beim PKW ist vor allem die vertikale Achse dominant, wobei bei 600 mm die Tendenz eher in Richtung dominanter links/rechts Vibration geht). Ob diese Veränderungen wahrnehmbar sind kann aber hier nicht beurteilt werden, vor allem wenn man bedenkt wie groß die Veränderungen im gesamten Frequenzbereich sind.

Am Lenkrad des PKW ist der Effekt der Filterung gering, d.h. die Vibrationen im tieffrequenten Bereich sind während normaler Fahrt gering. Es ist klar ersichtlich, dass beim Lenkrad auftretende (gewichtete) Beschleunigungen bei Streifen mit 600 mm Fugenabstand am höchsten sind, da die tieferen Frequenzen in der ISO 5349-1 stärker gewichtet werden. Es scheint hier sekundär ob es sich um ein RS oder ein Sinusprofil handelt, die Unterschiede fallen hier deutlich geringer als zu anderen Streifen aus. Oberwellen die beim RS-Profil eher auftreten als beim Sinus werden, so wie auch Vibrationen aufgrund kürzerer Fugenabstände, durch die Frequenzgewichtung stark gedämpft. Der Effekt der Sinustiefe ist hier klar zu sehen (RS8, RS9, RS10 bzw. RS6).

Beim LKW fällt vor allem ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Messkampagnen auf, wobei die Vibrationen bei MS2 im Schnitt geringer ausfallen und auch stärker zu streuen scheinen. Auffällig ist auch, dass die Verteilungen der Beschleunigungen sehr asymmetrisch, d.h. schief sind (Median nicht in der Mitte der Inter-Quartil-Box).

Eine Ursache für diese Schiefe ist, dass die Grundvibration beim LKW vor allem in der zweiten Hälfte der zweiten Messung von der ersten Messung abweicht. In Messserie 1 zeigte sich durchgängig eine erhöhte Beschleunigung im Bereich bis zu 50 Hz.

In MS2 trat diese Vibration nicht immer auf. Abb. 7-56 zeigt ein Beispiel wo kurz vor Beginn der Teststrecke die Vibration schlagartig verschwindet und erst nach Ende der Strecke wieder beginnt. Aus der Darstellung scheint es, dass sich die Vibration im tieffrequenten Bereich in der Anfahrt zum Streifen verändert. Allerdings zeigt z.B. Abb. 7-57 ein anderes

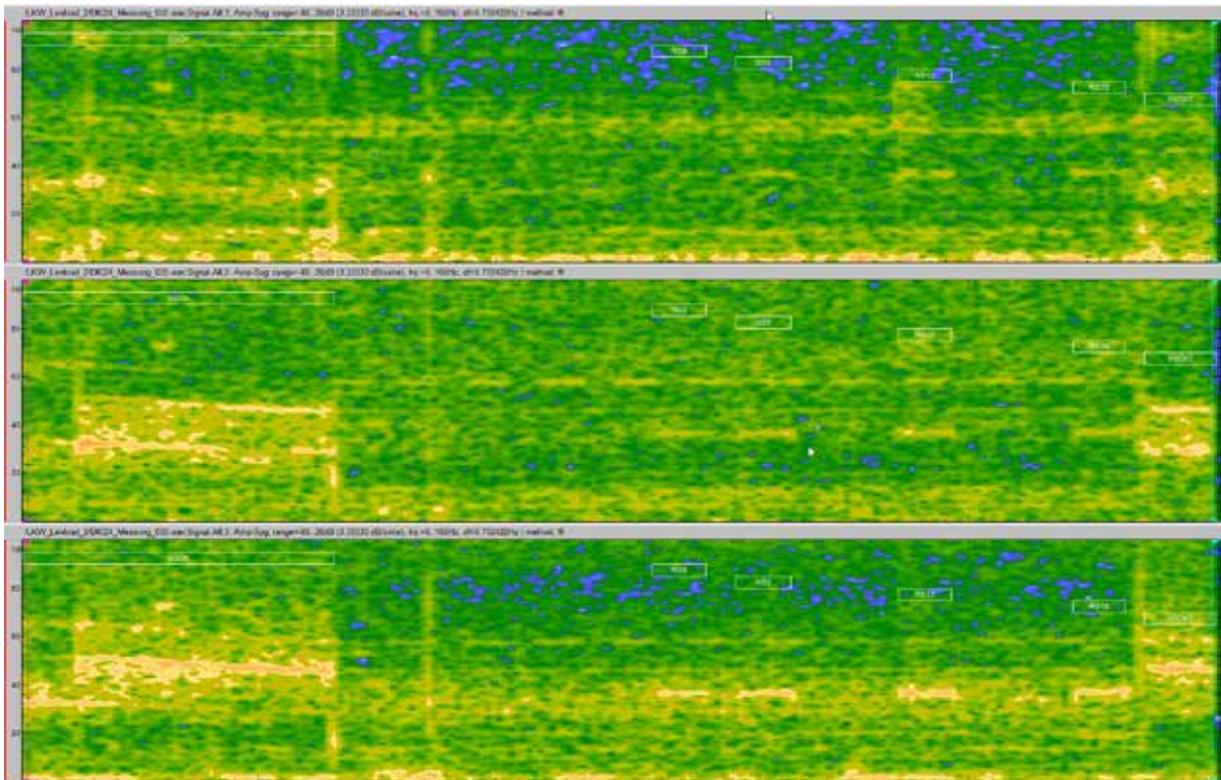


Abb. 7-56: Beispiel eines Beschleunigungssignals am Lenkrad im LKW (links/rechts, vor/zurück, vertikal). Die grauen Rechtecke zeigen die Zeitbereiche in denen Rumpelstreifen überfahren werden

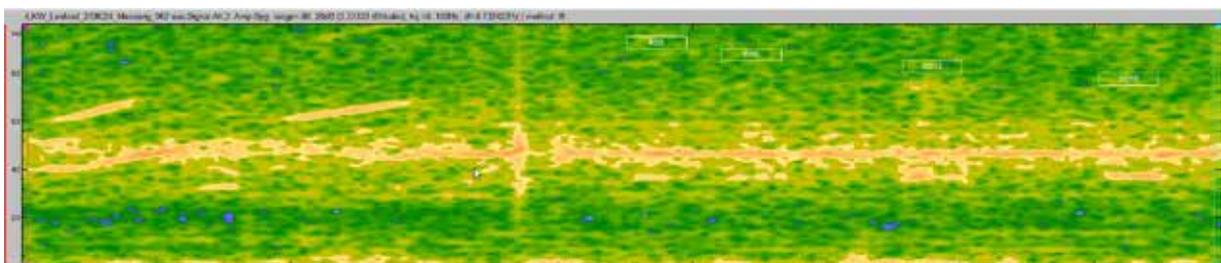


Abb. 7-57: Vertikales Beschleunigungssignal am Lenkrad im LKW (Vertikal) mit durchgehender Vibration

Bild, hier scheint es, dass die Komponente im Bereich von ca. 50 Hz (genauer 46 Hz) eine konstante Frequenz aufweist, während, verursacht durch die Beschleunigung des LKW, auch veränderliche Komponenten auftreten.

Die Unterschiede in der Vibration sind beträchtlich und bei etwa 29 Hz ist der Unterschied mit und ohne Vibration ca. 14 dB auf (Schwingungen in Fahrtrichtung, mittlere Grafik in Abb. 7-56). Bei 47 Hz tritt ebenfalls eine Abschwächung um ca. 14 dB auf (vertikal, untere Grafik in Abb. 7-56). Wenn nun das akustische Signal betrachtet wird, so ergibt sich kein offensichtlicher Unterschied, außer dass bei 29 Hz die Amplitude um ca. 4 dB absinkt. Auch

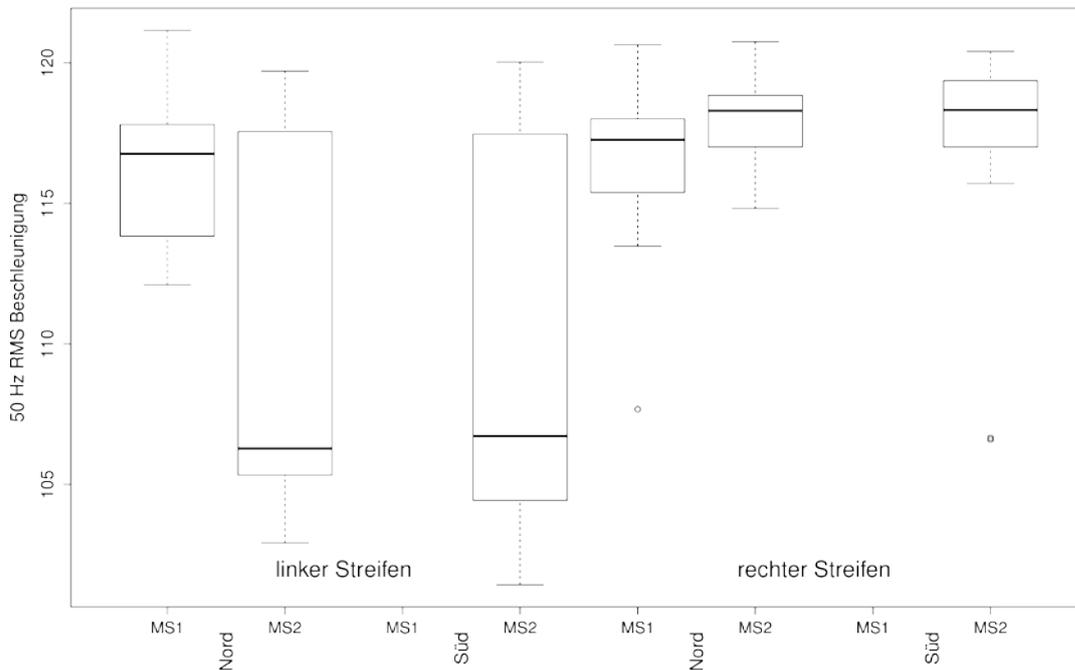


Abb. 7-58: RMS Beschleunigung bei 50 Hz als Funktion der Messserie, Teststrecke und Streifen

nach mehrmaligem Anhören mit Kopfhörern war hier kein Übergang zu hören, was wiederum gegen einen Schaltvorgang spricht (die Veränderung der Motordrehzahl sollte hörbar sein). Aus verschiedenen Publikationen wird ersichtlich, dass Resonanzen am Lenkrad und der Lenksäule bei den genannten Frequenzen auftreten können [30] [31], der Grund warum sie hier auftreten und wieder verschwinden ist aber nicht bekannt.

Abb. 7-58 zeigt das 50 Hz Terzband der vertikalen Beschleunigung am Lenkrad des LKW. Es ist klar dass in Messserie 2 bei den jeweils linken Streifen (300 mm neben dem Begrenzungsstreifen) zumindest die Hälfte der Überfahrten ohne diese Vibration unter 50 Hz stattgefunden haben. Bei den restlichen Messungen ist meist eine deutliche Komponente im 50 Hz-Band vorhanden. Diese Variabilität ist aber vermutlich nicht ein Effekt des Streifens, da die Schwingung auch dort sporadisch auftritt.

Aufgrund dieser Beobachtungen ist es sinnvoll, die Änderung der Beschleunigung bezogen auf die Fahrten ohne Rumpelstreifen zu betrachten.

Es wurde hier die Differenz pro Messfahrt berechnet, da gewisse Grundschwingungsanteile stark variierten. In Abb. 7-59 sieht man hier nochmals, dass die PKW-Fahrten sehr gut reproduzierbar sind. Die hohe Schwingungsamplitude bei RS12 ist der großen Frästiefe am Anfang geschuldet. Beim LKW sind noch immer Unterschiede zu beobachten, vor allem bei den beiden 600 mm Sinusstreifen ist die Beschleunigung deutlich reduziert. Bei RS6 könnte eine Ursache sein, dass in MS1 die Überfahrten eher rechts, bei MS2 eher links und bei beiden mit mäßig guter Überdeckung gefahren wurden.

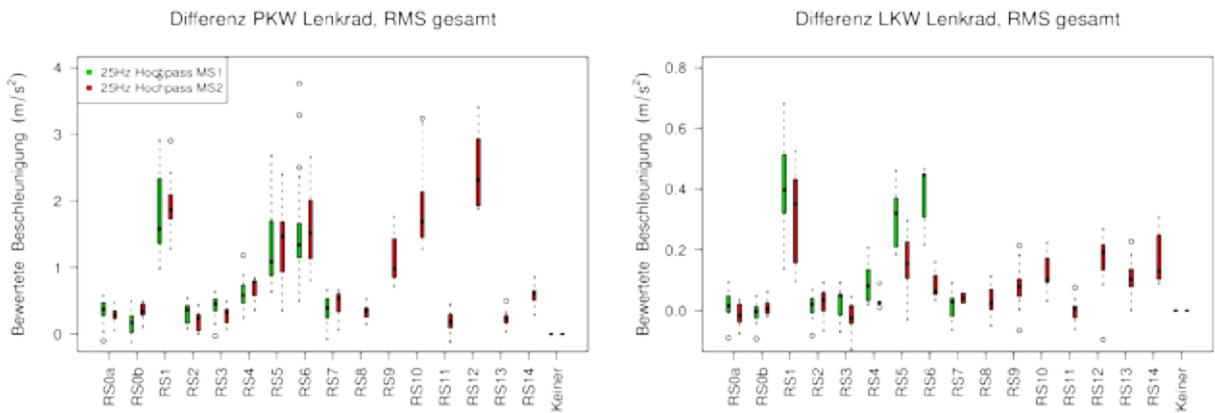


Abb. 7-59: Differenz der RMS-Lenkradbeschleunigung in Bezug auf Fahrten ohne Rumpelstreifen (Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt)

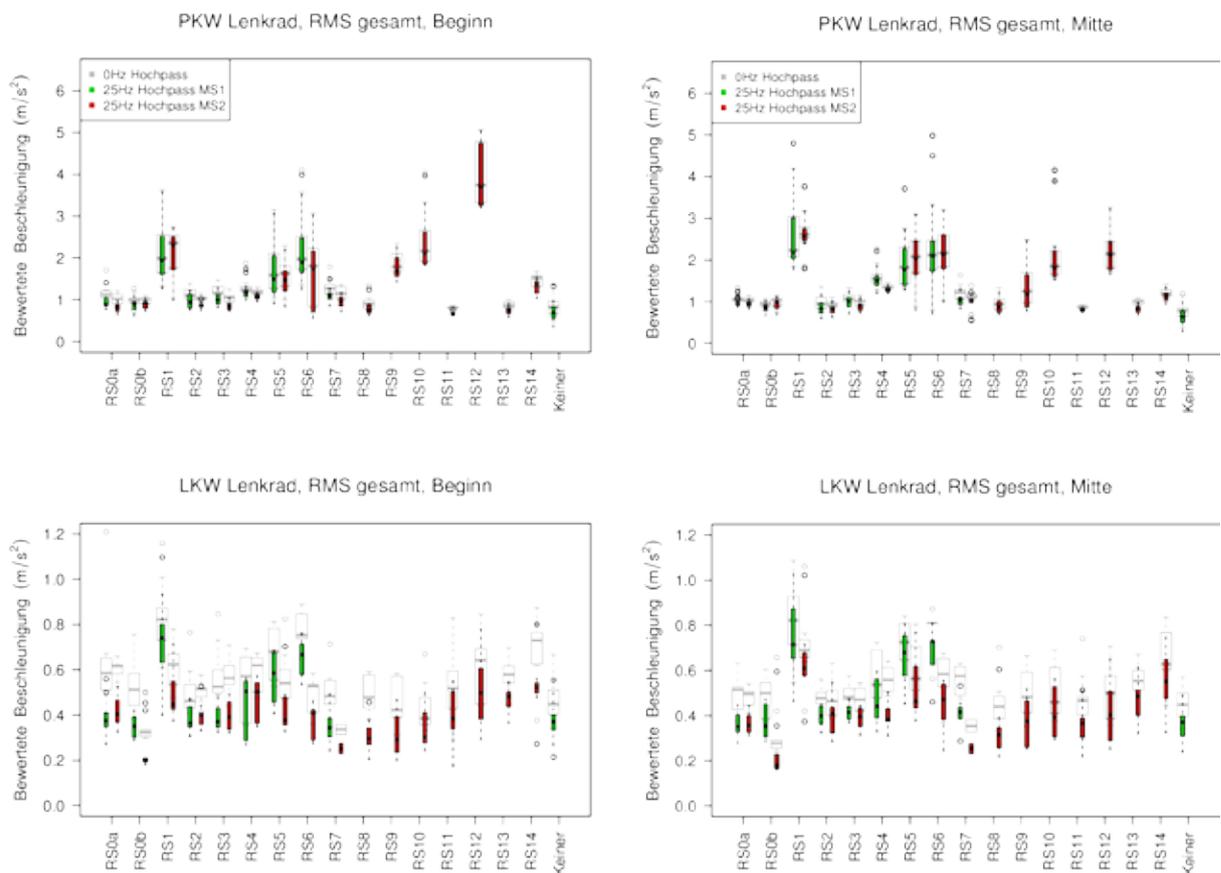


Abb. 7-60: Vergleich Lenkradbeschleunigung am Beginn und in der Mitte des Streifens (Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt)

Die tiefere Fräsung bei RS12 (Abb. 7-60) resultiert in einer um ca. $1,5 \text{ ms}^{-2}$ reduzierten Beschleunigung in der Mitte der Überfahrt im Vergleich zum Anfang, wodurch der RMS über die gesamte Überfahrt erhöht ist. Beim Lastwagen sind die Tendenzen ähnlich wenn auch

weniger ausgeprägt. Auch der Unterschied bei RS12 zwischen Anfang und Ende ist beim LKW deutlich geringer und im Bereich von unter $0,1\text{ms}^{-2}$.

Spektrale Anteile der Lenkradbeschleunigung

Bei den gewichteten Schwingungen nach ISO 5349-1 ist noch ein wichtiger Punkt anzumerken. Die Gewichtungskurve wurden aus Tests mit der flachen Hand auf einer vibrierenden Platte hergeleitet [32]. Andere Studien zeigen zum Teil beträchtliche Abweichungen wenn, wie beim Lenkrad, ein Griff umfasst wird. Hier ergeben sich vor allem bei niedrigen Amplituden starke Abweichungen die sowohl von der Schwingungsrichtung als auch von der Griffstärke abhängen [33] [34]. Diese Ergebnisse legen nahe, dass höhere

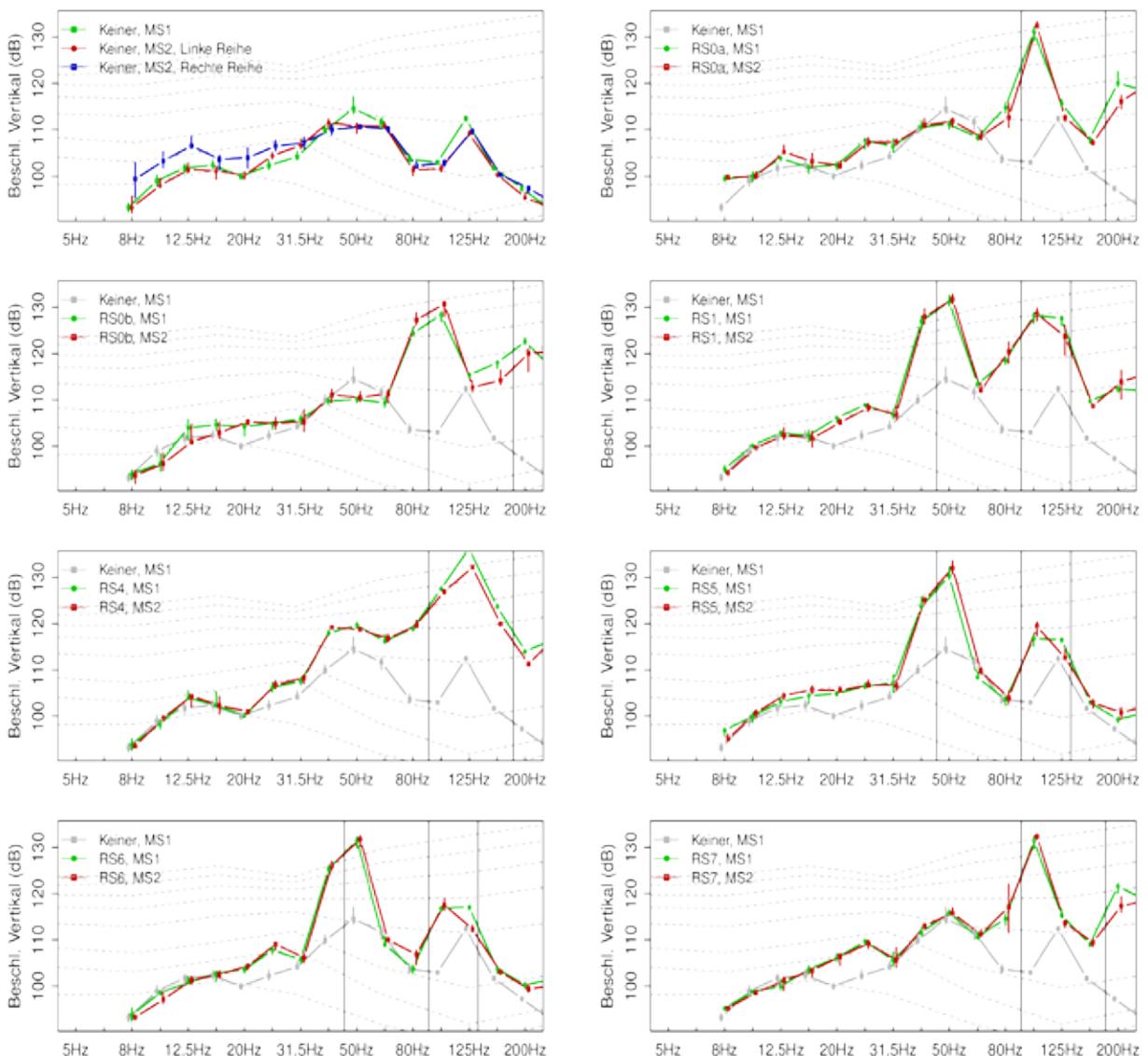


Abb. 7-61: Spektrale Verteilung der vertikalen Beschleunigung beim PKW, Testfeld 1

Frequenzen bei geringer Vibration relativ gesehen an Einfluss gewinnen. Dies ist ähnlich wie bei der Akustik, wo sich das Frequenzverhalten des subjektiven Eindrucks mit der Signalintensität stark verändert (vergleiche z.B. A versus C-Gewichtung beim hörbaren Schall).

Abb. 7-61 und Abb. 7-62 zeigen die spektrale Zusammensetzung der vertikalen Beschleunigungspegel der beiden Messkampagnen (120 dB entspricht $a = 1 \text{ m/s}^2$). Der Überdeckungsgrad wurde auf ± 3 eingeschränkt. Die grauen strichlierten Linien zeigen die in [34] hergeleiteten Kurven gleicher wahrgenommener Schwingungsintensität in einer einem PKW-Lenkrad nachempfundenen Situation bei vertikaler Schwingung. Die Griffstärke wurde als leicht angenommen Die unterste Linie stellt die Wahrnehmungsschwelle dar. Die Fehler-

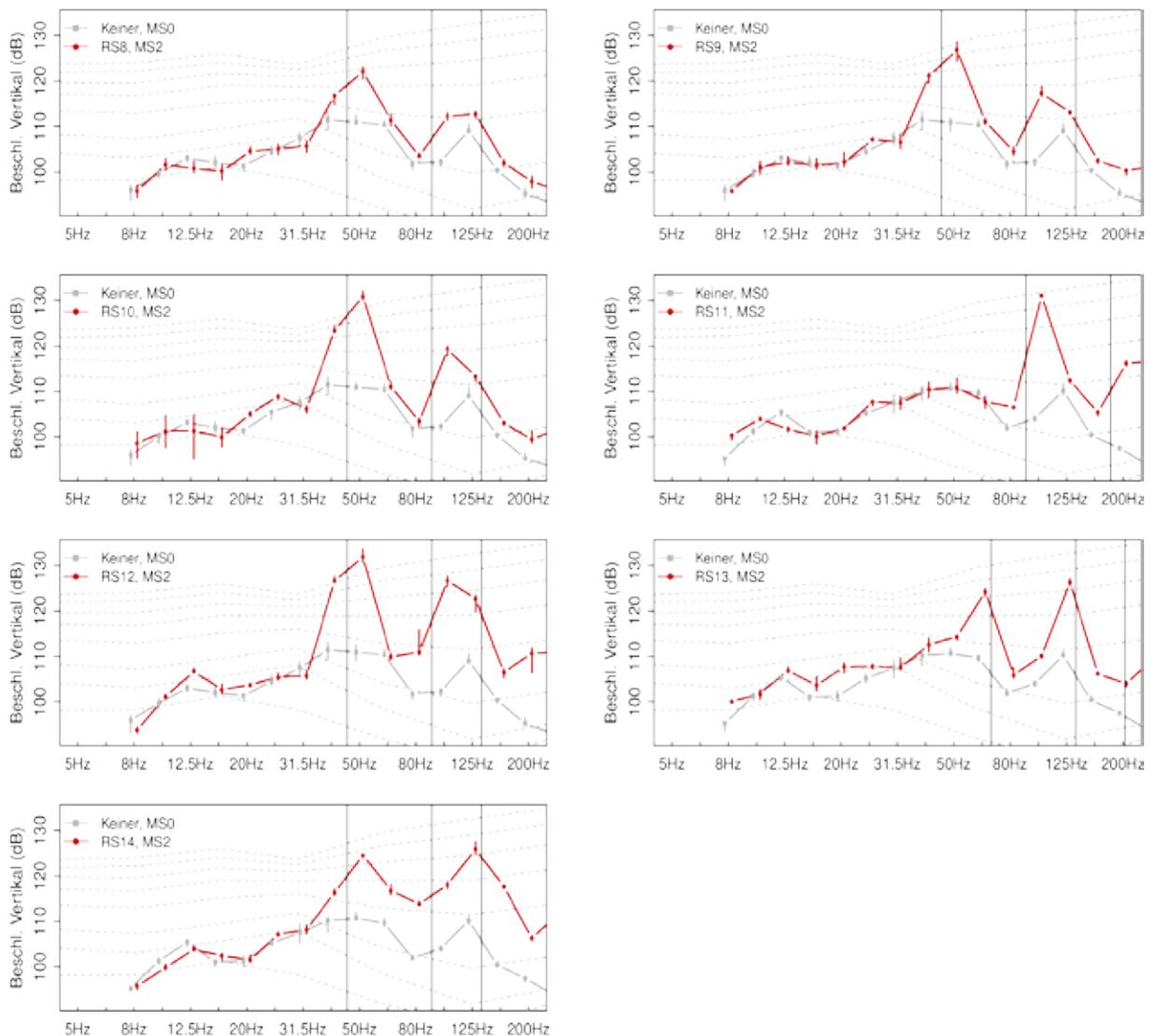


Abb. 7-62: Spektrale Verteilung der vertikalen Beschleunigung beim PKW, Testfeld 2

balken sind, wie schon bei Lästigkeit und Dringlichkeit, die 95% Konfidenzintervalle auf den Median berechnet mittels Bootstrapping. Die Beschleunigungsmessungen in Testfeld 1 sind gut reproduzierbar und es ergaben sich keine nennenswerten Unterschiede, außer dann, wenn kein Rumpelstreifen vorhanden ist. Hier sieht man sehr gut, dass die Grundschiwingung bei den 600 mm Streifen mit etwa 45 Hz bei RS und Sinusprofilen ähnlich ist und nur die harmonischen sich anders verhalten. Dies gilt auch für RS8 bis RS10, bei denen die Amplitude mit der Fugentiefe stetig ansteigt. RS12, über die gesamte Überfahrt gesehen, produziert hier eine ähnliche Amplitude.

Beim LKW (Abb. 7-63 und Abb. 7-64) zeigt sich die Vibration im Bereich der 50 Hz-Terz durch eine hohe Streuung der Daten der linken Streifenreihen. Wichtig ist, dass die obere

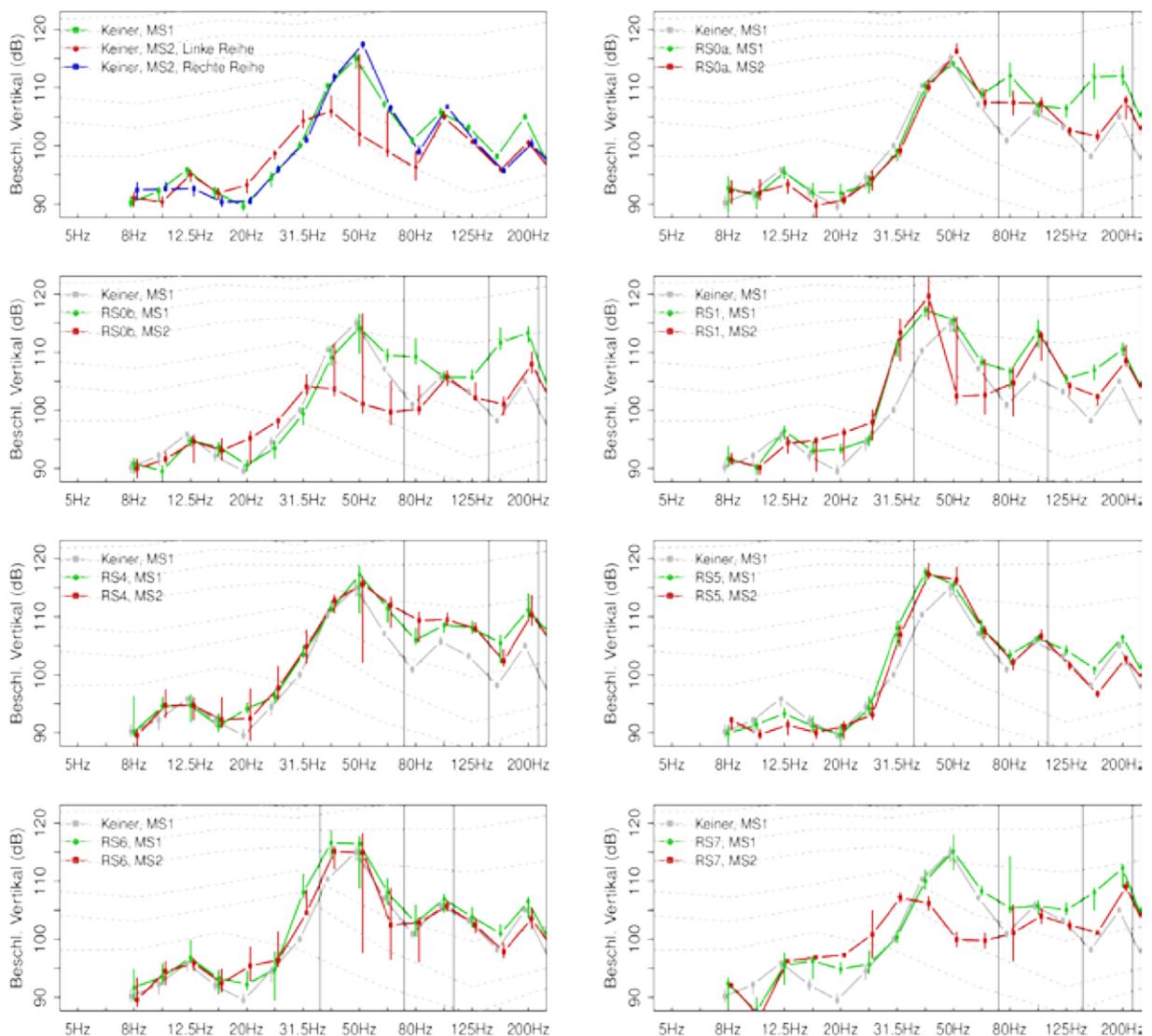


Abb. 7-63: Spektrale Verteilung der vertikalen Beschleunigung beim LKW, Testfeld 1

Grenze immer ca. dem Niveau der ersten Messserie entspricht. Dies lässt sich auch einfach zeigen, indem die Grundvibration ohne Rumpelstreifen der jeweiligen Überfahrt abgezogen wird. Daraus ergeben sich die Daten die in Abb. 7-65 und Abb. 7-66 dargestellt sind. Hieraus ist ersichtlich, dass die Vibration durch die Rumpelstreifen in MS1 und MS2 sehr ähnlich sind (zumindest unter 100 Hz). Die Komponente bei ca. 18 Hz z.B. bei RS10 ergibt sich durch die ungleiche Fugengeometrie der 2 Fugen die bei einer Umdrehung des Formrades gefräst werden.

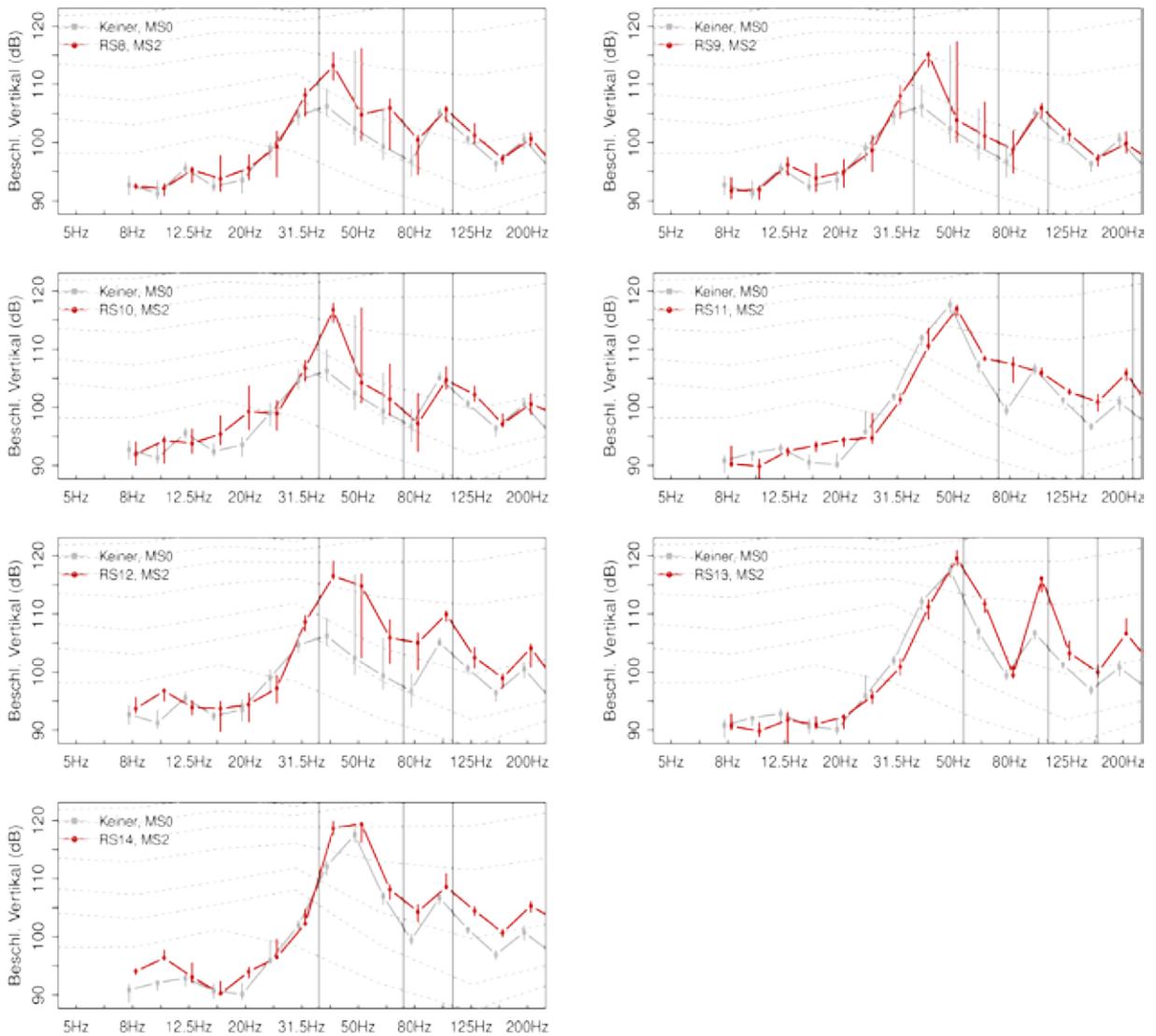


Abb. 7-64: Spektrale Verteilung der vertikalen Beschleunigung beim LKW, Testfeld 2



Abb. 7-65: Spektrale Effekte der vertikalen Beschleunigung beim LKW, Testfeld 1

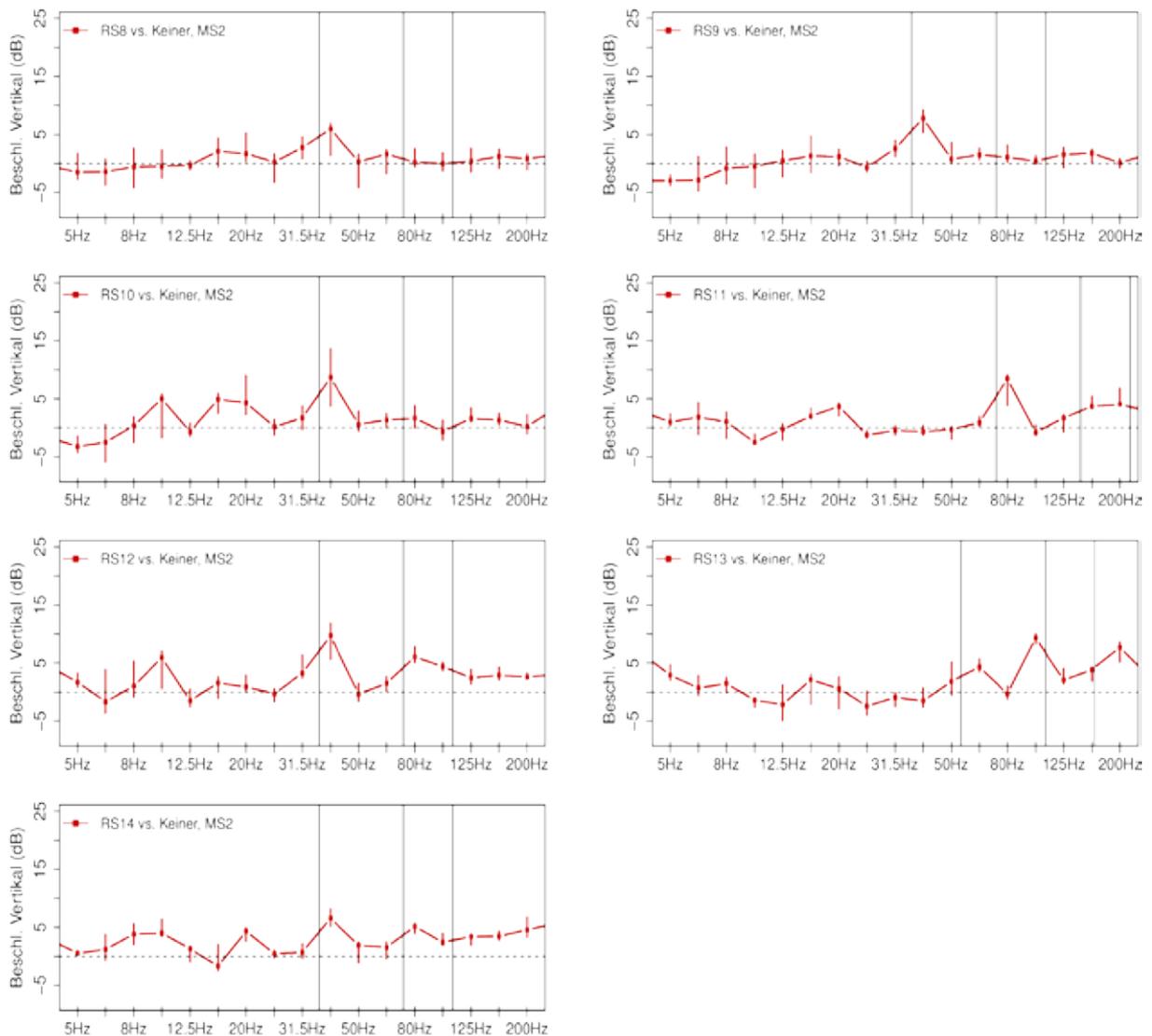


Abb. 7-66: Spektrale Effekte der vertikalen Beschleunigung beim LKW, Testfeld 2

Spektrale Anteile der Sitzbeschleunigung

Abgesehen von der Gewichtung nach ISO 2631 können auch bei der Sitzbeschleunigung die spektralen Anteile betrachtet werden. Für die vertikale Komponente gibt es aus verschiedenen Studien Daten für die Wahrnehmungsschwelle (siehe z.B. [35]).

Die Wahrnehmungsschwelle aus [35] ist als schwarze strichlierte Linie eingezeichnet. Das graue Rechteck zeigt den Bereich in dem sich der Großteile der Schwellwert befinden (eine Übersicht befindet sich in [35]).

Die nächsten vier Abbildungen zeigen diese Werte (berechnet aus der gesamten Überfahrt).

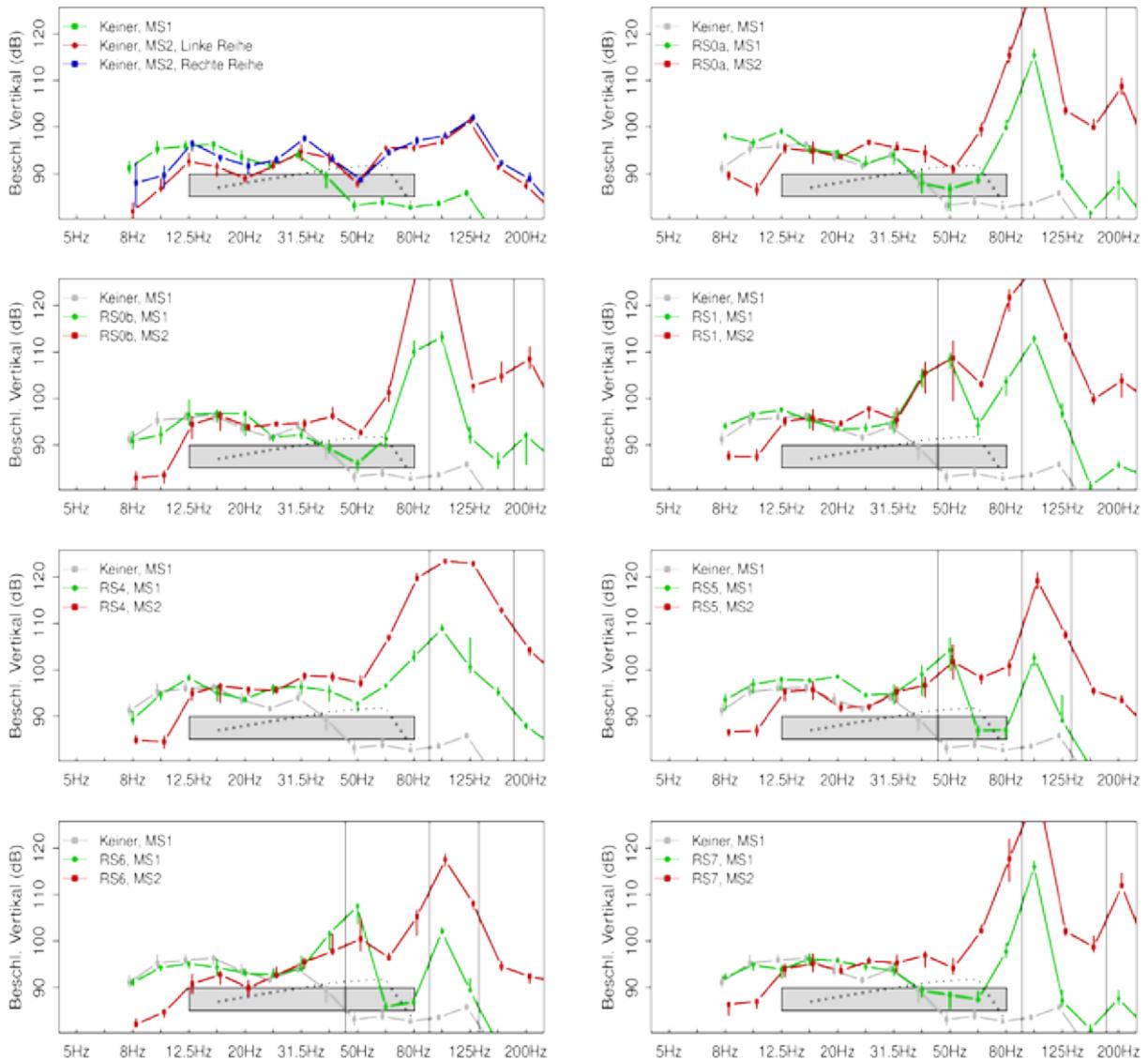


Abb. 7-67: Spektrale Effekte der vertikalen Sitzbeschleunigung beim PKW, Testfeld 1

Es zeigt sich beim PKW dass die Schwelle teils deutlich überschritten wird (Abb. 7-67 und Abb. 7-68) wogegen beim LKW (Abb. 7-69 und Abb. 7-70) im für die RS relevanten Frequenzbereich praktisch nie der Schwellwert überschritten wird.

Beim PKW zeigt sich aber ein Anstieg der vertikalen Sitzbeschleunigung von MS1 zu MS2, sodass diese teilweise schon ohne Rumpelstreifen über der Wahrnehmungsschwelle befindet, wodurch die Wahrnehmbarkeit der zusätzlichen Schwingung wieder eine Frage der Maskierungseffekte ist (siehe nächster Abschnitt). Bei kurzen Fugenabständen (300 mm) ist die Grundfrequenz außerdem schon außerhalb des Frequenzbereichs der Daten in [35].

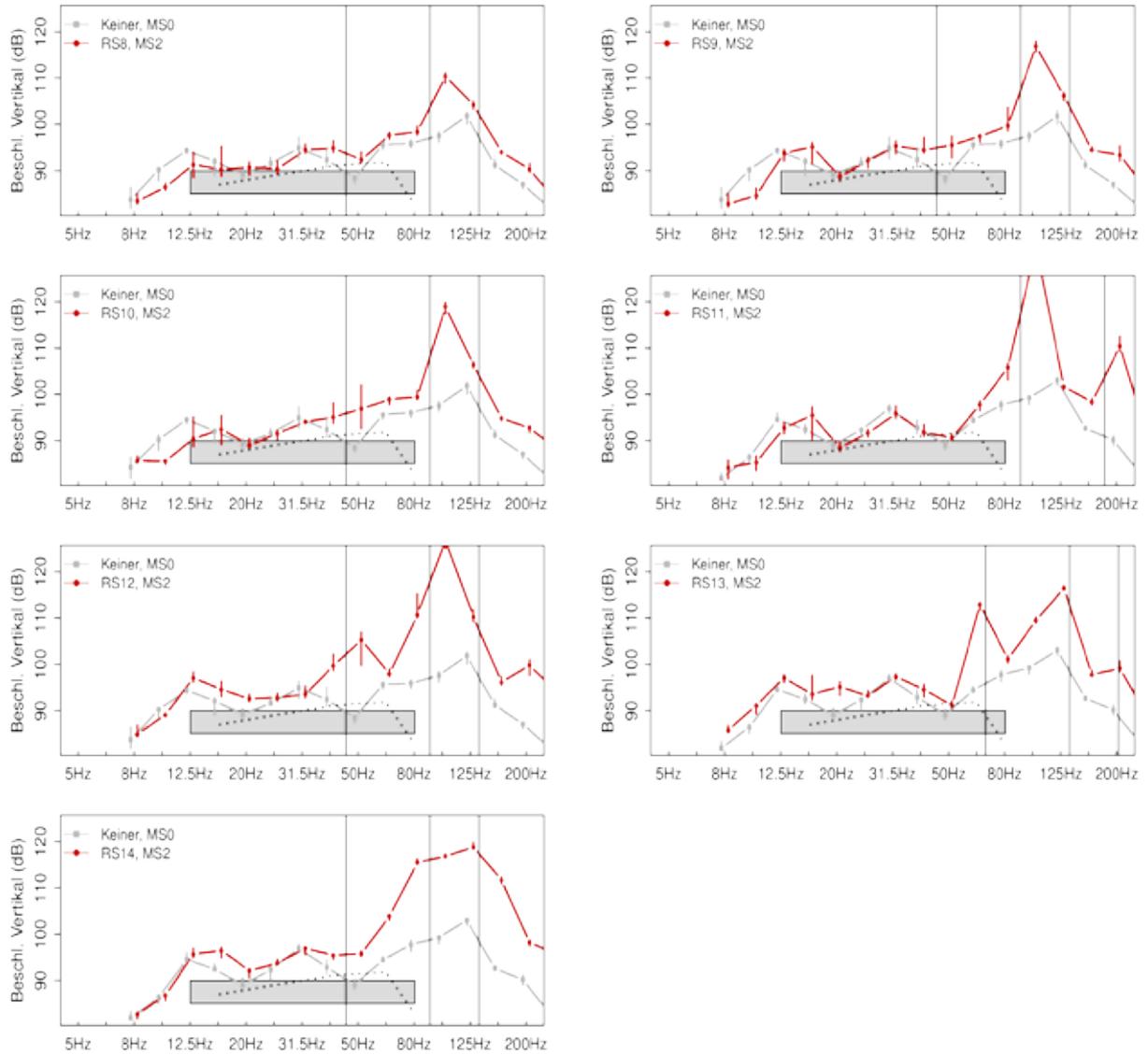


Abb. 7-68: Spektrale Effekte der vertikalen Sitzbeschleunigung beim PKW, Testfeld 2

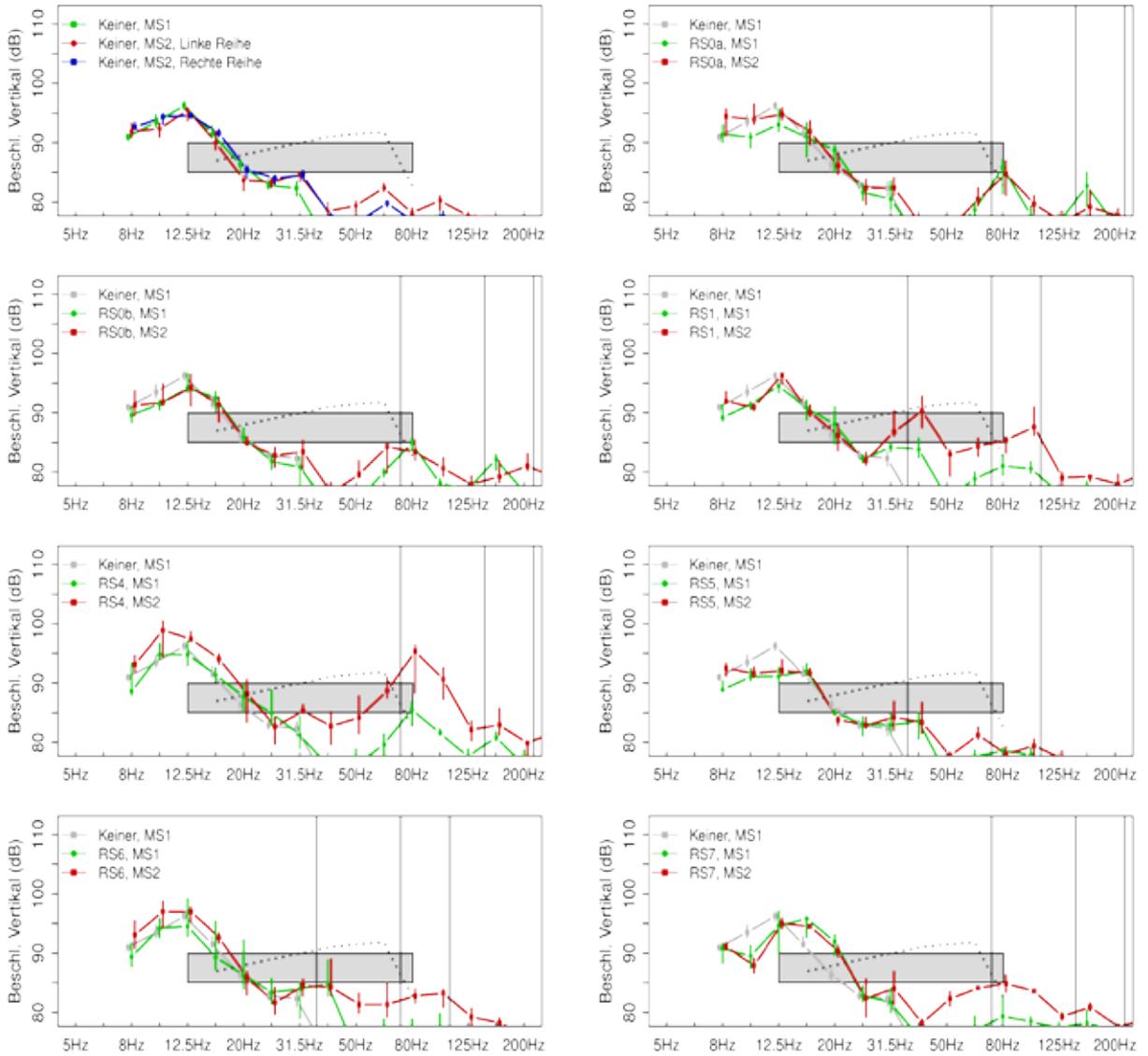


Abb. 7-69: Spektrale Effekte der vertikalen Sitzbeschleunigung beim LKW, Testfeld 1

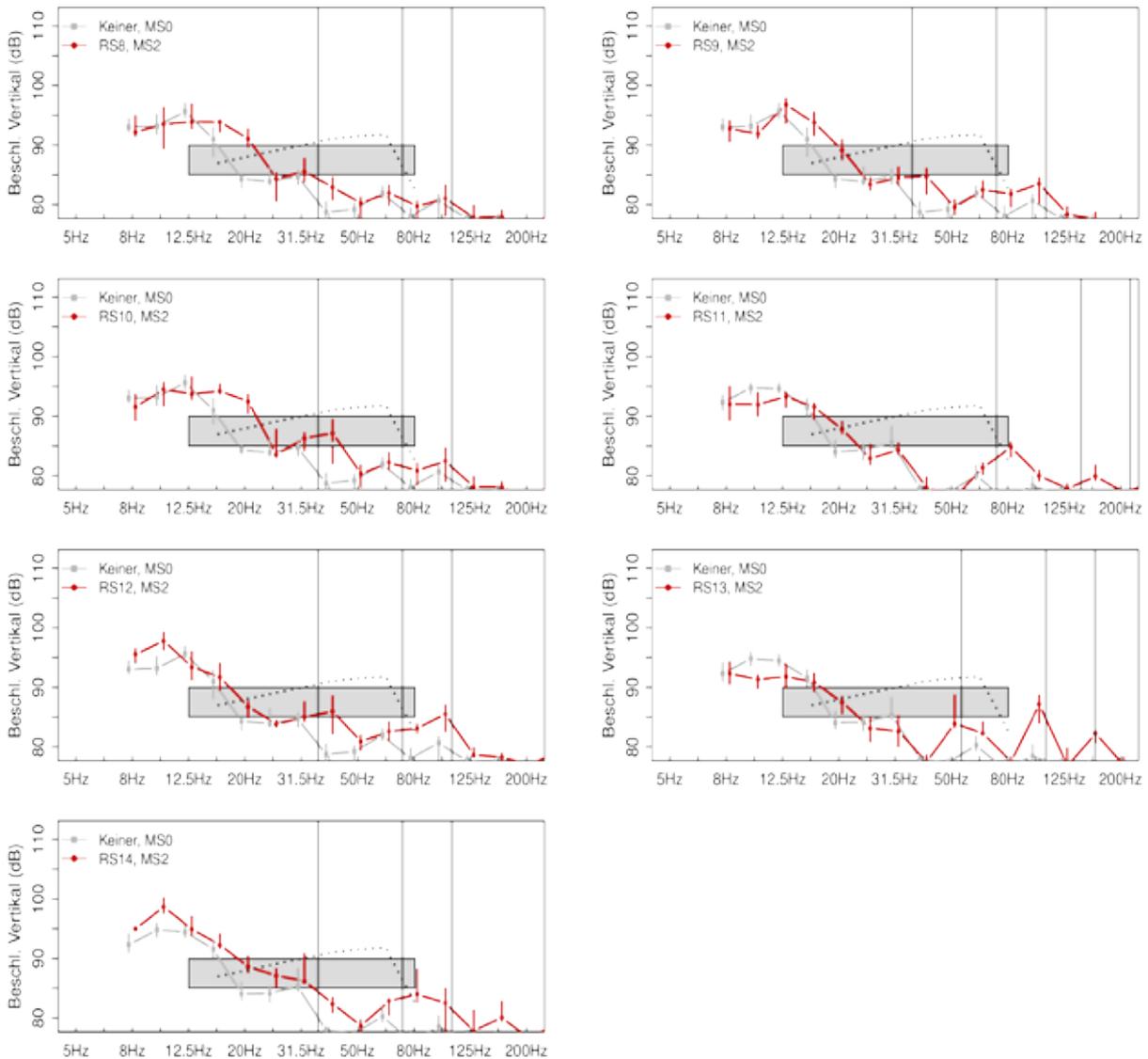


Abb. 7-70: Spektrale Effekte der vertikalen Sitzbeschleunigung beim LKW, Testfeld 2

Effekt der Fugengeometrie und des Fugenabstandes

Abb. 7-71 stellt die Sitzbeschleunigung (25 Hz Hochpassfilter) als Funktion der Rumpelstreifenparameter dar. Da die Grundschiwingung in MS1 und MS2 sehr unterschiedlich ist, sind hier nur die Daten von MS2 dargestellt, da hier alle RS gleichzeitig gemessen wurden. Hier ist gut zu sehen, dass beim LKW die links/rechts-Richtung dominant ist. Es scheint auch ein Anstieg der Sitzvibration für größere Fugenabstände und bei 600 mm sinusförmigen RS auch für die Fugentiefe vorhanden zu sein, insgesamt scheinen die Unterschiede aber eher gering, wobei hier keine Aussage über die Wahrnehmbarkeit getroffen werden kann.

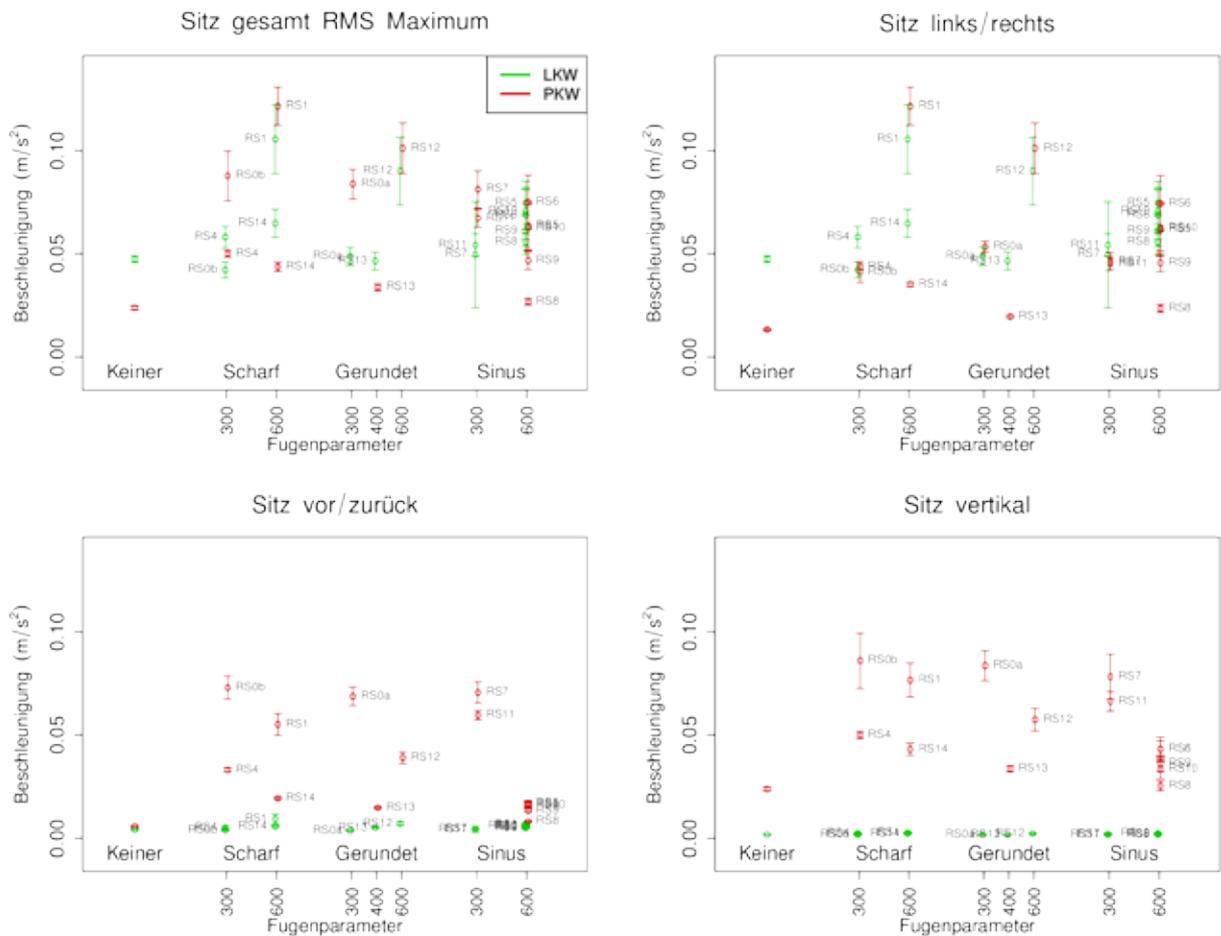


Abb. 7-71: Bewertete Beschleunigung am Sitz als Funktion der Fugengeometrie, gesamte Überfahrt (Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt). Es werden nur Ergebnisse aus Messserie 2 dargestellt

Abb. 7-72 zeigt, in der jeweiligen Richtung, den Unterschied zwischen der Wahrnehmungsschwelle und der gemessenen Beschleunigung im für die Grundfrequenz (z.B. 92 Hz bei PKW und 300 mm) relevanten Terzband in dB. Da die Grundfrequenz auch Erhöhungen in zwei Terzen verursachen kann, wurde aus den beiden nächstgelegenen Terzbändern jene ausgewählt, in der der Zuwachs am höchsten war. Bei den Zufallsstreifen wurde der mittlere Abstand verwendet. Hier ist klar zu sehen, dass die Gesamtvibration über der Wahrnehmungsschwelle liegt, und dass der Unterschied Gesamtvibration-Schwelle teilweise nur wenig vom Fugenabstand abhängt.

Relevant ist aber, ob Änderungen im Vergleich zur Grundvibration wahrgenommen werden können.

Abb. 7-73 zeigt ähnlich wie Abb. 7-72 zuvor, den Zuwachs im relevanten Terzband, allerdings bezogen auf die Grundvibration im Fahrzeug. Es zeigt sich in allen Achsen und auch größtenteils beim LKW ein mittlerer Anstieg von mindestens 5 dB, d.h. dass die (außer

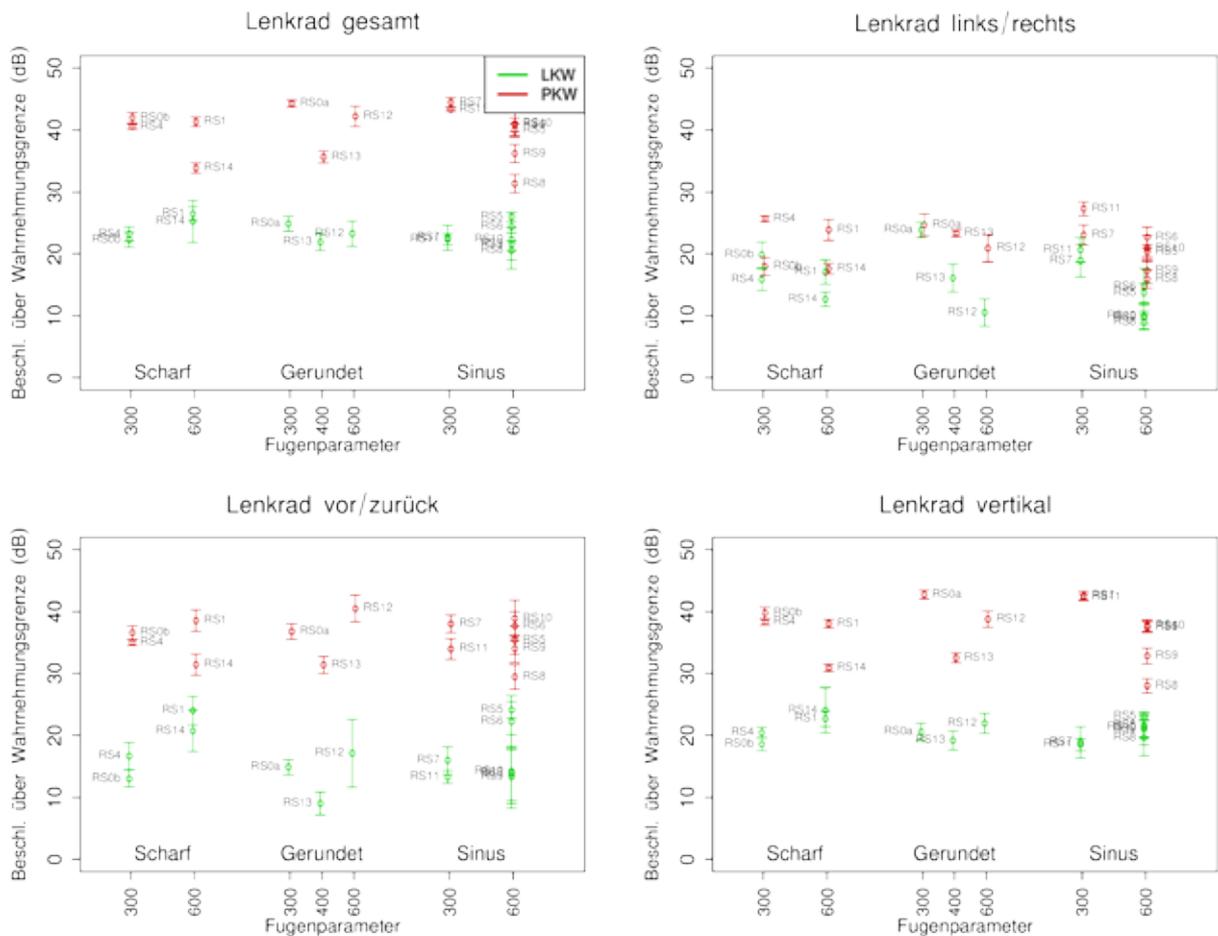


Abb. 7-72: Unterschied zwischen gemessener Lenkradbeschleunigung und der Wahrnehmungsschwelle im für den jeweiligen Rumpelstreifen relevanten Terzband (Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt). Für die vertikale Beschleunigung und die RMS-Werte wurde die Schwelle aus [34] genommen, für links/rechts und vor/zurück wurden die Werte aus [33] verwendet in dB. Es werden die Daten beider Messserien gemeinsam gezeigt

bei RS4 und RS14) schmalbandige Beschleunigung etwa 3 dB über dem Hintergrund liegt (bei gleicher Amplitude wären 3 dB Anstieg zu erwarten).

Die Frage, ob vor allem geringe Erhöhungen ausreichen, um wahrgenommen zu werden, lässt sich nicht direkt beantworten. Die (inkohärente) Grundvibration fungiert hier als sogenannter Masker und erhöht damit die Wahrnehmungsschwelle. Es gibt Studien zu diesem Phänomen, allerdings wird hier meist schmalbandiges Rauschen (z.B. eine Terz breit [36]) verwendet. Von dieser Prämisse ausgehend, produziert das sogenannte In-Channel-Masking, d.h. das Signal und der Masker liegen im selben Frequenzbereich, eine 1:1 Erhöhung der Schwelle. Liegt daher das Signal über dem Masker sollte es wahrnehmbar sein. Da aber auch aus anderen Frequenzbändern Maskierung erfolgen kann, ist unklar ob die Vibration ausreicht.

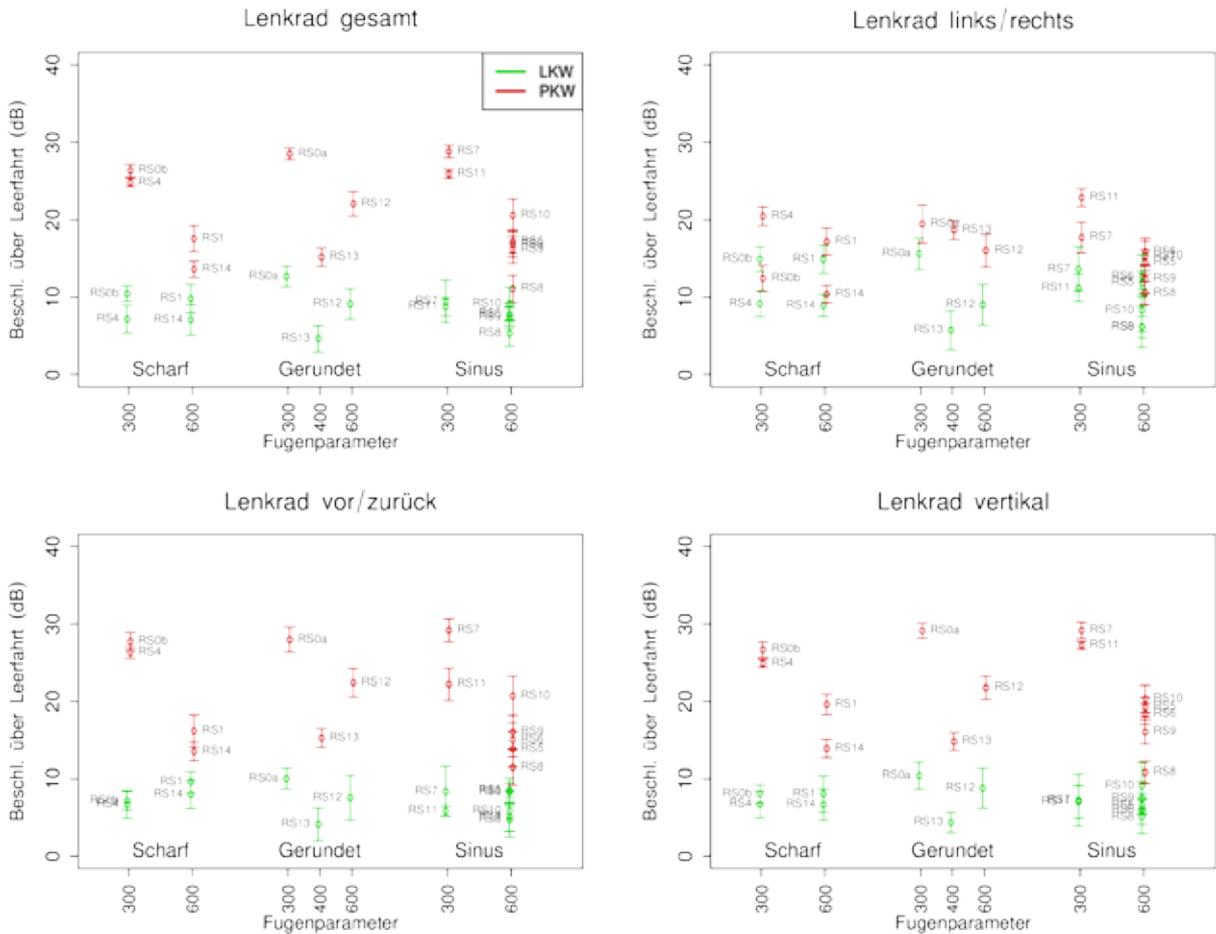


Abb. 7-73: Unterschied in der Beschleunigung und der Grundvibration in dB im für den jeweiligen Rumpelstreifen relevanten Terzband (Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt). Die Grundvibration wurde vor der jeweiligen Rumpelstreifenüberfahrt bestimmt. Es werden die Daten beider Messserien gemeinsam gezeigt

7.7. Fahrerbefragung

Auf Ansuchen der ASFINAG wurde auch eine Fahrerbefragung durchgeführt. Es wurde die wahrgenommene Dringlichkeit untersucht (Fragebogen, Anleitung inkl. Einverständniserklärung siehe Anhang D). Die Fahrer wurden in der Dienststelle mündlich und schriftlich unterwiesen. Es galt, nach dem Überfahren der Streifen eine Beurteilung auf einer Skala von 1 (gar nicht dringlich) bis 5 (sehr dringlich) abzugeben.

Die Befragung fand im Regelbetrieb statt. Da diese Überfahrten im Zuge der normalen Arbeit stattfanden, wurden nur wenige Überfahrten durchgeführt bzw. Fragebögen ausgefüllt. Weiters gab es Probleme wegen der Anonymisierung, da die Kennung um die Fragebögen zuzuordnen zu können meist nicht ausgefüllt wurde.

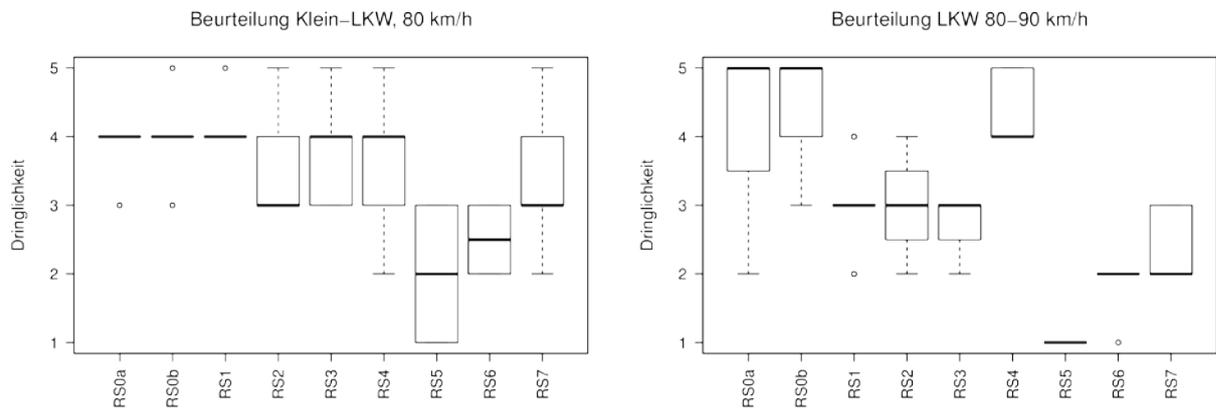


Abb. 7-74: Boxplot der Urteile über die ausgefüllten Fragebögen für Klein-LKW und LKW

Die Überfahrten wurden jeweils für einen Streifen durchgeführt, d.h. entweder wurden RS0b, RS1, RS4, RS6 und RS7 in einem Durchgang überfahren, oder RS0a, RS3, RS2 und RS5. Für den LKW wurden insgesamt 5 Überfahrten des linken Streifens (RS0b, 4 mit 80 km/h, eine mit 90 km/h) und 3 Überfahrten des rechten Streifens (RS0a, alle mit 80 km/h) durchgeführt.

Für den Klein-LKW wurden insgesamt 7 Überfahrten des linken Streifens (RS0b, 6 mit 80 km/h, eine mit 60 km/h) und 6 Überfahrten des rechten Streifens (RS0a, 5 mit 80 km/h, eine mit 60 km/h) durchgeführt.

Beim PKW gab es nur 3 Überfahrten, von einer Analyse wurde daher abgesehen.

Aufgrund der teils fehlenden Zuordnung zum Fahrer werden die Ergebnisse aller Fragebögen dargestellt (eigentlich müssten die Urteile des gleichen Fahrers gemittelt werden, da diese voneinander abhängige Beobachtungen darstellen). Die Fahrten mit 60 km/h wurden aufgrund der großen Abweichung bei der Geschwindigkeit herausgenommen. Dieses Ergebnis kann nur als ein sehr grober Trend aufgefasst werden. Prinzipiell sind RS0a und RS0b im Schnitt die besten Streifen, RS1 wird beim LKW als etwas weniger dringlich empfunden. RS4 liegt dazwischen. Die Kegelstreifen RS2 und RS3 sind ähnlich wie RS1 und RS7 fällt beim LKW noch einmal etwas ab. Die 600 mm Sinusstreifen bewegen sich in den untersten beiden Stufen, wobei RS5 (gewölbte Trommel) etwas schlechter wahrgenommen wurde.

7.8. Gemeinsame Betrachtung

Bisher wurden die Ergebnisse der verschiedenen Messungen und Wahrnehmungstests für sich dargestellt und analysiert. Wichtig ist aber, die Daten miteinander in Verbindung zu setzen um ein möglichst vollständiges Bild zu erhalten. Aus dieser Gegenüberstellung

erfolgte auch die Auswahl der Streifen die im Testfeld 2 gefräst wurden. Die Überlegungen die zur Auswahl der Streifen führten, sind an den dafür relevanten Stellen dieses Abschnitts im Detail ausgeführt.

Akustik außen vs. innen

Abb. 7-75 zeigt eine Gegenüberstellung der akustischen Eigenschaften der Innen- und Außenmessungen. Die Fehlerbalken zeigen das 95 %-Konfidenzintervall der Außen- und Innenpegel (aus der t-Verteilung der jeweiligen Bedingung). Die Konfidenzintervalle dienen nur der Orientierung, wie zuverlässig der Mittelwert geschätzt wurde. Innen- und Außenmessungen wurden getrennt durchgeführt, daher basiert die Berechnung der Mittelwerte und Intervalle auf unterschiedlichen Daten (keine bivariaten Verteilungen). Die Pegelgrößen zeigen deutliche Korrelationen zwischen den Mittelwerten innen und außen (nach Fahrzeug getrennt in der Grafik links oben), d.h. im Großen und Ganzen bedeutet das:

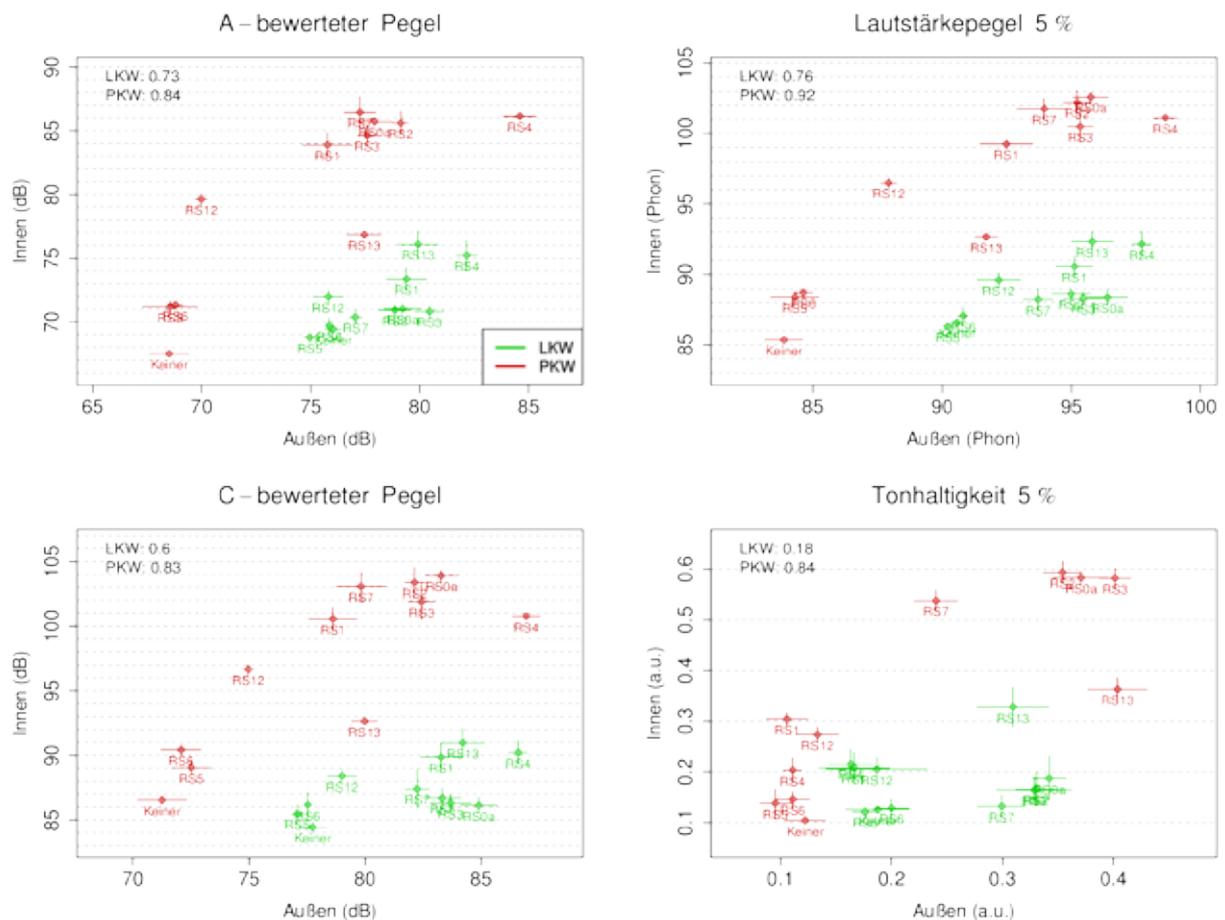


Abb. 7-75: Gegenüberstellung verschiedener akustischer Größen für Innen- und Außenmessungen (Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt, innen nur Messserie 2) inklusive der fahrzeugspezifischen Korrelation. Außen wurden die gesamten Überfahrten verwendet, innen das mittlere 0,5 s lange Segment

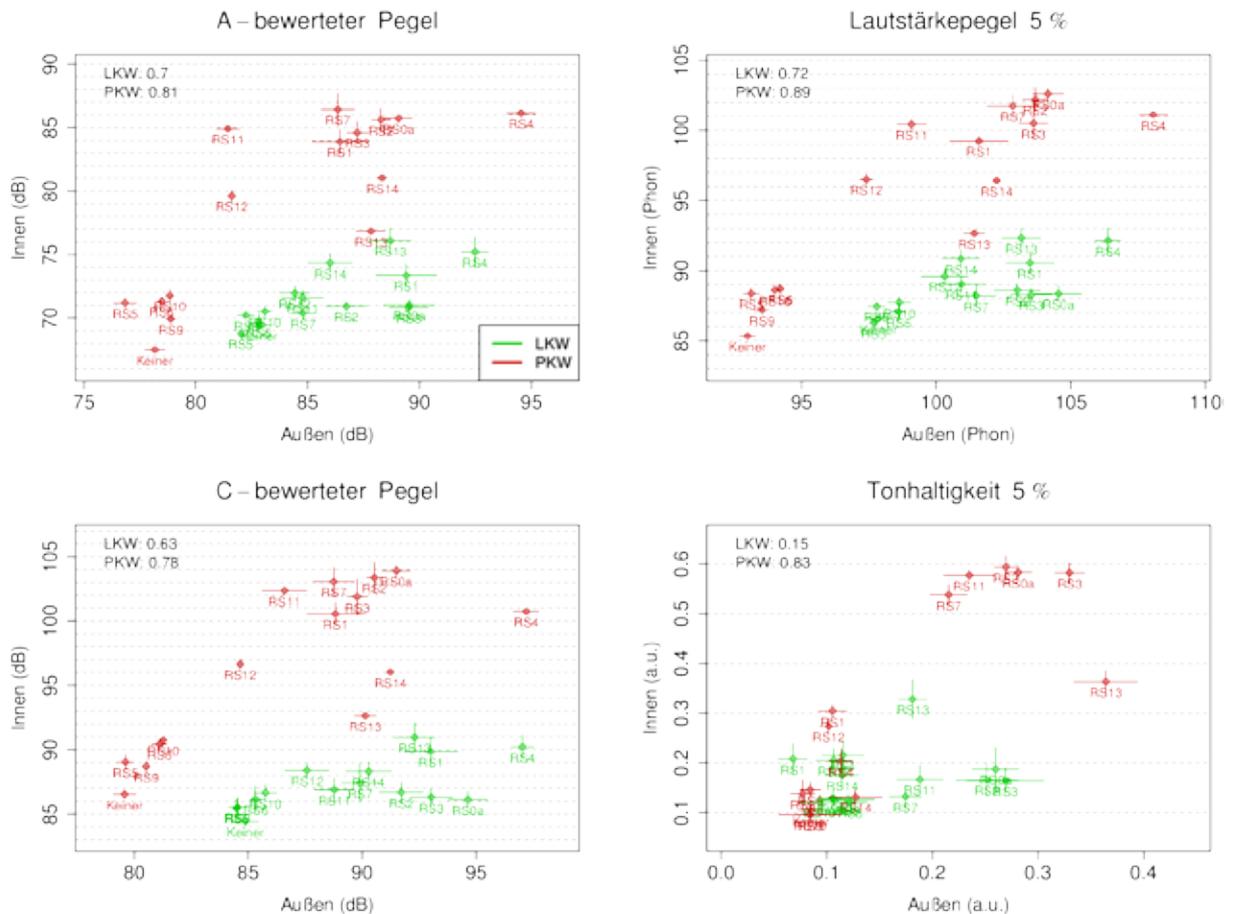


Abb. 7-76: Gegenüberstellung verschiedener akustischer Größen Innen- und Außenmessungen (Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt, 7,5 m, innen nur Messserie 2)

je höher der Schalldruckpegel (oder die Lautheit) innen ist, desto lauter ist die Überfahrt außen. Der Zufallsstreifen weicht hier vor allem beim PKW ab, da er außen deutlich lauter ist aber nicht innen. Ein weiterer Streifen der hier bei PKW aus der Reihe fällt ist der 400 mm Streifen (RS13). Dieser ist außen vergleichsweise laut (im Bereich der 300 mm Streifen, innen allerdings deutlich leiser, also genau das Gegenteil von dem was erwünscht wäre. Beim LKW liegt RS13 was die Pegelmaße betrifft, eher im Trend.

Bei Tonhaltigkeit sieht man, dass beim PKW ein relativ deutlicher Zusammenhang zwischen innen und außen besteht wogegen beim LKW Unterschiede in der Tonhaltigkeit innen eher gering sind. Hier fällt wieder RS13 auf durch hohe Tonhaltigkeit außen aber nicht innen beim PKW und genau umgekehrt beim LKW.

Abb. 7-76 zeigt wie bereits Abb. 7-75 eine Gegenüberstellung verschiedener Parameter des Innen- und Außensignals, allerdings diesmal für die Emissionsmessungen in 7,5 m Entfernung. Die 4 Rumpelstreifen die nur in dieser Entfernung gemessen wurden sind RS9

und RS10 (600 mm Sinus mit nominell 7 und 10 mm, tatsächlich aber 5 und 7 mm tief), RS11 (300 mm Sinus, 7 mm) und RS14 (600 mm Zufall, 7 mm). Beim LKW passen auch diese 4 Streifen in das generelle Muster. Beim PKW zeigt RS14 eher eine Tendenz wie bei RS13 und RS4, also geringere Innenpegel bei mit anderen Streifen vergleichbaren Außenpegeln. Bei RS11, andererseits, ist zumindest beim A-Pegel eine Tendenz in die andere Richtung vorhanden, bei C-Pegel und Lautstärkepegel nähert sich dieser wieder an die akustischen Eigenschaften der anderen Streifen aus dem Testfeld 1 an.

Wahrnehmung außen vs. innen

Die bisherige Betrachtung basierte auf rein (psycho)akustischen Maßen. Die Ergebnisse aus den Wahrnehmungstests hängen zwar, wie bereits gezeigt, vor allem mit dem Lautstärkepegel eng zusammen, trotzdem ist es wichtig, diese Ergebnisse direkt zu vergleichen.

In diesem Abschnitt werden einerseits die Zusammenhänge zwischen Innen- und Außenbereich dargestellt, andererseits aber auch erklärt, wie die Auswahl der Streifen auf Teststrecke 2 durchgeführt wurde. Es werden hier auch immer wieder Daten der synthetisierten Überfahrten gezeigt, da diese eine wichtige Rolle in der Auswahl spielten und auch die allgemeinen Zusammenhänge sehr gut darstellen.

Abb. 7-77 und Abb. 7-78 zeigen die Dringlichkeit des Streifens als Funktion der logarithmischen Lästigkeit, getrennt nach Fahrzeugkategorie bezogen auf den jeweiligen synthetisierten Referenzstreifen RS0a (die synthetische Variante wurde verwendet, um mit der Gegenüberstellung Reaktionszeit-Lästigkeit einheitlich zu sein). Die Ellipsen zeigen die bivariaten Konfidenzintervalle der Differenz zum Referenzstreifen pro Bedingung über die Probanden (auch hier dienen diese zur Illustration der Zuverlässigkeit der Mittelwertschätzung). In dieser Darstellung wäre ein besserer Rumpelstreifen ein Streifen im linken, oberen Quadranten (Lästigkeit gesenkt und Dringlichkeit erhöht). Hier zeigte sich der R600 (600 mm mit 7 mm Fuge) durch eine niedrigere Lästigkeit mit beim LKW im Vergleich zu anderen Streifen geringfügig (weniger als eine Stufe) verringerter Dringlichkeit als möglicher Kandidat. Auch S400 (Sinus mit 400 mm) und Z600 zeigen verringerte Lästigkeit. Verglichen mit Abb. 7-79 wo alle Daten aus gemessenen Segmenten dargestellt sind wird klar, dass die Wahrnehmung für die meisten Rumpelstreifenvarianten (gemessen und synthetisiert) allerdings nur in einem vergleichsweise geringen Bereich variiert wird und eine Reduktion der Lästigkeit mit einer Reduktion der Dringlichkeit einhergeht.

Aus der Analyse der Lästigkeit und Dringlichkeit zeigten sich mit R600, S400 und Z600 drei mögliche RS-Varianten.

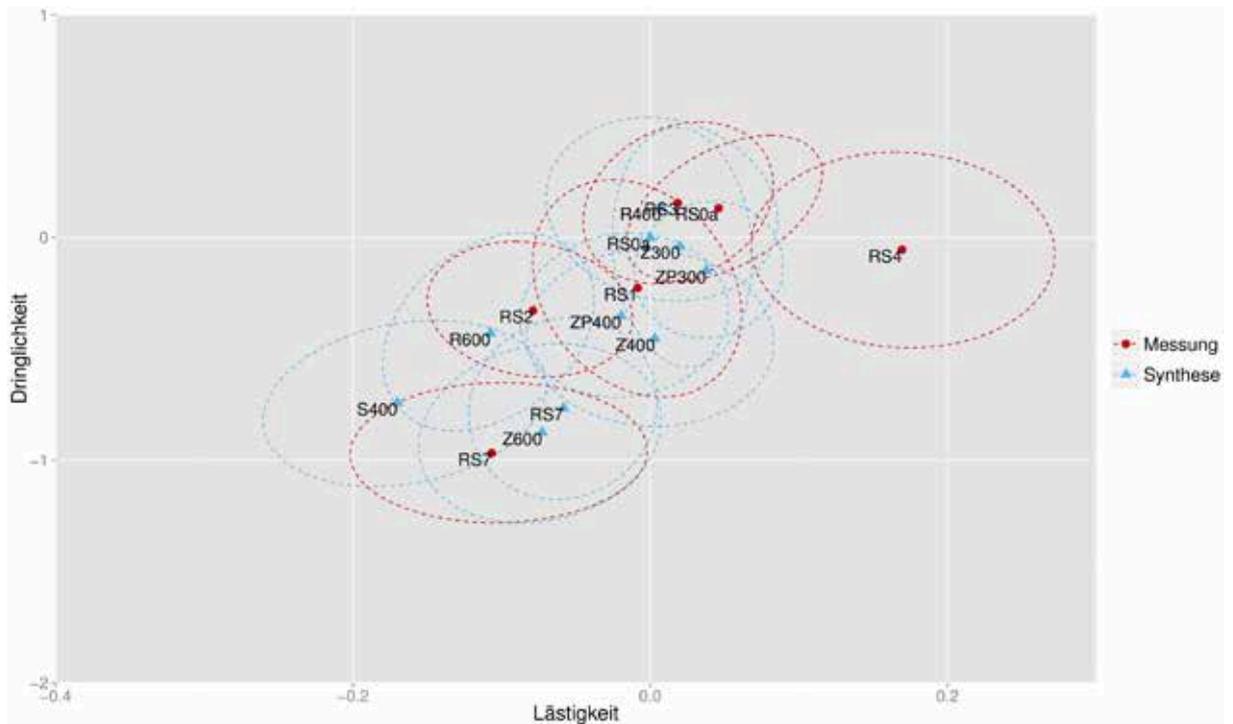


Abb. 7-77: Dringlichkeit vs. Lästigkeit beim LKW bezogen auf den synthetisierten Referenzstreifen RS0a

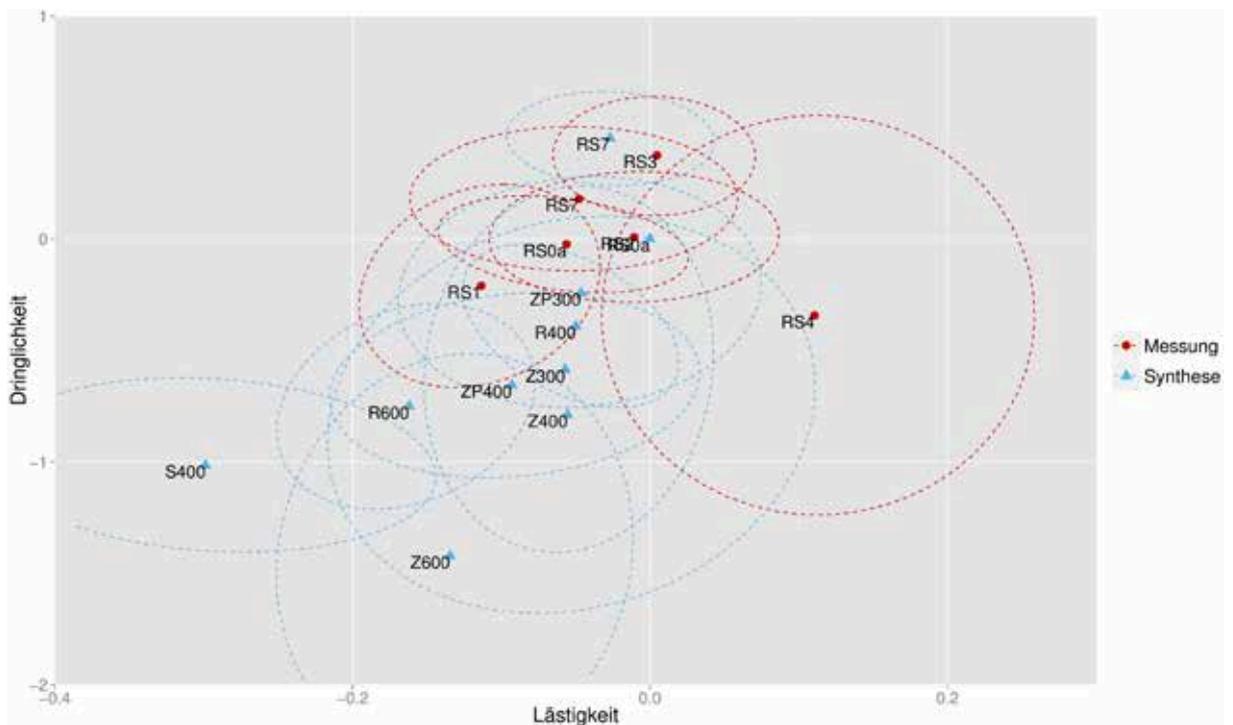


Abb. 7-78: Dringlichkeit vs. Lästigkeit beim PKW bezogen auf den synthetisierten Referenzstreifen RS0a

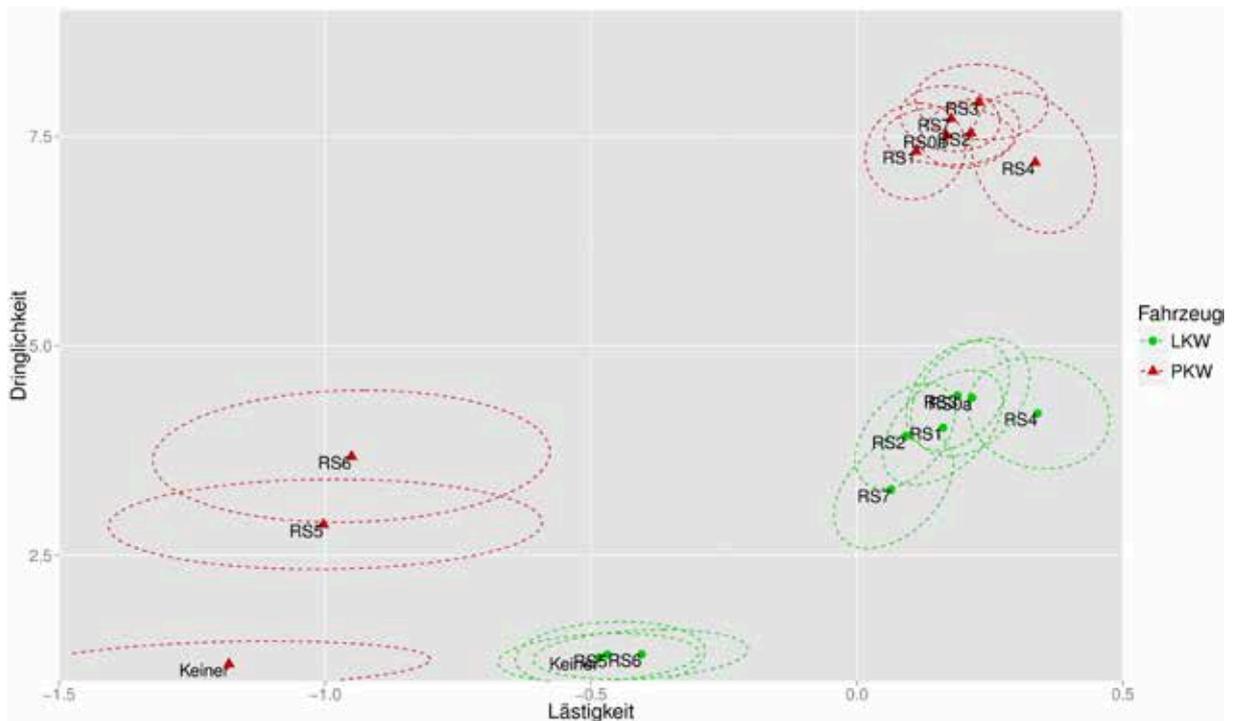


Abb. 7-79: Dringlichkeit vs. Lästigkeit der Messungen in Testfeld 1 bei LKW und PKW

Abb. 7-80 zeigt die auf den Modellen der Daten aus den Wahrnehmungstest basierenden Vorhersagen für Dringlichkeit und Lästigkeit aus den Messdaten innen und in 25 m Entfernung. Eine Absenkung der (log) Lästigkeit um 0,5 heißt dass das Signal um einen

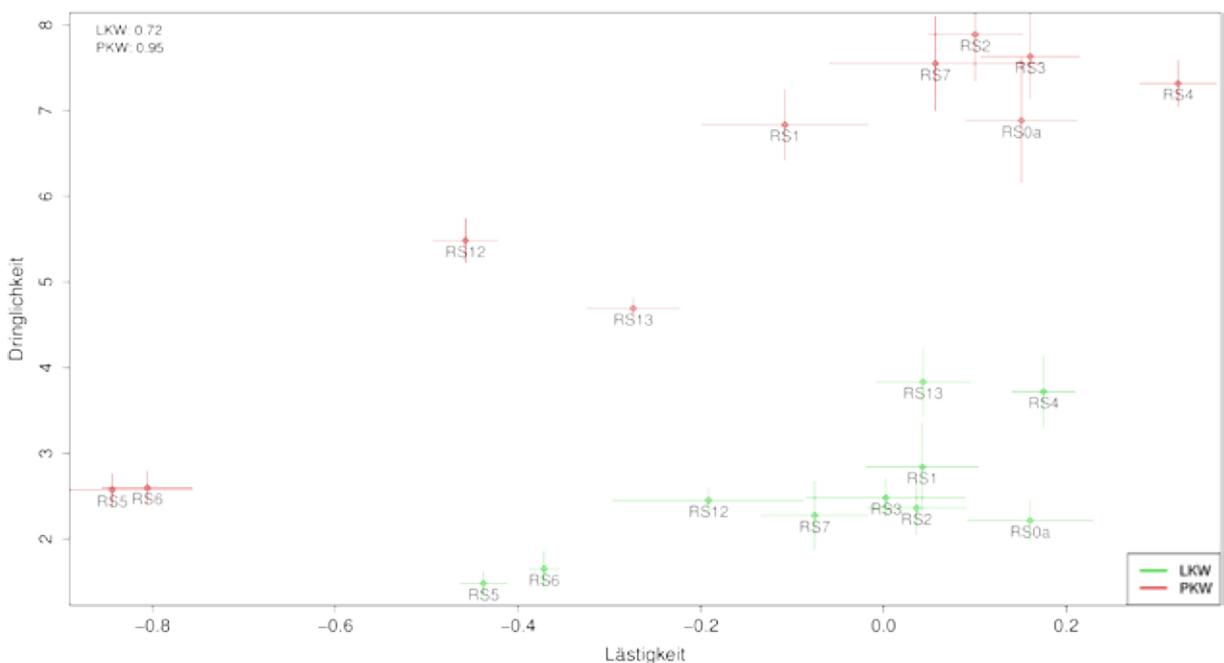


Abb. 7-80: Modellvorhersagen für Innen und Außen aus den gemessenen Segmenten beider Testfelder (Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt, innen nur Messserie 2)

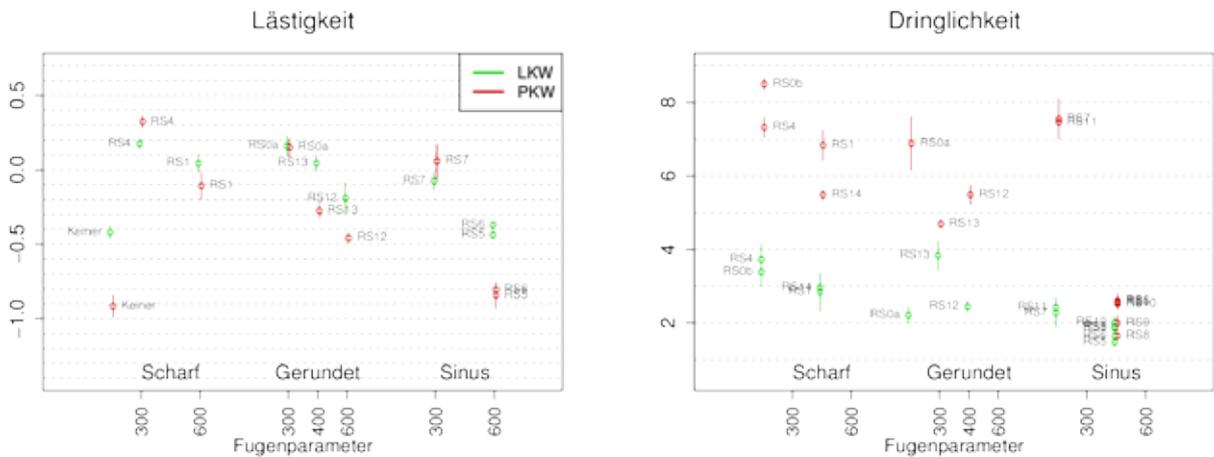


Abb. 7-81: Lästigkeit und Dringlichkeit in Abhängigkeit der Fugengeometrie, innen nur Messserie 2

Faktor 0,7 weniger lästig wahrgenommen wird. Die Fehlerbalken beziehen sich auf den Mittelwert der aus den Messungen vorhergesagten Mittelwerte mit der Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt. Wichtig: die Unsicherheiten der Modelle für Lästigkeit und Dringlichkeit selbst fließen hier nicht ein. Interessant ist, dass der am wenigsten lästige Rumpelstreifen (mit Ausnahme der 600 mm Sinusstreifen) beim PKW in etwa gleichzusetzen ist mit einer Vorbeifahrt eines LKW ohne Rumpelstreifen (RS5 und RS6 beim LKW sind sehr ähnlich zu diesem Fall).

Abb. 7-81 zeigt die aus den Modellen vorhergesagte Lästigkeit und Dringlichkeit in Abhängigkeit der Fugengeometrie für Überfahrten mit Überdeckung auf max. 3 eingeschränkt.

Abb. 7-82 zeigt die Dringlichkeit der synthetisierten Stimuli in Abhängigkeit der Reaktionszeiten (der probandenspezifische Mittelwert wurde abgezogen). Die mittleren Reaktionszeitunterschiede und die Dringlichkeit zeigen eine negative Korrelation sowohl pro Fahrzeugkategorie als auch insgesamt wobei doch deutliche Streuungen sichtbar sind. Es sollten sich daher ähnliche Varianten als Verbesserung herausstellen.

Abb. 7-83 stellen den Zusammenhang zwischen Reaktionszeit und Lästigkeit dar (beide bezogen auf den Referenzstreifen RS0a). In dieser Darstellung wäre ein besserer Rumpelstreifen ein Streifen im linken, unteren Quadranten (Lästigkeit und Reaktionszeit geringer). Beim LKW trifft dies nur auf den synthetisierten 600 mm Streifen (periodisch R600 und pseudozufällig Z600) mit 7 mm Fugentiefe zu. Auch beim PKW (Abb. 7-84) zeigt sich hier eine Reduktion der Lästigkeit die aber mit einer Erhöhung der Reaktionszeit einhergeht. In absoluten Zahlen ist die Reaktionszeit aber immer noch geringer als beim LKW. Daher wurde dieser Streifen als einer der beiden Fälle für Testfeld 2 ausgewählt, die komplett

durchgemessen wurden. S400 schneidet hier beim LKW schlechter ab, da die Reaktionszeit erhöht ist (Abb. 7-83).

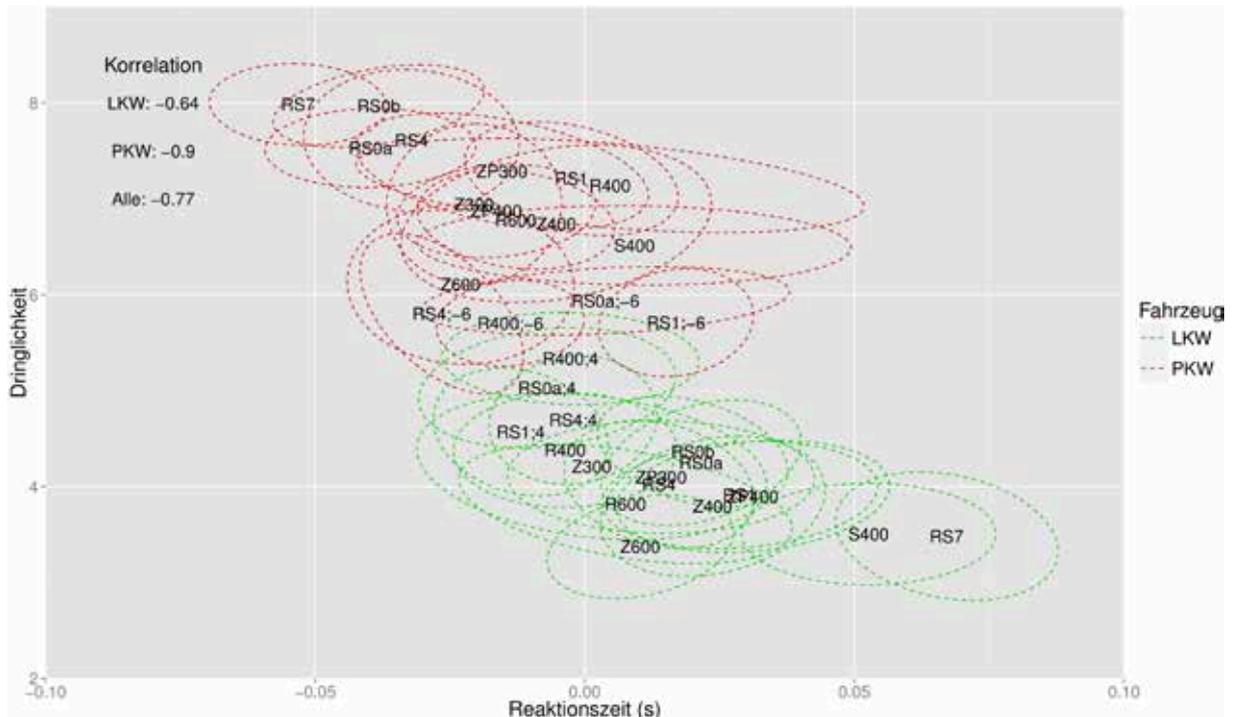


Abb. 7-82: Dringlichkeit vs. Reaktionszeit der synthetisierten Stimuli über die Probanden. Pro Proband wurde die mittlere Reaktionszeit aller synthetisierten Stimuli abgezogen.

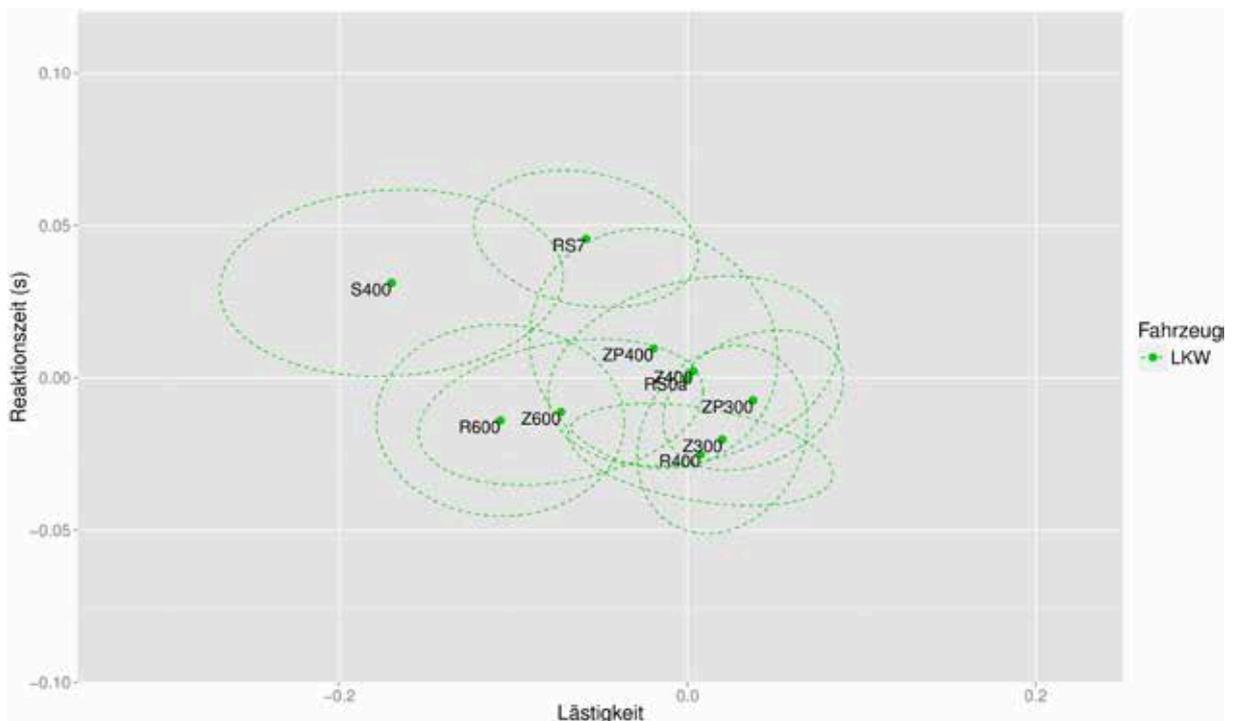


Abb. 7-83: Reaktionszeit vs. Lästigkeit der synthetisierten LKW-Stimuli bezogen auf RS0a des jeweiligen Fahrzeugs

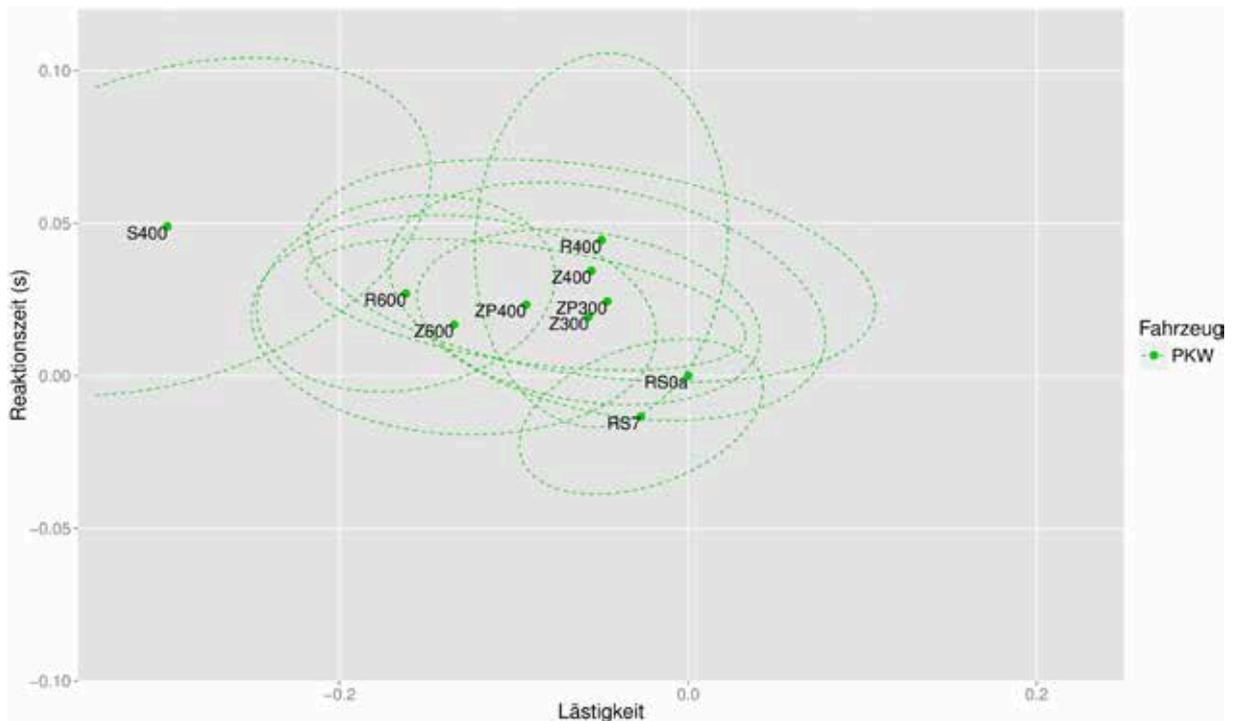


Abb. 7-84: Reaktionszeit vs. Lästigkeit der synthetisierten PKW-Stimuli bezogen auf RS0a des jeweiligen Fahrzeugs

Als interessante Varianten stellten sich daher folgende Streifen heraus: R600, Z600 und S400. Bei S400 ergab sich aber das Problem, dass diese Variante im Zuge des vorliegenden Projektes nicht verfügbar war. Um aber trotzdem eine Variante mit 400 mm Abstand zu testen, wurde der R400 ausgewählt (konventionell, 7 mm tief).

Aufgrund der schwierigen und nicht praktikablen Erstellung der pseudozufälligen Variante, wurden R600 und R400 vollständig gemessen, während bei Z600 eine Emissionsmessung durchgeführt wurde.

Um genauere Informationen über die Vibration zu erhalten, wurden außerdem noch die drei 600 mm Sinusvarianten (RS8, RS9, RS10) gefräst. RS11 (300 mm Sinus, 7mm tief) wurde hinzugenommen, um auch einen flach gefrästen 300 mm Sinus analysieren zu können.

Aufgrund der Erfahrungen mit dem LKW aus Testfeld 1 wurde auch entschieden, alle neuen RS 350 mm breit zu fräsen.

Vibration vs. Akustik

Bei den Innenraumsignalen ist ein direkter Vergleich zwischen Vibration und Akustik wichtig, um zu sehen ob die beiden Sinneseindrücke gemeinsam erhöht werden können. Aufgrund der geringen Sitzvibrationen wird hier nur mehr das Lenkrad betrachtet.

Abb. 7-85 zeigt den direkten Vergleich zwischen Lautstärkepegel und gewichteter Beschleunigung. Die Farben unterscheiden LKW und PKW, die Symbole die Messserie (MS1: Kreise, MS2: Dreiecke). Wie auch schon aus den einzelnen Betrachtungen der verschiedenen Messergebnisse bekannt, ist der Bereich in dem sich Veränderungen im LKW (grüne Symbole) abspielen, in beiden Dimensionen deutlich eingeschränkt (im Detail siehe Abb. 7-86). Beim PKW zeigen sich hier sehr deutlich die Unterschiede zwischen den 600 mm Sinusstreifen (rechts unten, starke Vibration mit Ausnahme von RS8, geringe akustische Wirkung) und den konventionellen 600 mm Profilen (rechts oben, RS1 und RS12). Links oben (laut aber weniger Vibration lt. ISO) befinden sich die 300 mm Streifen wogegen RS13 (400 mm) und RS14 (600 mm Zufall) etwas weniger akustische Wirkung zeigen. RS8 ist aufgrund seiner geringen Frästiefe weder akustisch noch taktil auffällig. Bis auf wenige RS ist die Vibration im PKW höher als im LKW.

Beim LKW zeigten sich in MS1 (rote Symbole in Abb. 7-86) ähnliche Tendenzen, in MS2 sind diese nur noch schwer auszumachen. Insgesamt war, wie bereits ausgeführt, die Vibration aber auch teilweise die akustische Wirkung in MS2 geringer, die Gründe hierfür sind nicht klar.

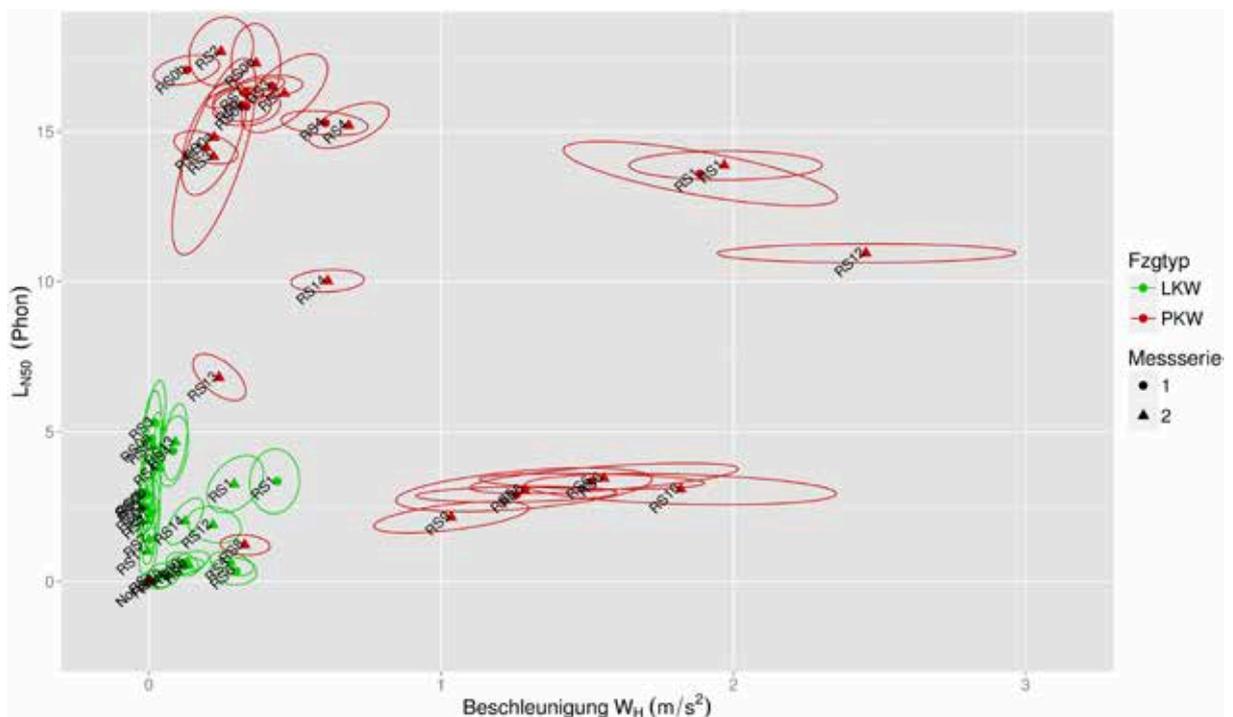


Abb. 7-85: Differenz des Median des Lautstärkepegel vs. der Differenz des RMS-Wertes der gewichteter Lenkradbeschleunigung für PKW und LKW bezogen auf Fahrten ohne Rumpelstreifen. Die Überdeckung ist auf die gesamte Fahrt betrachtet auf max. 3 eingeschränkt

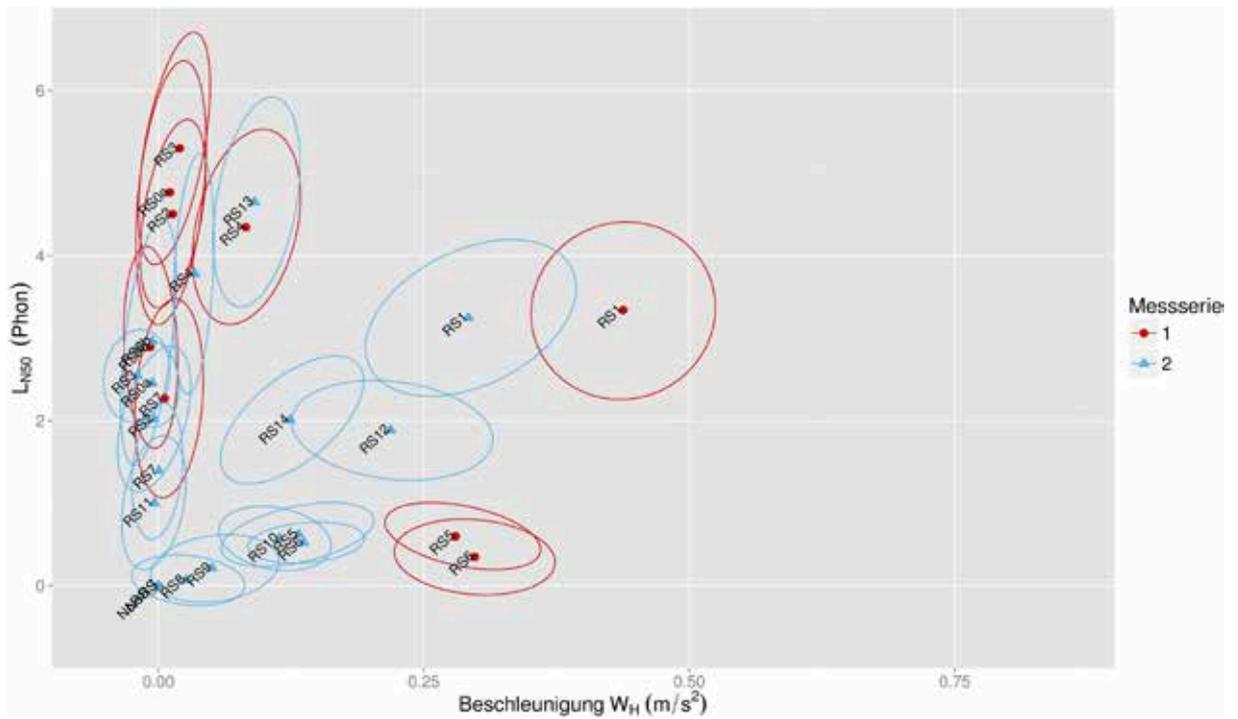


Abb. 7-86: Differenz des Median des Lautstärkepegel vs. der Differenz des RMS-Wertes der gewichteter Lenkradbeschleunigung für den LKW bezogen auf Fahrten ohne Rumpelstreifen

8. ERGEBNISÜBERSICHT

Dieser Abschnitt dient als Zusammenfassung der gemeinsamen Betrachtung. Die Darstellungen sollen dazu dienen, die wichtigsten gemessenen Rumpelstreifen gegenüberzustellen, diesmal ohne Information über die Streuung.

Es werden L_{N5} für Außen (gesamte Überfahrt) und die Differenz des L_{N50} zur Fahrt ohne RS für Innen dargestellt, da diese der Wahrnehmung am besten entsprechen. Weiters werden auch nochmals der L_{Aeq} und die Differenz des L_{Aeq} dargestellt, da dies die gängigste Größe für die Beschreibung von Lärm ist. Bei den Diagrammen mit den Emissionsmessungen (7,5 m) ist anzumerken, dass die Beziehung zur Lästigkeit auf den 25 m Daten basiert. Aufgrund der teilweise deutlichen Unterschiede beim LKW zwischen MS1 und MS2, werden die Daten von MS1 grau dargestellt. Innen wurden hier die gleichen Parameter wie für die Vorhersagemodelle der Wahrnehmungsdaten verwendet (Anfang bis 1,2 s nach Beginn des RS). Es wurden nur Fahrten mit guter Überdeckung (auf max. 3 eingeschränkt) verwendet.

8.1. Immission vs. Innengeräusch

Abb. 8-1 und Abb. 8-2 stellen die Immission dem Innengeräusch gegenüber. Ein Rumpelstreifen weiter links bedeutet weniger laut, bzw. einen geringeren Schalldruckpegel, weiter unten bedeutet reduzierte akustische Änderung im Fahrgastraum.

Diese Darstellung ist insofern notwendig, da eine Reihung der Rumpelstreifen nicht direkt vorgenommen werden kann, ohne vorher die Relevanz der verschiedenen Parameter festzulegen. Ist also das Außengeräusch wichtiger wäre ein Reihung entlang der Horizontalen sinnvoll, z.B. beim PKW ist RS12 dem RS0a vorzuziehen, geht es um das Innengeräusch ist die vertikale Achse relevant und daher die Reihung im Beispiel umgekehrt. Weiters verliert man bei einer reinen Reihung auch die Größenunterschiede die ein Maß für die Verbesserung darstellen.

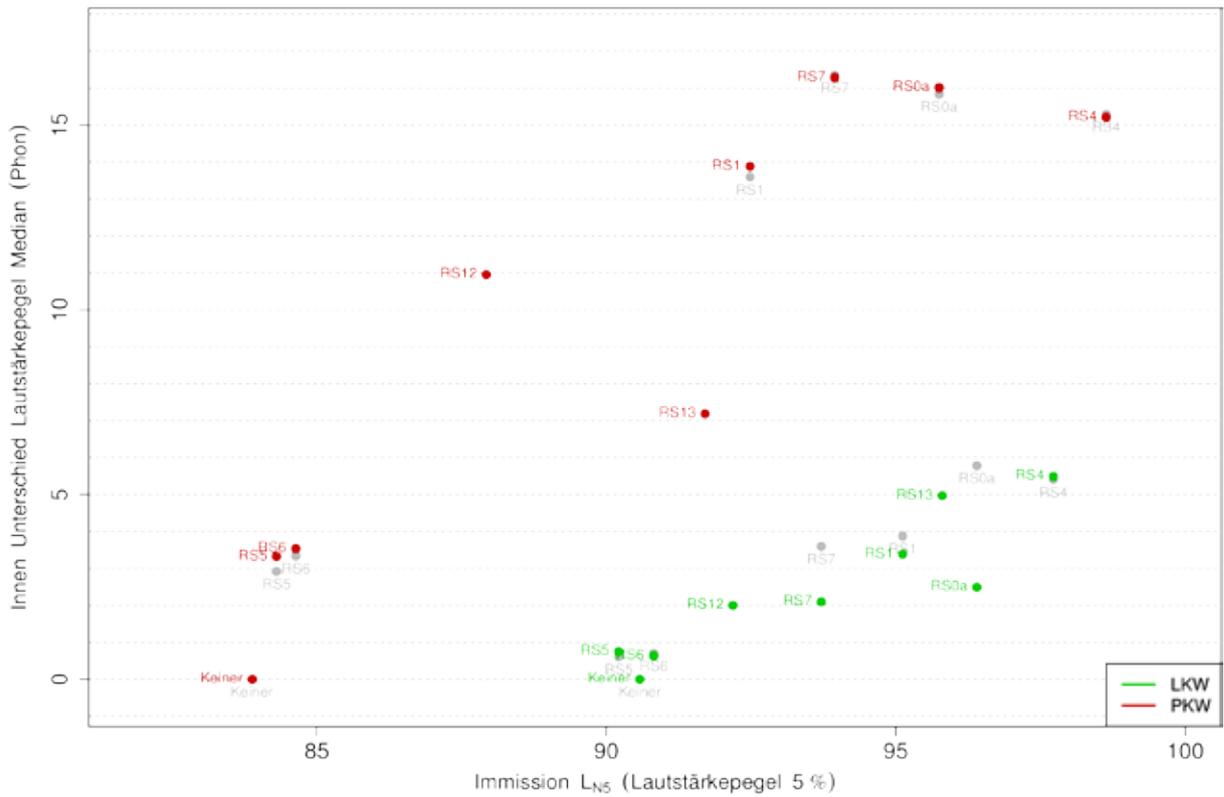


Abb. 8-1: Gegenüberstellung der wichtigsten Rumpelstreifen für Innen und Immission

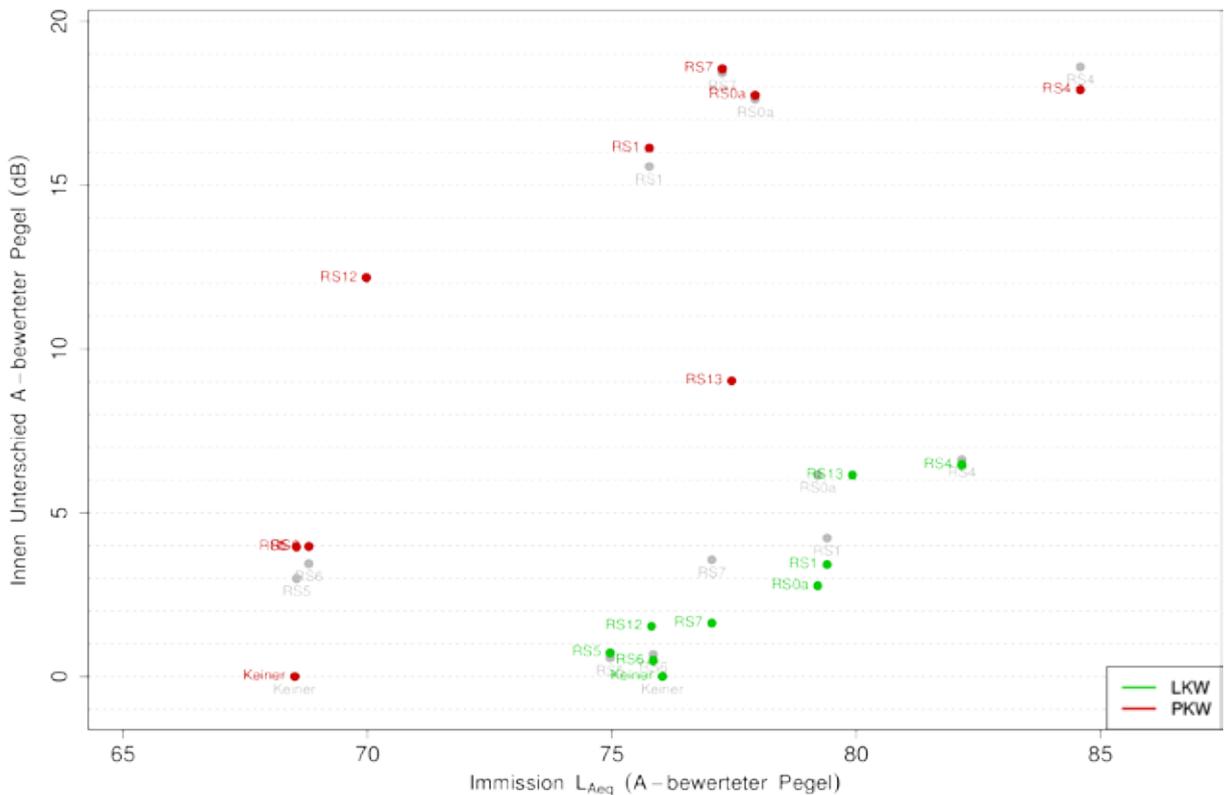


Abb. 8-2: Gegenüberstellung der wichtigsten Rumpelstreifen für Innen und Immission mittels L_{Aeq}

8.2. Emission vs. Innengeräusch

Die Darstellung des Innengeräusches gegenüber der Emission hat den Vorteil, dass auch weitere 4 Streifen mit aufgenommen werden können (RS9, RS10, RS11 und RS14).

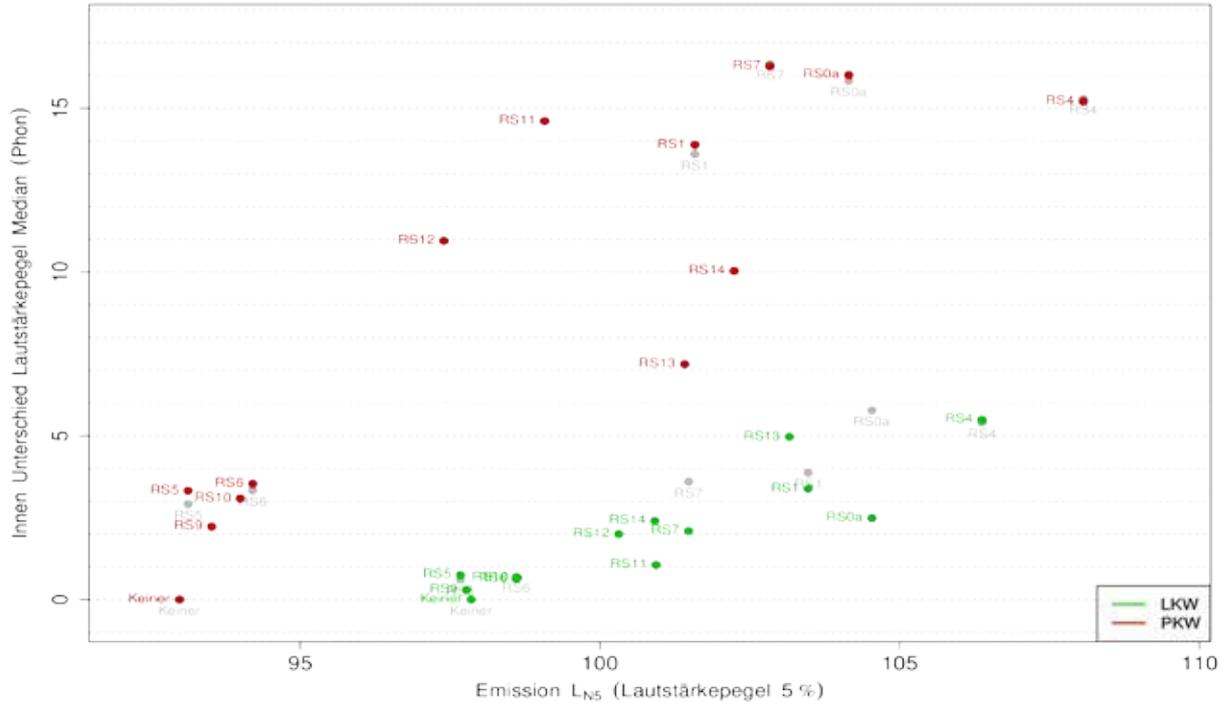


Abb. 8-3: Gegenüberstellung der wichtigsten Rumpelstreifen für Innen und Emission

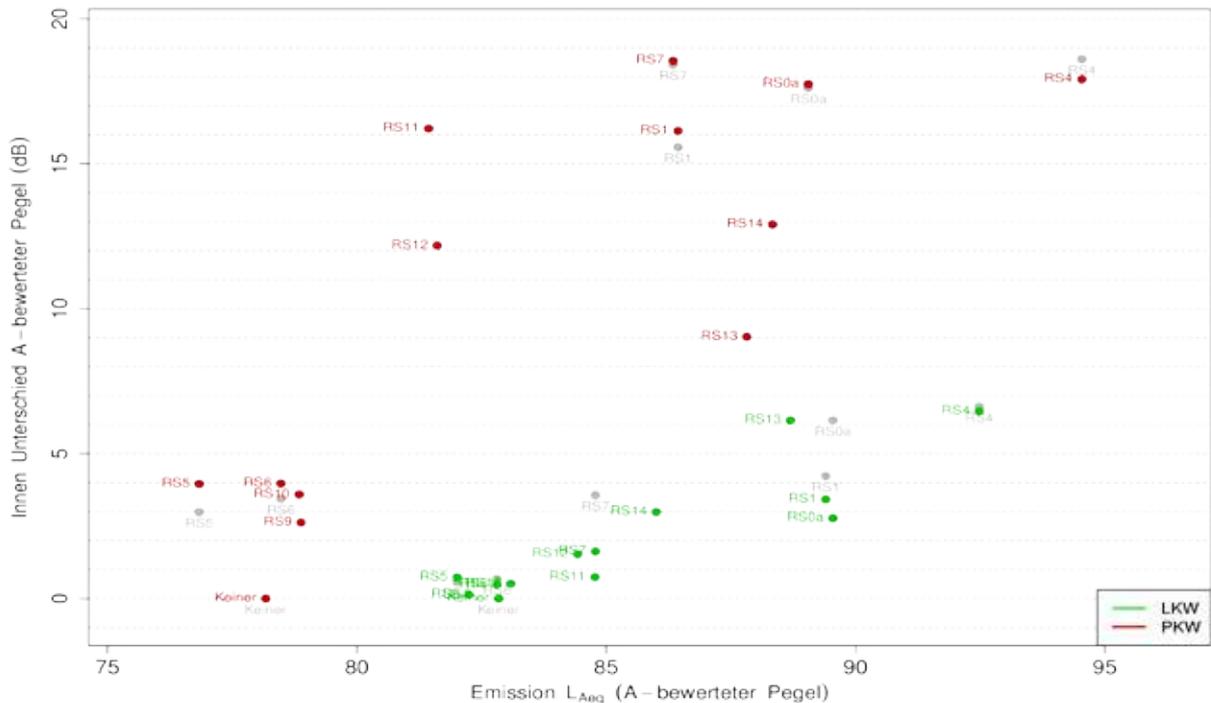


Abb. 8-4: Gegenüberstellung der wichtigsten Rumpelstreifen für Innen und Emission mittels L_{Aeq}

8.3. Vibration am Lenkrad

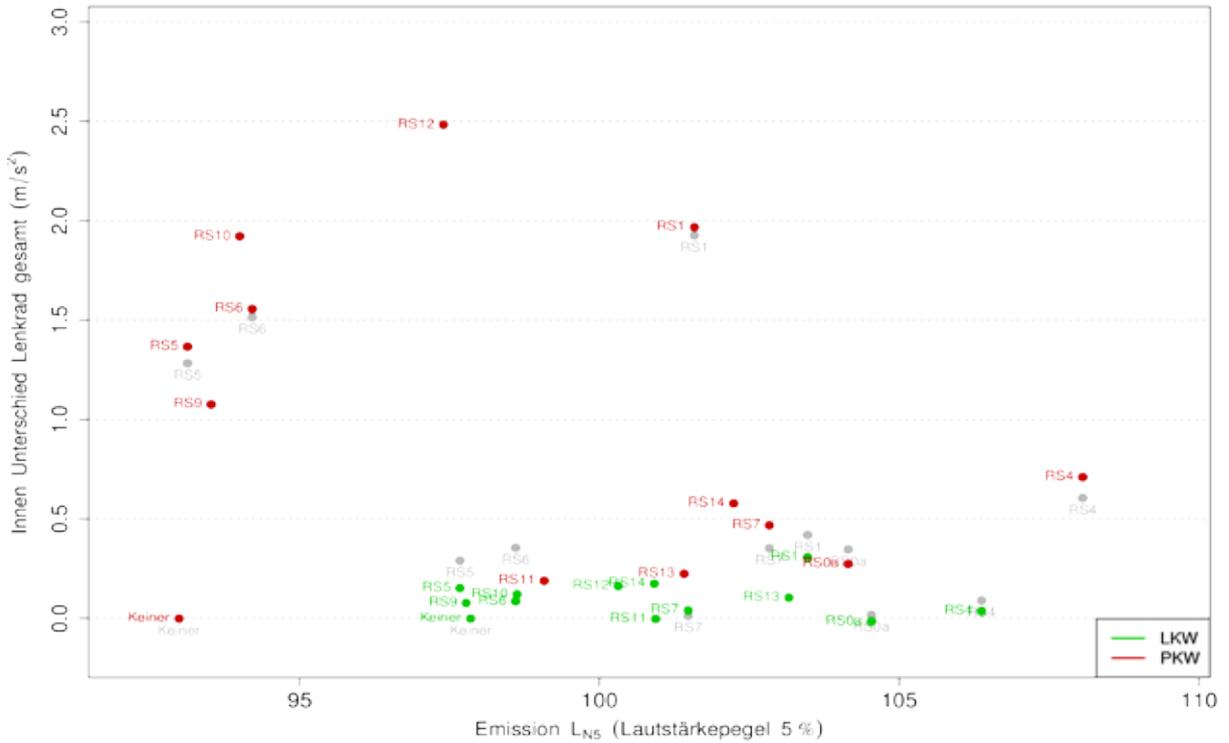


Abb. 8-5: Gegenüberstellung der wichtigsten Rumpelstreifen für Emission und gewichteter Lenkradvibration

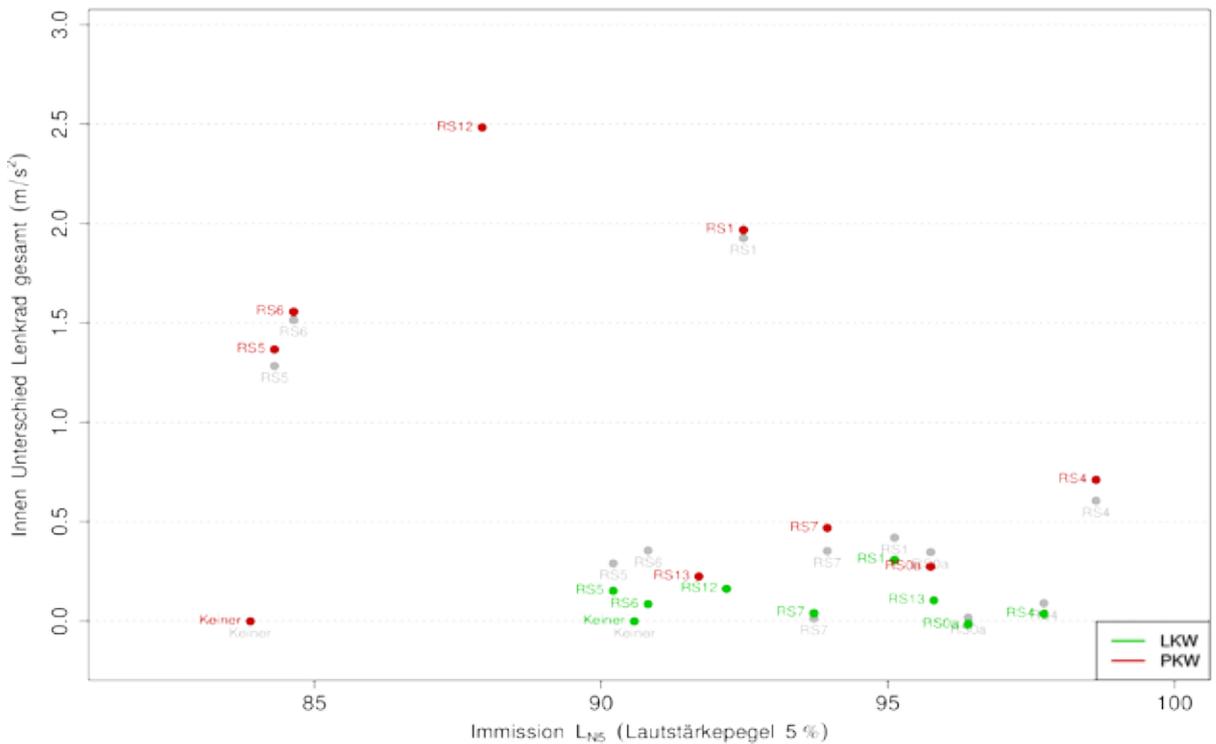


Abb. 8-6: Gegenüberstellung der wichtigsten Rumpelstreifen für Immission und gewichteter Lenkradvibration

9. ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Projekt wurde der Frage nachgegangen, ob es Möglichkeiten gibt Rumpelstreifen so auszuführen, dass die Belästigung von Anrainern reduziert werden kann und gleichzeitig die aufmerksamkeitssteigernde Wirkung erhalten werden kann.

Zu diesem Zweck wurden zwei umfangreiche Testfelder erstellt, mit insgesamt 16 verschiedenen Rumpelstreifen-Varianten. Im Innenraum wurden sowohl die akustische Wirkung als auch die Vibration an Lenkrad und Sitz erfasst. Im Außenbereich wurden bei 10 Streifen sowohl Emissionsmessungen mit einem Mikrofon in 7,5 m Entfernung als auch Immissionsmessungen mit dem Kunstkopf und einem Mikrofon in 25 m durchgeführt. Zusätzlich wurden an 4 weiteren Streifen noch die Schallemissionen in 7,5 m erfasst. Bei zwei Streifen wurde auf jegliche Außenmessungen verzichtet, da entweder die extrem geringe Fugentiefe eine sehr geringe Emissionsänderung bei einer Rumpelstreifenbefahrung erwarten ließ oder der Rumpelstreifen einen sehr lauten Extremfall (abgeschätzt durch Schrägeinfallsmessungen), der vor allem für das Verhalten im Fahrzeuginneren relevant war, darstellt.

Die akustischen Messungen des ersten Testfelds bestehend aus 9 Rumpelstreifen sowohl im Innen- als auch im Außenbereich wurden als Basis für Wahrnehmungstests verwendet, wofür auch synthetisierte Vorbeifahrten generiert wurden, um alternative Rumpelstreifenvarianten zu untersuchen. Die Messungen der Rumpelstreifen des zweiten Testfeldes waren ursprünglich zur Verifikation der Untersuchungsergebnisse vorgesehen, jedoch konnten aufgrund des erweiterten Umfangs an Rumpelstreifen noch weitere Erkenntnisse abgeleitet werden.

9.1. Erkenntnisse

Fahrzeugspezifische Ergebnisse

Für die Messungen wurden aufgrund der zu erwartenden Unterschiede in der Wirkung nach außen und nach innen sowohl ein PKW, als auch ein LKW untersucht, daher wurde für jede dieser Fahrzeugkategorien ein Testfahrzeug gewählt und für die Messungen eingesetzt.

Erst bei tiefergehender Betrachtung der Auswertungsergebnisse wird die Komplexität der verschiedenen Einflussfaktoren ersichtlich bzw. kann auf folgende grundsätzliche Einschätzung des Einflusses des Fahrzeugs und der Fahrzeugkategorie geschlossen werden.

Ein Vergleich der Innengeräusche im PKW bei Überfahrt der konventionellen Rumpelstreifen mit unterschiedlichen Fugenabständen zeigt sehr deutlich (und reproduzierbar), dass der Schalldruckpegel bei einem Fugenabstand von 400 mm deutlich unterhalb des Pegels bei Fugenabständen von 300 mm und 600 mm liegt, während die Außengeräusche mit Zunahme des Fugenabstandes den erwarteten Trend einer Pegelabnahme verfolgen. Im LKW ist hingegen der Schalldruckpegel in der Fahrerkabine bei einem Fugenabstand von 400 mm höher als bei den kürzeren oder längeren Fugenabständen, während die Schallimmissionen ebenfalls im Trend liegen. Dies verdeutlicht gerade für die Akustik im Fahrzeuginnenraum, dass hier sehr fahrzeugspezifische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz stark verstärkend oder dämpfend wirken können. Und die Anregungsfrequenz ist ihrerseits von Fugenabstand und der Fahrgeschwindigkeit direkt abhängig. Aber auch die Phasenverschiebung zwischen der Anregung der 1. und der 2. Achse, welche sich durch Fugen- und Radabstand ergibt, kann eine wesentliche Rolle spielen.

Die Innengeräusche bei Überfahrten über Rumpelstreifen des 1. Testfeldes wurden sowohl bei der 1., wie auch 15 Monate später bei der 2. Messserie erfasst und ausgewertet, um zu prüfen, ob sich Änderungen einstellten. Während beim PKW die Innengeräusche vergleichbar waren (maximal 1-2 dB Unterschied), trat beim LKW eine deutliche, reproduzierbare Pegelreduktion bei einigen Rumpelstreifen (RS0a, RS2, RS3, RS7) um ca. 2-4 dB auf (die übrigen Rumpelstreifen zeigten hingegen vergleichbare akustische Werte). Beim LKW handelte es sich bei beiden Messserien um das gleiche Fahrzeug. Da auch die Infrastruktur sich in den 15 Monaten nicht änderte, erscheint lediglich die höhere Außentemperatur (ca. 15°C Unterschied) bzw. die höhere Fahrbahntemperatur der 2. Messserie (im Gegensatz zur 1. Messserie schien bei LKW-Messungen der 2. Messserie die Sonne), der Reifendruck (anders als beim PKW erfolgte beim LKW keine Kontrolle an den Messtagen) und/oder die geringere Reifenprofiltiefe (Abnahme am Vorderreifen von ca. 12 mm auf ca. 4 mm) als Ursache möglich.

Des Weiteren zeigte sich beim LKW, dass die Grundvibrationen – das bedeutet die Vibrationen ohne Überfahrt eines Rumpelstreifens – am Lenkrad (möglicherweise durch nicht permanent aktive Aggregate des LKWs) stark variieren. Dementsprechend wird eine zuverlässige Differenzierung zwischen Vibrationsanteilen des Fahrzeuges und zusätzlichen, durch Rumpelstreifen hervorgerufenen Anteilen erschwert bzw. können in weiterer Folge nur eingeschränkt allgemeine Aussagen über die Auswirkungen von Rumpelstreifen auf die Vibrationen am Lenkrad getroffen werden.

Diese Beispiele sollen die Vielschichtigkeit von Einflüssen verdeutlichen, welche zum Teil zu deutlichen Unterschieden in der Wirkung von Rumpelstreifen führen können und deren Ursachen unklar sind. Andere Fahrzeuge (auch der gleichen Kategorie) können sich aufgrund unterschiedlicher Konstruktion und aufgrund der daraus resultierenden Eigenschaften im Hinblick auf Schwingungsanregung, -übertragung und -abstrahlung sehr unterschiedlich verhalten. Aus theoretischen, physikalischen Überlegungen können zwar grundlegende Tendenzen abgeleitet werden (beispielsweise längerer Abstand sollte leiser werden), jedoch dürften fahrzeugspezifische Eigenschaften (wie Resonanzen) diese Trends überlagern, sodass sich selbst grundlegende Trends umkehren können.

Eine Verallgemeinerung der Einzelergebnisse, welche für die eingesetzten Fahrzeuge (und für die während der Messungen vorherrschenden Rahmenbedingungen) gelten, auf alle in Österreich verkehrenden Fahrzeuge und auftretenden Rahmenbedingungen ist demzufolge nur sehr eingeschränkt möglich. Sehr wohl können jedoch die folgenden, grundlegenden Zusammenhänge anhand der Ergebnisse identifiziert werden, welche für die zukünftige Auswahl von Rumpelstreifen hilfreich sein können.

Synthetisierte Überfahrten

Die Verwendung synthetisierter Überfahrten war teilweise erfolgreich. Beim LKW zeigten sich teils gute Übereinstimmungen zwischen Vorhersage und späterer Messung, beim PKW war die Übereinstimmung deutlich geringer. Hier sticht vor allem der konventionelle Rumpelstreifen mit einem Fugenabstand von 400 mm hervor, der sich sowohl beim LKW als auch beim PKW atypisch verhält. Beim LKW wurden dessen akustische Auswirkungen erfolgreich vorhergesagt, der Einbruch des Innensignals im PKW führte allerdings zu beträchtlichen Abweichungen. Auch im Außensignal war dieser Streifen auffällig, da die bei den anderen Streifen hervorgerufenen, hochfrequenten Anteile nicht auftraten.

Diese Abweichungen führten dazu, dass die synthetisierten Signale nicht für direkte Vergleiche der Rumpelstreifenparameter herangezogen werden können, aber sie dienen dazu – und das ist ebenso wichtig – den akustischen Bereich in den Wahrnehmungstests zu erweitern, um dadurch einen besseren Gesamteindruck über den Zusammenhang zwischen Wahrnehmung und Akustik zu erhalten.

Abschließend ist anzumerken, dass im Zuge der Synthese verschiedene Entscheidungen bezüglich der Interpolation zwischen Fugenabständen sowohl bei der Fugengeometrie als auch bei den hochfrequenten Anteilen getroffen werden mussten. Vor allem die hochfrequenten Anteile stellten sich im Nachhinein als problematisch heraus, die Größe des Effekts war aber aufgrund der vorhandenen Daten nicht abzusehen. Für etwaige künftige

Untersuchungen führen die in Messserie 2 gewonnenen Daten zu einer deutlichen Verbesserung des Synthesemodells.

Fahrzeugkategorie

Ein direkter Vergleich von LKW und PKW bestätigt vor allem den Trend, dass im LKW nur relativ geringe Veränderungen des Pegels (L_{Aeq} im Bereich von 6 dB) und der akustischen Parameter auftreten, während im PKW die Pegelerhöhungen teilweise auch sehr extrem ausfallen können (bis zu 19 dB wurden gemessen). Einerseits liegen die Werte beim LKW damit größtenteils über der Wahrnehmungsschwelle, wobei dies durch die Ergebnisse der Reaktionstests aber auch durch die Dringlichkeitsurteile untermauert wird. Allerdings können vermutlich Änderungen in der akustischen Umgebung (z.B. Radio eingeschaltet) die Unterschiede schon unter die oft zitierte, in realistischen Umgebungen allgemein als Wahrnehmungsschwelle angenommene Pegeldifferenz von 3 dB drücken. Tendenziell zeigt sich diese Schwelle von 3 dB auch in den ermittelten Reaktionswahrscheinlichkeiten. Zudem treten zwischen 3 und 5 dB gegenüber höheren Pegeldifferenzen die stärksten Änderungen in der Reaktionszeit auf. Ob die Rumpelstreifengeräusche im LKW dann tatsächlich unterhalb von 3 dB nicht mehr hörbar sind, hängt aber sehr stark von den akustischen Merkmalen des Umgebungsgeräusches ab.

Weiters ist zu berücksichtigen, dass die zu warnenden Fahrer auch müde oder erschöpft sein können, wodurch sich die Wahrnehmungsschwelle vermutlich erhöhen wird. In der Literatur wird angenommen, dass eine Erhöhung im Bereich von ca. 10 dB als alarmierend wahrgenommen wird und weiters, dass über 15 dB die Gefahr einer Schreckreaktion steigt. Beim verwendeten PKW liegen die Pegeländerungen daher schon größtenteils über den empfohlenen Werten. Die gemessenen Pegelunterschiede spiegeln sich auch in der ermittelten Dringlichkeit wider. Rumpelstreifenüberfahrten im PKW werden in der Regel als deutlich dringlicher wahrgenommen als im LKW.

Im Außenbereich zeigt sich, dass die Pegeländerungen bei LKW und PKW auch unterschiedlich sind (max. 15 dB im PKW vs. max. 8 dB im LKW), wobei dies vor allem durch das höhere Grundgeräusch des LKWs verursacht wird. Absolut gesehen sind die Vorbeifahrtspegel bei deutlich hörbaren Rumpelstreifen ähnlich, was sich auch in der Lästigkeitswahrnehmung niederschlägt. Der LKW ist allerdings bei gleichem L_{Aeq} bei den im LKW wahrgenommenen Rumpelstreifen etwas weniger lästig.

Auch die gemäß ISO 5349-1 frequenzgewichteten Vibrationen am Lenkrad sind beim PKW mehrfach so groß wie beim LKW. Die nach ISO 2631-1 bewerteten Sitzbeschleunigungen

liegen grundsätzlich bei beiden Fahrzeugen auf ähnlichem Niveau. Jedoch zeigt eine Hochpassfilterung mit 25 Hz zur Unterdrückung dominanter, von den Rumpelstreifenüberfahrten unabhängiger Grundvibrationen, dass die relevanten Schwingungsanteile sehr geringe Werte aufweisen ($< 0,2 \text{ m/s}^2$), weshalb sie in der Ergebnisinterpretation nicht weiter berücksichtigt werden.

Zusammenfassend muss daher festgehalten werden, dass die massiven, technischen Unterschiede der Fahrzeugkategorien dazu führen, dass im LKW die signalisierende, aufmerksamkeitssteigernde Wirkung in der Regel deutlich unterhalb jener im PKW liegt und unter gewissen Umständen bzw. bei ungünstigem Rumpelstreifendesign zumindest im Hinblick auf eine *akustische* Signalwirkung de facto nicht vorhanden ist. Demgegenüber können – ebenfalls in Abhängigkeit von der konkreten Rumpelstreifenausführung – im PKW akustische Signale erzeugt werden, die in ungünstigen Fällen bereits die Gefahr von Schreckreaktionen bergen und somit dem Ziel einer erhöhten Sicherheit abträglich sind.

Konventionelle Rumpelstreifen mit periodisch angeordneten Fugen

Diese Art von Rumpelstreifen stellt in Österreich den derzeitigen Stand der Technik dar. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie aufgrund der regelmäßigen Anregung, tonale Komponenten in den akustischen Auswirkungen innen, wie außen zeigen. Werden Fugenabstände bei sonst gleichem Fugenprofil größer gewählt, so ist aufgrund der Abnahme an Fugen je Längeneinheit von einer Verringerung der akustischen Auswirkungen auszugehen. Dies bestätigt sich zwar bei Betrachtung von 300 und 600 mm Abständen (aufgrund der Verdoppelung werden zum Teil gleiche Frequenzen zum Schwingen angeregt), jedoch weichen die Auswirkungen bei 400 mm Fugenabstand wie oben erwähnt von diesem Zusammenhang ab. Ein Vergleich der Wahrnehmung von Rumpelstreifen mit einem Abstand von 300 mm und von 600 mm zeigt ebenfalls diesen Trend: trotz zunehmender Fugentiefe werden die Rumpelstreifen mit längerem Fugenabstand bei beiden Fahrzeugkategorien außen als geringfügig weniger lästig und innen als geringfügig weniger dringlich eingestuft. Die Reaktionszeiten für akustisch deutlich wahrnehmbare Überfahrtsgeräusche mit Pegelanstiegen ab 5 dB zeigen einen Anstieg von etwas unter 4 Millisekunden pro Dezibel Pegelabnahme und variieren daher bei geringfügigen Änderungen des Pegels im Bereich von wenigen hundertstel Sekunden.

Im Gegensatz zur akustischen Wirkung sind die Veränderungen der gemäß ISO 5349-1 gewichteten Vibration am Lenkrad bei Rumpelstreifenüberfahrt bei einem Fugenabstand von 600 mm höher als bei einem Fugenabstand von 300 mm. Allerdings treten bei PKW bei

einem Fugenabstand von 400 mm Vibrationen in ähnlicher Größenordnung wie bei 300 mm auf, während beim LKW ein geringfügiger Anstieg zu verzeichnen ist. Bei der Anregungsfrequenz treten sogar bei beiden Fahrzeugkategorien bei 400 mm Fugenabstand Einbrüche im linearen Trend auf. Insofern kann keine allgemeine fugenabstandsabhängige Tendenz der Vibration aus den Untersuchungsergebnissen abgeleitet werden.

Ein Vergleich der beiden Rumpelstreifen mit einem Fugenabstand von 600 mm und unterschiedlichen Fugentiefen (7 mm und 10 mm) zeigt, dass die akustischen Parameter innen wie außen mit der Fugentiefe wie auch die bewertete Lenkradbeschleunigung zunehmen. Allerdings nimmt mit der Fugentiefe auch die Rundung an der Fräskante zu Beginn und am Ende der Fugen ab, weshalb sowohl Fugentiefe und/oder Rundung der Fugenkante für die Beeinflussung der akustischen Parameter verantwortlich sein können.

Konventionelle Rumpelstreifen mit in zufälligem Abstand angeordneten Fugen

Durch die zufällige Variation des Fugenabstandes von konventionellen Rumpelstreifen kann die tonale Komponente in den Schallimmissionen wirkungsvoll gegenüber den Rumpelstreifen mit regelmäßiger Fugenanordnung vermindert werden. Gleichzeitig werden jedoch – bei gleicher Fugentiefe und Form – deutlich höhere Schalldruckpegel hervorgerufen. Ein möglicher Grund ist gerade die breitbandigere Schwingungsanregung, wodurch möglicherweise Resonanzeffekte vermehrt auftreten.

Der erwartete Vorteil gerade in der Lästigkeitsempfindung von Schallimmissionen kehrt sich damit ins Gegenteil. Eine Senkung der Schallemissionen sollte grundsätzlich durch eine Reduktion der Fugentiefe auch bei Rumpelstreifen mit zufälligem Abstand erzielbar sein. Allerdings konnte dies im Rahmen des Projekts nur zum Teil nachgewiesen werden. So zeigt der Rumpelstreifen mit zufälligem Abstand im 2. Testfeld zwar geringere Schallemissionen, jedoch wurden hier sowohl die Fugentiefe (von 10 mm auf 7 mm) reduziert, wie auch der mittlere Fugenabstand (von 300 mm auf 600 mm) erhöht.

Die Innengeräusche befinden sich beim PKW auf ähnlichem Niveau wie die Geräusche bei Rumpelstreifen mit periodischen Fugenabstand und mit gleicher Fugentiefe und -form, während sie beim LKW um ca. 1-2 dB höher liegen. Allerdings wird die Dringlichkeit dieser Geräusche sowohl beim LKW, als auch beim PKW etwas geringer eingestuft.

Werden die gewichteten Vibrationen am Lenkrad betrachtet, so zeigt sich, dass es beim PKW durch die breitbandigere Anregung auch zu einer Senkung der Beschleunigungen gegenüber der Rumpelstreifen mit gleichem (mittleren) Fugenabstand kommt. Beim LKW bewegen sich die Lenkradbeschleunigungen hingegen in einem ähnlichen Bereich.

Die Erstellung von zufälligen Rumpelstreifen ist zurzeit nur manuell möglich. Das bedeutet, dass die variierenden Abstände händisch ausgemessen, die Fräsmaschine für jede Fuge einzeln positioniert und die Frästrommel bei Stillstand der Fräsmaschine abgesenkt werden muss. Ohne die Entwicklung einer automatisierten Erstellung von Rumpelstreifen mit zufälligem Fugenabstand ist der Einsatz dieser Art der Rumpelstreifen daher wirtschaftlich mit großen Nachteilen behaftet.

Sinusförmige Rumpelstreifen

Das Fehlen der Kante der Einzelfugen bei sinusförmigen Rumpelstreifen (durch starke Abrundung des Übergangs) vermindert die Anregungsintensität und führt gegenüber konventionellen Rumpelstreifen bei gleicher Periodizität bzw. Wellenlänge und Fugentiefe meist zu geringeren akustischen Auswirkungen – innen wie außen. Bei einer großen Wellenlänge von 600 mm ist dies stets deutlich ausgeprägt und führt sowohl bei gerader wie auch bei gewölbter Frästrommel dazu, dass sich Schallemissionen und -immissionen, wie auch die Geräusche im Inneren des LKWs, kaum vom Fahrgeräusch ohne Rumpelstreifenüberfahrt unterscheiden. Lediglich beim PKW treten geringfügige Pegelerhöhungen im Fahrzeuginneren von wenigen Dezibel auf. Bei einer kürzeren Wellenlänge von 300 mm kommt es jedoch in allen Bereichen zu Pegelerhöhungen - beim PKW im Fahrzeuginneren ist sogar ein deutlicher Anstieg von mehr als 15 dB zu verzeichnen.

Der geringe akustische Effekt von Sinusstreifen mit einer Wellenlänge von 600 mm spiegelt sich auch in den Lästigkeits- und Dringlichkeitsurteilen wider, die sich nur geringfügig vom normalen Fahrgeräusch unterscheiden, während bei kürzeren Wellenlängen beide subjektiven Beurteilungen stark zunehmen. Hervorzuheben ist, dass die Lästigkeit der Immissionen von Sinusstreifen mit großer Wellenlänge beim LKW deutlich über jener des PKWs liegt. Grund hierfür ist, dass die Immissionen durch den Rumpelstreifen in den Hintergrund treten und primär das normale Fahrgeräusch beurteilt wurde. Auch im Reaktionstest schlägt sich dies nieder: Sinusstreifen mit einer Wellenlänge von 600 mm weisen beim PKW durch eine deutliche Erhöhung der Reaktionszeiten, beim LKW sogar weitestgehend fehlende Reaktionen auf.

Langwellige Sinusprofile (600 mm) rufen beim PKW meist ähnlich oder geringfügig niedrigere, gewichtete Vibrationen am Lenkrad hervor, wie konventionelle Rumpelstreifen mit regelmäßig angeordneten Fugen bei gleicher Periodizität. Beim LKW sind zwar die Schwankungen zwischen den Messserien sehr groß. Werden jedoch die Ergebnisse nur

innerhalb der Messserien verglichen, so entsteht ein ähnliches Bild: kürzere Wellenlängen (300 mm) bewirken vor allem beim PKW eine deutliche Reduktion der Vibrationen. Bei beiden Fahrzeugkategorien liegen sie damit auf vergleichbarem Niveau wie konventionelle Rumpelstreifen mit periodisch angeordneten Fugen.

Konische Rumpelstreifen

Die durch die Schrägstellung des Fräskopfes erzeugten Fugen sollten bei Linksneigung den Schall unter das Fahrzeug lenken, wodurch die Schallabstrahlung in die Umgebung geringfügig reduziert und im besten Fall gleichzeitig eine geringe Anhebung des Pegels im Fahrzeuginneren erreicht werden sollte. Zur besseren Beurteilung, ob derartige Effekte in einem signifikanten Maß auftreten, wurde neben links- auch rechtsgeneigte Fugen erstellt, bei welchen eine gegenteilige Wirkung erwartet wurde.

Die mittleren Schallimmissionen zeigen bei den beiden Fahrzeugkategorien unterschiedliche Wirkung: während beim LKW tatsächlich die mittleren Immissionen bei Linksneigung um 1-2 dB geringer sind, als bei Rechtsneigung, besteht eine ähnliche Differenz jedoch mit umgekehrten Vorzeichen beim PKW. Die Tendenzen beim Innengeräusch sind zudem bereits zwischen den beiden Messserien gegenläufig: während bei der 1. Messserie (passend zu den Schallimmissionen des LKWs, nicht jedoch zu jenen des PKWs) bei Rechtsneigung höhere Schalldruckpegel vorhanden sind, gleicht sich dies bei der 2. Messserie an bzw. sind beim PKW sogar bei Linksneigung geringfügig höhere Werte vorhanden.

Die hohe Variabilität der Messergebnisse kann möglicherweise durch die starke Abhängigkeit der Anregung durch die zu- bzw. abnehmende Fugentiefe bei Querversatz bei Rumpelstreifenüberfahrt erklärt werden, welche bereits von dem PKW-Testfahrer subjektiv wahrgenommen wurde. Zudem sind der Genauigkeit der manuellen Beurteilung des Querversatzes anhand der fahrzeugseitigen Videoaufzeichnungen Grenzen gesetzt, sodass diese der erhöhten Querversatzsensitivität nicht gerecht wurde. Aufgrund dessen kann im Rahmen dieses Projekts die erwartete, vorteilhafte Wirkung bei linksgeneigten Fugen nicht bestätigt werden.

Tabellarischer Vergleich der Bewertungsparameter

Eine zusammenfassende Darstellung aller Ergebnisse gestaltet sich aufgrund der mehrdimensionalen Zielsetzung schwierig. In den beiden folgenden Überblickstabellen Tab. 9-1 und Tab. 9-2 sind die wesentlichen Bewertungsparameter der Geräuschsituation

Kurzbezeichnung	RS0a	RS1	RS4	RS5	RS6	RS7	
Beschreibung	konventionell (häufig verwendeter Abstand)	konventionell mit doppeltem Fugenabstand	konventionell mit Zufallsabständen	Sinus mit gewölbter Frästrommel	Sinus ausschließlich im Längsprofil	Sinus mit gewölbter Frästrommel	
Fugenform							
Fräsmuster							
Grundriss Einzelfuge	rechteckig	rechteckig	rechteckig	wellenförmig	-	wellenförmig	
Frästrommel	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	gewölbt	gewölbt	gewölbt	
Breite B / mm	300	300	300	150 - 300	300	100 - 300	
Länge L / mm	150	200	140	durchgehend	durchgehend	durchgehend	
Fugenabstand A / mm	300	600	300 (Mittel)	600	600	300	
Tiefe T / mm	7	10	10	9 - 16	0 - 7	6 - 16	
PKW	Spitzenlautstärkepegel $L_{N5, 25\text{ m}}$	96 Phon (0)	-3 Phon (3)	3 Phon (-3)	-11 Phon (10)	-11 Phon (10)	-2 Phon (2)
	Spitzenlautstärkepegel $L_{N5, 7,5\text{ m}}$	104 Phon (0)	-3 Phon (2)	4 Phon (-4)	-11 Phon (10)	-10 Phon (9)	-1 Phon (1)
	Anstieg Medianer Lautstärkepegel $L_{N50, \text{innen}}$	16 Phon (0)	-2 Phon (-2)	-1 Phon (0)	-13 Phon (-10)	-13 Phon (-10)	1 Phon (0)
	Anstieg Vibration Lenkrad (RMS, ISO 5346-1)	0,3 m/s ² (0)	1,7 m/s ² (8)	0,4 m/s ² (2)	1,1 m/s ² (5)	1,3 m/s ² (6)	0,2 m/s ² (1)
LKW	Spitzenlautstärkepegel $L_{N5, 25\text{ m}}$	96 Phon (0)	-1 Phon (2)	1 Phon (-2)	-6 Phon (10)	-6 Phon (9)	-3 Phon (4)
	Spitzenlautstärkepegel $L_{N5, 7,5\text{ m}}$	105 Phon (0)	-1 Phon (2)	2 Phon (-3)	-7 Phon (10)	-6 Phon (9)	-3 Phon (4)
	Anstieg Medianer Lautstärkepegel $L_{N50, \text{innen}}$	2,8 Phon (0)	1,5 Phon (5)	3,1 Phon (10)	-2,1 Phon (-7)	-2,1 Phon (-7)	-0,7 Phon (-2)
	Anstieg Vibration Lenkrad (RMS, ISO 5346-1) ^b	0,0 m/s ² (0)	0,3 m/s ² (10)	0,1 m/s ² (2)	0,2 m/s ² (5)	0,1 m/s ² (3)	0,1 m/s ² (2)

Allgemeine Anmerkungen

-) RS0a stellt die Referenz dar, für alle anderen Rumpelstreifen wird die Differenz angegeben
-) Für die Werte in den Klammern wurde die maximale Differenz auf 10 normiert, eine positive Zahl bedeutet eine Verbesserung, eine negative Zahl eine Verschlechterung
-) Für Lastigkeit und Dringlichkeit wurden die am besten korrelierenden psychoakustischen Maße verwendet
-) Für die Innenraummessungen wurden die Daten der Messreihe 2 verwendet

^a Durch die tiefere Fräsung zu Beginn von RS12 wird die Vibration beim PKW etwas überschätzt

^b Die gewichtete Vibration beim LKW variiert nur in einem geringen Bereich und zeigte vergleichsweise große Unterschiede in den beiden Messserien

Tab. 9-1: Überblick über wesentliche Rumpelstreifen (Teil 1/2): geometrische Formen und Bewertungsparameter

Kurzbezeichnung	RS10	RS11	RS12	RS13	RS14	
Beschreibung	Sinus, breiter und tiefer als RS6	Sinus, breiter, tiefer und halber Fugenabstand gegenüber RS6	konventionell mit doppeltem Fugenabstand, breiter und flacher als RS12	konventionell, breiter und höherer Fugenabstand gegenüber RS0a	konventionell mit Zufallsabständen, breiter, flacher u. doppelter Abstand als bei RS4	
Fugenform						
Fräsmuster						
Grundriss Einzelfuge	-	-	rechteckig	rechteckig	rechteckig	
Frästrommel	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	
Breite B / mm	350	350	350	350	350	
Länge L / mm	durchgehend	durchgehend	200	150	120	
Fugenabstand A / mm	600	300	600	400	600 (Mittel)	
Tiefe T / mm	0 - 7 (10)	0 - 7 (10)	7	7	7	
PKW	Spitzenlautstärkepegel L_{N5} , 25 m	-	-8 Phon (7)	-4 Phon (4)	-	
	Spitzenlautstärkepegel L_{N5} , 7,5 m	-10 Phon (9)	-5 Phon (5)	-7 Phon (6)	-3 Phon (2)	-2 Phon (2)
	Anstieg Medianer Lautstärkepegel L_{N50} , innen	-13 Phon (-10)	-1 Phon (-1)	-5 Phon (-4)	-9 Phon (-7)	-6 Phon (-5)
	Anstieg Vibration Lenkrad (RMS, ISO 5346-1)	1,6 m/s ² (7)	-0,1 m/s ² (0)	2,2 m/s ² ^a (10)	0,0 m/s ² (0)	0,3 m/s ² (1)
LKW	Spitzenlautstärkepegel L_{N5} , 25 m	-	-4 Phon (7)	-1 Phon (1)	-	
	Spitzenlautstärkepegel L_{N5} , 7,5 m	-6 Phon (9)	-4 Phon (5)	-4 Phon (6)	-1 Phon (2)	-4 Phon (5)
	Anstieg Medianer Lautstärkepegel L_{N50} , innen	-2,1 Phon (-7)	-1,6 Phon (-5)	-0,6 Phon (-2)	2,5 Phon (8)	0,0 Phon (0)
	Anstieg Vibration Lenkrad (RMS, ISO 5346-1) ^b	0,1 m/s ² (4)	0,0 m/s ² (0)	0,2 m/s ² (5)	0,1 m/s ² (4)	0,2 m/s ² (6)

Allgemeine Anmerkungen

-) RS0a stellt die Referenz dar, für alle anderen Rumpelstreifen wird die Differenz angegeben
-) Für die Werte in den Klammern wurde die maximale Differenz auf 10 normiert, eine positive Zahl bedeutet eine Verbesserung, eine negative Zahl eine Verschlechterung
-) Für Lastigkeit und Dringlichkeit wurden die am besten korrelierenden psychoakustischen Maße verwendet
-) Für die Innenraummessungen wurden die Daten der Messreihe 2 verwendet

^a Durch die tiefere Fräsung zu Beginn von RS12 wird die Vibration beim PKW etwas überschätzt

^b Die gewichtete Vibration beim LKW variiert nur in einem geringen Bereich und zeigte vergleichsweise große Unterschiede in den beiden Messserien

Tab. 9-2: Überblick über wesentliche Rumpelstreifen (Teil 2/2): geometrische Formen und Bewertungsparameter

neben der Strecke und im Fahrzeuginnenen, sowie der Lenkradbeschleunigungen sowohl als gemessene Unterschiede, als auch in Form einer zahlenmäßigen Bewertung bezogen auf die konventionellen Rumpelstreifen mit einem Fugenabstand von 300 mm für PKW und LKW dargestellt. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass durch eine isolierte Betrachtung einzelner Bewertungsparameter ohne Vergleich mit den weiteren Parametern die wesentlichen Projektergebnisse nicht vollständig wiedergegeben werden können. Hierfür können auch die Abbildungen in Kapitel 8 herangezogen werden, welche die verschiedenen Messwerte für innen und außen gegenüberstellen.

9.2. Schlussfolgerungen

Aus den durchgeführten Untersuchungen lassen sich mehrere Schlussfolgerungen ableiten:

- 1) Grundsätzlich hat sich gezeigt, dass Außen- und Innengeräusch in relativ hohem Ausmaß korrelieren: ausgehend von den konventionellen Rumpelstreifen können höhere Innengeräusche in der Regel nur erzielt werden, wenn auch Schallemissionen und –immissionen ansteigen. Allerdings kann durch ungünstiges Design der Rumpelstreifen der problematische Fall hervorgerufen werden, dass die Emissionen und Immissionen ansteigen, während sich das Fahrzeuginnengeräusch nur unwesentlich ändert.
- 2) Im PKW kann schon durch relativ moderate Rumpelstreifen ein akustischer Effekt erzielt werden, die Reaktion bei Streifen die hauptsächlich Vibration erzeugen (600 mm Sinus) ist dies allerdings nicht immer gegeben.
- 3) Wenn eine bestimmte akustische Wirkung im LKW benötigt wird, z.B. Pegelanstieg größer 5 dB oder eine zuverlässige Reaktion auf eine akustische Veränderung, so hat dies immer einen deutlichen Anstieg des Außengeräuschs und damit auch einen Anstieg der Lästigkeit vor allem beim PKW zur Folge.
- 4) Soll die Umgebung wenig bis gar nicht beeinträchtigt werden, kommen laut den vorliegenden Ergebnissen nur sinusförmige Streifen in Frage. Zwar zeigen diese Streifen bei einer Wellenlänge von 300 mm deutliche Lärmzunahmen in der Umgebung. doch bei 600 mm verursachen sie im Außenbereich nur sehr geringfügige zusätzliche Emissionen. Dementsprechend sind im PKW akustische Komponenten nur in geringem Ausmaß und im LKW gar nicht mehr vorhanden, während Vibrationen am Lenkrad gegenüber konventionellen Rumpelstreifen in ähnlicher Form bestehen bleiben. Ob diese für eine Warnung von (eventuell ermüdeten) Fahrern ausreicht, konnte im Zuge dieser Untersuchungen nicht erhoben werden.

- 5) Für noch längere Fugenabstände (z.B. 1200 mm), welche hier nicht untersucht wurden, ist davon auszugehen, dass der Lärm nicht stärker wird, allerdings ist unklar wie stark Vibrationen am Lenkrad auftreten. Hier stellt sich auch die Frage, ob bei steileren Überfahrtswinkeln, welche zu sehr kurzen Rumpelstreifenüberfahrtszeiten führen, überhaupt noch starke Effekte zu erwarten sind.
- 6) Bzgl. der Breite der Streifen sind die Daten nicht eindeutig, allerdings erscheint aufgrund der durchschnittlich deutlich größeren Reifenbreite von LKWs eine breitere Fräsung (mindestens 350 mm) sinnvoll. Außerdem würde sich dadurch auch die Überfahrtsdauer erhöhen, wodurch sich die Wahrnehmung verbessern könnte.
- 7) An sehr kritischen Stellen mit einer hohen Unfallhäufung und dichter Besiedelung können die Sicherheitsziele und eine gleichzeitige Senkung der Lärmbelastung von Anrainern möglicherweise durch ein noch näher zu untersuchendes, zweistufiges Verfahren erreicht werden. Dabei wird ein 600 mm Sinusstreifen, welcher vor allem Vibrationen hervorruft, nahe an der Begrenzungslinie als Vorwarnstreifen angeordnet. Etwas versetzt befindet sich ein zweiter, akustisch wirksamer Streifen, der aber vermutlich deutlich seltener überfahren werden wird. Nachteilig bei diesem Ansatz sind jedoch die erhöhten Erstellungskosten.

10. DANKSAGUNG

Abschließend möchten sich die Autoren bei allen Mitarbeitern der Autobahnmeisterei Stockerau bedanken, deren Unterstützung maßgeblich dazu beigetragen hat, die Vermessung und Erstellung der Teststrecke sowie die Überfahrmessungen erfolgreich durchzuführen. Im Besonderen gilt der Dank auch Herrn Josef Mechtler, welcher durch kompetente, konstruktive und lösungsorientierte Beiträge bei der Umsetzung diverser Tätigkeiten geholfen und eine hohe Flexibilität bei der Dienstenteilung für die nur sehr kurzfristig anberaubbaren Messungen gezeigt hat.

11. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Markus Lerner, Andreas Hegewald, Ulrich Löhe und Helmut Velling, "Sicherheitwirkung eingefräster Rüttelstreifen entlang der BAB A 24, Bericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt AP 3610", Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V177, Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach, April 2009, ISBN 978-3-86509-896-3.
- [2] Chung Chen, Emmanuel O. Darko und Tannoueray N. Richardson, "Optimal Continuous Shoulder Rumble Strips and the Effects on Highway Safety and the Economy", in *ITE Journal*, Mai 2003, S. 30-41.
- [3] Eric T. Donnell, H. Joseph Sommer, Philip M. Garvey, Scott C. Himes und Darren J. Torbic, "Statistical model of in-vehicle sound generated from highway rumble strips", in *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, Vol. 5, Nr. 4, 2009, S. 308-328, DOI: 10.1504/IJVNV.2009.031134.
- [4] Delaware Departement of Transportation, "SR 24 Longitudinal Edge Line Rumble Strip", 2012.
- [5] DIN 45681, "Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschmissionen", Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, März 2005.
- [6] "Verordnung über den Schutz der Arbeitnehmer/innen vor der Gefährdung durch Lärm und Vibrationen (Verordnung Lärm und Vibrationen – VOLV)", BGBl. II Nr. 22/2006,.
- [7] Kerry Perrillo, "The Effectiveness and Use of Continuous Shoulder Rumble Strips", Albany, New York, Aug. 1998, Online: https://safety.fhwa.dot.gov/roadway_dept/research/conts_rumble/conts_rumble.pdf.
- [8] World Health Organization (WHO), "Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe", 2011, ISBN 978 92 890 0229 5.
- [9] Jorgen Kragh, Bent Andersen und Sigurd N. Thomsen, "Low Noise Rumble Strips on Roads - A Pilot Study", in *Conference Proceedings of Internoise*, 2007, S. 755-764.
- [10] Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), "Messbericht über die Geräusch- und Schwingungsmessung beim Überfahren von Rumpelstreifen", 2009.
- [11] Brigade Electronics, bbs-tek Rückfahrwarner, Online: <http://www.rueckfahrwarner.at/images/stories/Bilder/BBS-Tek.pdf>.
- [12] J. Edworthy, S. Loxley und I. Dennis, "Improving auditory warning design: relationship between warning sound parameters and perceived urgency", in *The Journal of Human*

- Factors*, Vol. 33, Nr. 2, April 1991, S. 205-231, DOI: 10.1177/001872089103300206.
- [13] C. Suied, P. Susini und S. McAdams, "Evaluating warning sound urgency with reaction times", in *Journal of Experimental Psychology Applied*, Vol. 14, Nr. 3, Sept. 2008, S. 201-212, DOI: 10.1037/1076-898X.14.3.201.
- [14] O. Houix et al., "Perceptual influence of the vibratory component on the audio component of alarms produced by rumble strips, by measuring reaction times", in *Proceedings of the Acoustics 2012 Nantes Conference*, April 2012, S. 1083-1088.
- [15] Jeffrey Miles und Melisa Finley, "Factors That Influence the Effectiveness of Rumble Strip Design", in *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2030, 2007, S. 1-9, DOI: 10.3141/2030-01.
- [16] Troy Bucko, Evaluation of Milled-In Rumble Strips, Rolled-In Rumble Strips and Audible Edge Stripes. Online: <http://www.dot.ca.gov/newtech/researchreports/reports/2001/milled-in.pdf>
- [17] DIN EN ISO 8041, "Schwingungseinwirkung auf den Menschen – Messeinrichtung (ISO 8041:2005)", Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Juni 2006.
- [18] DIN EN ISO 5349-1, "Messung und Bewertung der Einwirkung von Schwingungen auf das Hand-Arm-System des Menschen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen", Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Dez. 2001.
- [19] ÖNORM ISO 2631-1, "Mechanische Schwingungen und Stöße - Bewertung der Auswirkung von Ganzkörperschwingungen auf den Menschen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen", Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2007.
- [20] Norbert Ostermann et al., "Psychoakustische Analyse von schienenverkehrsinduzierten Schallimmissionen - PASS", im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung 2012 durch BMVIT und ÖBB gefördertes Projekt, Nov. 2014, Online: <https://www2.ffg.at/verkehr/file.php?id=638>.
- [21] Christian Kasess, Wolfgang Kreuzer und Holger Waubke, "An efficient quadrature for 2.5D boundary element calculations", in *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 382, Nov. 2016, S. 213-226, DOI: 10.1016/j.jsv.2016.06.041.
- [22] ISO 9613-1:1993, "Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere".
- [23] Damián Marelli und Peter Balazs, "On Pole-Zero Model Estimation Methods Minimizing a Logarithmic Criterion for Speech Analysis", in *IEEE Transactions on Audio, Speech,*

- and Language Processing*, Vol. 18, Nr. 2, Feb 2010, S. 237-248, DOI: 10.1109/TASL.2009.2025544.
- [24] Mats E. Nilsson, Mikael Andéhn und Paulina Leśna, "Evaluating roadside noise barriers using an annoyance-reduction criterion", in *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 124, Nr. 6, 2008, S. 3561-3567, DOI: 10.1121/1.2997433.
- [25] H. L. Lane, A. C. Catania und S. S. Stevens, "Voice Level: Autophonic Scale, Perceived Loudness, and Effects of Sidetone", in *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 33, Nr. 160, 1961, S. 160-167, DOI: 10.1121/1.1908608.
- [26] Samuel W. Greenhouse und Seymour Geisser, "On methods in the analysis of profile data", in *Psychometrika*, Vol. 24, Nr. 2, Juni 1959, S. 95-112, DOI: 10.1007/BF02289823.
- [27] H. J. Keselman, Joanne C. Keselman und Juliet P. Shaffer, "Multiple pairwise comparisons of repeated measures means under violation of multisample sphericity", in *Psychological Bulletin*, Vol. 110, Nr. 1, Juli 1991, S. 162-170, DOI: 10.1037/0033-2909.110.1.162.
- [28] H. J. Keselman, "Testing treatment effects in repeated measures designs: an update for psychophysiological researcher", in *Psychophysiology*, Vol. 35, Nr. 4, Juli 1998, S. 470-478.
- [29] Gideon Schwarz, "Estimating the dimension of a model", in *The Annals of Statistics*, Vol. 6, Nr. 2, 1978, S. 461-464.
- [30] Polat Sendur, Ali Kurtdere und Oral Akaylar, "A Methodology to Improve Steering Wheel Vibration of a Heavy Commercial Truck", in *Internoise 2016*, Hamburg, S. 7325-7336.
- [31] Shuming Chen, Dengfeng Wang, Gangping Tan und Jianming Zan, "Modal Analysis of Automotive Steering System Based on Finite Element Method", in *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 121-126, 2012, S. 2085-2090, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.121-126.2085.
- [32] Toshisuke Miwa, "Evaluation methods for vibration effect - Part 3. Measurements of threshold and equal sensation contours on hand for vertical and horizontal sinusoidal vibrations", in *Industrial Health*, Vol. 5, Nr. 3-4, 1967, S. 213-220, DOI: 10.2486/indhealth.5.213.
- [33] Miyuki Morioka und Michael J. Griffin, "Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical hand-transmitted vibration", in *Journal of*

Sound and Vibration, Vol. 295, Nr. 3-5, August 2006, S. 633-648, DOI:
10.1016/j.jsv.2006.01.029.

- [34] Miyuki Morioka und Michael J. Griffin, "Frequency dependence of perceived intensity of steering wheel vibration: effect of grip force", in *Proceedings - EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2007*, Tsukuba, Japan, 2007, S. 50-55, ISBN: 0-7695-2738-8, DOI: 10.1109/WHC.2007.58.
- [35] Ingo Baumann, Michael A. Bellmann, Volker Mellert und Reinhard Weber, "Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwellen von Vibrationen auf einem Kraftfahrzeugsitz", in *Fortschritte der Akustik, DAGA 2001 (CD)*, Hamburg, 2001.
- [36] Miyuki Morioka und Michael J. Griffin, "Independent responses of Pacinian and Non-Pacinian systems with hand-transmitted vibration detected from masked thresholds", in *Somatosensory and Motor Research*, Vol. 22, Nr. 1-2, März-Juni 2005, S. 69-84, DOI: 10.1080/08990220500084644.

Anhang A Teststrecke und Rumpelstreifen

Kurzbezeichnung	RS0a	RS0b	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7
Beschreibung	konventionell (häufig verwendeter Abstand)	konventionell, schärfere Kante als RS0a	konventionell mit doppeltem Fugenabstand	nach links geneigte Frästrommel	nach rechts geneigte Frästrommel	konventionell mit Zufallsabständen	Sinus mit gewölbter Frästrommel	Sinus ausschließlich im Längsprofil	Sinus mit gewölbter Frästrommel
Fugenform									
Fräsmuster									
Grundriss Einzelfuge	rechteckig	rechteckig	rechteckig	trapezförmig	trapezförmig	rechteckig	wellenförmig	-	wellenförmig
Frästrommel	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	gewölbt	gewölbt	gewölbt
Breite B / mm	300	300	300	300	300	300	150 - 300	300	100 - 300
Länge L / mm	150	140	200	200 - 80	80 - 200	140	durchgehend	durchgehend	durchgehend
Fugenabstand A / mm	300	300	600	300	300	300 (Mittel)	600	600	300
Tiefe T / mm	7	10	10	12 - 5	5 - 12	10	9 - 16	0 - 7	6 - 16

Abb. A-1: Überblick Rumpelstreifen des 1. Testfeldes

Kurzbezeichnung	RS8	RS9	RS10	RS11	RS12	RS13	RS14
Beschreibung	Sinus, breiter und flacher als RS6	Sinus, breiter als RS6	Sinus, breiter und tiefer als RS6	Sinus, breiter, tiefer und halber Fugenabstand gegenüber RS6	konventionell mit doppeltem Fugenabstand, breiter und flacher als RS12	konventionell, breiter und höherer Fugenabstand gegenüber RS0a	konventionell mit Zufallsabständen, breiter, flacher und doppelter Abstand als bei RS4
Fugenform							
Fräsmuster							
Grundriss Einzelfuge	-	-	-	-	rechteckig	rechteckig	rechteckig
Frästrommel	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch	zylindrisch
Breite B / mm	350	350	350	350	350	350	350
Länge L / mm	durchgehend	durchgehend	durchgehend	durchgehend	200	150	120
Fugenabstand A / mm	600	600	600	300	600	400	600 (Mittel)
Tiefe T / mm	0 - 2 (4)	0 - 5 (7)	0 - 7 (10)	0 - 7 (10)	7	7	7

Abb. A-2: Überblick Rumpelstreifen des 2. Testfeldes

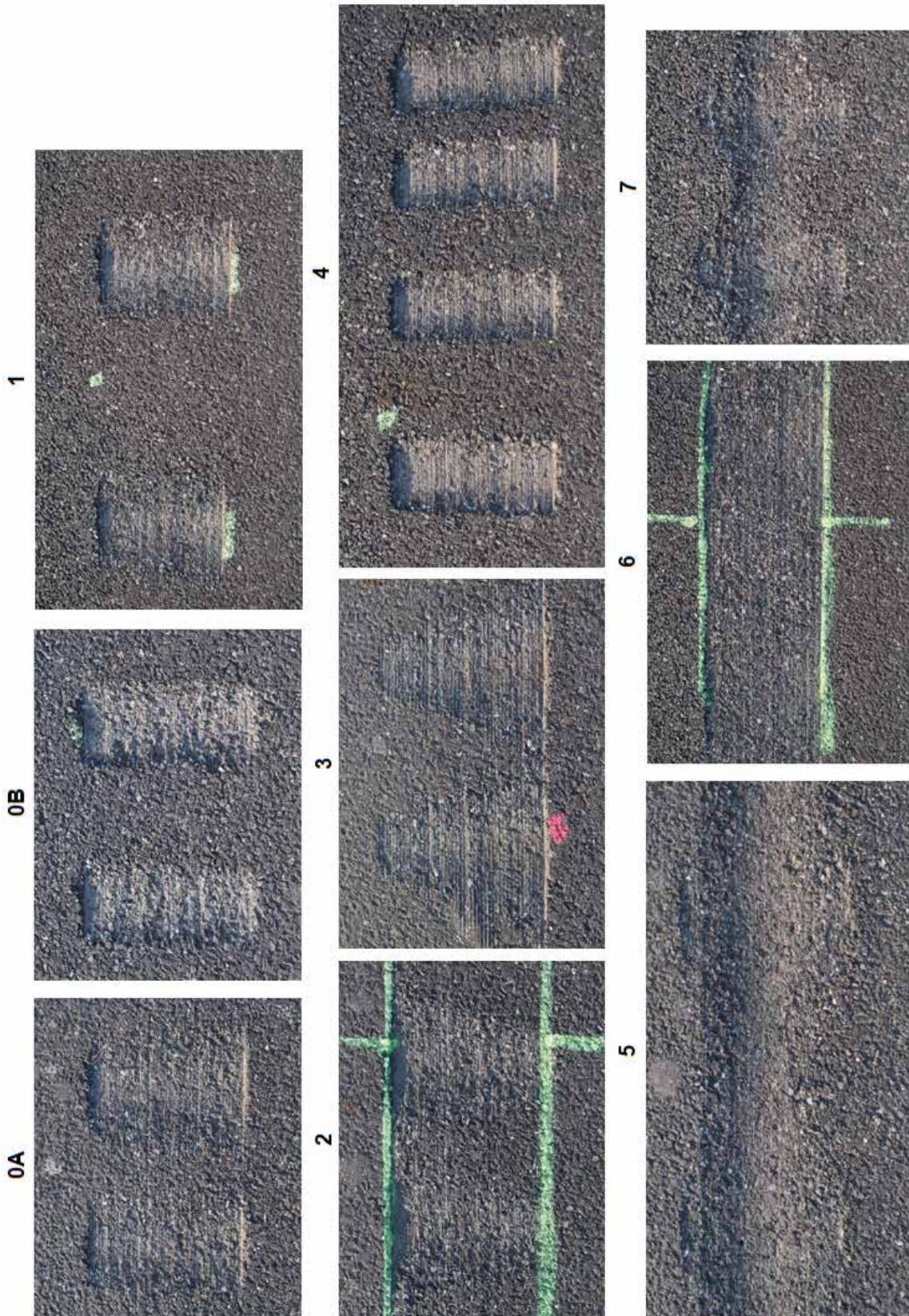


Abb. A-4: Exemplarische Bilder der Fräsungen des 1. Testfelds (2015)

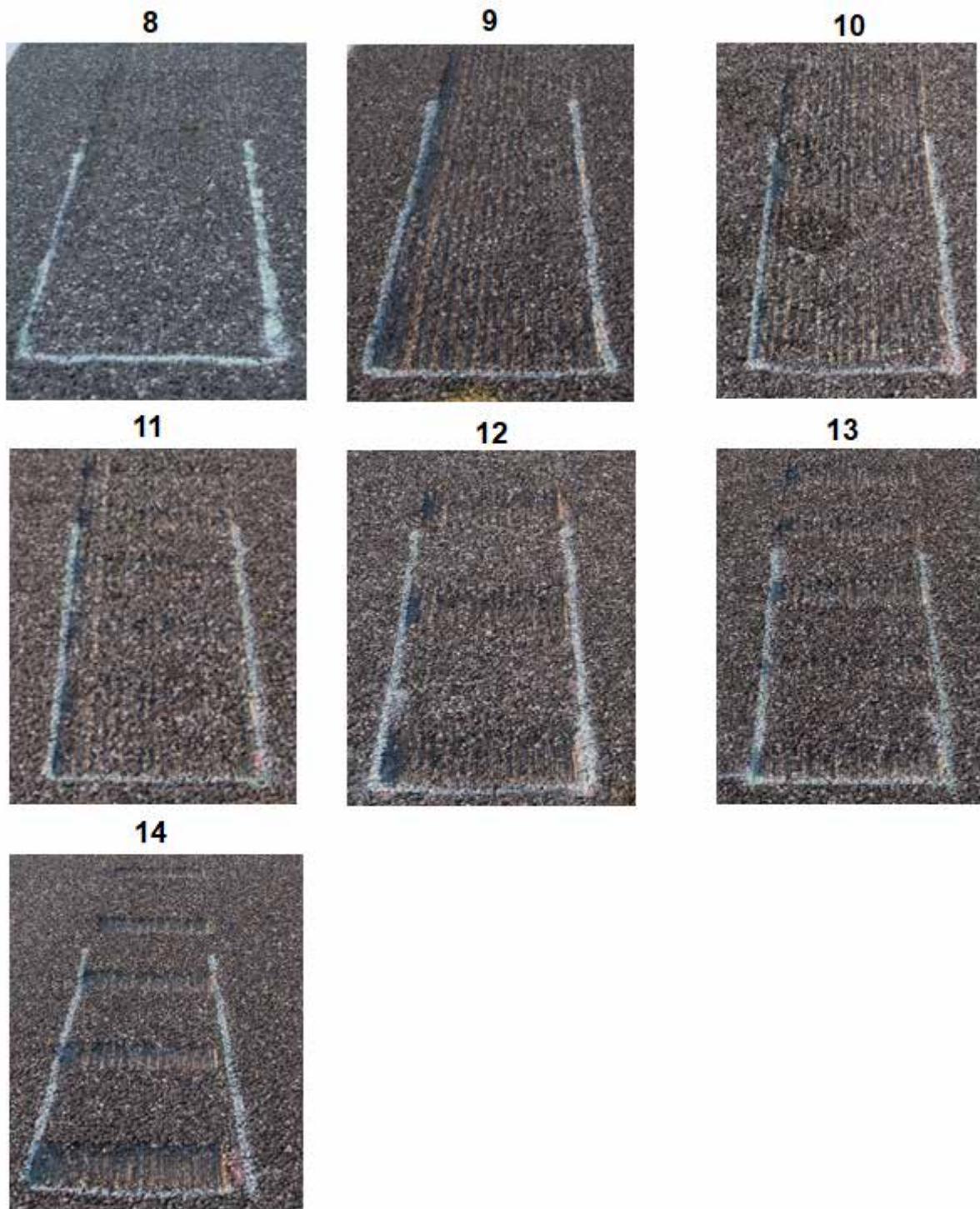


Abb. A-5: Exemplarische Bilder der Fräsungen des 2. Testfelds (2017)

Anhang B Manuelle Segmentierung der Innenraumsignale

In der ersten Messserie war kein externes Signal für die Bestimmung des Startzeitpunktes vorhanden. Daher wurden die Segmente manuell aus Basis des Spektrogramms bestimmt. Im LKW und bei RS5 und RS6 beim PKW wurde eine Waveletdarstellung verwendet, da sich in dieser die Änderungen besser bestimmen ließen. Im Weiteren sind die für die Testauswahl durchgeführten Segmentierungen angeführt. Die für die akustischen Auswertungen an allen Signalen durchgeführte Segmentierung wurde im Prinzip gleich durchgeführt allerdings aufgrund der Menge an Daten haben diese eine etwas größere Unsicherheit. Bei manchen Rumpelstreifen (RS5 und RS6 beim LKW) konnte der Startzeitpunkt nur noch anhand der Fahrdauer vom vorangegangenen RS bestimmt werden.

PKW

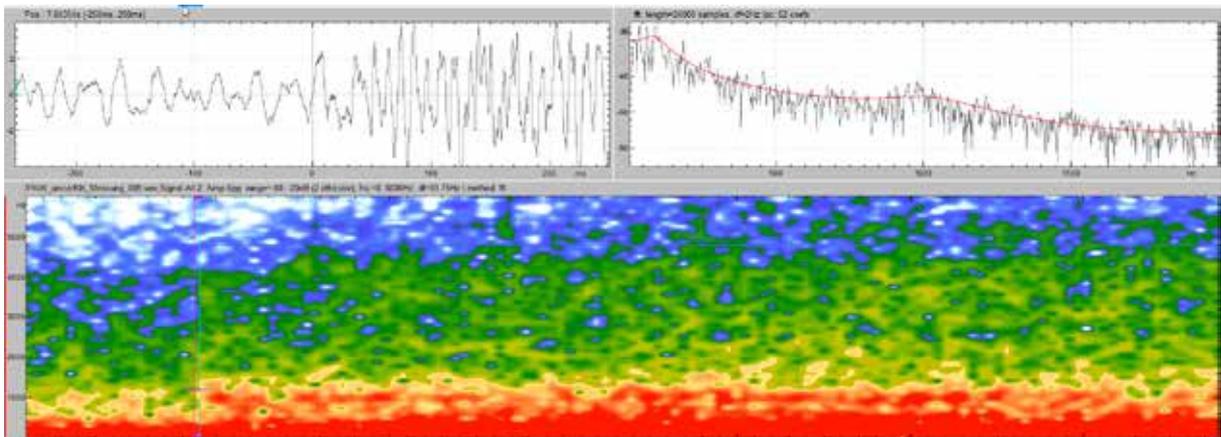


Abb. B-1: RS0a, Messung 09

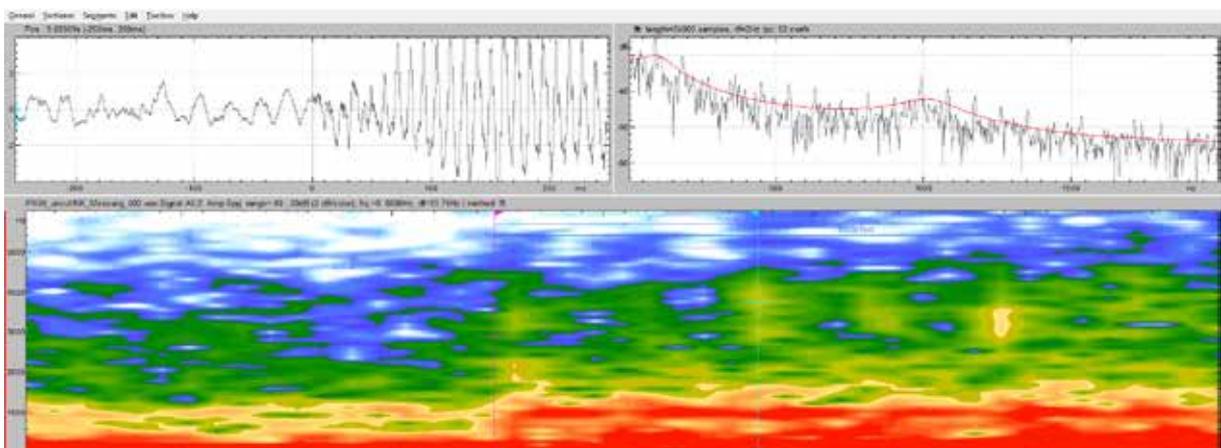


Abb. B-2: RS0b, Messung 02

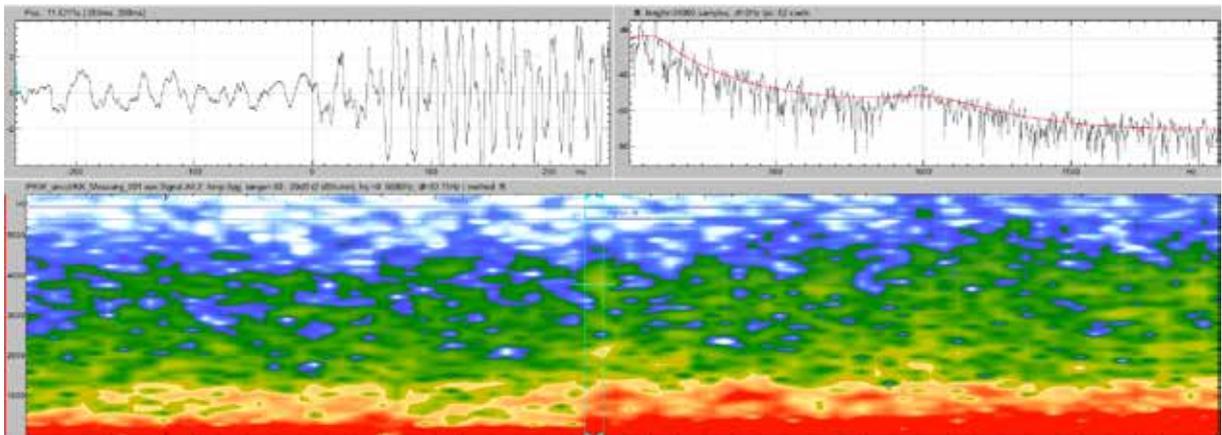


Abb. B-3: RS1, Messung 01

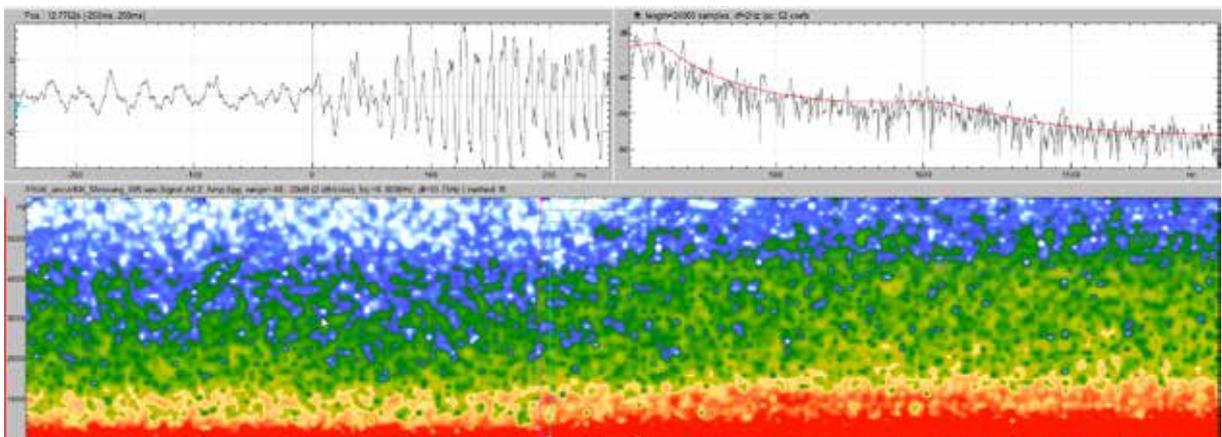


Abb. B-4: RS2, Messung 09

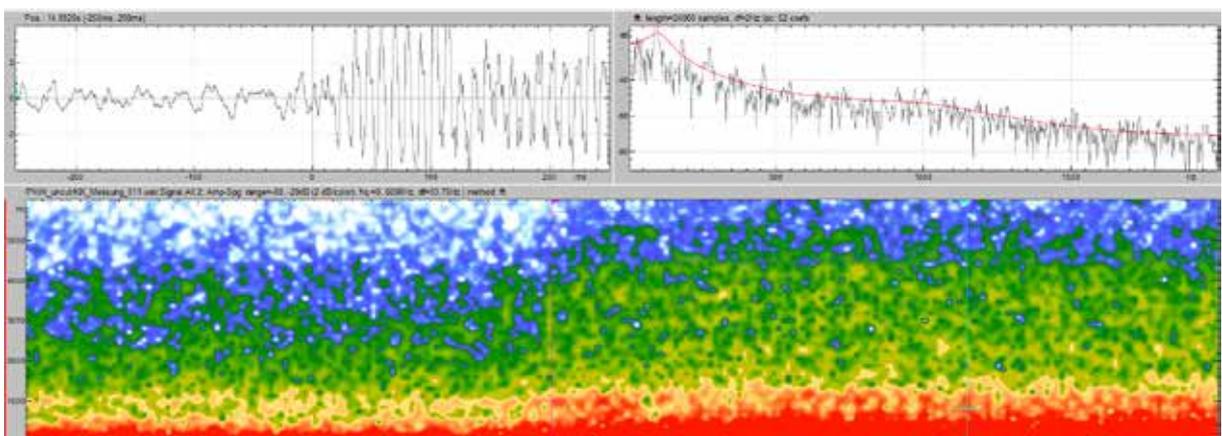


Abb. B-5: RS3, Messung 11

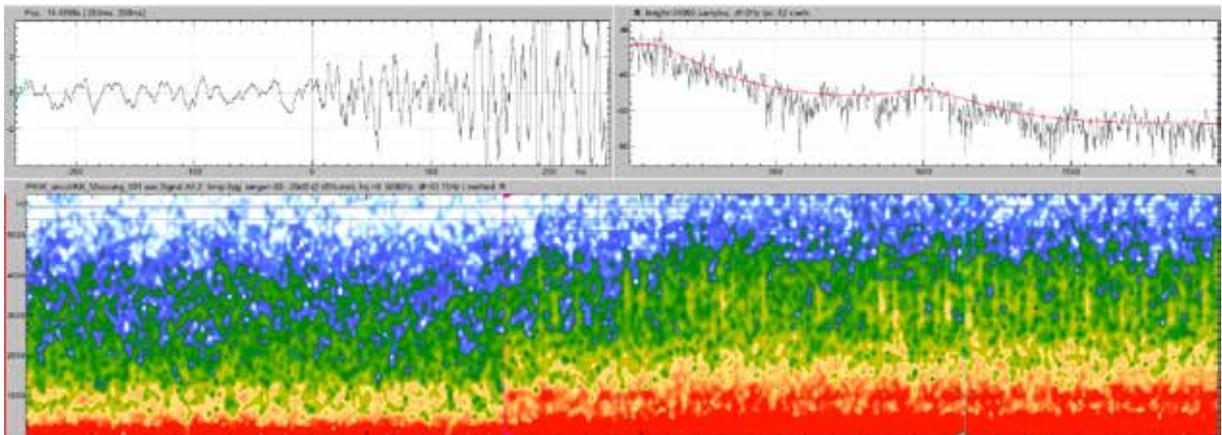


Abb. B-6: RS4, Messung 01

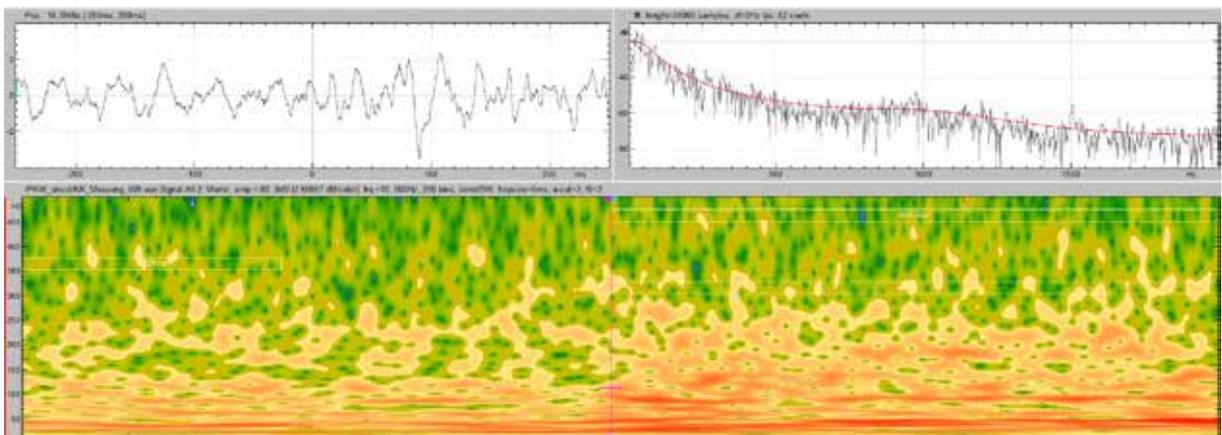


Abb. B-7: RS5, Messung 09

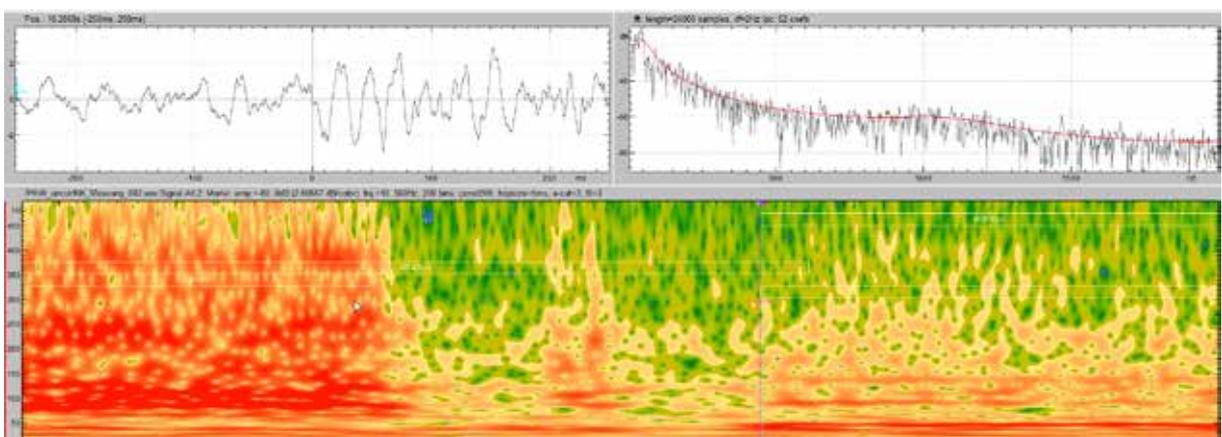


Abb. B-8: RS6, Messung 03

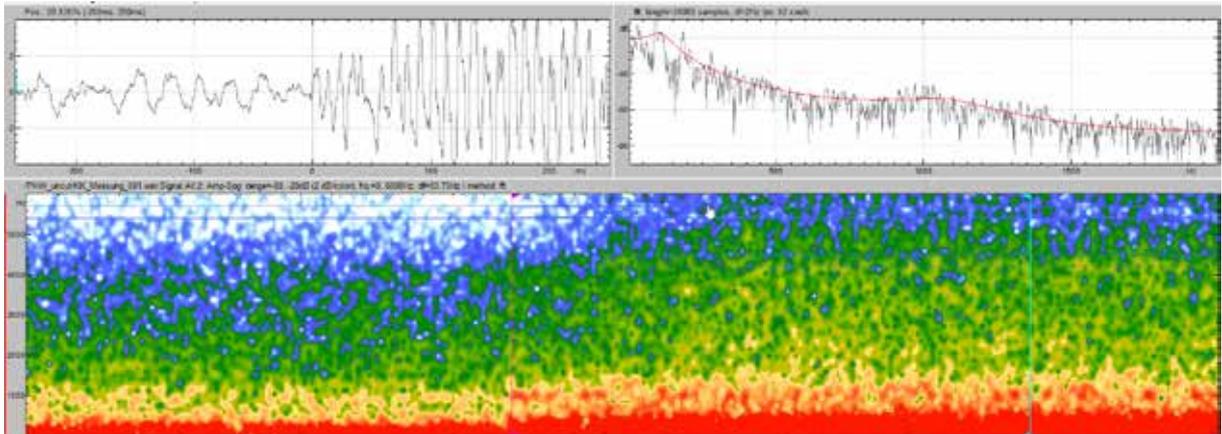


Abb. B-9: RS7, Messung 01

LKW Innen

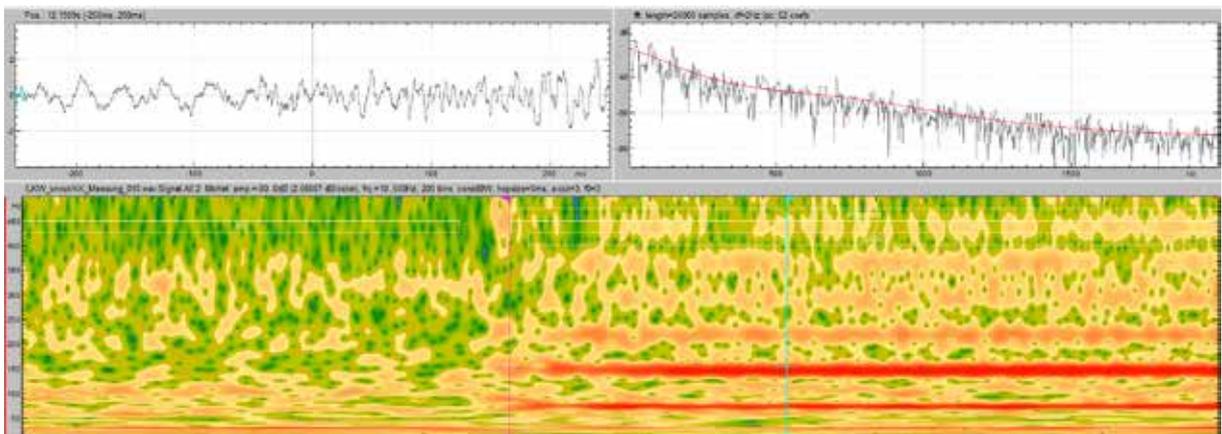


Abb. B-10: RS0a, Messung 10

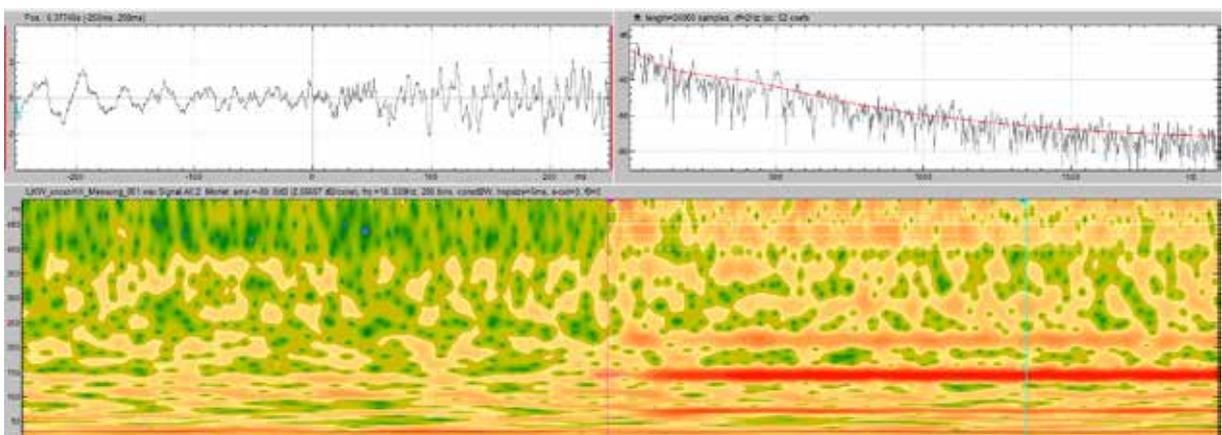


Abb. B-11: RS0b, Messung 01

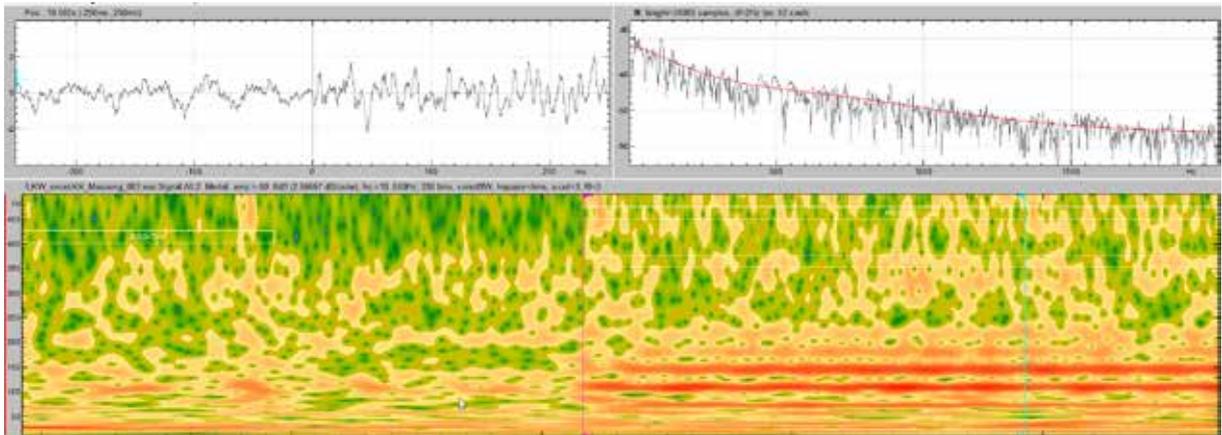


Abb. B-12: RS1, Messung 03

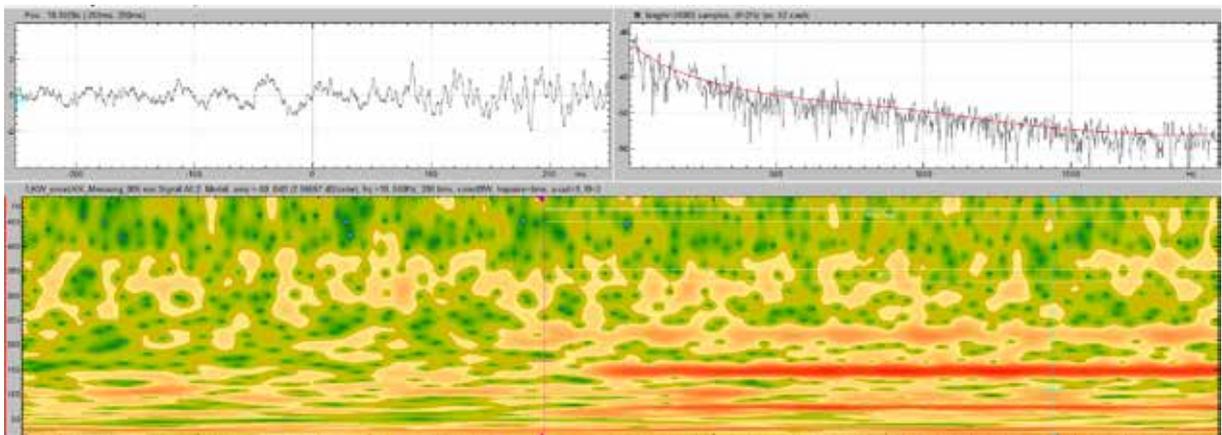


Abb. B-13: RS2, Messung 06

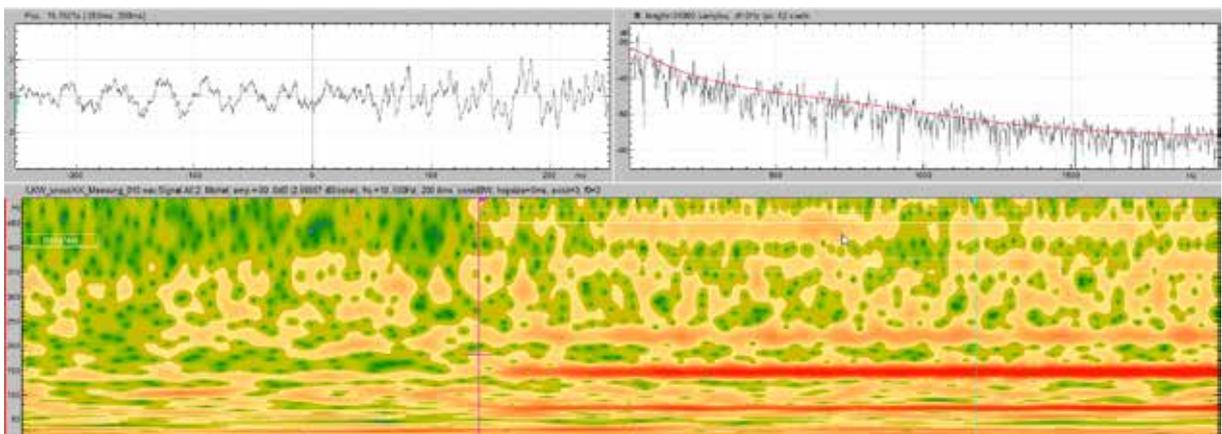


Abb. B-14: RS3, Messung 10

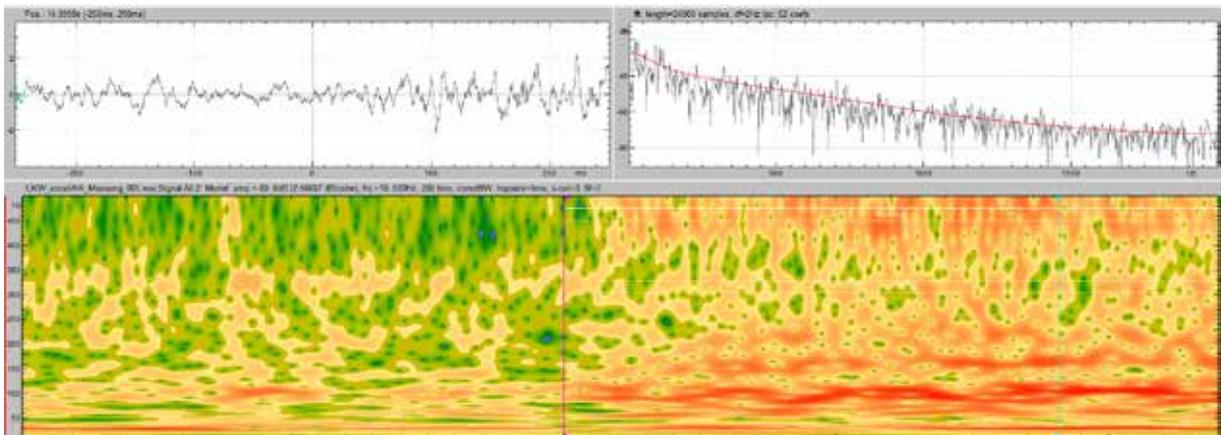


Abb. B-15: RS4, Messung 05

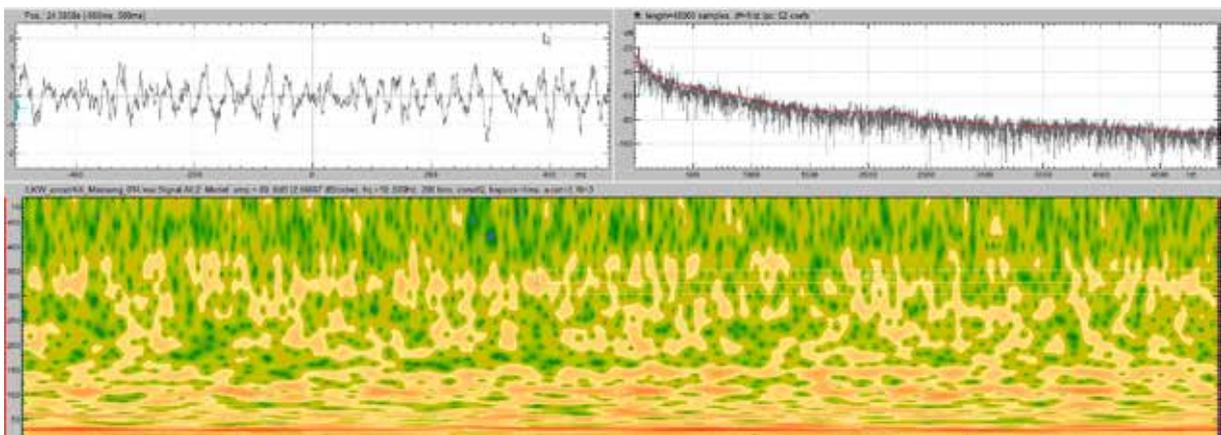


Abb. B-16: RS5, Messung 14

Sowohl bei RS5 als auch bei RS6 war keine Segmentierung aufgrund der akustischen Eigenschaften möglich. Es wurden daher Segmente auf Basis des Abstandes zwischen den Streifen und der Geschwindigkeit erstellt.

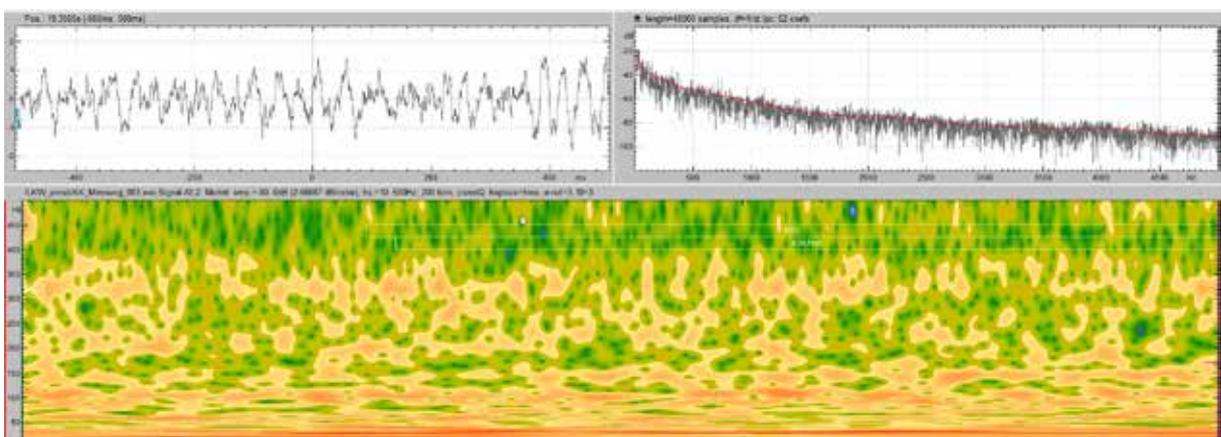


Abb. B-17: RS6, Messung 03

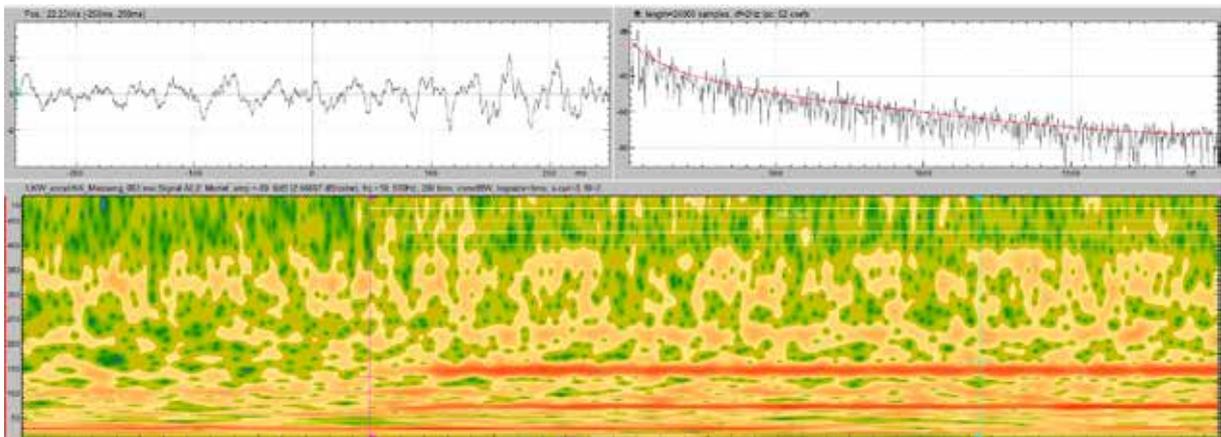


Abb. B-18: RS7, Messung 03

Anhang C Wahrnehmungstest Instruktionen

Test zur Wahrnehmung von Störschall (Teil 1)

Anleitung

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

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

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

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

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

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

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



Vielen Dank für Ihre Mitarbeit

Test zur Wahrnehmung von Warnsignalen (Teil 2)

Anleitung

Der Test wird am Computer mit Hilfe der Tastatur oder der Maus durchgeführt. In der Abbildung sehen Sie die Testoberfläche. Der Aufbau ist sehr einfach, es gibt ein Feld das anzeigt wann der Stimulus gespielt wird (linke Abbildung) und eine Skala auf der Sie die Änderung im Geräusch nach ihrer Dringlichkeit beurteilen können (rechte Abbildung).

Stellen Sie sich vor Sie sitzen im Auto und plötzlich ändert sich das Geräusch im Fahrzeug. Beurteilen Sie die Veränderung des Geräusches danach, wie dringend Sie es erachten, darauf zu reagieren. Die Skala ist in 5 Hauptkategorien unterteilt, es ist auch jeweils eine Zwischenstufe möglich.

Eine Fortsetzung des Experiments ist erst möglich nach Beurteilung der Dringlichkeit (die Schaltfläche mit der Aufschrift „Weiter“ wird aktiv)

Bevor der Test beginnt haben Sie noch Gelegenheit, die Aufgabe zu üben. Nach diesem Training können Sie im Falle von Unklarheiten nochmals Fragen stellen.



Vielen Dank für Ihre Mitarbeit

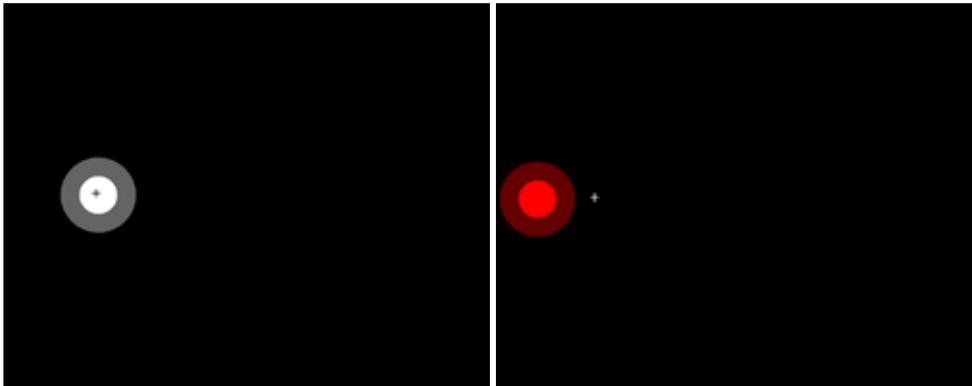
Test zur Wahrnehmung von Warnsignalen (Teil 3)

Anleitung

Der Test wird am Computer mit Hilfe der Tastatur und der Maus durchgeführt. In der Abbildung sehen Sie die Testoberfläche. Es bewegt sich ein Kreis zufällig über den Bildschirm. Ihre Aufgabe ist es, diesem Kreis mit der Maus zu folgen. Wenn der Mauszeiger innerhalb des Kreises ist, so ist dieser grau (linke Abbildung), ansonsten rot (rechte Abbildung). Sie müssen die Maus mit ihrer nicht-dominanten Hand bewegen, d.h. als Rechtshänder mit der linken Hand und umgekehrt. Gleichzeitig hören Sie das Innengeräusch eines Fahrzeugs.

Stellen Sie sich vor Sie sitzen im Auto und plötzlich ändert sich das Geräusch im Fahrzeug. Wenn Sie eine solche Änderung wahrnehmen, drücken Sie so schnell wie möglich die Leertaste der Tastatur. Es gibt keine visuelle Rückmeldung, daher ist es wichtig die Taste fest durchzudrücken. Weiters ist hier die Geschwindigkeit, nicht die Dauer des Tastendrucks entscheidend.

Bevor der Test beginnt haben Sie noch Gelegenheit, die Aufgabe zu üben. Nach diesem Training können Sie im Falle von Unklarheiten nochmals Fragen stellen



Vielen Dank für Ihre Mitarbeit

Anhang D Fahrerbefragung

Hinweise zum Fragebogen:

Beurteilung: wahrgenommene Dringlichkeit der Rumpelstreifen (wie dringend ist eine Reaktion aufgrund der Veränderung der Geräusch- und Vibrationskulisse notwendig). Beurteilt soll der Gesamteindruck werden (Geräusch, Vibration).

Skala: 5 (sehr dringend)
4
3
2
1 (gar nicht dringend)

Überfahrt:

- mit den rechten Rädern der Fahrzeuge möglichst vollständig überdeckend (Zwillingstreifen ausgenommen)
- möglichst konstante Geschwindigkeit
 - LKW vorzugsweise mit 80 km/h
 - Klein-LKW und PKW vorzugsweise mit 100 km/h
- Alle 4 oder 5 Streifen (je nach Spur) sollen überfahren werden

Nach der Überfahrt:

- In Pannenbucht anhalten (ca. 600 m nach den Rumpelstreifen)
- Unmittelbar protokollieren
- Alternativ: Aufnahmen der Urteile z.B. mittels eines Smartphones. Die Urteile könnten dann später übertragen werden.
- Kennwort verwenden: ein Kennwort überlegen und auf allen ausgefüllten Fragebögen vermerken. Dadurch wird die Auswertung anonymisiert.
- Fahrzeugtyp (LKW, KleinLKW und PKW), Geschwindigkeit, sowie Datum und Uhrzeit aufzeichnen.
- Vorzugsweise sollten die beiden Spuren abwechselnd überfahren werden, wobei für jede Überfahrt ein eigener Fragebogen auszufüllen ist.

Wichtige Hinweise:

- Die Teilnahme an der Untersuchung ist *freiwillig*
- Beim Überfahren der Rumpelstreifen und beim Protokollieren auf die Sicherheit des Fahrers und der anderen Verkehrsteilnehmer achten (*Warnlicht einschalten*)
- Die Überfahrten dürfen *nur in der Dienstzeit* erfolgen

Ich erkläre mich bereit, an den Überfahrten teilzunehmen und dabei oben angeführte Punkte zu beachten.

Name, Datum

Unterschrift

