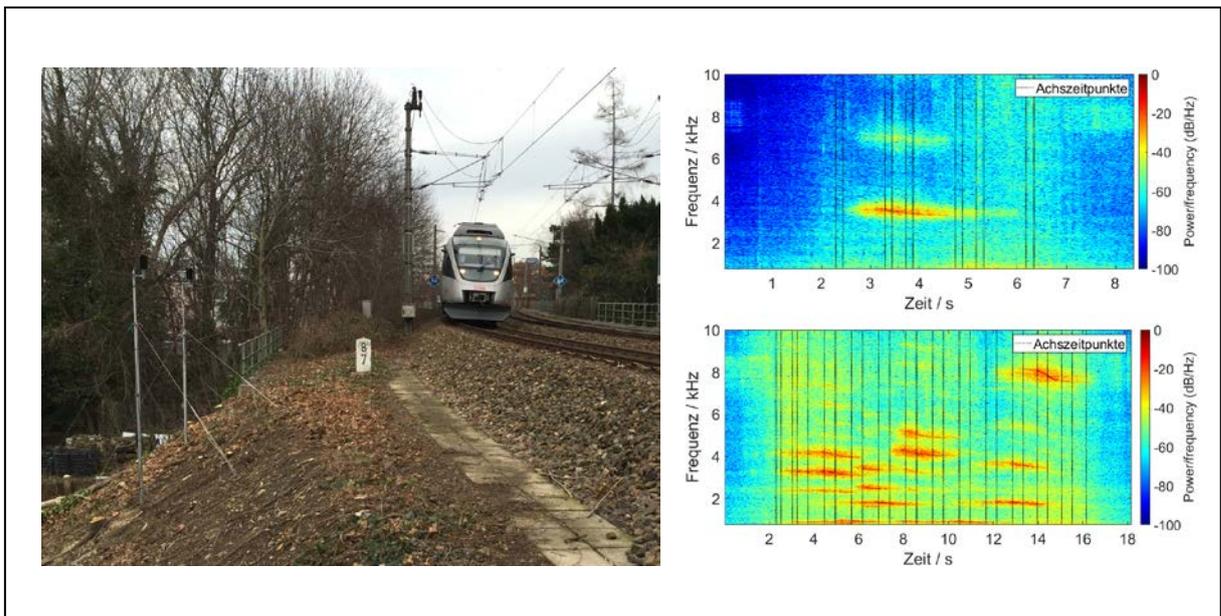


Einflüsse auf Schallemissionen in Bögen ESB

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2014
(VIF2014)

Juni 2019



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A – 1030 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG
Nordbahnstraße 50
A - 1020 Wien



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



Für den Inhalt verantwortlich:

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



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



HY-POWER Produktions und Handels GmbH
Hauptstraße 40
A-3021 Pressbaum



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien



Einflüsse auf Schallemissionen in Bögen ESB

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2014)

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Maly

Dipl.-Ing. Michael Ostermann

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

Florian Biebl, BSc

Dipl.-Ing. Manuel Gunacker

Ansprechpartner ÖBB:

Dr. Günter Dinhobl

Ing. Harald Meidl

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

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

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|--|------------|
| 0. EXECUTIVE SUMMARY | 6 |
| 0.1. DEUTSCH..... | 6 |
| 0.2. ENGLISCH | 7 |
| 1. EINLEITUNG | 9 |
| 1.1. PROBLEMSTELLUNG | 9 |
| 1.2. ANONYMISIERUNG DER SCHNELLBAHNEN..... | 10 |
| 1.3. BEGRIFFSDEFINITIONEN | 10 |
| 1.4. UMSETZUNG | 11 |
| 2. LITERATURRECHERCHE..... | 12 |
| 2.1. ENTSTEHUNGSMECHANISMEN FÜR KURVENQUIETSCHEN | 12 |
| 2.2. WITTERUNGSBEDINGTE EINFLÜSSE | 14 |
| 2.3. FAHRZEUGABHÄNGIGE EINFLÜSSE | 16 |
| 2.4. WIRKSAMKEIT EINER SCHIENENKOPFKONDITIONIERUNG | 17 |
| 3. MESSUNGEN..... | 20 |
| 3.1. ALLGEMEINES | 20 |
| 3.2. MESSKONFIGURATION | 20 |
| 3.3. STANDORTAUSWAHL..... | 24 |
| 3.4. ZUGZAHLEN | 32 |
| 4. AUTOMATISIERTE ERKENNUNG VON AUFFÄLLIGKEITEN IN SCHALLEMISSIONEN | 34 |
| 4.1. BETRACHTUNGSGRENZEN TONALER EMISSIONSKOMPONENTEN | 34 |
| 4.2. EMPIRISCHE VERIFIZIERUNG DER ERKENNUNG UND VERGLEICH ZU BEGEL..... | 48 |
| 5. FAHRZEUGDATEN..... | 55 |
| 5.1. RADEIGENSCHAFTEN | 55 |
| 5.2. ZUGGARNITUREN UND DEREN ORIENTIERUNG | 58 |
| 6. ANALYSE VON EINFLUSSGRÖSSEN | 61 |
| 6.1. JAHRESWITTERUNGSVERLAUF..... | 61 |
| 6.2. SCHIENENKOPFKONDITIONIERUNG..... | 79 |
| 6.3. RADEIGENSCHAFTEN | 117 |
| 7. KORREKTURFAKTOREN..... | 157 |
| 7.1. WITTERUNG | 158 |
| 7.2. SCHIENENKOPFKONDITIONIERUNG..... | 162 |
| 7.3. JAHRESWITTERUNGSVERLAUF..... | 172 |
| 8. ZUSAMMENFASSUNG..... | 176 |
| 9. LITERATURVERZEICHNIS | 188 |

| | |
|---|------------|
| ANHANG A STATISTISCHE AUSWERTUNGEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN WITTERUNGSBEDINGUNGEN | 191 |
| ANHANG B ACHSBEZOGENE AUSWERTUNG VON AUFFÄLLIGKEITEN IN MQ2 | 218 |
| B.1 BREITBANDIGE AUFFÄLLIGKEITEN – SCHNELLBAHN TYP A (UN AUSGERICHTET)..... | 219 |
| B.2 BREITBANDIGE AUFFÄLLIGKEITEN – SCHNELLBAHN TYP A (AUSGERICHTET)..... | 220 |
| B.3 BREITBANDIGE AUFFÄLLIGKEITEN – SCHNELLBAHN TYP B, (UN AUSGERICHTET)..... | 221 |
| B.4 BREITBANDIGE AUFFÄLLIGKEITEN – SCHNELLBAHN TYP B (AUSGERICHTET)..... | 223 |
| B.5 TONALE AUFFÄLLIGKEITEN – SCHNELLBAHN TYP A (UN AUSGERICHTET)..... | 225 |
| B.6 TONALE AUFFÄLLIGKEITEN – SCHNELLBAHN TYP A (AUSGERICHTET)..... | 226 |
| B.7 TONALE AUFFÄLLIGKEITEN – SCHNELLBAHN TYP B (UN AUSGERICHTET)..... | 227 |
| B.8 TONALE AUFFÄLLIGKEITEN – SCHNELLBAHN TYP B (AUSGERICHTET)..... | 229 |
| ANHANG C ÜBERBLICK AUFFÄLLIGER EMISSIONEN IN MQ2 | 231 |
| C.1 SCHNELLBAHN TYP A (UN AUSGERICHTET)..... | 232 |
| C.2 SCHNELLBAHN TYP B (AUSGERICHTET)..... | 254 |
| ANHANG D ÜBERBLICK RADPARAMETER | 290 |
| D.1 SCHNELLBAHN TYP A | 291 |
| D.2 SCHNELLBAHN TYP B | 313 |
| ANHANG E VERGLEICH DER VERLÄUFE AKUST. AUFFÄLLIGKEITEN UND WITTERUNG | 349 |
| ANHANG F LOGISTISCHE REGRESSION VON WITTERUNGSPARAMETERN | 353 |
| F.1 SCHNELLBAHN TYP A | 354 |
| F.2 SCHNELLBAHN TYP B | 361 |
| ANHANG G LOGISTISCHE REGRESSION VON RAD- UND ACHSPARAMETER | 368 |
| G.1 MINIMAL-, MITTEL- UND MAXIMALWERTE DER PARAMETER – SCHNELLB. TYP A..... | 369 |
| G.2 MINIMAL-, MITTEL- UND MAXIMALWERTE DER PARAMETER – SCHNELLB. TYP B..... | 372 |
| G.3 SEPARATE BETRACHTUNG DER GARNITUREN – SCHNELLBAHN TYP A..... | 375 |
| G.4 SEPARATION NACH MITTLERER ZUGGESCHWINDIGKEIT – SCHNELLB. TYP A | 386 |
| G.5 KONSTANTE, RELATIVE LUFTFEUCHTIGKEIT – SCHNELLBAHN TYP A..... | 389 |
| G.6 DIFFERENZIERUNG BREITB. UND TONALER AUFFÄLLIGKEITEN – SCHNELLB. TYP A..... | 396 |
| G.7 MINIMAL-, MITTEL- UND MAXIMALWERTE DER PARAMETER – TRIEBW. TYP B | 398 |
| ANHANG H MITTLERE ABGESCHÄTZTE LÄNGENBEZOGENE SCHALLLEISTUNGSPEGEL | 407 |
| ANHANG I VERFAHREN ZUR BERECHNUNG DES LW'~ GEM. [1]..... | 415 |

0. EXECUTIVE SUMMARY

0.1. Deutsch

Als eine wesentliche Lärmbelastigung vor allem in engen Gleisbögen sind hochfrequente Emissionskomponenten („Kurvenquietschen“ und „Kurvenkreischen“) ein Faktor der bisher nur unzureichend in den aktuellen Regelwerken und Berechnungsverfahren berücksichtigt wird. Die grundsätzlichen Entstehungsmechanismen (wie Stick-Slip Effekt und Spurkranzanlauf) sind zwar bekannt. Eine Quantifizierung dieser Effekte auf Basis definierter Rahmenbedingungen wie beispielsweise den vorherrschenden Witterungsbedingungen oder dem jeweiligen Verschleißzustand der Schienenfahrzeugräder ist aber derzeit noch nicht möglich. Schienenkopfkonditionierung ist eine Möglichkeit, derartige Emissionsanteile in Bögen merklich zu senken, jedoch ist auch deren Wirkung von den meteorologischen Bedingungen abhängig.

In vorliegendem Projekt wurden daher Kurvengeräusche im Hinblick auf die erwähnten Einflüsse und auf die Prognose der Erhöhungen von Schalldruckpegel in Bögen untersucht. Zu diesem Zweck wurden an zwei engen, hinsichtlich der Oberbauparameter vergleichbaren Bögen (Radien ~230 m) der Wiener Vorortelinie S45 die Schallemissionen inkl. der meteorologischen Bedingungen über einen Zeitraum von 11 Monaten bzw. von rund 20000 Vorbeifahrten aufgezeichnet und auffällige Emissionskomponenten mittels des im Vorprojekt BEGEL entwickelten Auswertalgorithmus automatisiert identifiziert. Vor einem der beiden Messbögen war zudem eine Schienenkopfkonditionieranlage installiert und über 9 Monate in Betrieb, um deren Wirkung abschätzen zu können. Darüber hinaus wurden zur Untersuchung des Radverschleißes von den verkehrenden Schnellbahngarnituren die Ergebnisse von Radprofilmessungen erhoben.

Basierend auf diesen Messdaten wurden zur Untersuchung des Witterungseinflusses relative Auftretshäufigkeiten und abgeschätzte mittlere, längenbezogene Schalleistungspegel bei verschiedenen Bedingungen einander gegenüber gestellt und interpretiert. Unter anderem zeigt sich, dass Schientemperaturen, die unter dem Taupunkt liegen, sowie Niederschlag zu einer deutlichen Verminderung von Auftretshäufigkeiten auffälliger Emissionskomponenten führen und dass bei Luftfeuchtigkeiten im Bereich von 70 % bis 80 % die höchsten Häufigkeiten zu verzeichnen waren. Häufigkeitsvergleiche zwischen den beiden Bögen bei aktiver Schienenkopfkonditionierung zeigten zum Teil gegenläufige Tendenzen zwischen den beiden verkehrenden Schnellbahnbaureihen bzw. zwischen tonalen und breitbandigen

Auffälligkeiten. Tendenziell nimmt die Minderungswirkung der Konditionierung jedoch mit steigender Temperatur ab. Im Bereich der Radprofilparameter konnte nach einer Einschränkung des betrachteten Zeitbereichs zur Verringerung witterungsbedingter Einflüsse mittels logistischer Regression bei einer der beiden Schnellbahnbaureihen eine schwache Abhängigkeit von einigen Radparametern beobachtet werden. Die mit dem Verschleiß abnehmenden Auftrittshäufigkeiten können möglicherweise auf eine verschleißbedingte Zunahme des Spurmaßes zurückgeführt werden.

Als Grundlage für Verbesserungen in der Prognoserechnung wurden Korrekturfaktoren für verschiedene (mittlere, sowie akustisch günstige und ungünstige) Wetterausprägungen abgeschätzt und entsprechende Korrekturbereiche angeführt. Auf gleiche Weise wurde die Minderungswirkung für die Schienenkopfkonditionierung ermittelt.

0.2. Englisch

A major source of annoyance especially in narrow curves, the so called curve squealing and flanging noise, is only insufficiently implemented in current calculation schemes for noise mapping. The origin of its generation (i.e. stick-slip effect and flange contact) is known, however effects based on specific influencing factors like prevailing weather conditions or the wear conditions of vehicles wheels are currently not quantifiable. By the use of rail lubrication such noise components can be reduced significantly, but their effect will probably be influenced by weather conditions too.

Present research project regarding curve squealing and flange noise focus on the investigation of mentioned influencing factors and on the prediction of sound level increases in narrow curves. For this purpose, extensive measurements over 11 months were carried out in two narrow curves with comparable superstructure (e.g. radii ~ 230 m) of the Vienna suburban train line S45. Thereby the noise emissions as well as weather conditions of more than 20000 pass-bys in each measurement section were recorded. Tonal squeal noise and more broadband flanging noise were detected in the recordings automatically by means of a previously developed algorithm. In addition one of the measurement curves was equipped with a rail lubrication system, which was in operation over 9 months to estimate the effect of rail head conditioning. For wheel condition analysis also the wheel profile measurements results of all suburban trains which were in operation at the S45 were collected.

Based on these data sets the frequencies of occurrence and calculated average length-related sound power levels under different weather conditions were compared and interpreted. This show, that rainfall as well as rail temperatures below the dew point lower

the frequencies of occurrence significantly and that the highest frequencies were observed at air humidity from 70 % to 80 %. Comparisons of the occurrence frequencies in both curves showed for active rail lubrication partly divergent trends between the two types of suburban trains observed at the S45 as well as between narrow band curve squealing and more broadband flanging noise. However, the overall lowering effect of high noise emission occurrences due to rail lubrication decreases with increasing temperature. For wheel profile analysis, first the considered period of time was limited to reduce the influence of varying weather conditions. For one type of the observed suburban trains logistic regressions show weak dependencies of occurrence frequencies on progressive wear, which possibly indicates a relation to the observed increase of vehicles track gauge due to wear.

As a basis for improvements in actual noise mapping, correction factors for different weather conditions (mean conditions as well as advantageous and disadvantageous conditions) were estimated and the ranges of variation were specified. The lowering effect of rail lubrication was determined in similar way.

1. EINLEITUNG

1.1. Problemstellung

Die von Schienenfahrzeugen bei Bogendurchfahrten hervorgerufenen Vorbeifahrtgeräusche können einen hochfrequenten und zum Teil tonalen Charakter aufweisen, wodurch sie von Anrainern besonders störend empfunden werden. Neben dem, durch den sogenannten „Stick-Slip“ Effekt erzeugten Kurvenquietschen (tonales Geräusch) ist auch das maßgeblich durch den Spurkranzanlauf erzeugte Kurvenkreischen (breitbandiges Geräusch) ein Effekt der nicht nur den Absolutpegel erhöht, sondern auf Grund der Frequenzverteilung auch den Klang des Geräusches negativ beeinflusst. Im Forschungsprojekt BEGEL [1] 2012 – 2015 wurden bereits umfassende Untersuchungen zum Thema Bogengeräusche durchgeführt. Neben der Untersuchung von unterschiedlichen Bogenradien, wurde auch ein automatisierter Algorithmus zur Erkennung von tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten entwickelt, dessen Verwendung nach einer entsprechenden Verifizierung der Eignung auch in vorliegendem Projekt angedacht ist.

Bei der Erstellung von Lärmrasterkarten und der damit rechnerisch ermittelten Lärmbelastung von Anrainern, ist die zusätzliche Belastung durch Bogengeräusche nur unzureichend berücksichtigt. So gibt es seitens der Berechnungsvorschriften zwar Pegelzuschläge, diese berücksichtigen jedoch weder die Häufigkeit des Auftretens oder die spektrale Zusammensetzung von tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten, noch den Einfluss von Maßnahmen, die das Bogengeräusch vermindern. Ein bewährtes Mittel zur Bekämpfung der Lärmbelästigung in Gleisbögen ist der Einsatz von Schienenkopfkonditionieranlagen (Auftrag am Schienenkopf) sowie von Schienenschmieranlagen (Auftrag an der Flanke des Schienenkopfs). Die Wirkung wurde zwar bereits in zahlreichen Forschungsprojekten dokumentiert, es gibt jedoch keine einheitliche Berechnungsmethode um diese Wirkung quantitativ (Abschlag vom Bogenzuschlag) zu berücksichtigen.

Ein wichtiger Faktor sowohl beim Auftreten der tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten als auch bei der Wirkung von Schienenkopfkonditionieranlagen sind die Witterungsbedingungen. So haben Studien etwa gezeigt, dass es bei Regen bzw. nasser Schienenoberfläche zu wesentlich geringeren Auftrittshäufigkeiten kommt [1], [2]. Inwiefern unterschiedliche Witterungsbedingungen abseits von Regen einen Einfluss auf das Auftreten sowie auf die Wirkung von Konditionieranlagen haben, ist bis jetzt nur wenig

erforscht. Neben den meteorologischen Bedingungen, ist auch der Zustand der Radsätze vorbeifahrender Züge ein möglicher Einflussfaktor, welcher sich auf den Kontaktpunkt zwischen Rad und Schiene und somit auch auf das Auftreten von Kurvenquietschen und –kreischen auswirken kann. Ziel dieses Projekts ist es deshalb, das Auftreten von Auffälligkeiten, sowie die durch Konditionieranlagen hervorgerufenen Änderungen messtechnisch über den Jahresverlauf zu erfassen und Witterungseinflüsse (Schiementemperatur, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Regen, Taupunkt) sowie den Einfluss unterschiedlicher Radzustände zu analysieren. Die Auswertungen sollen eine Grundlage bilden, solche Einflussfaktoren als Korrekturwerte für die zwei relevanten Rechenvorschriften, die ONR 305011 sowie die Europäische Richtlinie 2015/996 (CNOSSOS-EU), darstellen zu können.

1.2. Anonymisierung der Schnellbahnen

Für die Untersuchung der Fahrzeugeigenschaften wurden Radprofilaten seitens ÖBB-Personenverkehr zur Verfügung gestellt. Aufgrund einer Geheimhaltungsvereinbarung werden betrachtete Schnellbahnen im Folgenden nicht anhand ihrer tatsächlichen Baureihe unterschieden, sondern einheitlich als Schnellbahnen oder Personenzüge vom Typ A oder B bzw. als Schnellbahnbaureihe A oder B bezeichnet.

1.3. Begriffsdefinitionen

Das weitgehende Fehlen einer einheitlichen Bezeichnung für verschiedene Ausprägungen von Kurvengeräuschen in der deutschsprachigen Literatur wurde bereits im Projekt BEGEL aufgezeigt (vgl. gleichnamiges Kapitel 1.3 im BEGEL-Ergebnisbericht [1]). Auch im Zuge der in diesem Projekt durchgeführten Literaturrecherche, wenngleich der Fokus auf englischsprachiger Literatur lag, zeichnete sich keine klare Tendenz für eine Vereinheitlichung der Begrifflichkeiten ab. Aus diesem Grund werden die folgenden Begriffskonventionen aus dem Projekt BEGEL [1] in ESB übernommen:

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

Auch die Klassifizierung der auffälligen Geräuschkomponenten erfolgt grundsätzlich analog zu BEGEL. Lediglich die untere Betrachtungsgrenze tonaler Auffälligkeiten wurde aufgrund der Gegebenheiten in den beiden betrachteten Bögen von 1,25 kHz auf 0,8 kHz bzw. bei Schnellbahnen der Baureihe B auf 1 kHz gesenkt. Mit dieser Änderung ergeben sich folgende aus dem Ergebnisbereich [1] abgeleitete und im weiteren Bericht verwendete Kategorien akustischer Auffälligkeiten:

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

1.4. Umsetzung

Die Arbeiten innerhalb des Projekts wurden entsprechend der im Projektantrag verankerten Aufgabenteilung von den beteiligten Projektpartnern wie folgt umgesetzt:

- Literaturerhebung (Kap. 2): TU-Wien (IEW) und psiacoustic
- Akustische Messungen (Kap. 2.3): psiacoustic
- Automatisierte Erkennung akustischer Auffälligkeiten (Kap. 4): TU-Wien (IEW)
- Erhebung von Fahrzeugdaten (Kap. 5): TU-Wien (IEW)
- Analyse Jahreswitterungsverlauf (Kap. 6.1): psiacoustic
- Analyse Schienenkopfkonditionierung (Kap. 6.2): psiacoustic
- Analyse Radeigenschaften (Kap. 6.1): TU-Wien (IEW)
- Korrekturfaktoren (Kap. 7): psiacoustic

2. LITERATURRECHERCHE

Bei der Bogenfahrt von Schienenfahrzeugen können zusätzliche Geräusche auftreten, die zu erhöhter abgestrahlter Schalleistung führen. Für eine allgemeine Beschreibung der Geräusche und deren Charakteristik wird auf den Ergebnisbericht des abgeschlossenen Forschungsprojekts BEGEL [1], sowie hinsichtlich der Begriffsdefinitionen auf Kap. 1.3 verwiesen. Als Ergänzung zu diesen Ausführungen werden die vermuteten Entstehungsmechanismen für Kurvenquietschen durch selbsterregte Stick-Slip Schwingungen des Rades näher beleuchtet. Des Weiteren wird auf die theoretischen Arbeiten für die im vorliegenden Projekt zu untersuchenden Fragestellungen der Einflüsse von Witterung und von Fahrzeugeigenschaften, sowie über die Wirksamkeit einer Schienenkopfkonditionierung gesondert eingegangen.

2.1. Entstehungsmechanismen für Kurvenquietschen

Die Entstehung dieses Phänomens wird von der dynamischen Interaktion, der Kontaktmechanik und dem Reibungsverhalten zwischen Rad und Schiene beeinflusst. Als Hauptemissionsquelle wurde das Rad identifiziert, welches durch ein ruckweises Quergleiten des Rades am Schienenkopf (Stick-Slip) in ein oder mehreren Moden zum Schwingen angeregt wird. Die Energiequelle für diese durch Nichtlinearitäten im Rad/Schiene-Kontakt entstehenden selbsterregten Schwingungen des Rades ist ein lateraler Kriechvorgang. Die zwei Hauptmechanismen, die die Entstehung der Stick-Slip Schwingungen des Rades begünstigen, sind [3]:

- negative Steigung der Funktion des Reibungskoeffizienten mit zunehmendem lateralen Kriechen
- gleichzeitige Anregung mehrerer geometrischer Moden des Rades („mode coupling“)

Messungen zeigten bei steigendem, lateralen Kriechen zunächst einen linearen Anstieg und anschließend ein Maximum des Reibungskoeffizienten bevor dieser bei weiterer Erhöhung des Kriechens wieder abnimmt [3]. Eine ähnliche Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten wurde zudem vom Anlaufwinkel beobachtet, bei welcher mit steigendem Anlaufwinkel ebenfalls ein Abfall des Reibungskoeffizienten eintritt [2], [4].

Der Stick-Slip Effekt kann mit einem simplen mechanischen Modell beschrieben werden (siehe Abb. 2-1, links). Eine Masse m (das Rad) wird auf einem Band (die Schiene) mit einer Geschwindigkeit V_0 (in lateraler Richtung) bewegt, wobei an die Masse eine mit zunehmender Verschiebung u größer werdende Rückstellkraft, modelliert durch eine Feder mit der Federkonstante k und ein Dämpfungselement, ansetzt. Dementgegen wirkt

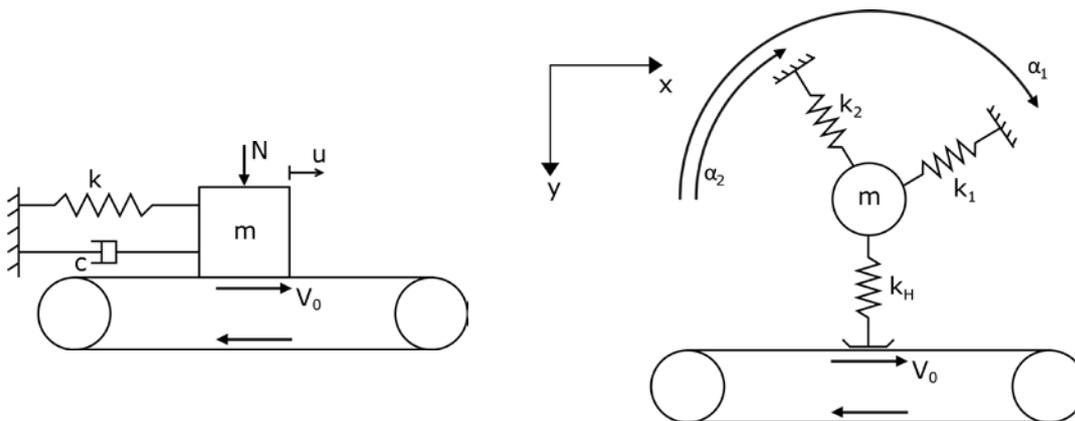


Abb. 2-1: Modellierung des Stick-Slip Effekts (links) und von „mode coupling“ (rechts) (Quelle: Thompson et al.¹)

die Reibungskraft zwischen Masse und Band, welche durch die Kombination aus Normalkraft N in vertikaler Richtung (Radaufstandskraft) und dem statischen Reibungskoeffizienten μ_s bestimmt wird. Der statische Reibungskoeffizient μ_s ist jedoch nur maßgeblich, solange keine Relativbewegung zwischen Band und Masse auftritt. In Gleitphasen ist hingegen der dynamische Reibungskoeffizient μ_d anzusetzen. Sofern die Federkraft kleiner oder gleich der Reibungskraft ist, haftet die Masse am Band ($ku \leq \mu_s N$). Wenn diese Bedingung nicht mehr zutrifft, kommt es zu einem Gleitvorgang, bei welchem die Verschiebung u und damit die rückstellende Federkraft ku abnimmt bis die Gleitreibungskraft $\mu_d N$ überwiegt, die Masse wieder zum Stillstand kommt und der Vorgang von Neuem beginnt. Dieses Abwechseln von Haften und Gleiten der Masse, stellt im Fall konstanter Bedingungen eine periodische Anregung dar, wodurch im Fall der Eisenbahnräder eine harmonische Schwingung in einer deren Eigenfrequenzen hervorgerufen werden können. Die mittlere Gleitgeschwindigkeit zwischen Masse und Band stellt dabei die laterale Kriechgeschwindigkeit dar [5].

Im Gegensatz zur Theorie der negativen Steigung des Reibungskoeffizienten, ist beim „mode coupling“-Mechanismus ein System mit zwei Freiheitsgraden zu betrachten. Ein simplifiziertes mechanisches Modell ist in Abb. 2-1 (rechts) dargestellt, bei welchem die Masse m (das Rad) über das mit einer Geschwindigkeit V_0 bewegte Band (der Schiene) gleitet und mit zwei Federn (Federkonstanten k_1 und k_2) in Position gehalten wird. Eine weitere Feder (Federkonstanten k_H) bildet die Kontaktsteifigkeit zwischen der Masse und dem Band (des Rad-Schiene Kontakts) ab. Durch Variationen in der Normalkraft

¹ D.J. Thompson, G. Squicciarini und B. Ding, "A state-of-the-art review of curve squeal noise: phenomena, mechanisms, modelling and mitigation", in *Conference Proceedings of 12th International Workshop on Railway Noise (IWRN12)*, Terrigal, Australien, September 2016, S. 3 und 5

(Radaufstandskraft) wird die Masse zu vertikalen Schwingungen angeregt. Durch Haft- und Gleitvorgänge am Band wird die Masse gleichzeitig zu Schwingungen in lateraler Richtung angeregt [5].

Die beiden Schwingungen sind durch die Reibungskraft miteinander gekoppelt. Mit wechselnden Reibungskräften – verursacht durch wechselnde Normalkräfte – tritt in vertikaler (y) und lateraler (x) Richtung eine oszillierende Schwingung auf. Über die Kopplung wird ständig Energie zwischen den beiden Schwingungen ausgetauscht. Entscheidend für den Austausch ist eine Phasenverschiebung zwischen den beiden Schwingungen. Zum Verständnis der Abhängigkeit wird die Bewegungsgleichung von x und y dargestellt [6]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -2x - (1 - \Delta)y$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -x - 2y$$

Im Fall von $\Delta < 1$ treten zwei normale ungedämpfte Moden mit verschiedenen Frequenzen auf, die miteinander gekoppelt sind und zwischen denen ein Energiegleichgewicht herrscht. Bei $\Delta = 1$ tritt bei $y(t)$ eine instabile selbsterregte Schwingung auf, da von der Schwingung $x(t)$ immer mehr Energie zugeführt wird, aber $x(t)$ nicht mehr mit $y(t)$ gekoppelt ist. Die Amplitude von $y(t)$ nimmt linear zu, während $x(t)$ konstant bleibt. Bei $\Delta > 1$ treten sowohl bei $x(t)$, als auch bei $y(t)$ instabile selbsterregte Schwingungen auf, da die Amplitude bei beiden Schwingungen linear zunimmt [6].

Der „mode coupling“-Mechanismus kann auch bei konstantem Reibungsverhalten auftreten. Die abgestrahlte Frequenz hängt bei beiden beschriebenen Mechanismen von ein oder mehreren Eigenmoden des Rades ab [3].

2.2. Witterungsbedingte Einflüsse

Entsprechend den Ausführungen in Kap. 2.1 sind die Reibungsbedingungen zwischen Rad und Schiene ein wesentlicher Einflussfaktor hinsichtlich der Entstehung und Ausprägung von Kurvenquietschen. Demzufolge sind auch all jene Witterungsbedingungen, die eine Änderung dieser Reibungsverhältnisse hervorrufen können, als Einflussfaktoren anzusehen. Beispielsweise ist bekannt, dass die Auftretshäufigkeit von Kurvenquietschen und Kurvenkreischen bei Regen generell geringer ist (vgl. [1], [2]). Allerdings wird auch eine hohe Sensitivität gegenüber Parametern, wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit, vermutet [2].

Während im Zuge der vertiefenden Recherchen im vorliegenden Projekt keinerlei Publikationen über den Zusammenhang zwischen Kurvenkreischen und der relativen Luftfeuchtigkeit gefunden wurden, existieren zahlreiche Publikationen im Hinblick auf Kurvenquietschen. So wurden die Auswirkungen von relativer Luftfeuchtigkeit auf Kurvenquietschen von Liu und Meehan [7], sowie von Meehan et al. [8] sowohl durch Feldmessungen, als auch Laborversuche unter kontrollierten Bedingungen untersucht.

In umfangreiche Feldmessungen im australischen Eisenbahnnetz wurde beobachtet, dass sich die Auftrittswahrscheinlichkeit von Kurvenquietschen mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit erhöht [7]. Diese Theorie scheint den Beobachtungen einer geringeren Wahrscheinlichkeit von Kurvenquietschen unter feuchteren Bedingungen als Folge eines geringeren Reibungskoeffizienten zu widersprechen. Jedoch bestätigte sich gemäß Liu et al. [7] die beobachtete Tendenz der australischen Feldmessungen bei Laborversuchen unter kontrollierten Umgebungsbedingungen mit relativen Luftfeuchtigkeiten von 50 %, 70 % unter 90 %. Während der Versuche wurden zudem die Kontaktkräfte und der simulierte Anlaufwinkel gemessen und ausgewertet. Die Funktion von Reibungskoeffizient und lateralem Kriechen erreichte bei höherer Luftfeuchtigkeit früher das Maximum (Punkt des kritischen Kriechens) und zeigt dann bei allen drei simulierten Fällen eine fallende Charakteristik. Dadurch kann es bei höherer Luftfeuchtigkeit bereits bei geringerem lateralen Kriechen beziehungsweise geringeren Anlaufwinkeln zu selbsterregten Stick-Slip Schwingungen kommen, wodurch die größere Auftrittswahrscheinlichkeit für Kurvenquietschen erklärbar wird. Bezüglich der Amplitude des erzeugten Schalldrucks von Kurvenquietschen bei verschiedener Luftfeuchtigkeit, ist tendenziell eine geringe Zunahme der Amplituden mit höherer Luftfeuchtigkeit in den Auswertungen erkennbar. Die Autoren weisen allerdings darauf hin, dass generell die Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft gemessen wird und dieser Wert unter Umständen nicht direkt eine Aussage über das Feuchtigkeitsbild auf der Schiene zulässt.

Meehan et al. [8] untersuchten den Zusammenhang zwischen Reibungskoeffizient, relativer Luftfeuchtigkeit und Kurvenquietschen mit Feldmessungen in Australien (größtenteils Güterzüge) und einem theoretischen Modell. Die Messungen und die Theorie zeigten einen deutlichen Anstieg der Auftrittshäufigkeit von Kurvenquietschen mit zunehmender relativer Luftfeuchtigkeit. Zusätzlich wurde eine nahezu lineare Abnahme des Reibungskoeffizienten mit steigender Luftfeuchtigkeit beobachtet.

Wie Jiang und Dwight [6] berichten, wurde in einem australischen Forschungsprojekt durch Feldmessungen unter anderem der Zusammenhang zwischen der

Auftrittshäufigkeit von Kurvenquietschen mit hohem Schalldruckpegel und der relativen Luftfeuchtigkeit untersucht. Kurvenquietschen trat im Bereich zwischen 20 % und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit auf, wobei sich aber kein Anstieg der Häufigkeit mit steigender Luftfeuchtigkeit zeigte. Es konnte auch kein Zusammenhang mit der Amplitude des Schalldrucks und der relativen Luftfeuchtigkeit herausgefunden werden. In einer Feldmessung aus 2008 wurde ebenfalls kein Zusammenhang zwischen der Auftrittshäufigkeit von Kurvenquietschen und der relativen Luftfeuchtigkeit herausgefunden. Dies steht im Widerspruch zu den bereits erwähnten Publikationen.

Umfassende Untersuchungen zur Auswirkung von Witterungseinflüssen auf das Reibungsverhalten zwischen Rad und Schiene wurden durch Zhu et al. [9] durchgeführt. Dabei wurde in Laborversuchen unter kontrollierten Bedingungen herausgefunden, dass bei niedriger Lufttemperatur eine geringe Zunahme der absoluten Luftfeuchtigkeit den Reibungskoeffizienten stark verringern kann. Zusätzlich reagiert der Reibungskoeffizient bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit nicht sensibel auf Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit. Bei relativ trockenen Bedingungen – relative Luftfeuchtigkeit unter 55 % - wurde beobachtet, dass signifikante Änderungen des Reibungskoeffizienten bei geringen Änderungen in der relativen Luftfeuchtigkeit auftreten. Weitere Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Kurvenquietschen bzw. Kurvenkreischen und der Lufttemperatur bzw. Schienentemperatur sind abseits der Untersuchungen des vorangegangenen Projekts BEGEL (vgl. Ergebnisbericht [1]) nicht bekannt.

2.3. Fahrzeugabhängige Einflüsse

In Bögen kommt es aufgrund von mehreren möglichen Kontaktpunkten und aufgrund von Riffelbildung auf der Schienenoberfläche zu erhöhten Schallemissionen im Rollgeräusch. In einer theoretischen Modellierung, die durch Messungen validiert wurde, wurde eine Erhöhung im Schalldruckpegel von 2 dB bis 7 dB im mittleren bis hohen Frequenzbereich (> 500 Hz) festgestellt. Durchschnittlich zeigte sich eine Erhöhung von 5 dB im A-bewerteten Schalldruckpegel. Mehrpunktkontakt kann durch Rad- oder/und Schienenverschleiß, bei Weichen und bei engen Bögen entstehen. Riffelbildung kann verringert oder vollständig eliminiert werden, wenn sehr elastische Schienenbefestigungen verwendet werden oder bei Fester Fahrbahn die Lagerung vertikal sehr elastisch und horizontal sehr steif ausgeführt wird [10].

Thompson und Remington [11] untersuchten die Auswirkungen von angepassten Rad- und Schienenprofilen auf gerader Strecke und fanden heraus, dass dies zu einer Lärmreduktion führen kann. Die durchschnittliche Rauigkeit und Schallabstrahlung fällt mit

steigender Breite der Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene. Dieser Effekt ist allerdings sehr gering. Änderungen im Radprofil können einerseits die Kontaktfläche verändern und andererseits die Steifigkeit des Rades. Die beste Reduktion der Schallemission wird mit einer Verringerung der Steifigkeit und einer Vergrößerung der Kontaktfläche erreicht. Zusätzlich wurde die Kontaktposition der beiden Räder auf der Schiene hinsichtlich der Schallabstrahlung untersucht. Mit einer Parametervariation wurde herausgefunden, dass unterschiedliche Kontaktpositionen eine Variation in der Schallemission von bis zu 4 dB im A-bewerteten Schalldruckpegel verursachen können [11]. Dieser Wert basiert auf Simulationen und wurde bis jetzt nicht durch Feldmessungen verifiziert.

Untersuchungen der Auswirkungen von Radverschleiß auf die Schallemissionen in Bögen sind keine bekannt.

2.4. Wirksamkeit einer Schienenkopfconditionierung

Um das Reibungsverhalten und damit das Auftreten von Kurvengeräuschen zu beeinflussen, besteht einerseits die Möglichkeit Schmiermittel (Öl, Fett) oder Wasser auf der Schiene aufzubringen, welche den Reibungskoeffizient (zum Teil auch unzulässig) stark verringern und andererseits sogenannte Reibwert-Modifizierer zu applizieren, welche die fallende Charakteristik der Funktion des Reibungskoeffizienten mit steigendem lateralen Kriechen verhindern und stattdessen einen konstanten bis ansteigenden Verlauf des Reibungsbeiwerts bewirken. Der Reibungskoeffizient wird bei wasserbasierten Reibwert-Modifizierern im mittleren Bereich gehalten (0,3-0,35) [12]. Schmiermittel haben den Nachteil, dass sie teilweise den Reibungsbeiwert wesentlich unter 0,2 senken und deshalb ein Sicherheitsrisiko darstellen (beispielsweise wird in den Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven“ [13] für die Berechnung des Gleitschutzsystems ein Bereich von 0,15 bis 0,17 angegeben). Deshalb werden Schmiermittel normalerweise nur an der Schienenflanke durch Flankenschmieranlagen appliziert [2]. Da die Wirksamkeit von Schienenkopfconditionieranlagen erörtert wird, liegt der Fokus auf den Auswirkungen von Reibwert-Modifizierern.

Eadie et al. [12], [14], [15] untersuchten die Auswirkungen einer Schienenkopfconditionierung mit dem wasserbasierten Reibwert-Modifizierer KELTRACK™ (Patent [16]) auf Kurvenquietschen und Kurvenkreischen mit Feldmessungen. Die Applizierung erfolgte teilweise manuell (Auftragsmenge 0,3 g/m) und teilweise automatisiert (Portec Protector®). Es wurden Messungen bei Straßenbahn-, U-

Bahn- und Vollbahnsystemen (Güterverkehr) durchgeführt. Bei allen Messungen trat nach der Applizierung der Schienenkopfkonditionierung im Vergleich zu den Messungen ohne Konditionierung eine signifikante Reduktion des gemessenen Schalldrucks ein. Im längenbezogenen Schalldruckpegel zeigten sich Reduktionen von 10-12 dB (Straßenbahn), 7-10 dB (U-Bahn) und 9-15 dB (Vollbahn). Alle Schallmessungen wurden im Standardmesspunkt nach EN ISO 3095 [17] durchgeführt. Speziell im spektralen Bereich wurde im Frequenzbereich zwischen 1000 Hz und 5000 Hz, wo vor Applizierung tonale Spitzen aufgetreten sind und diese mit Kurvenquietschen in Verbindung gebracht wurden, deutliche Verringerungen in den Schallemissionen beobachtet. Zusätzlich wurde auch der Unterschied zwischen der Applizierung nur an der bogeninneren Schiene und an beiden Schienen untersucht. Dabei zeigte sich, dass im letzteren Fall die tonalen Spitzen im Bereich zwischen 1000 Hz und 5000 Hz noch weiter verringert bzw. verhindert werden konnten und zusätzlich auch im Frequenzbereich zwischen 5000 Hz und 10000 Hz, was als Kurvenkreischen interpretiert wurde, eine deutliche Abnahme von bis zu 8 dB in den A-bewerteten maximalen Amplituden der Terzpegel des Schalldrucks stattfand. Trotzdem wurde durch die Applizierung der Schienenkopfkonditionierung das Auftreten von Kurvenquietschen und Kurvenkreischen nicht verhindert.

Liu und Meehan [18] untersuchten die Auswirkungen von Reibwert-Modifizierern auf die Auftrittshäufigkeit von Kurvenquietschen und die Amplituden von Quietschgeräuschen in Laborversuchen. Bei den Versuchen wurden sowohl wasserbasierte, als auch ölbasierte Reibwert-Modifizierer getestet. Beide Arten reduzierten Kurvenquietschen sowohl in der Amplitude, als auch in der Auftrittshäufigkeit. Als Grund für die Verringerung der Amplitude wird eine Reduktion der lateralen Kräfte, welche Moden des Rades außerhalb der Ebene induzieren können, genannt. Auch bei den Laborversuchen wurde Kurvenquietschen nicht zur Gänze verhindert. Die gemessenen Schalldrücke zeigten sowohl mit, als auch ohne Applikation des Modifizierers eine steigende Charakteristik mit zunehmendem Anlaufwinkel und mit zunehmender Geschwindigkeit. Bei ölbasierten Modifizierern wurde beobachtet, dass in Einzelfällen das Quietschen eine tonalere Charakteristik zeigte.

Im ÖBB Forschungsprojekt WORMS Sound [19] wurde die Wirkung einer Schienenkopfkonditionieranlage an der Innenschiene eines Bogens mit einem Radius von 184 m vom Projektpartner psiacoustic überprüft. Der Vergleich der Messdaten ergab je nach Zugtyp eine mittlere Pegelreduktion von 2,5 dB bis 10,6 dB. Zudem konnten eine Reduktion maximal auftretenden Vorbeifahrtpegel von bis zu 15,6 dB nachgewiesen

werden. Die größte Wirkung konnte im Frequenzbereich 3,15 Hz bis 4 kHz erzielt werden. Durch den Einsatz der Schienenkopfkonditionieranlage konnte das Kurvenquietschen zwar stark reduziert, jedoch nicht gänzlich verhindert werden.

In einem Maßnahmenkatalog gegen Eisenbahnlärm [20] des Internationalen Eisenbahnverbands UIC wird erwähnt, dass sowohl Schmiermittel, als auch Reibwert-Modifizierer die Auftrittswahrscheinlichkeit von Kurvenquietschen reduzieren. Zusätzlich verringern sich tendenziell die Zeitdauer der Ereignisse und die maximale Amplitude.

Zusammenfassend ergaben die Recherchen, dass sich eine Schienenkopfkonditionierung positiv auf die Reduktion von Auftrittshäufigkeit, Zeitdauer und Amplitude des Kurvenquietschens auswirkt. Reibwert-Modifizierer verhindern die negative Steigung im Reibungskoeffizienten nach dem kritischen lateralen Kriechen und wirken deshalb einem Entstehungsmechanismus von Kurvenquietschen entgegen. Kurvenquietschen wird dadurch aber nicht zur Gänze verhindert, weshalb die Vermutung naheliegt, dass noch weitere Mechanismen das Phänomen induzieren können (wie z.B. der beschriebene „mode coupling“-Mechanismus).

3. MESSUNGEN

3.1. Allgemeines

Auf Grundlage des ausgearbeiteten Messkonzepts wurden zur Erfassung der erforderlichen akustischen und meteorologischen Daten jeweils ein Messquerschnitt im Bogen mit einer Schienenkopfkonditionieranlage und ein Vergleichsabschnitt ohne Maßnahmen über einen Zeitraum von elf Monaten messtechnisch erfasst. Der erste zu untersuchende Abschnitt war auf Grund der einzigen im Untersuchungsbereich (S45) installierten Schienenkopfkonditionieranlage bereits zu Beginn des Projektes vorgegeben. Dieser Messquerschnitt (MQ1) befindet sich unmittelbar vor der Station Gersthof Streckenkilometer 5,6 in einem Gleisbogen mit Radius < 300 m. Ausgehend von den Oberbauparametern dieses Abschnittes wurden in weiterer Folge mögliche Referenzquerschnitte gesucht die möglichst idente Parameter aufweisen.

Neben der Analyse der vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Oberbauparameter wurden auch Vorortbesichtigungen sowie Fahrten im Führerstand durchgeführt um einen Überblick für das Auftreten der in diesem Projekt relevanten tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten zu schaffen. Neben den Streckeneigenschaften war auch die Möglichkeit der Positionierung der Mikrofone im Standardmesspunkt in 7,5 m Entfernung zur Gleisachse sowie die elektrische Versorgung bei der Wahl des Referenzabschnittes ausschlaggebend.

Die Daten aller sechs in Betracht gezogenen Streckenabschnitte, sowie des Abschnitts mit Konditionieranlage sind in Tab. 3-1 gegenübergestellt.

3.2. Messkonfiguration

Für die Erfassung der akustischen Messdaten wurde an beiden Messquerschnitten ein mobiles acramos[®] Messsystem (acoustic railway monitoring system) installiert. Mit

| | km | Bogentyp in Regel-fahrtrichtung Gl. 2 | Radius | Über-höpfung | Schienen | Schwelle |
|--------------|------|---------------------------------------|--------|--------------|----------|----------|
| MQ1 | 5,6 | Links | 226 m | 90 mm | S49 | Holz |
| MQ2.1 | 9,3 | Links | 228 m | 90 mm | S49 | Holz |
| MQ2.2 | 9,05 | Rechts | 201 m | 130 mm | S49 | Holz |
| MQ2.3 | 8,7 | Links | 230 m | 90-95 mm | S49 | Holz |
| MQ2.4 | 7,15 | Rechts | 228 m | 70-75 mm | S49 | Holz |
| MQ2.5 | 3,5 | Links | 425 m | 40-45 mm | S49 | Holz |
| MQ2.6 | 0,5 | Rechts | 203m | 110 mm | S49 | Holz |

Tab. 3-1: Daten der einzelnen Messquerschnitte, S45



Abb. 3-1: acramos[®] Messsystem

diesem, vom Projektpartner psiacoustic in Kooperation mit der ÖBB Infrastruktur AG entwickelten System können die Geräuschemissionen von Schienenfahrzeugen des Regelbetriebs automatisch und fahrzeugselektiv gemessen werden.

Durch die im Messgleis installierten Radsensoren wird das Messsystem gestartet und die Geschwindigkeit jeder einzelnen Achse (Abbremsen / Beschleunigen) sowie das Achsmuster und damit die Kategorie des Zuges erfasst. Alle Messkanäle werden simultan mit einer Abtastrate von 50 kHz aufgezeichnet und mit Hilfe des Achssignals den einzelnen Achsen zugeordnet.

Die Messung wird automatisch gestartet, sobald die erste Achse eines Zuges den Radsensor überrollt. Je nach Einstellung wird die Messung nach einer vorher definierten Nachlaufzeit (z.B. 5 Sekunden nach der letzten Achsdetektion) beendet. Die erfassten Daten werden anschließend automatisch analysiert, die wichtigsten Parameter in Form von ASCII-Dateien abgelegt und in eine interne Datenbank übertragen.

Die Software acramos[®] analysiert vollautomatisch die Rohdaten nach jeder Zugvorbeifahrt.

Die folgenden Zugtypen wurden im Zuge dieses Projektes von acramos erfasst und entsprechend dem Achsmuster zugeordnet.

Personenzug (PZ) Typ A: Sowohl 10 als auch 20 achsige Schnellbahngarnituren mit Jakobsdrehgestell (eindeutige Identifizierung auf Grund des Achsmusters möglich)

Personenzug (PZ) Typ B: 12 und 24 achsige Schnellbahngarnituren mit je einem Steuer, Mittel und Triebwagen (eindeutige Identifizierung auf Grund des Achsmusters möglich).

| | Kanal | Messposition | Sensor | SN |
|-----|-------|-------------------------|---------------------------------|--------|
| MQ1 | 1 | M1 7,5/1,2 ü. SOK, Gl.2 | Mikrofon GRAS46AE | 195316 |
| | 2 | M2 7,5/1,2 ü. SOK, Gl.2 | Mikrofon GRAS46AE | 58530 |
| | 4 | Schiene I, Gl. 2 | Schienentemperatursensor Müller | |
| | 7 | R1 (Trigger), Gl. 2 | Radsensor Altpro ZK24 | |
| | 8 | R2, Gl. 2 | Radsensor Altpro ZK24 | |
| MQ2 | 1 | M1 7,5/1,2 ü. SOK, Gl.2 | Mikrofon GRAS46AE | 195314 |
| | 2 | M2 7,5/1,2 ü. SOK, Gl.2 | Mikrofon GRAS46AE | 195315 |
| | 4 | Schiene I, Gl. 2 | Schienentemperatursensor Müller | |
| | 7 | R1 (Trigger), Gl. 2 | Radsensor Altpro ZK24 | |
| | 8 | R2, Gl. 2 | Radsensor Altpro ZK24 | |

Tab. 3-2: Kanalbelegung acramos®

Güterzüge: Lok mit unterschiedlicher Anzahl Güterwagen. Die Art des Güterwagens ist auf Grund identer Drehgestelle an Hand des Achsmusters nicht möglich.

Güter-Kfz: Lok mit unterschiedlicher Anzahl an Güterwagen für den Kfz-Transport mit einer bestimmten Länge und einem bestimmten Längen-Achsverhältnis. Dieser Typ wird nur bei einer artenreinen Zugzusammenstellung erkannt und sonst als Güterzug klassifiziert.

Einzellokfahrten: Einzelne Loks (L1116, L1044, L2016, L1042, L2070) bzw. zwei gekuppelte Einzelloks welche auf Grund des Achsmusters eindeutig identifizierbar sind.

In Tab. 3-2 die Kanalbelegung des Systems, sowie die genaue Bezeichnung der Sensoren aufgelistet.

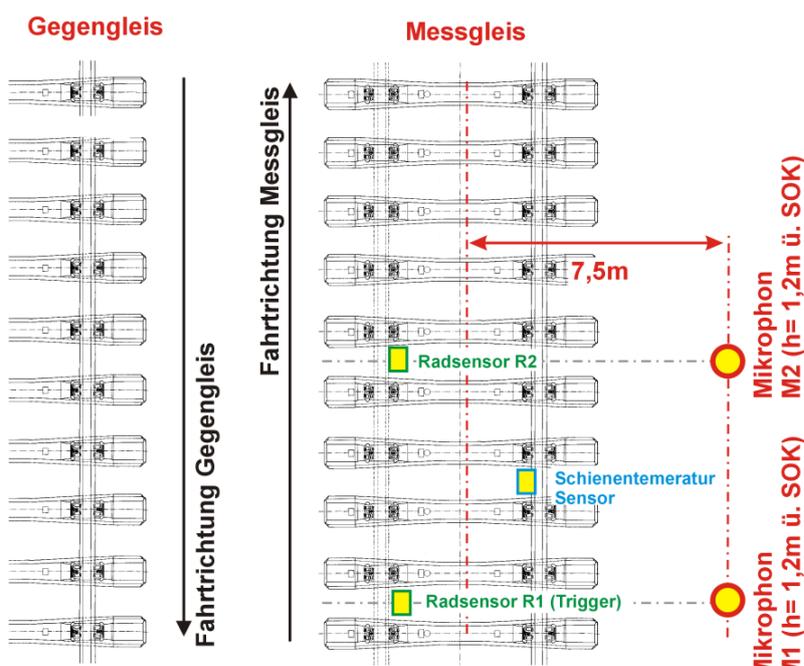


Abb. 3-2: Messsetup

In Abb. 3-2 ist die Position der einzelnen Sensoren im Gleis schematisch dargestellt. Dieser Messaufbau war bei beiden Messquerschnitten ident.

Für die Erfassung des Schalldrucks wurden Klasse I Mikrofone verwendet und sowohl vor als nach jeder Messkampagne mittels geeichten Kalibrator (CAL200) kalibriert, wobei die Abweichung sowohl vor als auch nach der Messkampagne bei 1 kHz unterhalb von 0,2 dB lagen. Zudem waren während der gesamten Messkampagne zwei Mikrofone im Einsatz, um Defekte eines einzelnen Mikrofons ausschließen zu können.

Für die Erfassung der Schienentemperaturen kam ein PT100 Widerstandsthermometer der Fa. Müller Industrie-Elektronik GmbH zum Einsatz, welcher unterhalb des Schienenfußes mit Klemmen fixiert wurde und dessen Daten nach jeder Vorbeifahrt ausgelesen wurden.

Zur Erfassung der meteorologischen Daten (Wind, Regen, Lufttemperatur, Feuchte) wurde eine VAISALA WXT520 verwendet. Für die Auswertungen konnten daher die folgenden Witterungsbedingungen berücksichtigt werden:

- Schienentemperatur: Die mithilfe eines PT100 Temperatursensor unterhalb des Schienenfußes gemessenen Schienentemperatur variiert vor allem in den Spitzenwerten (Sonneneinstrahlung) deutlich von der Lufttemperatur und liegt damit näher an akustisch relevanten Oberbauelementen, wie der Zwischenlage
- Lufttemperatur: Die Lufttemperatur wird mittels einer Wetterstation nahe des Gleisbereiches bei jeder Überfahrt eines Zuges aufgezeichnet
- Regen: Für die Detektion Regen wird ausgehend vom Sensor der Wetterstation ein Zeitraum von 15 Minuten als Regen bzw. Witterungsbedingung mit nasser Schiene definiert
- Taupunkt: Die Taupunkttemperatur wurden mithilfe der Lufttemperatur sowie des Luftdrucks für jede Vorbeifahrt berechnet, um die Möglichkeit der Bildung von Feuchtigkeit an der Schiene abzubilden

Für die Messung der Oberflächenrauheit der Schienen wurde ein stationär zu bedienendes Schienenrauheitsmessgerät des Typs ODS TRM-05 verwendet. Auf einer Messbasis von 1,2 m wird während eines Messdurchgangs das vertikale Oberflächenprofil mit drei Sensoren entlang dreier Messspuren parallel erfasst und aufgezeichnet.

Die Erfassung der Schienenabklingrate (Track Decay Rate, TDR) wurde durch Impulsanregung des (unbelasteten) Gleises erhoben (Impulshammermethode). Dabei



Abb. 3-3: Schienenrauheitsmessgerät ODS TRM-05 (links) und Messung der Schienenabklingrate mittels Impulshammermethode (rechts)

wurden die Signale des Impulshammers mit einem 8-Kanal Analysesystem MEDA der Fa. Wölfel aufgezeichnet. Die Auswertung der erfassten Daten erfolgte im Labor.

Die folgende Sensorik kam für die Erfassung der Schienenabklingrate zum Einsatz:

| | |
|------------------------|--|
| Impulshammer: | PCB, type 086D05, Seriennr. 31723, Medium Impact Cap (Metal) |
| Schwingungskalibrator: | MF VC10; Seriennr. 960202 |
| Messsystem: | MEDA, Fa. Wölfel Messsysteme Software GmbH & Co.KG, software version 8.102, serial no 08/695-2 |

3.3. Standortauswahl

Um die Installation der Mikrofonpositionen in 7,5 m Entfernung zur Gleisachse zu ermöglichen und gute Schallausbreitungsbedingungen sowohl im Abschnitt MQ1 mit installierter Schienenkopfkonditionieranlage (SKK), als auch Referenzabschnitt MQ2 herzustellen, wurde im jeweiligen Streckenabschnitt im Vorfeld der Pflanzenbewuchs entfernt.

3.3.1. Messquerschnitt 1 mit SKK (MQ1) – Gersthof, km 5,6 auf Gleis 2

Messquerschnitt 1 befindet sich nahe der Station Gersthof auf Gleis 2 bei km 5,6. In Fahrtrichtung vor der Messstelle (~80 m) ist eine Schienenkopfkonditionieranlage mit jeweils zwei Konditionierleisten an jeder Schiene installiert. Abb. 3-4 liefert einen Überblick über den Messquerschnitt und die Lage der Mikrofonpositionen sowie eine Auflistung der Oberbaubedingungen am untersuchten Streckenabschnitt. Zusätzlich wurden dort auch die Geschwindigkeit gemäß dem Verzeichnis der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten (VzG), sowie die ausgeglichene Geschwindigkeit v_a angegeben.

| Messstelle 1: Gersthof, S45, Gleis 2 | |
|---------------------------------------|--------------|
| Streckenkilometer | 5,6 |
| Bogenradius | 226 m |
| Entfernung MQ von Bogenanfang (RFR) | 50 m |
| Schienentyp | S49 |
| Überhöhung | 90 mm |
| Neigung in Regelfahrtrichtung Gleis 2 | 0 ‰ |
| Oberbau | Schotter |
| Schwellen | Holzschwelle |
| VzG | 60 km/h |
| V _a | 41,5 km/h |



Abb. 3-4: Messquerschnitt MQ1 - Streckeneigenschaften (links) und Übersicht (rechts)

Der Streckenabschnitt befindet sich in städtischem Wohngebiet. Die Gleisseite, auf welcher auch die Mikrofone positioniert waren, ist zu einer mäßig befahrenen Sackgasse gerichtet, entlang welcher sich Wohnhäuser erstrecken. Unmittelbar nach dem Messquerschnitt führt die Strecke über eine Brücke, unter welcher eine stark befahrene Straße (Gentzgasse) die Strecke quert. Diese wird neben dem Individualverkehr auch von Straßenbahnen frequentiert.

Die Schienenkopfkonditionieranlage der Marke FRIKTIONMASTER KK25 der Fa. HY-POWER wird eingesetzt, um das Konditioniermittel auf den Schienenkopf zu fördern. Dieses wird im Weiteren durch den vorbeifahrenden Zug in Fahrtrichtung verteilt.

Abb. 3-5 zeigt die SKK, welche im Wesentlichen aus dem Anlagenkasten, den vier Konditionierleisten, dem Zugererkennungssensor und den Zuleitungen besteht.



Abb. 3-5: SKK bei MQ1 – Übersicht des montierten Anlagenkastens inkl. Konditionierleisten

Die Anlage wurde in Fahrtrichtung nach dem Tunnel montiert, wobei

- der Anlagenkasten rechts neben dem Gleis positioniert ist,
- der Zugererkennungssensor mit einem Klemmsystem an der Schiene befestigt ist und
- die vier Konditionierleisten ebenfalls mit einem Klemmsystem an den Außenseiten der Schienen befestigt sind.

Eine Konditionierleiste wird durch eine Druckluftzuleitung und vier Fettzuleitungen betrieben. Somit ergeben sich insgesamt 16 Fettzuleitungen, welche durch einen Progressivverteiler im Anlagenkasten versorgt werden.

Zu Beginn der Messkampagne wurde die Anlage so eingestellt, dass alle fünf Züge der Auslösevorgang (zwei Zyklen des Progressivvertelers) aktiviert wurde. Ab dem 24.06.2016 wurde dieses Intervall auf sechs Züge erhöht und auf einen Zyklus des Progressivvertelers reduziert. Ablauf des Auslösevorganges:

- Nach Erkennen des vierten bzw. fünften Zuges, wird durch die Fassungspumpe das Konditioniermittel zu den vier Leisten gefördert. Dabei wird die zu fördernde Menge mit einem Progressivverteiler exakt auf die vier Leisten aufgeteilt. Jede Leiste erhält $0,2 \text{ cm}^3$ Konditioniermittel pro Zuleitung. Somit werden insgesamt $3,2 \text{ cm}^3$ pro Zyklus gefördert. Das Mittel verweilt an der Oberkante der Leisten, bis zum nächsten Zug.
- Nach Erkennen des fünften bzw. sechsten Zuges, wird per Druckluft das zuvor geförderte Mittel von der Oberkante der Leiste über die Schiene zur Mitte an den Schienenkopf geblasen. Der vorbeifahrende Zug verteilt das Mittel in Fahrtrichtung mit der Lauffläche des Schienenrades.

Wenn bei Regen bzw. nasser Schiene Konditioniermittel aufgebracht wird, kann dieses leichter weggeschleudert werden. Um dies zu verhindern, ist die SKK mit einem Regensensor ausgestattet. Dieser blockiert den Auslösevorgang, wenn Regen erkannt wird. Dies hat den Vorteil, dass weniger Konditioniermittel verbraucht und die Umgebung nicht verunreinigt wird.

Die Messungen an Messquerschnitt 1 wurden im Zeitraum vom 04.02.2016 bis 10.01.2017 durchgeführt. Um einen Vergleich zwischen MQ1 und dem Referenzabschnitt MQ2 zu ermöglichen, wurde die Schienenkonditionieranlage zu Beginn der Messkampagne abgeschaltet. Dadurch sollten neben den gemessenen Vorbeifahrtpegel auch das Auftreten und die Häufigkeit von tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten bzw. der Unterschied zwischen den zwei Messquerschnitten ermittelt werden.

Am 12.04.2016 15:30 Uhr wurde die Schienenkopfkonditionieranlage (SKK) auf Gleis 2 wieder in Betrieb genommen.

acramos Messstelle 1 Gersthof, km 5,6 Gleis 2 (02.02.2016/10.01.2017)
Center line/mitte, beide Schienen

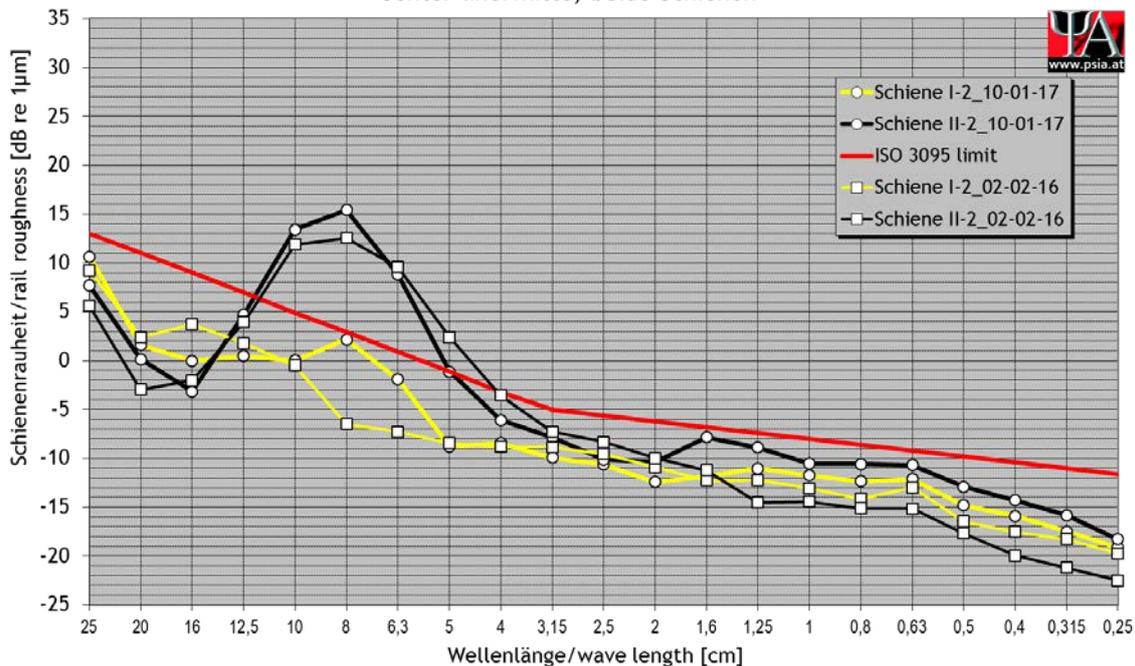


Abb. 3-6: akustische Schienenrauheit 2016 / 2017, Messquerschnitt 1, Gersthof, km 5,6

Die Messung der akustischen Schienenrauheit erfolgte an beiden Schienen sowohl vor (02.02.2016) als auch am Ende (10.01.2017) der Messkampagne.

Die Ergebnisse beider Messungen und Schienen sind in Abb. 3-6 dargestellt. Die Rauheit überschreitet sowohl vor als auch nach der Messkampagne auf Schiene II (Bogeninnenseite) die Grenzkurve gem. TSI-CR-NOISE im Wellenlängenbereich von 10 cm bis 5 cm. Die Ergebnisse der bogenaußenliegenden Schiene I halten bei beiden Messungen die Grenzwerte ein.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Änderung der Schienenrauheit über den Zeitraum der Messkampagne nur geringfügig ausfällt. Sie zeigen auch, dass für die Wellenlängenbereiche < 4 cm alle Schienenrauheiten unterhalb dem Limit der ÖN EN ISO 3095:2010 liegen.

Zusätzlich zur Schienenrauheit wurde auch die Abklingrate des Gleises mittels Impulshammermethode erhoben. Die Ergebnisse der lateralen und vertikalen Track Decay Rate sind für beide Messungen (15.04.2016 / 10.01.2017) in Abb. 3-7 (Schiene I) und Abb. 3-8 (Schiene II) dargestellt.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die laterale Abklingrate von Schiene-I (10.01.2017) und Schiene-II (15.04.2016) das Limit gemäß TSI-Noise lediglich im Frequenzbereich von etwa 1,25 kHz bis 2 kHz unterschreitet, im gesamten restlichen Bereich wird das Limit eingehalten. Schiene-II (10.01.2017), der lateralen TDR, unterschreitet ab etwa 1 kHz das

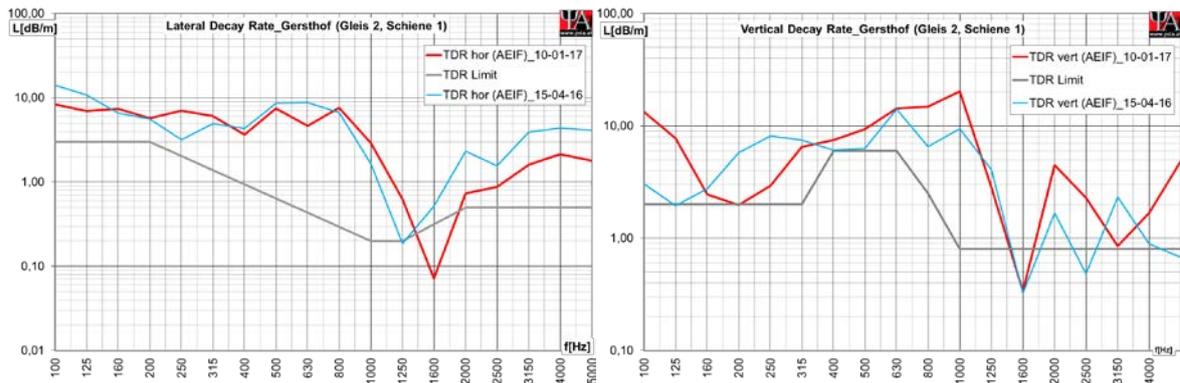


Abb. 3-7: laterale (links) und vertikale (rechts) Abklingrate Messquerschnitt 1, Schiene I, Gersthof, km 5,6

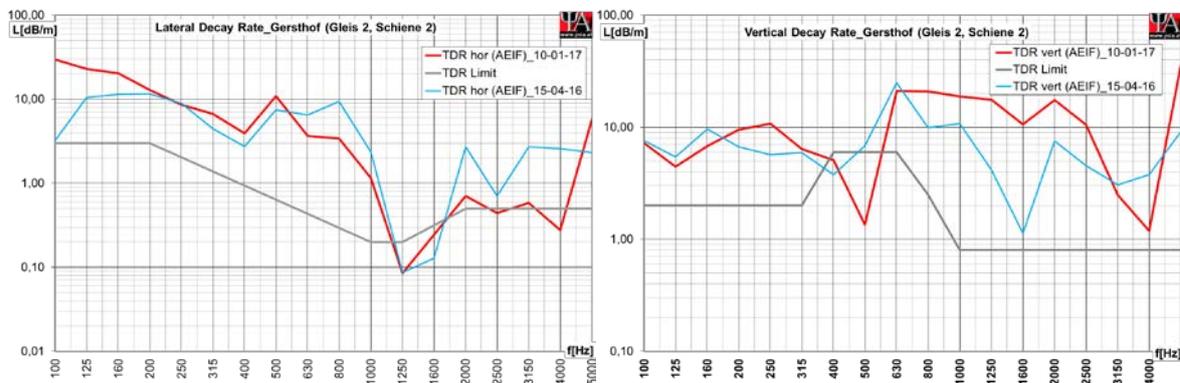


Abb. 3-8: laterale (links) und vertikale (rechts) Abklingrate Messquerschnitt 1, Schiene II, Gersthof, km 5,6

Limit. Betrachtet man die Ergebnisse der vertikalen Abklingrate, erkennt man, dass Schiene-II bis auf den Frequenzbereich von 400 Hz bis 630 Hz das Limit nicht unterschreitet. Bei Schiene-I kommt es hingegen zu Unterschreitungen ab etwa 1,25 kHz. Generell lässt sich zwischen den Messungen ein relativ ähnlicher Verlauf erkennen. Auf Grund der Unterschiedlichen Jahreszeiten und in Folge dessen auch unterschiedlicher Gleistemperaturen (Messung 1: 10 °C, Messung 2: 0 °C) kommt es jedoch zu geringfügigen Änderungen.

3.3.2. Messquerschnitt 2 (MQ2) – Heiligenstadt, km 8,7 auf Gleis 2

Die Messstelle 2 befindet sich bei km 8,7 zwischen den Stationen Heiligenstadt und Oberdöbling. Kurz vor dem Messquerschnitt befindet sich eine „Trennstelle“, also ein kurzer Bereich in dem keine Energieversorgung vorhanden ist. Etwa 100 m nach dem Messquerschnitt führt die Strecke unter einer Brücke und in weiterer Folge in einen Streckenbereich mit Einschnitt. An der mikrofonnahen Seite fällt der Bahndamm steil ab, welcher an private Gärten einiger Wohnblöcke angrenzt. Auf der anderen Seite der

| Messstelle 2: Heiligenstadt, S45 | |
|---|--------------|
| Streckenkilometer | 8,7 |
| Bogenradius | 230 m |
| Entfernung MQ von Bogenanfang (RFR) | 80 m |
| Schienentyp | S49 |
| Überhöhung | 90-95 mm |
| Neigung in Regelfahrtrichtung Gleis 2 | -10 ‰ |
| Oberbau | Schotter |
| Schwellentyp | Holzschwelle |
| VzG | 60 km/h |
| v_a | 42,5 km/h |



Abb. 3-9: Messquerschnitt MQ2 - Streckeneigenschaften (links) und Übersicht (rechts)

Strecke befindet sich der Wertheimsteinpark. Abb. 3-9 liefert einen Überblick über den Messquerschnitt und die Lage der Mikrofonpositionen sowie eine Auflistung der Oberbaubedingungen am untersuchten Streckenabschnitt. Zusätzlich wurden dort auch die Geschwindigkeit gemäß dem Verzeichnis der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten (VzG), sowie die ausgeglichene Geschwindigkeit v_a angegeben.

Die Messungen in MQ2 erfolgten vom 26.01.2016 bis 28.01.2017. Die akustischen Oberbauparameter wurden sowohl vor als auch nach der Messkampagne jeweils einmal erfasst. Die erste Messung der akustischen Schienenrauheit wurde am 27.01.2016 durchgeführt. Die zweite Messung fand am 12.01.2017 statt. Die Ergebnisse beider Messungen und Schienen sind in Abb. 3-10 dargestellt.

Die Rauheit der Außenschiene (schwarz) weist eine deutliche Überschreitung der EN ISO 3095 [17] im Wellenlängenbereich 6,3 cm bis 16 cm auf, während die Innenschiene (gelb) die Grenzwerte beinahe im gesamten Wellenlängenbereich einhält. Im Vergleich zur Messung zu Beginn der Kampagne erkennt man einen leichten Abfall der Rauheit der Innenschiene im gesamten Wellenlängenbereich, während die Außenschiene vor allem im Frequenzbereich $< 2,5$ cm niedrigere Schienenrauheiten aufweist.

Zusätzlich zur Schienenrauheit wurde auch die Abklingrate des Gleises im Messquerschnitt erhoben. Die Ergebnisse der vertikalen und lateralen TDR sowohl für die Messung vor (27.01.2016) als auch nach (12.01.2017) der Messkampagne sind für Schiene-I in Abb. 3-11 und für Schiene-II Abb. 3-12 dargestellt.

Die laterale Gleisabklingrate beider Schienen unterschreitet für die Messung vom 27.01.2016 das Limit bei 1,6 kHz, bei der Messung am Ende der Kampagne am 12.01.2017 wird die Grenze jedoch über den gesamten Frequenzbereich eingehalten. Die vertikale Gleisabklingrate für Schiene-II hält das Limit über den gesamten

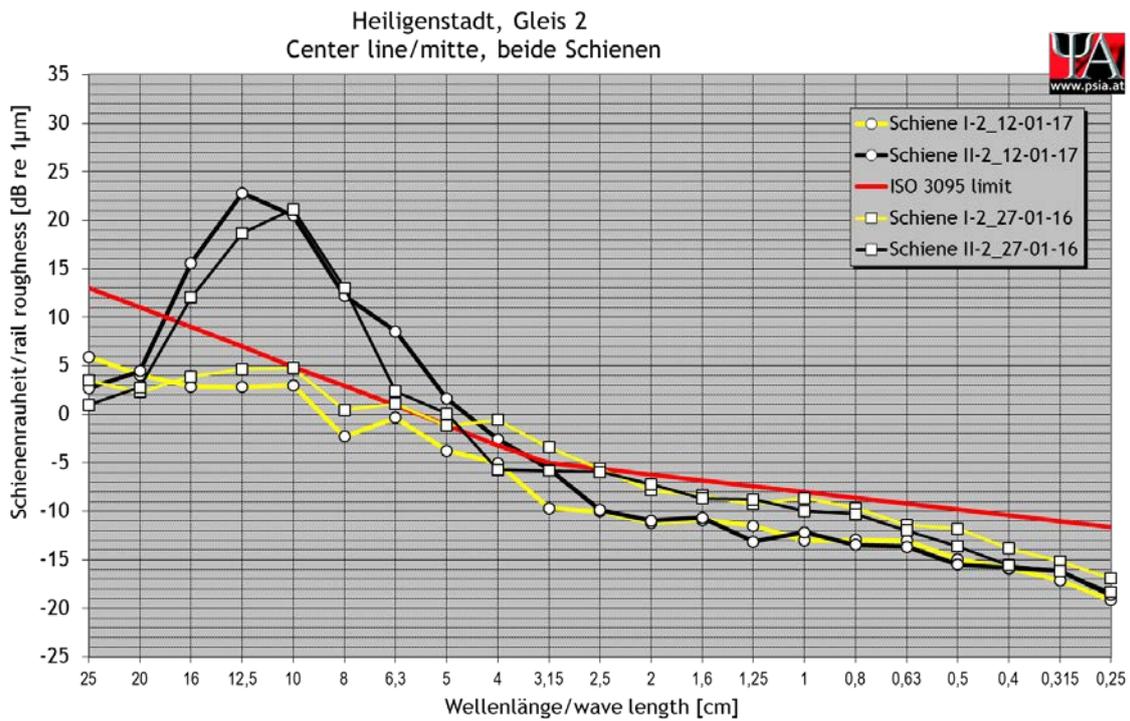


Abb. 3-10: akustische Schienenrauheit 2016 / 2017, Messquerschnitt 2, Heiligenstadt, km 8,7

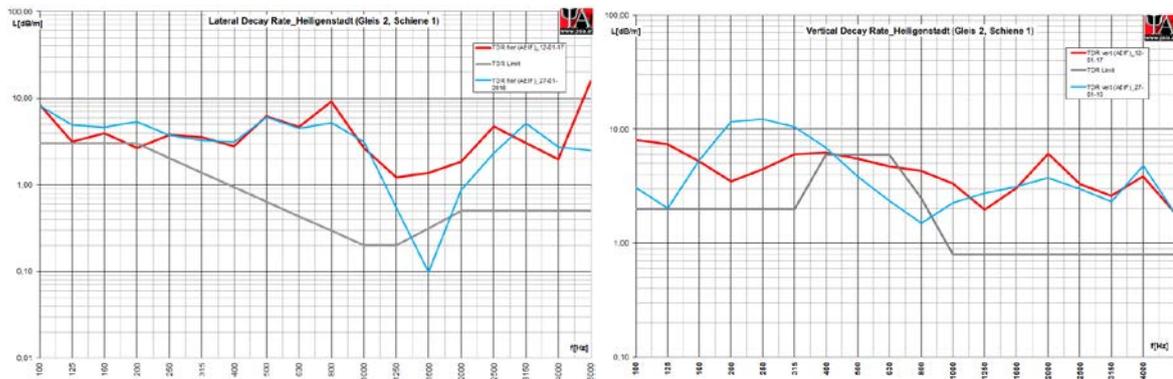


Abb. 3-11: laterale (links) und vertikale (rechts) Abklingrate Messquerschnitt 2, Schiene I, Heiligenstadt, km 8,7

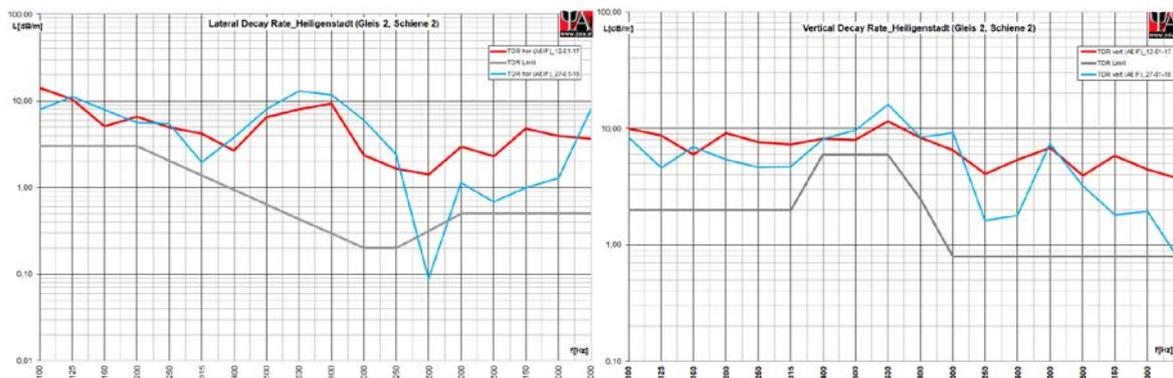


Abb. 3-12: laterale (links) und vertikale (rechts) Abklingrate Messquerschnitt 2, Schiene II, Heiligenstadt, km 8,7

Frequenzbereich für beide Messungen ein, für Schiene-I kommt es bei der Messung vom 27.01.2016 zu Unterschreitungen dieses Limits im Frequenzbereich von 400 Hz bis etwa 1000 Hz und bei der wiederholten Messung am 12.01.2017 von 400 Hz bis etwa 800 Hz.

3.3.3. Vergleichbarkeit der Messquerschnitte

Bei der Auswahl der Messquerschnitte wurde zwar darauf geachtet möglichst idente Gleisparameter und Streckengeometrien auszuwählen, auf Grund des bereits durch das Projekt vorgegebenen Messquerschnitts 1 (einziger Abschnitt mit Schienenkopfkonditionieranlage) waren die Möglichkeiten jedoch eingeschränkt. Während in MQ1 der Großteil der Züge direkt nach dem Bogen in der Haltestelle Gersthorf stehen bleibt, haben die Züge in MQ2 freie Fahrt. Abb. 3-13 zeigt die Geschwindigkeitsdifferenz der ersten und der letzten Achse für die Personenzüge (Typ A und B).

Zu Beginn der Messkampagne wurde für einen Zeitraum von 2 Monaten MQ1 mit deaktivierter SKK betrieben wodurch die Unterschiede zwischen den zwei Abschnitten abgeschätzt werden konnten (siehe Kapitel 7.2).

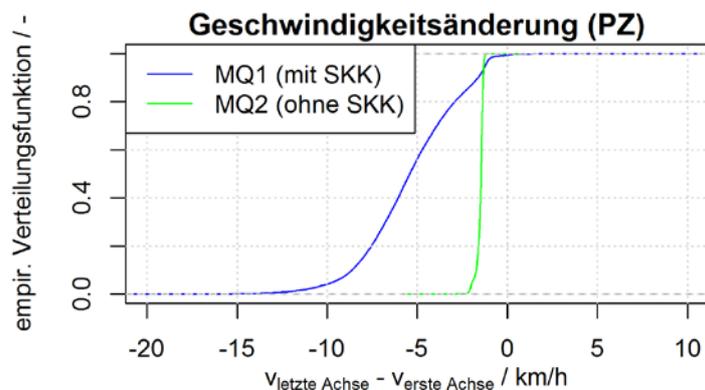


Abb. 3-13: Unterschiedliche Geschwindigkeitsänderung an den zwei Messquerschnitten

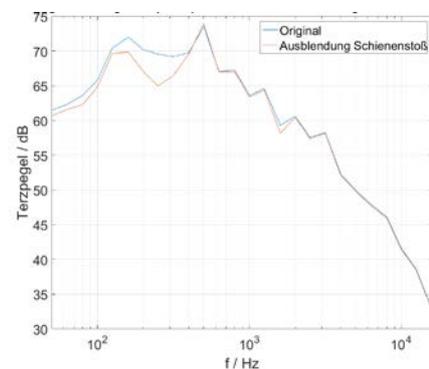


Abb. 3-14: Schienenfehler einige Meter in Fahrtrichtung vor MQ1 (links) und beispielhafter Vergleich eines Terzspektrums mit Schienenfehler und mit manueller Ausblendung von Schienenfehler (rechts)

Bei der Beurteilung der Ergebnisse sollten zudem folgende Bedingungen berücksichtigt werden:

- In MQ1 wurde ein Fehler an der Schienenoberfläche der bogenaußenliegenden Schiene entdeckt (siehe Abb. 3-14), etwa 5 m vom Messquerschnitt entfernt, welcher während des Untersuchungszeitraums nicht mehr entfernt werden konnte. Der Einfluss eines solchen Schienenfehlers auf die Schallabstrahlung der Vorbeifahrten ist vor allem im niederen Frequenzbereich erkennbar. Um die Auswirkung dieses Schienenfehlers abzuschätzen wurden anhand einer Zugvorbeifahrt exemplarisch die jeweiligen Geräuschkomponenten aus dem Zeitsignal geschnitten und ein Terzspektrum ohne Schienenfehler berechnet. Der Vergleich zeigt, dass die Differenzen vor allem im Bereich < 400 Hz liegen.
- MQ1 liegt nahe einer innerstädtischen Straße welche auch von Straßenbahnen benutzt wird. Eine direkte Schallübertragung hin zu den Messpunkten ist zwar nicht möglich, der Grundgeräuschpegel in MQ1 ist jedoch deutlich höher als auf MQ2. Aus diesem Grund wurde am 11. 02. 2016 im Zeitraum von 11:00 bis 13:00 Uhr das Umgebungsgeräusch ohne Zugvorbeifahrt mit Hilfe eines Schallpegelanalysators aufgezeichnet. Das Umgebungsgeräusch lag bei MQ1 bei rund 57 dB(A), bei MQ2 bei rund 49 dB(A). Auf Grund der Pegelhöhe einer Zugvorbeifahrt ist jedoch trotz alledem davon auszugehen, dass der Einfluss auf den Vorbeifahrtpegel vernachlässigbar ist.

3.4. Zugzahlen

Während des gesamten Messzeitraumes wurden die jeweiligen Vorbeifahrten jeweils an beiden Messquerschnitten erfasst und anschließend im Labor eine gemeinsame Datenbasis geschaffen. Nur jene Züge, für welche von beiden Messquerschnitten Daten zuordenbar waren wurden für die weiteren Analysen berücksichtigt.

Den Hauptanteil des Personenverkehrs bilden vor allem die Schnellbahnzüge (Typ A und B).

Die Kategorie PZ Typ A ist ein Elektrotriebzug mit Scheibenbremsen und zwei angetriebenen Drehgestellen am Anfang und Ende des 4-teiligen Zuges. Die übrigen Drehgestelle sind als Jakobsdrehgestelle ausgeführt, befinden sich also jeweils zwischen zwei Wagen. Die Achszahl beträgt 10 Achsen. Die Räder dieser Kategorie haben einen relativ geringen Durchmesser, 750 mm für die angetriebenen Räder und 630 mm für die restlichen Räder.

Die Kategorie PZ Typ B ist eine dreiteilige Triebwagengarnitur bestehend aus einem Triebwagen, einem Zwischenwagen und einem Steuerwagen mit insgesamt 12 Achsen. Die Räder haben einen Durchmesser von 950 mm. Neben den Personenzügen wurden auch Güterzüge für den KFZ-Transport (PKWs), sowie Güterzüge als allgemeine Klasse identifiziert, deren Raddurchmesser unbekannt sind.

Die angegebenen Durchmesser beider Kategorien, beziehen sich hierbei immer auf ein neues Rad und sind in der Realität, durch Verschleiß und durch Instandhaltungsmaßnahmen geringer. Insgesamt wurden während des gesamten Messzeitraumes 20625 Züge erfasst, die Häufigkeit der einzelnen Zugkategorien sowie deren mittlere Geschwindigkeit zeigen Abb. 3-15 und Abb. 3-16.

| Zugtype | Anzahl | mittlere Geschwindigkeit [km/h] | |
|------------------|--------|---------------------------------|---------------------|
| | | MQ 1 (Gersthof) | MQ2 (Heiligenstadt) |
| PZ Typ A | 17097 | 46,8 | 54,4 |
| PZ Typ B | 3128 | 47,0 | 55,1 |
| L1116 | 186 | 51,9 | 52,2 |
| G-Kfz | 90 | 54,0 | 43,3 |
| Güter | 52 | 52,9 | 43,5 |
| Unbekannt | 48 | 46,8 | 47,6 |
| L1044 | 11 | 51,8 | 47,7 |
| L2016 | 8 | 56,4 | 60,5 |
| L1042 | 3 | 43,7 | 47,1 |
| Dieseltriebwagen | 1 | 60,7 | 59,4 |
| L2070 | 1 | 42,6 | 58,4 |

Abb. 3-15: Anzahl der Vorbeifahrten je Zugkategorie, S45

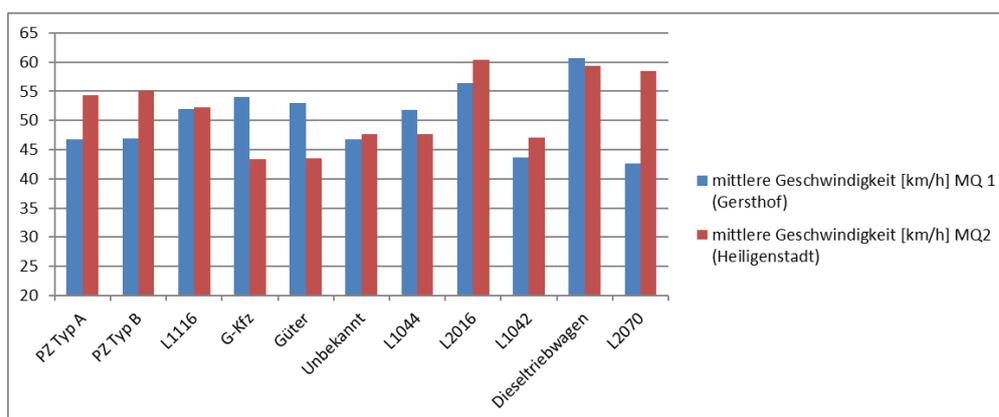


Abb. 3-16: Verteilung der mittleren Geschwindigkeit je Zugkategorie und Messquerschnitt

4. AUTOMATISIERTE ERKENNUNG VON AUFFÄLLIGKEITEN IN SCHALLEMISSIONEN

Ähnlich wie beim Forschungsprojekt BEGEL bedarf es für die Auswertung der Schallemissionen von einer großen Anzahl an Vorbeifahrten einer automatisierten Erkennung von akustischen Auffälligkeiten. Bereits in BEGEL wurde ein Algorithmus zu Erkennung von tonalen Komponenten (kennzeichnend für Kurvenquietschen) und breitbandigen Auffälligkeiten im oberen Frequenzbereich (kennzeichnend für Kurvenkreischen) in Emissionen, die im Standardmesspunkt in 7,5 m Entfernung zur Gleisachse und 1,2 m über Schienenoberkante erfasst werden, empirisch entwickelt und ausgiebig getestet. Um diesen Erkennungsalgorithmus auch in ESB einsetzen zu können, wurde die Anwendbarkeit anhand von zufällig ausgewählten Zügen durch Vergleich der Detektions- aber auch von Zwischenergebnissen anhand des Höreindrucks der Vorbeifahrtsgeräusche, deren Terzpegelzeitverläufen und deren Spektrogrammen empirisch geprüft. Die Erkenntnisse, wie auch die daraus resultierenden Anpassungen des Algorithmus werden im Folgenden beschrieben. Die Grundlagen zur automatisierten Erkennung von auffälligen Schallemissionen sind im BEGEL Endbericht [1] in Kapitel 3 über die automatisierte Erkennung von auffälligen Schallemissionen einzusehen.

4.1. Betrachtungsgrenzen tonaler Emissionskomponenten

Im Zuge der Verifizierung der Erkennung wurden unter anderem die Betrachtungsgrenzen für tonale Auffälligkeiten erweitert, um zu prüfen, inwieweit bei den aktuellen Messquerschnitten auch tonale Komponenten abseits des in BEGEL ermittelten Frequenzbereichs auftreten. Konkret wurde die untere Betrachtungsgrenze von der 1,25 kHz Terz auf die 125 Hz Terz gesenkt und die obere Grenze von der 12,5 kHz Terz auf die 16 kHz Terz angehoben (letzteres wurde erst möglich, da die Abtastfrequenz der Emissionsaufzeichnung gegenüber BEGEL von 32 kHz auf 50 kHz erhöht wurde).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass im Rahmen von BEGEL zwischen tonalen Komponenten (Terzbänder von 1,25 kHz bis 6,3 kHz) und hochfrequenten, tonalen Komponenten (Terzbänder von 8 kHz bis 12,5 kHz) bei der Erkennung unterschieden wurde. Während erstere als kennzeichnend für Kurvenquietschen eingestuft wurden, ist der Entstehungsmechanismus bei zweiteren unklar bzw. wird auch ein Zusammenhang mit dem Spurkranzanlauf vermutet. Dementsprechend wurden in BEGEL bzw. werden in ESB hochfrequente, tonale Auffälligkeiten nur bei Betrachtungen einbezogen, bei welchen

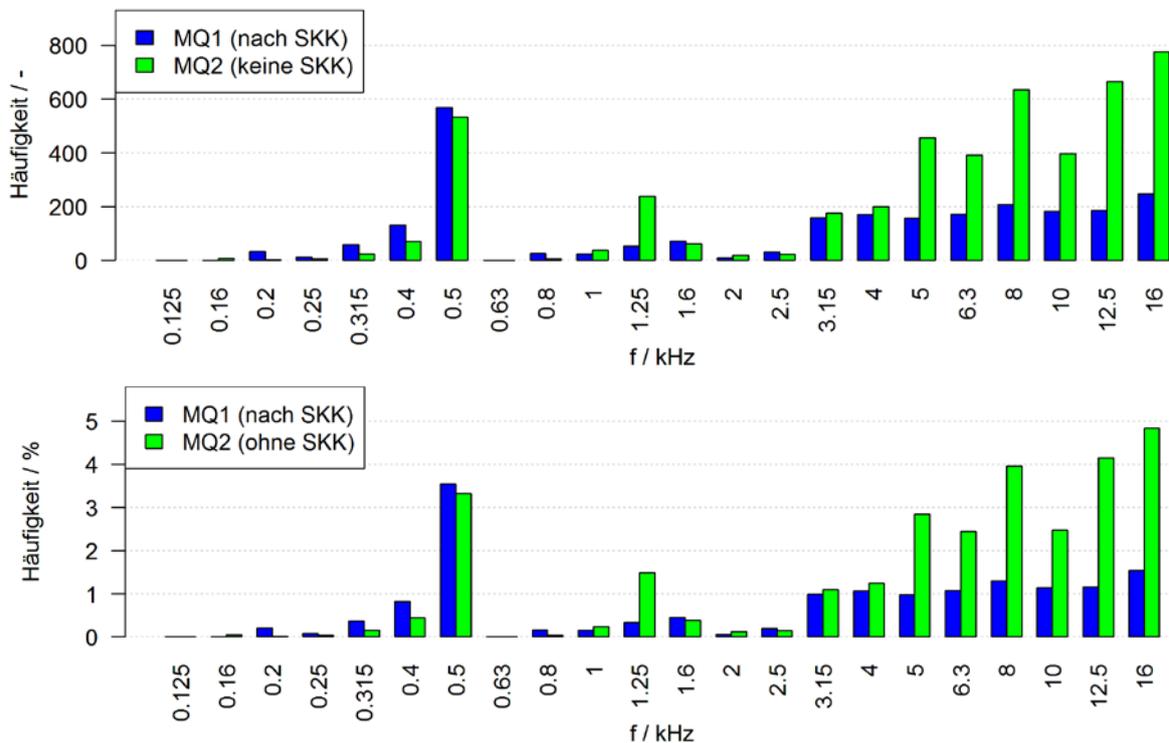


Abb. 4-1: Überblick der spektralen Verteilung von absoluten (oben) und relativen (unten) Häufigkeiten erkannter, tonaler Emissionskomponenten (1945 Züge in MQ1 und 3326 Züge in MQ2) im erweiterten Betrachtungsbereich (125 Hz bis 16 kHz) von 16054 Zügen bei Ausblendung der Zeitbereiche mit Regen und unabhängig des Betriebszustandes der vor MQ1 installierten Schienenkopfkonditionieranlage (SKK)

keine Differenzierung der Entstehungsmechanismen erfolgt (wie beispielsweise bei Bildung von Korrekturfaktoren).

Aus der in Abb. 4-1 dargestellten, spektralen Verteilung der tonalen Emissionskomponenten ist zu erkennen, dass auch abseits des im Projekt BEGEL definierten Frequenzbereichs tonale Komponenten durch den Auswertalgorithmus identifiziert werden. Dementsprechend werden auch jene tonalen Auffälligkeiten im Folgenden empirisch untersucht.

4.1.1. Erweiterung im Bereich tieffrequenter Terzbänder

Zugkategorie-spezifischer Überblick

In Abb. 4-1 fällt zunächst im Frequenzbereich zwischen 125 Hz und 1 kHz der hohe absolute Anteil an tonalen Auffälligkeiten im 500 Hz Terzband (bei beiden Querschnitten) auf. Aus einer nach Zugkategorien getrennten Darstellung (siehe Abb. 4-2 und Abb. 4-3) ist erkennbar, dass diese tonalen Emissionen fast ausschließlich der Schnellbahnbaureihe A zuzuschreiben sind, während Schnellbahnen der Reihe B, sowie Güterzüge (sowohl für den KFZ-Transport, wie auch für die allgemeine Klasse der

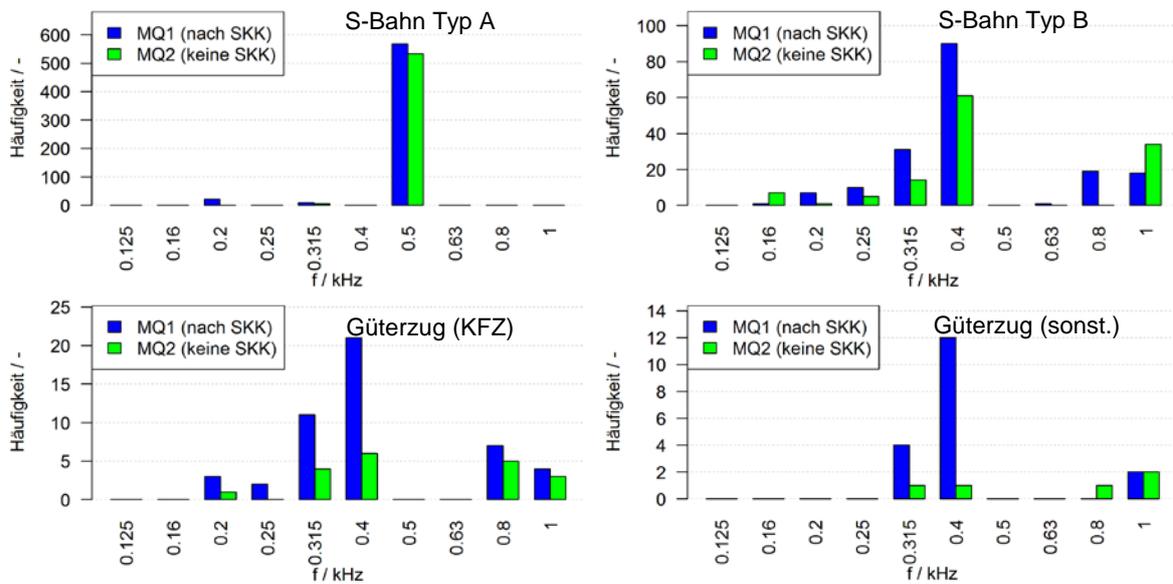


Abb. 4-2: Detaildarstellung der spektralen Verteilung von absoluten Häufigkeiten erkannter, tonaler Emissionskomponenten im tieffrequenten, erweiterten Betrachtungsbereich (125 Hz bis 1 kHz) getrennt nach Zugkategorie (Schnellbahn Typ A oben/links, Schnellbahn Typ B oben/rechts, Güterzüge für den KFZ-Transport (PKWs) unten/links und sonstige Güterzüge unten/rechts) bei Ausblendung der Zeitbereiche mit Regen und unabhängig des Betriebszustandes der vor MQ1 installierten Schienenkopfkonditionieranlage (SKK)

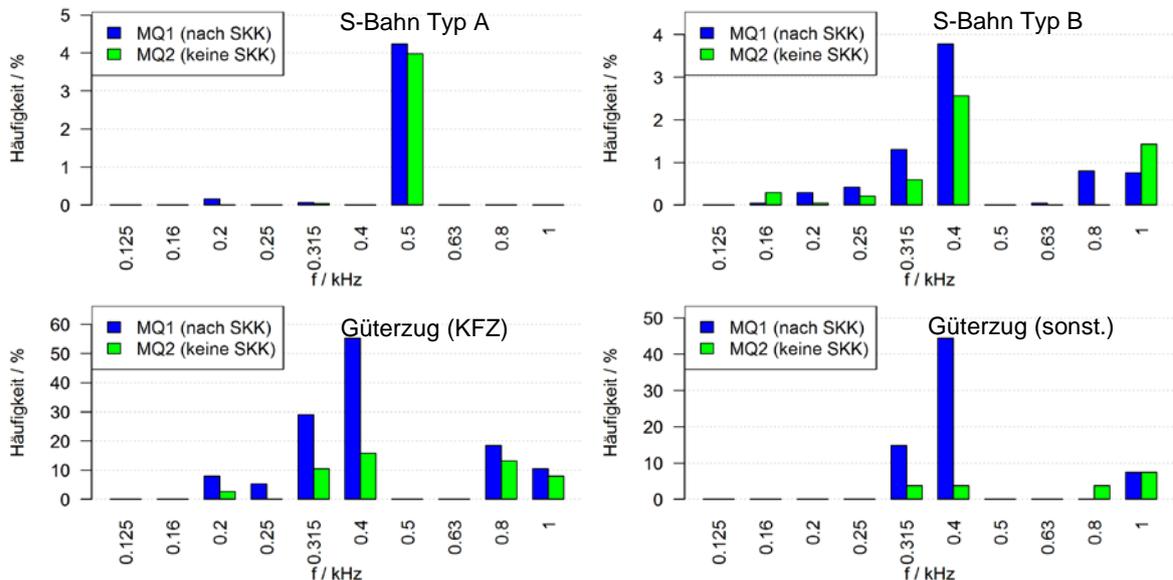


Abb. 4-3: Detaildarstellung der spektralen Verteilung von relativen Häufigkeiten erkannter, tonaler Emissionskomponenten im tieffrequenten, erweiterten Betrachtungsbereich (125 Hz bis 1 kHz) getrennt nach Zugkategorie (Schnellbahn Typ A oben/links, Schnellbahn Typ B oben/rechts, Güterzüge für den KFZ-Transport unten/links und sonstige Güterzüge unten/rechts) bei Ausblendung der Zeitbereiche mit Regen und unabhängig des Betriebszustandes der vor MQ1 installierten Schienenkopfkonditionieranlage (SKK)

sonstigen Güterzüge) vor allem in den darunterliegenden Terzbändern insbesondere dem 400 Hz Band für tonale Anteile verantwortlich sind. Zwar ist die absolute Anzahl an tonalen Detektionen im 500 Hz Band bei der Schnellbahnbaureihe A um ein Vielfaches

höher als in den anderen Bänder bzw. Zugskategorien. Bei relativer Darstellung der Erkennungshäufigkeiten mit Bezug zur Gesamtanzahl der in der jeweiligen Zugkategorie erfassten Züge (siehe Abb. 4-3) ergibt sich jedoch ein anderes Bild. So liegen die Häufigkeiten bei den beiden Schnellbahnbaureihen auf ähnlich geringem Niveau, wohingegen bei Güterzügen zumindest in MQ1 deutlich häufiger tonale Komponenten auftreten (vereinzelt bis rund 50 %). Allerdings besitzen diese hohen relativen Häufigkeitswerte aufgrund der wenigen erfassten Züge nur geringe Aussagekraft.

Terzbänder von 125 Hz bis 500 Hz

Die Emissionen im 500 Hz Terzband steigen nicht direkt proportional mit der Fahrgeschwindigkeit an (vgl. exemplarische Darstellung der Spektrogramme zweier Schnellbahnen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in Abb. 4-4), weshalb eine schmalbandige Erhöhung der Schienenrauheit als Ursache ausgeschlossen werden kann. Die tonalen Komponenten wurden bei Hörproben oft als Geräusch mit meist konstanter Frequenz wahrgenommen, welches oftmals über den Großteil der Vorbeifahrtszeit vorhanden ist und häufig hin zum letzten Drehgestell abnimmt. Erst bei höheren Fahrgeschwindigkeiten können vereinzelt Muster einer Frequenzverschiebung als mögliche Folge des Doppler-Effekts bei bewegten Schallquellen (vermutlich aufgrund der

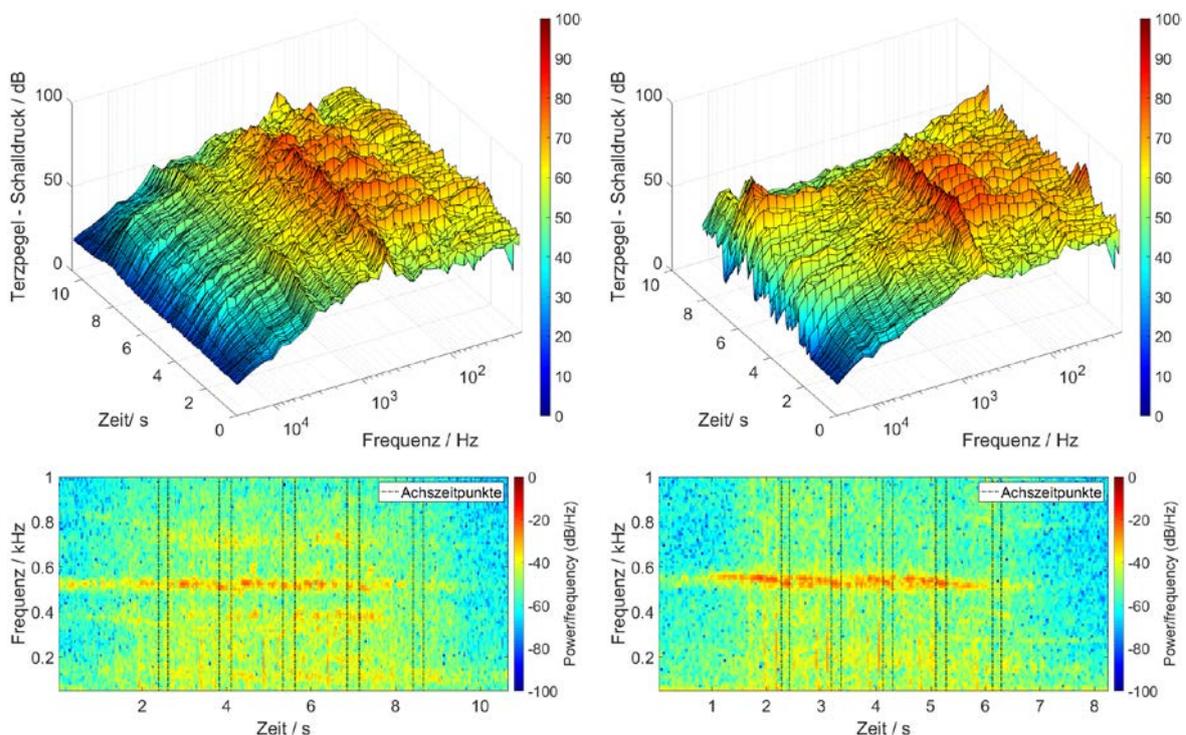


Abb. 4-4: Terzpegelzeitverläufe (oben) und Spektrogramme (unten) der Emissionen von zwei Schnellbahnen der Baureihe A in MQ1 mit tonalen Komponenten im 500 Hz Terzband mit mittleren Achsgeschwindigkeiten von 36,0 km/h (links) und 55,4 km/h (rechts)

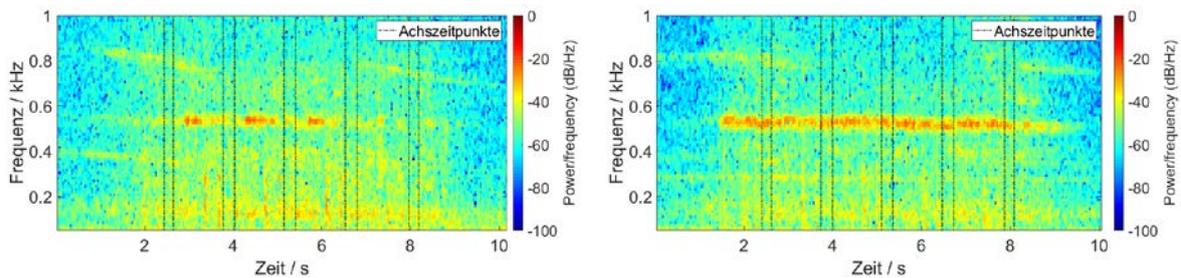


Abb. 4-5: Spektrogramme der Emissionen von zwei Schnellbahnen der Baureihe A in MQ1 bei gleicher Geschwindigkeit (~39 km/h), welche tonale Komponenten im 500 Hz Terzband mit (links) und ohne (rechts) erkennbaren Einbrüchen im Bereich der Drehgestelle aufweisen

begrenzten spektralen Auflösung in den Spektrogrammen) registriert werden (siehe Abb. 4-4, rechts). Im Bereich der Drehgestelle sind zum Teil (auch deutliche) Einbrüche zu erkennen (vgl. Abb. 4-5, links), die im Fall einer Schallquelle an der Bogeninnenseite zugewandten Fahrzeugseite durch Abschattungseffekte grundsätzlich erklärbar wären. Allerdings bestehen auch Vorbeifahrten, bei welchen derartige Einbrüche nicht zu verzeichnen sind (vgl. Abb. 4-5, rechts), weshalb entweder eine Quelle mit wechselnder Lage (an der Bogeninnen- oder -außenseite zugewandten Fahrzeugseite) vermutet werden kann oder die Annahme von Abschattungseffekten nicht zutreffend ist. Gegen eine rein fahrzeugseitige Ursache spricht jedoch, dass diese zwar ähnlich häufig in beiden Messquerschnitten auftraten, jedoch nur weniger als 20 % der in MQ1 oder MQ2 auffälligen Züge im jeweils anderen Messquerschnitt auch diese Auffälligkeit aufwiesen. Zudem traten tonalen Auffälligkeiten bei allen elf, die Messquerschnitte passierenden Schnellbahngarnituren auf. Zwar waren bei MQ2 zum Teil größere Unterschiede zwischen den Garnituren erkennbar, jedoch relativierten sich diese in MQ1, sodass keine klar interpretierbaren Häufigkeitsunterschiede festgestellt werden konnten.

Bei tonalen Auffälligkeiten im 315 Hz und 400 Hz Terzband von Schnellbahnen der Baureihe B können zwei unterschiedliche Charakteristika unterschieden werden: zum einen treten ähnlich der zuvor beschriebenen Auffälligkeiten im 500 Hz Terzband geschwindigkeitsunabhängige tonale Komponenten - meist im 400 Hz Band, vereinzelt auch im 315 Hz Band – in beiden Messquerschnitten auf, die sich meist über einen längeren Bereich der Vorbeifahrt, insbesondere im Bereich von Zwischen- und Steuerwagen, erstrecken (siehe Abb. 4-6). Doppler-Effekte wurden hierbei jedoch nicht beobachtet. Dem gegenüber sind in MQ1 im Bereich der Triebwagen kürzer andauernde, geschwindigkeitsabhängige Komponenten vorhanden, die vermutlich Komponenten der Traktion (Motor, Getriebe, etc.) zuzuschreiben sind (vgl. Abb. 4-7).

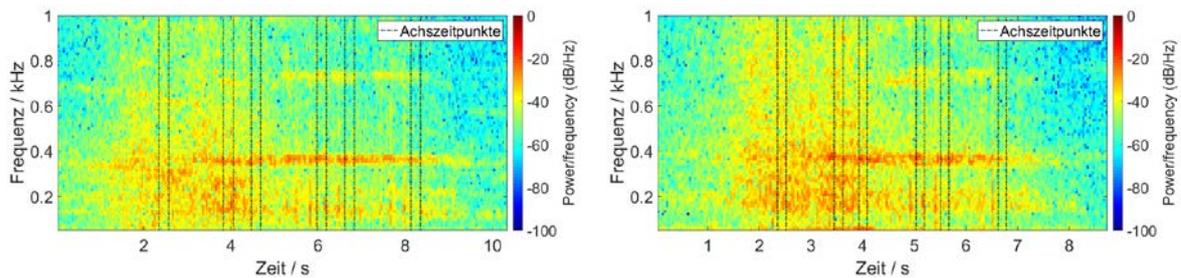


Abb. 4-6: Spektrogramme der Emissionen von zwei Schnellbahnen der Baureihe B in MQ1 mit tonalen Komponenten im 400 Hz Terzband mit mittleren Achsgeschwindigkeiten von 38,8 km/h (links) und 52,3 km/h (rechts)

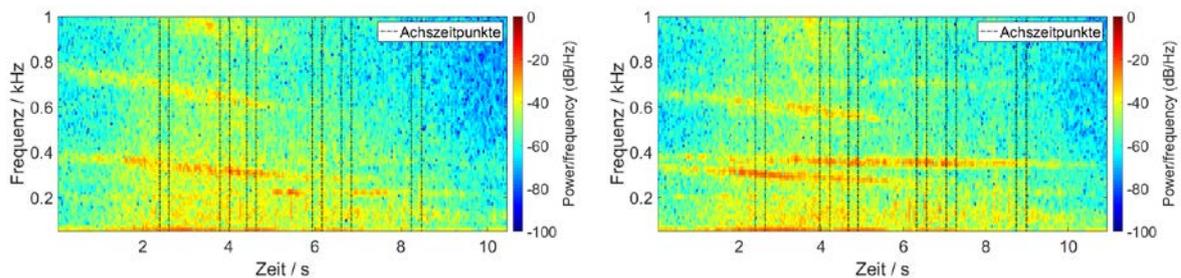


Abb. 4-7: Spektrogramme der Emissionen von zwei Schnellbahnen der Baureihe B in MQ1 - mit der Geschwindigkeit abnehmende, tonale Komponenten, die im Bereich des Triebwagens zur Erkennung durch den Auswertalgorithmus geführt hat (links) und Gegenüberstellung tonaler Komponenten mit geschwindigkeitsabhängiger und -unabhängiger Frequenz (rechts)

Güterzüge (für KFZ-Transport und sonstige Güterzüge) spielen für die weiteren Auswertungen aufgrund der geringen Anzahl erfasster Züge nur eine untergeordnete Rolle. Trotz dessen wurden auch deren tonale Auffälligkeiten im 315 Hz und 400 Hz Terzband betrachtet. Auch bei Güterzügen zeigen sich grundsätzlich zwei verschiedene Ausprägung der tonalen Komponenten: zum einen waren erneut Komponenten mit einer über längere Bereiche der Vorbeifahrt annähernd konstanten und geschwindigkeitsunabhängigen Frequenz zu beobachten, welche sich gerade bei höherer Geschwindigkeit aufgrund des hohen Grundrollgeräusches nicht so klar von den benachbarten Terzen hervorheben (vgl. Abb. 4-8). Diese Art tonaler Komponenten tritt bei

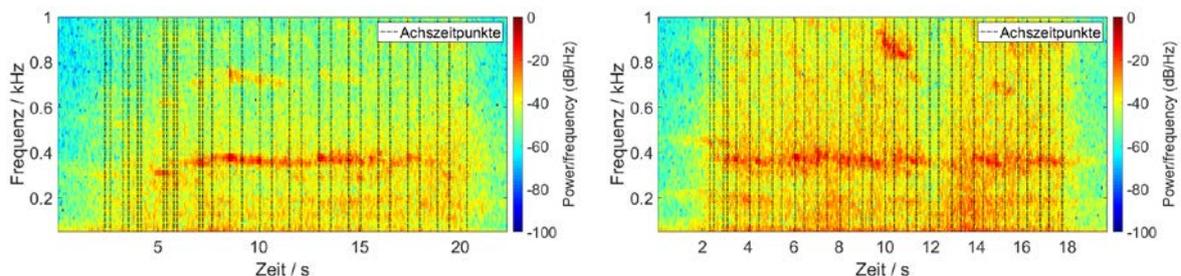


Abb. 4-8: Spektrogramme der Emissionen zweier Güterzüge in MQ1 mit tonalen Komponenten im 400 Hz Terzband mit mittleren Achsgeschwindigkeiten von 41,6 km/h (links) und 62,9 km/h (rechts)

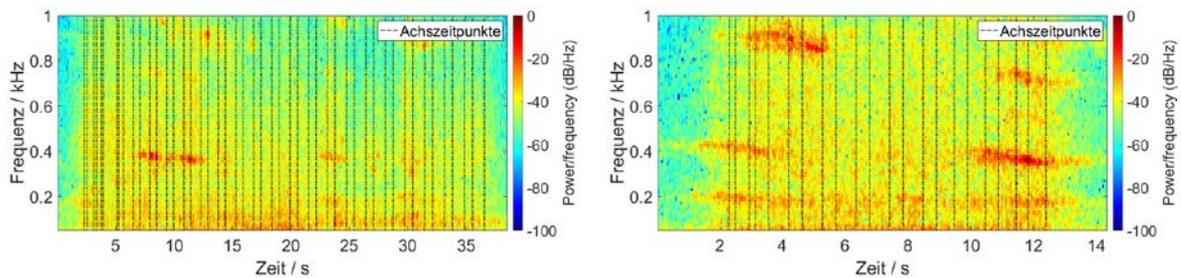


Abb. 4-9: Spektrogramme der Emissionen von zweier unterschiedlicher Güterzüge, welche dem zeitlichen Muster von Quietschgeräuschen ähneln – Güterzug mit einer mittleren Achsgeschwindigkeit von 39,6 km/h in MQ2, welcher nahe der 12. Achse (~ 8,2 s) und nahe der 17. Achse (~ 11,8 s) kurze tonale Komponenten im 400 Hz Terzband aufweist (links) und Güterzug mit einer mittleren Achsgeschwindigkeit von 57,2 km/h in MQ1 mit einer tonalen Auffälligkeit im 400 Hz Terzband nahe der 21., vorletzten Achse (~ 11,8 s) (rechts)

Güterzügen nahezu ausschließlich in MQ1 auf, wobei sie hier überwiegen. Die geringere Anzahl an tonalen Komponenten in MQ1 bzw. die geringe Anzahl tonaler Komponenten in MQ2 tritt deutlich kürzer hervor und ähnelt in der zeitlichen Struktur damit mehr einem Quietschgeräusch (siehe Abb. 4-9).

Im 125 Hz Terzband wurden keine tonalen Auffälligkeiten beobachtet und in den darüber liegenden Bändern von 160 Hz bis 250 Hz vergleichsweise wenige. Die tonalen Geräuschanteile im 160 Hz Band wurden bei Hörproben als tieffrequentes Rollgeräusch eingestuft, welche mehrheitlich bei Schnellbahngarnituren der Baureihe B auftraten. Bei Schnellbahnen der Baureihe A werden ausschließlich in MQ1 und hier nur im 200 Hz Band tonale Komponenten erkannt, welche rund 65 % aller tonalen Erkennungen

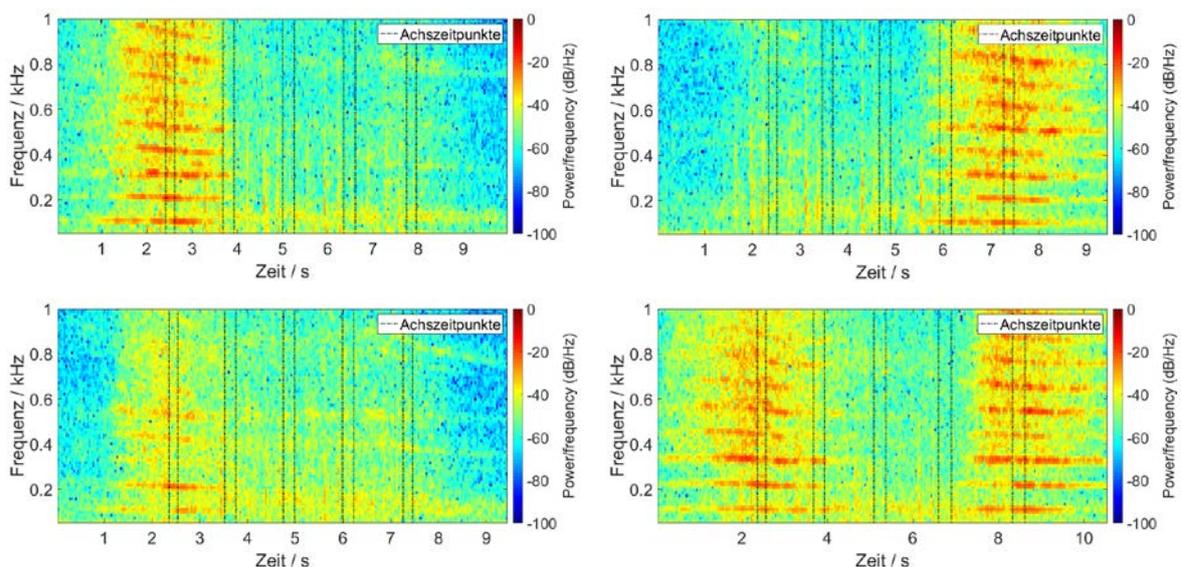


Abb. 4-10: Spektrogramme der Emissionen von Schnellbahnen der Baureihe A in MQ1 mit dröhnenden Geräuschen im Bereich des 1. Drehgestells (oben, links), des letzten Drehgestells (oben, rechts), geringes Dröhnen im Bereich des 1. Drehgestells (unten, links) und Dröhnen im Bereich des 1. und des letzten Drehgestells (unten, rechts)

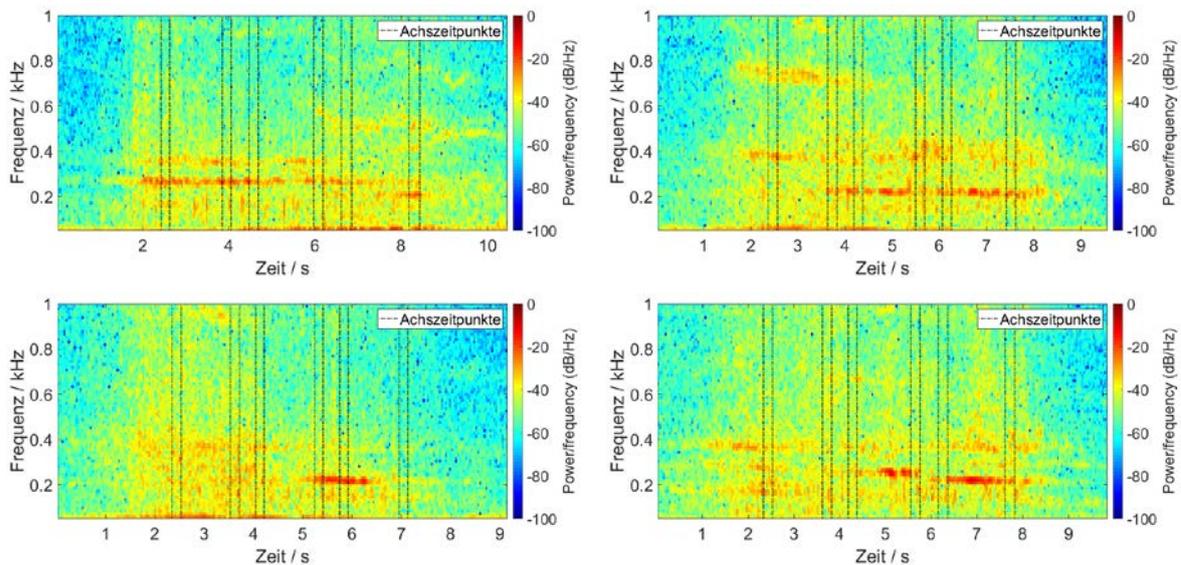


Abb. 4-11: Spektrogramme der Emissionen von Schnellbahnen der Baureihe B in MQ1 – tonale Komponente im 250 Hz Band bei mittlerer Achsgeschwindigkeit von 38,9 km/h und Triebwagen am Zugende (oben, links), im 200 Hz Band bei 44,4 km/h und Triebwagen am Zugsanfang (oben, rechts), kürzerer tonaler Komponente im 200 Hz Band bei 48,5 km/h und Triebwagen am Zugsanfang (unten, links) und zwei kürzere tonale Komponenten im 200 Hz und im 250 Hz Band bei 42,5 km/h und Triebwagen am Zugsanfang (unten, rechts).

in diesem Band darstellen. Allerdings handelt es sich um eine Art Dröhnen, welches zu Beginn oder/und am Ende der Vorbeifahrt auftreten kann, spektral von Oberwellen geprägt ist und dessen Frequenzen mit der Geschwindigkeit abnehmen (siehe Abb. 4-10). Da diese Art von Geräusch nur in MQ1 auftritt, kann das Dröhnen auch durch die Verzögerung der Züge hervorgerufen werden.

Die Schnellbahnbaureihe B zeigt in den 200 Hz und 250 Hz Terzbändern in beiden Messquerschnitten ähnliche Signaturen wie bei 400 Hz: meist (aber nicht immer) etwas länger andauernde tonale Komponenten abseits der Triebwagen. Inwieweit die Frequenzen konstant sind, lässt sich allerdings aufgrund der endlichen Auflösung der FFT bei diesen tiefen Frequenzen und wegen der geringen Anzahl an betroffenen Zügen nicht abschätzen. Aufgrund des akustischen Eindrucks bei Hörproben werden allerdings zwei verschiedene, geschwindigkeitsunabhängige Frequenzen vermutet (vgl. Abb. 4-11).

Bei Güterzügen werden in diesem Frequenzbereich über beide Querschnitte hinweg lediglich 5 tonale Auffälligkeiten detektiert. Aufgrund dieser geringen Anzahl und deren Heterogenität wird auf deren Eigenschaften nicht näher eingegangen.

Zusammenfassend kann für die Erkennung tonaler Auffälligkeiten in den Terzbändern von 125 Hz bis 500 Hz festgehalten werden, dass mit Ausnahme der geschwindigkeitsabhängigen Komponenten beim Triebwagen der Schnellbahnbaureihe B

(vgl. Abb. 4-7, unten links) und des dröhnenden Geräusches der Baureihe A (vgl. Abb. 4-10) vorwiegend über einen weiteren Bereich der Vorbeifahrt andauernde, tonale Anteile mit einer annähernd gleichbleibender Frequenz beobachtet wurden. Deutlich seltener traten hingegen kurzzeitige tonale Komponenten auf, die in ihrer zeitlichen Charakteristik Kurvenquietschen ähneln. Auf Basis der durchgeführten Hörproben können jedoch all diese Geräuschkomponenten subjektiv als leise beschrieben werden, deren Intensität in der Regel deutlich unterhalb der tonalen Komponenten im mittleren Frequenzbereich, welche kennzeichnend für Kurvenquietschen sind (vgl. Ergebnisbericht BEGEL [1]), liegen.

Für tonale Emissionskomponenten, deren Frequenz sich direkt proportional zur Fahrgeschwindigkeit darstellt, wird der Entstehungsmechanismus von Kurvenquietschen – der laterale Stick-Slip Effekt regt das Rad an, in einer seiner (geschwindigkeitsunabhängigen) Eigenfrequenzen zu schwingen – nicht als Ursache angesehen. Demgegenüber zeigt sich für die tonalen Anteile mit annähernd konstanten Frequenzen im Rahmen dieser Arbeit ein zwiespältiges Bild: so sprechen die Beobachtungen, dass bei Schnellbahnen der Baureihe A mit den kleinsten Rädern der betrachteten Zugskategorien der tonale Anteil bei einer höheren Frequenz auftritt, für eine Eigenfrequenzschwingung der Räder. Zudem deuten sich bei höheren Geschwindigkeiten und bei höherer Frequenz zum Teil Doppler-Verschiebungen an. Detektionszeitreihen lassen andererseits auf keine häufigkeitssenkende Wirkung der Schienenkopfkonditionierung in MQ1 schließen, während dies bei Kurvenquietschen grundsätzlich zu erwarten wäre bzw. bei tonalen Komponenten in vorliegenden Untersuchungen auch zu erkennen ist (vgl. Kap. 6.2). Zudem weisen die kürzeren zeitlichen Verläufe tonaler Komponenten in höheren Frequenzbereichen meist auf eine einzelne oder wenige verursachende Achsen hin, während die über längere Bereiche der Vorbeifahrt andauernden, tonalen Komponenten bei tiefen Frequenzen von deutlich mehr Rädern stammen müssten. Aufgrund dieser im Hinblick auf die Einstufung als Quietschgeräusche gegensätzlichen Eigenschaften, aber vor allem der in der Regel vergleichsweise leise, subjektive Höreindruck sprechen gegen eine Ausweitung der zur automatisierten Detektion betrachteten Terzbänder auf Frequenzbereiche ≤ 500 Hz.

Terzbänder von 630 Hz bis 1 kHz

Wie in Abb. 4-2 angedeutet, war im 630 Hz Terzband lediglich eine tonale Komponente zu verzeichnen, weshalb im Folgenden nur auf das 800 Hz Band und das 1 kHz Band eingegangen wird. Im Bereich der Schnellbahnen zeigt die Baureihe A in keine der

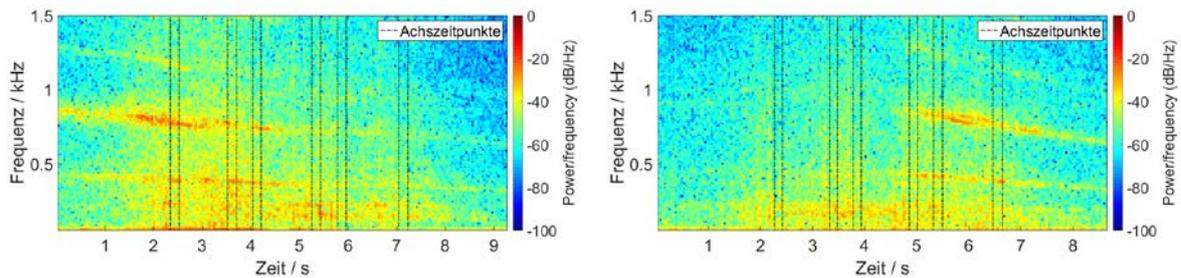


Abb. 4-12: Spektrogramme der Emissionen von zwei Schnellbahnen der Baureihe B in MQ1 mit tonalen Komponenten im 800 Hz Terzband, welche eine direkte Proportionalität zu Fahrgeschwindigkeit zeigen – Zug mit Triebwagen am Zuganfang (links) und am Zugende (rechts)

beiden Terzbänder eine Auffälligkeit. Bei der Baureihe B kann hingegen zwischen geschwindigkeitsabhängigen und geschwindigkeitsunabhängigen Komponenten unterschieden werden. Erstere treten ausschließlich im Bereich des Triebwagens im 800 Hz Terzband und in MQ1 auf, in welchem Personenzüge aufgrund der nachfolgenden Station üblicherweise bremsen. Aufgrund dieser ähnlichen Eigenschaften zu den zuvor beschriebenen geschwindigkeitsabhängigen Komponenten in den 315 Hz und 400 Hz Terzbändern dürfte es sich um das gleiche Phänomen handeln (vgl. Abb. 4-7, links). Allerdings scheint bei Erkennungen im 800 Hz Band die erste Oberwelle zu dominieren, weshalb diese erkannt wird (siehe Abb. 4-12).

Im 1 kHz Terzband werden tonale Komponenten hingegen in beiden Messquerschnitten und meist im Bereich der Übergänge zwischen den Wagen identifiziert (siehe Abb. 4-13).

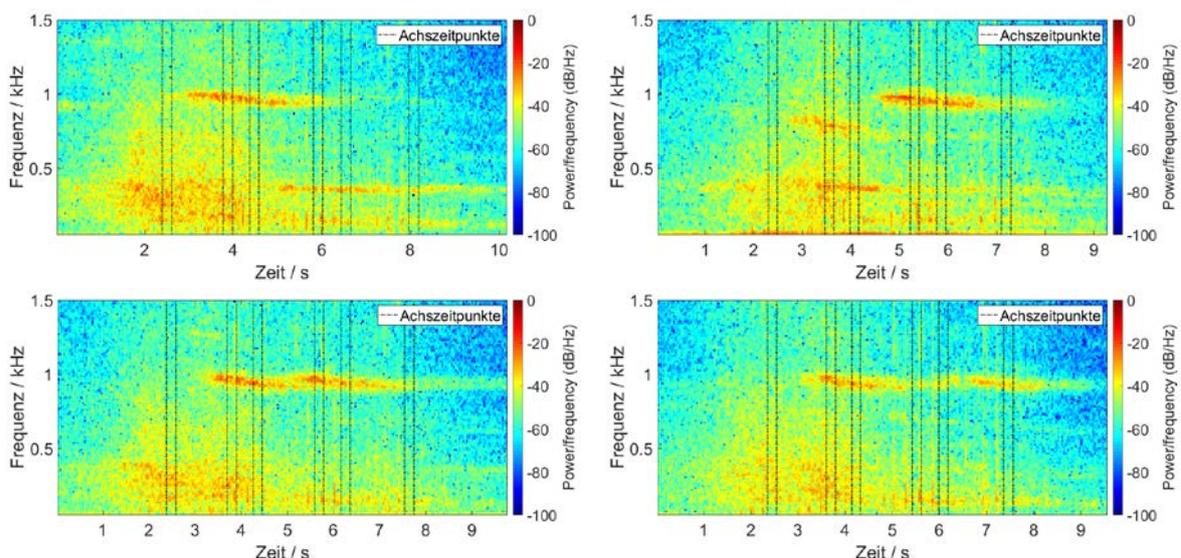


Abb. 4-13: Spektrogramme der Emissionen von Schnellbahnen der Baureihe B in MQ1 mit tonalen Komponenten im 1 kHz Terzband – tonale Komponente beim Übergang Triebwagen-Zwischenwagen (oben, links), tonale Komponente beim Übergang Zwischenwagen-Steuerwagen (oben, rechts), tonale Komponenten beider Wagenübergänge (unten, links) und tonale Komponente am Ende des Steuerwagens (unten, rechts)

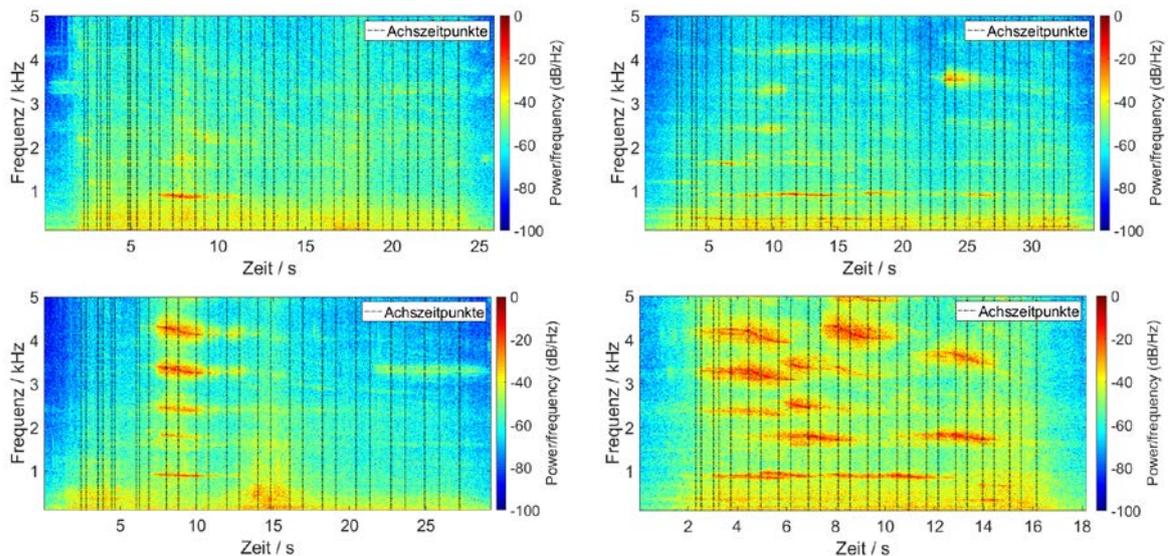


Abb. 4-14: Spektrogramme der Emissionen von Güterzügen mit tonalen Komponenten im 800 Hz und im 1 kHz Terzband – Zug in MQ1 mit isolierter tonaler Komponente (oben, links), Zug in MQ1 mit mehreren tonalen Komponenten (oben, rechts), Zug in MQ2 mit tonaler Komponente mit Oberwellen (unten, links) und Zug in MQ1 mit zahlreichen tonalen Komponenten, sowohl in den beiden betrachteten Terzbändern, wie auch in den darüber liegenden (unten, rechts)

In der Regel sind tonale Komponenten nicht über größere Bereiche der Vorbeifahrt durchgehend vorhanden, sondern akustisch separierbar. Eine Doppler-Verschiebung ist meist zu erkennen und auch in ihrer zeitlichen Struktur sind sich diese tonalen Komponenten und die tonalen Komponenten in höherfrequenten Terzbändern ähnlich. In MQ1 sind über den gesamten Messzeitraum etwas weniger tonale Komponenten als in MQ2 identifiziert worden, allerdings treten diese ausschließlich nach aktivierter Schienenkopfkonditionierung auf. Trotz dessen liegt aufgrund der zuvor erwähnten Eigenschaften die Vermutung nahe, dass es sich bei diesen Geräuschen um Kurvenquietschen handelt.

Bei Güterzügen treten in beiden Terzbänder (800 Hz und 1 kHz) und in beiden Messquerschnitten tonale Auffälligkeiten auf, welche sowohl akustisch wie auch in ihrer zeitlichen Struktur oftmals Quietschgeräuschen ähnlich sind (Beispiele für isolierte, aber auch für mehrfache tonale Komponenten sind in Abb. 4-14 dargestellt). Demzufolge wird hier davon ausgegangen, dass die tonalen Komponenten sowohl im 800 Hz Band, wie auch im 1 kHz Terzband von Kurvenquietschen herrühren.

Aufgrund dieser Auswertungen, aber auch aufgrund eines vermutlich durch den Frequenzgang des menschlichen Gehörs verursachten, lauterem Höreindrucks gegenüber tonaler Komponenten bei Frequenzen ≤ 500 Hz wird die untere Betrachtungsgrenze für die nachfolgenden Auswertungen von 1,25 kHz auf 800 Hz gesenkt. Um

Fehlerkennungen von geschwindigkeitsabhängigen, tonalen Komponenten zu vermeiden, werden jedoch Erkennungen im 800 Hz Band bei Schnellbahnen der Baureihe B verworfen.

Es sei darauf hingewiesen, dass durch derartige Anpassungen in der Erkennung nicht nur Vorteile bei der Analyse von Kurvenquietschen entstehen. Sondern es gehen damit auch grundsätzlich Unsicherheiten bei Vergleichen von aggregierten Ergebnissen (wie den Korrekturfaktoren) bei angepasster Erkennung und von Ergebnissen, die mit ursprünglichem Auswertalgorithmus gebildet werden, einher. Bei der erläuterten Anpassung belaufen sich die Unterschiede bei der Erkennung akustisch auffälliger Züge jedoch in MQ1 nur auf 31 der bei ursprünglicher Erkennung 2730 auffälligen Züge (1,1 %) und in MQ2 auf 10 der ursprünglich 6406 auffälligen Züge (0,2 %). Dementsprechend werden die dadurch hervorgerufenen Unterschiede als vernachlässigbar angesehen.

Des Weiteren sei angemerkt, dass die geringfügige Abänderung in der Erkennung durch die bei den Messungen vorhandenen Rahmenbedingungen (Verkehr, Bogeneigenschaften, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, etc.) begründet ist und daher nur für die Auswertungen der unter diesen Bedingungen erhobenen Messdaten anzuwenden ist. Gleichzeitig wird damit unterstrichen, dass die automatisierte Erkennung bei Einsatz unter geänderten Rahmenbedingungen stets im Hinblick auf korrekte Erkennungen zumindest stichprobenartig zu prüfen ist.

4.1.2. Erweiterung im Bereich hochfrequenter Terzbänder

Im Projekt ESB wurden die Abtastfrequenzen der Messungen gegenüber dem Projekt BEGEL von 32 kHz auf 50 kHz angehoben, um experimentell auch tonale Komponenten im 16 kHz Terzband untersuchen zu können. Dementsprechend wird im Folgenden der Frage nachgegangen, ob die obere Betrachtungsgrenze von 12,5 kHz auf 16 kHz angehoben werden sollte. Umgekehrt wird auch diskutiert, ob eine Senkung auf 10 kHz für die Abschätzung von Korrekturfaktoren zweckmäßiger wäre, da deren Frequenzbereich sich im Oktavbandspektrum nur bis zum 8 kHz Band und damit im Terzspektrum bis zum 10 kHz Terzband erstreckt. Zur besseren Einschätzung der Relevanz der einzelnen Terzbänder sind in Abb. 4-15 die absoluten und relativen Auftretshäufigkeiten in den hochfrequenten Terzbändern getrennt nach Zugkategorie dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass vor allem im unkonditionierten MQ2 im 12,5 kHz und 16 kHz Terzband tonale Komponenten häufiger als im 10 kHz Terzband erkannt werden. Ähnlich wie bei der unteren Betrachtungsgrenze werden bei den Schnellbahnen

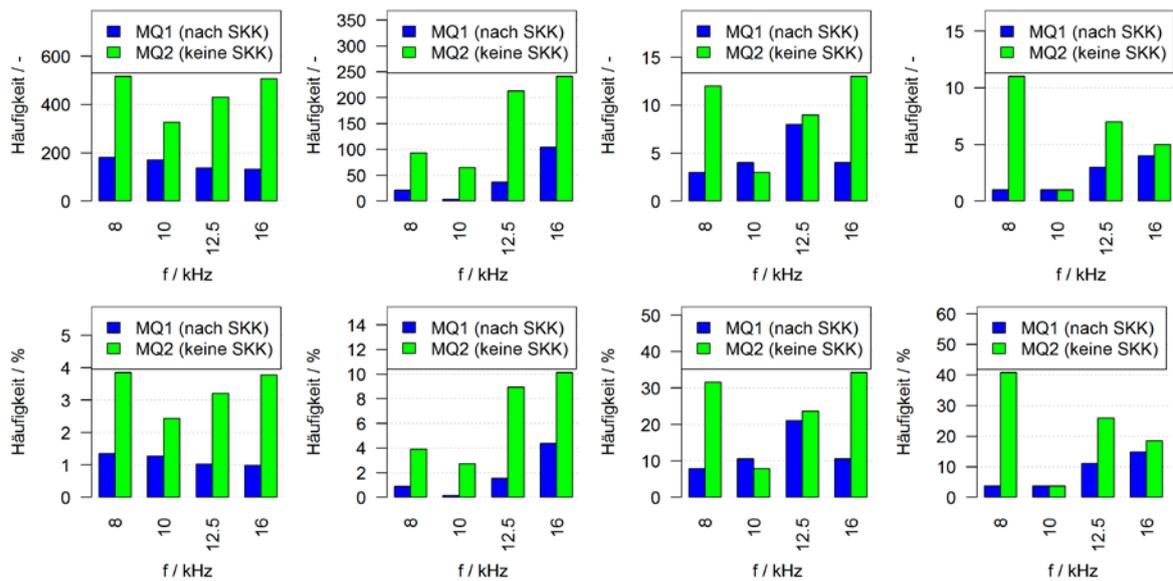


Abb. 4-15: Detaildarstellung der spektralen Verteilung von absoluten (oben) und relativen (unten) Häufigkeiten erkannter, tonaler Emissionskomponenten im hochfrequent, sowie im hochfrequent-erweiterten Betrachtungsbereich (8 kHz bis 16 kHz) getrennt nach Zugkategorie (von links nach rechts: Schnellbahn Typ A, Schnellbahn Typ B, Güterzüge für den KFZ-Transport und sonstige Güterzüge) bei Ausblendung der Zeitbereiche mit Regen und unabhängig des Betriebszustandes der vor MQ1 installierten Schienenkopfkonditionieranlage (SKK)

der Baureihe A und B aufgrund des Verkehrsmix zwar zahlreiche tonale Komponenten detektiert, jedoch weisen die vergleichsweise selten verkehrenden Güterzüge deutlich höhere relative Häufigkeiten auf.

16 kHz Terzband

Trotz der in Abb. 4-15 dargestellten zum Teil hohen Zahl an absoluten und/oder relativen Häufigkeiten, treten diese wesentlich seltener ausschließlich im 16 kHz Terzband und ohne breitbandige Auffälligkeiten (gemäß dem Auswertalgorithmus aus dem Projekt BEGEL) auf:

- Schnellbahn Baureihe A (MQ1 / MQ2) : 17 / 84 (0,1 % / 0,5 %)
- Schnellbahn Baureihe B (MQ1 / MQ2) : 44 / 32 (1,4 % / 1,0 %)
- Güterzüge für KFZ-Transport (MQ1 / MQ2) : 0 / 0 (0,0 % / 0,0 %)
- sonstige Güterzüge (MQ1 / MQ2) : 1 / 0 (1,9 % / 0,0 %)

In Abb. 4-16 sind zwei Beispiele für derartige, isolierte tonalen Komponenten dargestellt. Der Frequenzgang des menschlichen Gehörs, nimmt allerdings hin zu höheren Frequenzen zunehmend ab, sodass je nach konkreter Frequenz der tonalen Komponenten von einem um 5 dB bis 10 dB verminderten Hörempfinden gegenüber einem 1 kHz Ton

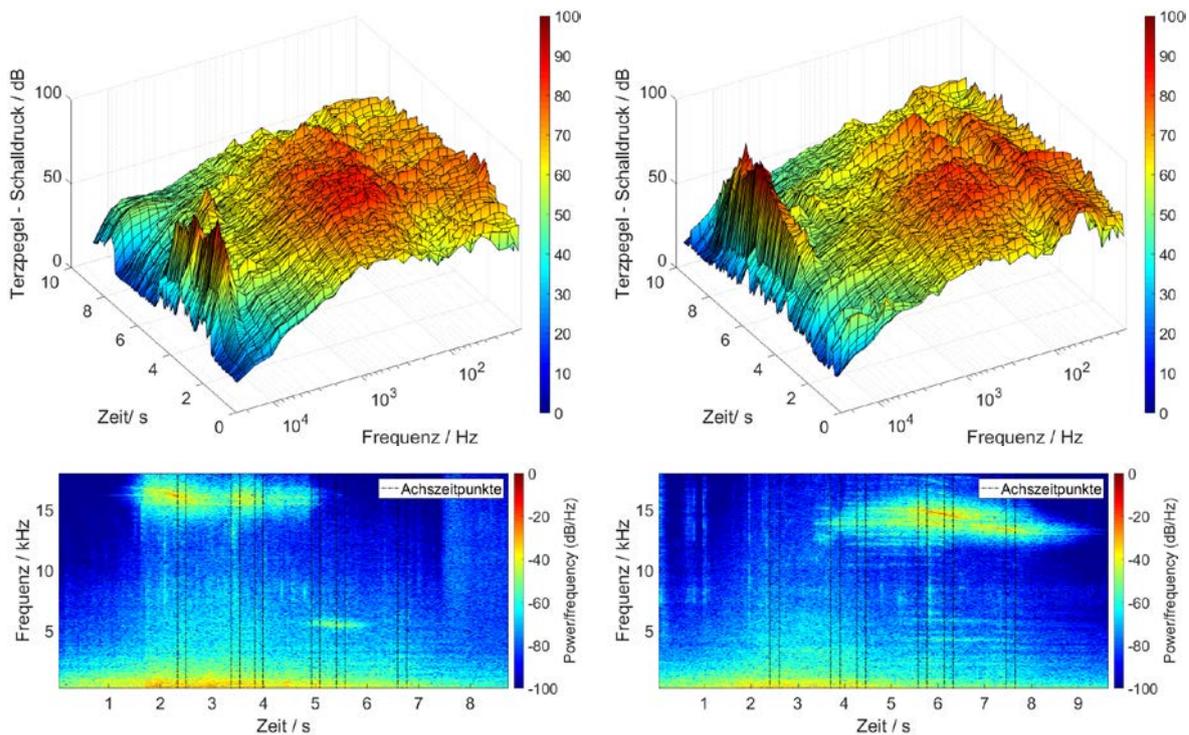


Abb. 4-16: Terzpegelzeitverläufe (oben) und Spektrogramme (unten) der Emissionen von zwei Schnellbahnen der Baureihe A in MQ1 mit isolierten, tonalen Komponenten im 16 kHz Terzband, welche trotz hoher Terzpegelwerte aufgrund der hohen Frequenz und dem frequenzabhängigen Lautheitsempfinden vergleichsweise leise wahrzunehmen sind

ausgegangen werden kann (vgl. Frequenzbewertungen im 16 kHz Terzband gemäß DIN EN 61672-1 [21]: -6,6 dB bei A-Bewertung bzw. -8,5 dB bei C-Bewertung). Dies wird auch durch die subjektiven Eindrücke von Hörproben bestätigt. So werden beispielsweise die beiden in Abb. 4-16 dargestellten tonalen Komponenten trotz deren hohen Pegelspitzen als vergleichsweise leise eingestuft. Aufgrund dieser Eigenschaft, aber auch wegen dem seltenen, isolierten Auftreten wird die automatisierte Erkennung nicht auf das 16 kHz Band ausgedehnt.

12,5 kHz Terzband

Die Nutzung des 12,5 kHz Terzbandes zur Bewertung von tonalen Auffälligkeiten kann grundsätzlich konträr diskutiert werden. Auf der einen Seite werden in der Prognoserechnung Oktavbänder bis zum 8 kHz Band betrachtet, in welches aus den zugrunde liegenden Terzspektren nur Bänder bis 10 kHz einfließen. Unter diesem Gesichtspunkt wäre eine Erkennung von tonalen Auffälligkeiten im 12,5 kHz Terzbandes nicht erforderlich.

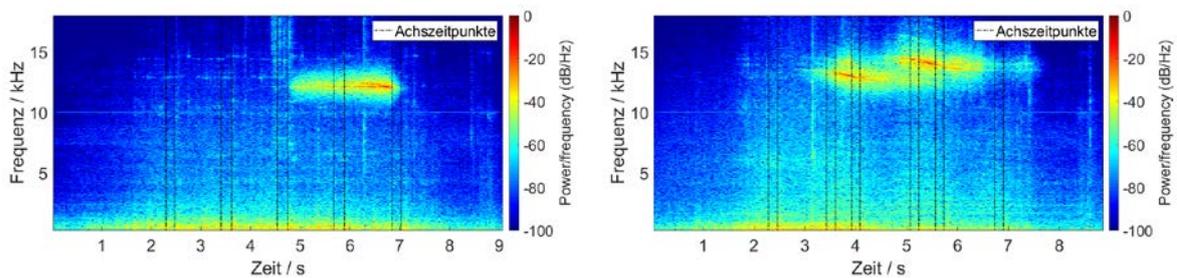


Abb. 4-17: Spektrogramme der Emissionen von zwei Schnellbahnen in MQ2 mit isolierten, tonalen Komponenten im 12,5 kHz Terzband, welche deutlich wahrzunehmen sind - Baureihe A (links) mit einer tonalen Komponente und Baureihe B mit zwei tonalen Komponenten, wobei die erste, etwas tieferfrequente Komponente besser wahrzunehmen ist (rechts)

Auf der anderen Seite waren tonale Komponenten – insbesondere mit Frequenzen nahe der unteren Bandgrenze – oftmals in den Hörproben bereits deutlich wahrzunehmen. Aus diesem Grund kann die Erkennung auffälliger, tonaler Komponenten auch unabhängig von nachfolgender Verwendung angesehen werden.

Die in Abb. 4-17 gezeigten Beispiele isolierter tonaler Auffälligkeiten traten in beiden Messquerschnitten äußerst selten auf (MQ1: 19 Züge bzw. 0,7 % der akustisch auffälligen Züge, MQ2: 17 bzw. 0,3 % der auffälligen Züge). Insofern ist davon auszugehen, dass die Auswirkungen in den nachfolgenden Auswertungen bei Veränderung der oberen Betrachtungsgrenze grundsätzlich vernachlässigbar gering sein werden. Vor diesem Hintergrund wurde letztlich die Einbeziehung des 12,5 kHz Terzbandes bei der Erkennung tonaler Komponenten aus dem Projekt BEGEL auch in ESB übernommen.

4.2. Empirische Verifizierung der Erkennung und Vergleich zu BEGEL

Der Algorithmus zur Erkennung tonaler Geräuschanteile im mittleren und oberen Frequenzbereich, sowie von breitbandigen Auffälligkeiten, wurde bereits im Projekt BEGEL anhand umfangreicher, zufällig ausgewählter Züge (Stichprobe) eingehend empirisch geprüft. Dabei wurden Ergebnisse der Erkennung den Erfahrungen durch Anhören akustischer Aufzeichnungen, sowie durch Vergleiche mit zugehörigen Terzpegelspektren und Terzpegelzeitverläufen gegenüber gestellt. Da sich im vorliegenden Projekt die Rahmenbedingungen unterscheiden (engere Bögen, Unterschiede im Oberbau, kürzere Personenzüge, unterschiedliche Fahrdynamik, etc.), wurde auch im vorliegenden Projekt eine derartige, empirische Verifizierung der automatisierten Erkennung von Auffälligkeiten basierend auf einer Stichprobe von 100 zufällig ausgewählten Zügen, sowie weiteren zahlreichen Hörproben und manuellen Bewertungen der Emissionsspektren im Zuge von Detailauswertungen, vorgenommen.

4.2.1. Breitbandige Auffälligkeiten

Zur Prüfung der automatisierten Erkennung breitbandiger Auffälligkeiten wurden die bereits im Projekt BEGEL untersuchten Grenzwerte für die Beurteilungsgröße (der arithmetische Mittelwert der Terzpegel von 8 bis 12,5 kHz) von 65 dB, 70 dB und 75 dB herangezogen. Basierend auf Hörproben zeichnet sich ein ähnliches Bild wie im Projekt BEGEL ab: bei einem Grenzwert von 75 dB werden subjektiv als auffällig eingestufte Vorbeifahrten häufiger nicht erkannt, weshalb sich dieser Wert für die Erkennung nicht anbietet. Bei breitbandigen Auffälligkeiten mit einer Beurteilungsgröße zwischen 65 dB und 70 dB handelt es sich hingegen meist um leisere und oftmals vergleichsweise kurze Zischgeräusche, wobei diese bei den beiden Schnellbahnbaureihen A und B einen nicht zu vernachlässigenden Anteil ausmachen (im unkonditionierten Bogen rund 13 % der Vorbeifahrten bzw. rund ein Drittel bis ein Viertel der bei einem Grenzwert von 65 dB erkannten Auffälligkeiten, vgl. Abb. 4-20). Der in BEGEL verwendete Grenzwert von 70 dB wurde auch im Hinblick auf die betrachteten Bögen mit größeren Radien bzw. auf Vorbeifahrten mit höheren Geschwindigkeiten und höheren Schallemissionen als guter Kompromiss zwischen hoher Erkennungsrate und Robustheit vor Fehldetektionen gewählt. Aufgrund der niedrigen Vorbeifahrtgeschwindigkeiten und der wegen der geringeren Grundrollgeräusche sensitiveren Wahrnehmung von Zischgeräuschen wäre im vorliegenden Projekt anhand der empirischen Prüfung sowohl eine Beibehaltung des BEGEL Grenzwertes von 70 dB, als auch eine Senkung um wenige Dezibel vertretbar. Jedoch erlaubt nur die Beibehaltung eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den verschiedenen Bögen aus beiden Projekten, weshalb der Grenzwert von 70 dB auch für die nachfolgenden Auswertungen angewandt wurde.

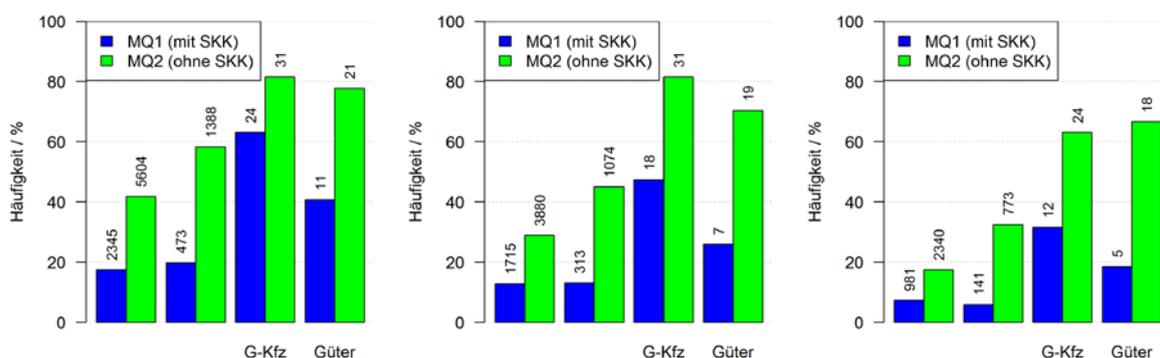


Abb. 4-18: relative Häufigkeiten (und absolute Häufigkeiten als Werte über Balken dargestellt) breitbandiger Auffälligkeiten verschiedener Zugskategorien während des gesamten Messzeitraums (und damit unabhängig vom Aktivierungszustand der Schienenkopfkonditionierung) bei Ausblendung von Regenphasen für die drei Grenzwerte 65 dB (links), 70 dB (Mitte) und 75 dB (rechts)

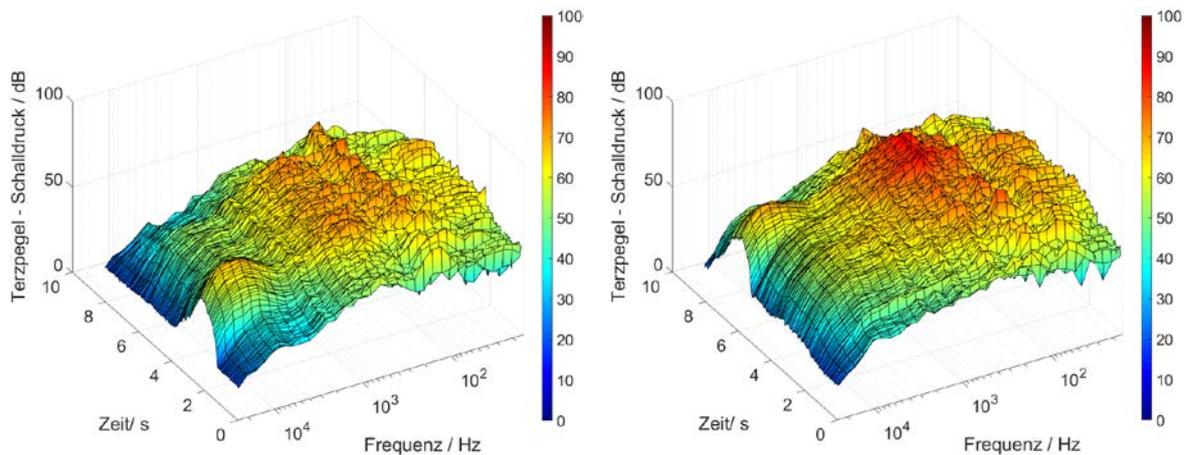


Abb. 4-19: exemplarische Darstellung der Terzpegelzeitverläufe von Vorbeifahrten mit deutlich wahrnehmbaren Zischgeräuschen der fahrzeugseitigen Spurkranzschmierung bei einer Schnellbahn der Baureihe A (links) und bei einer Schnellbahn der Baureihe B (rechts)

Im Rahmen der empirischen Prüfung wurden keine offensichtlichen Fehlerkennungen breitbandiger Auffälligkeiten identifiziert. Selbst vereinzelt auftretenden Zischgeräusche bei den beiden Schnellbahnbaureihen A und B und bei Güterzügen, welche laut Experten der ÖBB der fahrzeugseitigen Spurkranzschmierung zuzuordnen sind, und sich spektral durch breitbandige Pegelerhöhungen in den höherfrequenten Terzbändern äußern (siehe Abb. 4-19), werden korrekterweise nicht als breitbandige Auffälligkeiten erkannt. Aufgrund dieser Beobachtungen werden analog zum Projekt BEGEL breitbandige Auffälligkeiten als kennzeichnend für die durch Spurkranzanlauf verursachten Schallemissionen angesehen. Ein Vergleich zwischen den relativen Auftretshäufigkeiten breitbandiger Auffälligkeiten der verschiedenen Zugskategorien im unkonditionierten Bogen (siehe Abb. 4-18 Mitte; grüne Balken) und im engsten Messbogen aus dem Projekt BEGEL mit einem Radius von 256 m zeigt ähnliche Tendenzen. So weist die Schnellbahnbaureihe A mit 29 % (BEGEL 19 %) die geringste Neigung für breitbandige Auffälligkeiten auf, während bei der Schnellbahnbaureihe B mit 45 % (BEGEL 62 %) bereits deutlich häufiger derartige Auffälligkeiten auftreten. Bei den wenigen Vorbeifahrten von Güterzügen waren mit durchschnittlich rund 76 % (BEGEL 71 %) hingegen die höchsten Häufigkeiten zu registrieren. Ein Anstieg der relativen Häufigkeiten gegenüber BEGEL, wie er bei Schnellbahnen der Baureihe A und bei Güterzügen zu beobachten ist, wäre aufgrund des geringeren Bogenradius von 230 m in MQ2 grundsätzlich erwart- bzw. erklärbar. Allerdings zeigen die Schnellbahnen der Baureihe B einen gegenläufigen Trend, weshalb die Radienänderung als einzig bestimmender Einflussfaktor für die Häufigkeitsunterschiede in Frage zu stellen ist.

4.2.2. Tonale Auffälligkeiten

Auch für die automatisierte Erkennung tonaler Auffälligkeiten bestätigte die empirische Verifizierung grundsätzlich die hohe Zuverlässigkeit bzw. die guten Erkennungseigenschaften aus dem Projekt BEGEL. Aus diesem Grund wurden keine weiteren Anpassungen des Erkennungsalgorithmus für die Auswertungen im vorliegenden Projekt vorgenommen.

Die Schnellbahnen der Baureihe A wurden bereits im Projekt BEGEL in den beiden engeren Bögen – wenn auch basierend auf einer geringen Anzahl von Vorbeifahrten – betrachtet. Die sich dabei abzeichnende geringe Neigung tonaler Komponenten im Frequenzbereich bis 6,3 kHz ist auch in vorliegenden Messungen vorhanden: so traten tonale Auffälligkeiten im Messquerschnitts MQ1 im Zeitbereich ohne Konditionierung bzw. im unkonditionierten Messquerschnitt MQ2 während des gesamten Messzeitraums bei Ausblendung von Regenphasen nur bei rund 7 – 8 % der Vorbeifahrten auf. Entsprechend der spektralen Verteilung im unkonditionierten Bogen (siehe Abb. 4-20, oben links) treten tonale Komponenten zum einen im 1,25 kHz Terzband und zum anderen in den Terzbändern mit Mittenfrequenzen $\geq 3,15$ kHz auf, wobei ein deutlicher Anstieg ab dem 5 kHz zu verzeichnen ist. Auch wenn im Projekt BEGEL nur 8 tonale Auffälligkeiten detektiert wurden, so sind diese in den erwähnten Frequenzbereichen aufgetreten

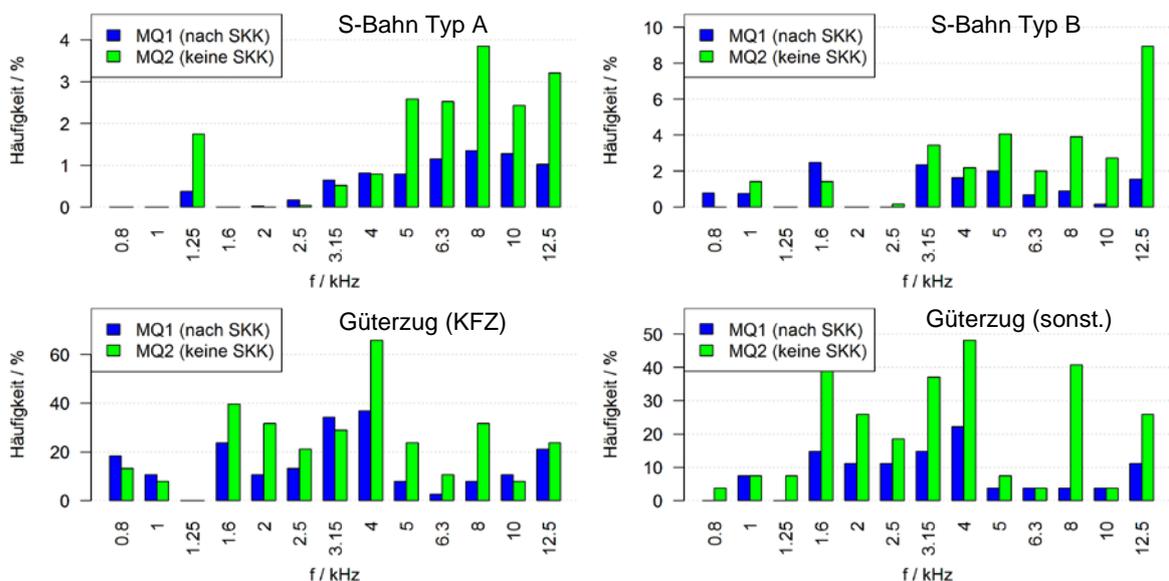


Abb. 4-20: spektrale Verteilung der relativen Häufigkeiten tonaler Komponenten im Frequenzbereich von 0,8 kHz bis 12,5 kHz während des gesamten Messzeitraums (und damit unabhängig vom Aktivierungszustand der Schienenkopfkonditionierung) und bei Ausblendung von Regenphasen - Schnellbahnen der Baureihe A (13407 Züge, oben links), Schnellbahnen der Baureihe B (2381 Züge, oben rechts), Güterzüge für den KFZ-Transport (38 Züge, unten links) und sonstige Güterzüge (27 Züge, unten rechts)

(3,15 kHz, 5 kHz und 6,3 kHz Terzband). Die tonalen Auffälligkeiten gehen über den gesamten, für den lateralen Stick-Slip Effekt grundsätzlich als kennzeichnend eingestuften Frequenzbereich von 0,8 kHz bis 6,3 kHz häufig mit breitbandigen Auffälligkeiten einher (beispielsweise sind in MQ2 bei rund 90 % der Züge mit tonalen Auffälligkeiten auch breitbandige Auffälligkeiten erkannt worden). Zudem sind bei jenen Zügen ohne vorhandene breitbandige Auffälligkeiten oftmals leisere Zischgeräusche wahrnehmbar, welche die Erkennungsgrenzwerte noch nicht überschreiten. Aufgrund dieser Beobachtungen ist für die Interpretation tonaler Auffälligkeiten bei Schnellbahnen der Baureihe A unklar, inwieweit diese kennzeichnend für den lateralen Stick-Slip Effekt sind oder ob die tonalen Komponenten mehrheitlich durch den Spurkranzanlauf hervorgerufen werden und damit diesem Anregungsmechanismus zuzuschreiben sind. Auch die Literatur liefert hierfür keine Hilfestellung – abgesehen von den allgemeinen Unterschieden in den Charakteristika der Emissionen beschreibt Thompson [2] lediglich, dass bei Spurkranzanlauf die Wahrscheinlichkeit für Kurvenquietschen gesenkt wird bzw. sich in Laborstudien eine Senkung der Pegel der tonalen Komponenten zeigte.

Tonale Auffälligkeiten bei Schnellbahnen der Baureihe B waren etwa doppelt so häufig zu beobachten als bei der Baureihe A (~18 % im Zeitraum ohne Konditionierung in MQ1 bzw. ~13 % während des gesamten Messzeitraumes in MQ2). Diese Auftrittshäufigkeiten liegen damit deutlich unter den Häufigkeiten im engsten Messbogen des Projekts BEGEL mit einem Radius von 256 m (~35 %). Die spektralen Verteilungen der tonalen Auffälligkeiten in beiden Projekten weisen gewisse Ähnlichkeiten auf. So waren gegenüber der in Abb. 4-20 (oben rechts) dargestellten Verteilung in BEGEL tonale Auffälligkeiten ebenfalls häufig im 3,15 kHz und 4 kHz Terzband, sowie (mit verringerter Häufigkeit) im 6,3 kHz Band und 1,6 kHz Band vorhanden. Allerdings waren in BEGEL tonale Auffälligkeiten im 5 kHz Band gegenüber den benachbarten Bändern deutlich seltener, weshalb die Auffälligkeiten im 3,15 kHz und 4 kHz Band dominierten, während bei vorliegenden Messungen eine derartige Konzentration von Auffälligkeiten in diesen beiden benachbarten Bändern nicht festzustellen ist.

Der Anteil an Vorbeifahrten mit tonaler Auffälligkeit in den Terzbändern von 0,8 kHz bis 6,3 kHz, bei welchen auch breitbandige Auffälligkeiten identifiziert wurden, liegt bei rund 73 % und damit deutlich unter jenem der Schnellbahnbaureihe A. Trotz dieses hohen Wertes wurde bei den empirischen Auswertungen der Eindruck gewonnen, dass die tonalen Auffälligkeiten – insbesondere in den Terzbändern ≤ 5 kHz – tendenziell unabhängig von breitbandigen Auffälligkeiten sind, da sie häufig während

unterschiedlicher Bereiche der Vorbeifahrt auftreten (breitbandige Auffälligkeiten wurden vermehrt bei den Triebwagen vorgefunden, während tonale Auffälligkeiten vermehrt dem zentralen Bereich der Garnitur rund um den Zwischenwagens zugeordnet wurden). Darüber hinaus sind bei jenen Vorbeifahrten mit tonalen, aber ohne erkannte breitbandige Auffälligkeiten auch häufig keine geringgradigen Erhöhungen der Terzpegel im oberen Frequenzbereich (wie dies bei leisen Zischgeräuschen der Fall wäre) beobachtet worden. Aufgrund dieser empirischen Auswertungen werden tonale Auffälligkeiten bei Schnellbahnen der Baureihe B in den Terzbändern von 0,8 kHz bis 6,3 kHz als kennzeichnend für den Stick-Slip Effekt angesehen.

Im Bereich der Güterzüge (für den KFZ-Transport, wie auch die sonstigen Güterzüge) sind zwar deutlich höhere relative Auftretshäufigkeiten tonaler Komponenten vorhanden, jedoch basieren die auf einer geringen Anzahl an Detektionen. Aufgrund der resultierenden, geringen Aussagekraft werden die in Abb. 4-20 (unten) dargestellten, spektralen Verteilungen nicht eingehend diskutiert, sondern lediglich festgehalten, dass nicht wie im Projekt BEGEL Auffälligkeiten in den Terzbändern ≥ 4 kHz gegenüber tieferen Frequenzen deutlich überwiegen. Insbesondere im unkonditionierten Bogen sind tonale Auffälligkeiten häufig auch im 2 kHz und im 2,5 kHz Terzband erkannt worden,

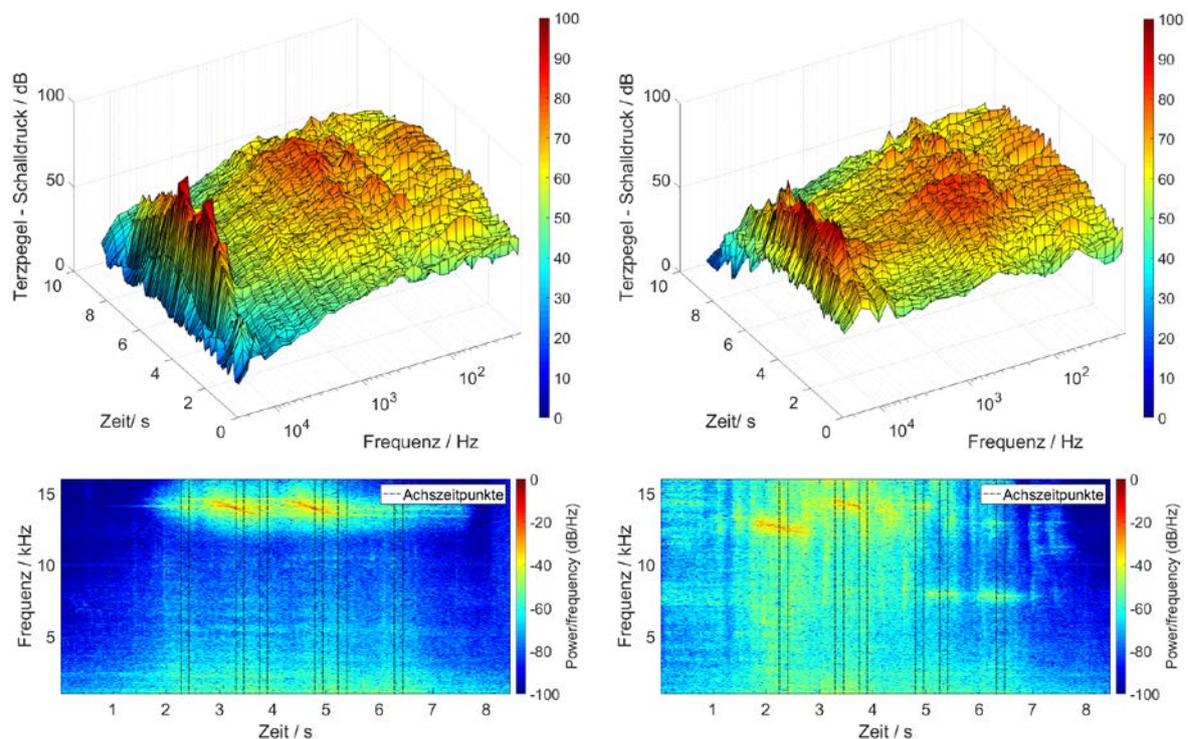


Abb. 4-21: Terzpegelzeitverläufe (oben) und Spektrogramme (unten) der Emissionen von zwei Schnellbahnen der Baureihe B in MQ2 mit tonalen Komponenten im oberen Frequenzbereich – sehr selten auftretende, isolierte tonale Auffälligkeit (links) und überwiegend auftretende Kombinationen mit breitbandigen Auffälligkeiten (rechts)

wegen im 5 kHz und 6,3 kHz Terzband die Häufigkeiten vergleichsweise gering ausfallen.

Tonale Auffälligkeiten im oberen Frequenzbereich (Terzbänder von 8 kHz bis 12,5 kHz) treten nur sehr selten wie in Abb. 4-21 (links) dargestellt isoliert auf (0,2 % aller akustisch auffälligen Vorbeifahrten im unkonditionierten Bogen), sondern es werden in der Regel auch breitbandige Auffälligkeiten detektiert (siehe Abb. 4-21, rechts). Aus diesem Grund, aber auch wegen der durch die mit steigender Frequenz zunehmenden Bandbreiten der Terzbänder und die daraus resultierenden, zunehmenden Unsicherheiten bei der Erkennung schmalbandiger Signalanteile, werden tonale Auffälligkeiten im oberen Frequenzbereich wie auch in BEGEL nur bei Betrachtungen einbezogen, bei welchen keine Differenzierung der Entstehungsmechanismen erfolgt (beispielsweise bei der Ableitung von Korrekturfaktoren in Kap. 7).

5. FAHRZEUGDATEN

Für die Untersuchung des Einflusses von Radeigenschaften auf die Kurvengeräusche war die Kenntnis über die Radprofile der verkehrenden Schnellbahngarnituren während des Messzeitraumes erforderlich. Zur Zuordnung der Messdaten zu den verschiedenen Schnellbahngarnituren wurden zudem Betriebsdaten der Garniturläufe benötigt. Darüber hinaus ist für die Untersuchung lokaler Unterschiede des Emissionsverhaltens im Zugverband die Kenntnis über die Orientierung von Garnituren, insbesondere bei einem unsymmetrischen Aufbau, vorteilhaft. Im Folgenden wird daher skizziert, welche Parameter in Bezug auf die Radeigenschaften und welche Daten für deren Zuordnung zu akustischen Messdaten erhoben werden konnten, wie diese erhoben wurden und wie diese Daten für die weiteren Auswertungen vorverarbeitet wurden.

5.1. Radeigenschaften

Alle Räder von Schnellbahngarnituren werden im Rahmen von Werkstättenaufenthalten zur Wartung bzw. Instandhaltung bei ÖBB Technische Services einer Radprofilmessung unterzogen, bei welcher das berührungslos arbeitende Messsystem Calipri der Firma NEXTSENSE GmbH zur Anwendung kommt. Im Fall einer erforderlichen Reprofilierung werden zudem bei Ein- und Ausgangsmessungen Radprofile bzw. –parameter mittels Abtastmessungen ermittelt. Die erfassten, sowie die daraus berechneten Profildaten werden in einer Radreifendatenbank zentral gespeichert. Aufgrund der Regelmäßigkeit der Werkstättenaufenthalte und wegen der geringen, zeitlichen Abstände von meist nur wenigen Monaten, besteht damit ein für die weiteren Untersuchungen ausreichend dichtes Netz an Profilmessungen, weshalb im weiteren auf diese, von ÖBB Technische Services zur Verfügung gestellten Daten zurückgegriffen wird.

Konkret wurden die Profilmessungen für die 11 verschiedenen, während des Messzeitraums bei den Messquerschnitten verkehrenden Garnituren der Baureihe A, sowie für die 22 verkehrenden Garnituren der Baureihe B seitens ÖBB bereitgestellt. Die Messdaten umfassen nicht nur Datensätze der Werkstättenaufenthalte während des Messzeitraumes, sondern auch jene von zumindest einem Werkstättenaufenthalt vor und einem nach dem Messzeitraumes der akustischen Messungen.

Abb. 5-1 und Abb. 5-2 definiert grafisch wesentliche, in der Datenbank enthaltenen Radparameter. Darüber hinaus werden noch (maximale) Differenzen von Radparametern eines Radsatzes, eines Drehgestells und/oder eines Fahrzeuges gebildet (wie den Messkreisdurchmesserdifferenzen) und allen der jeweils betrachteten Räder zugeordnet.

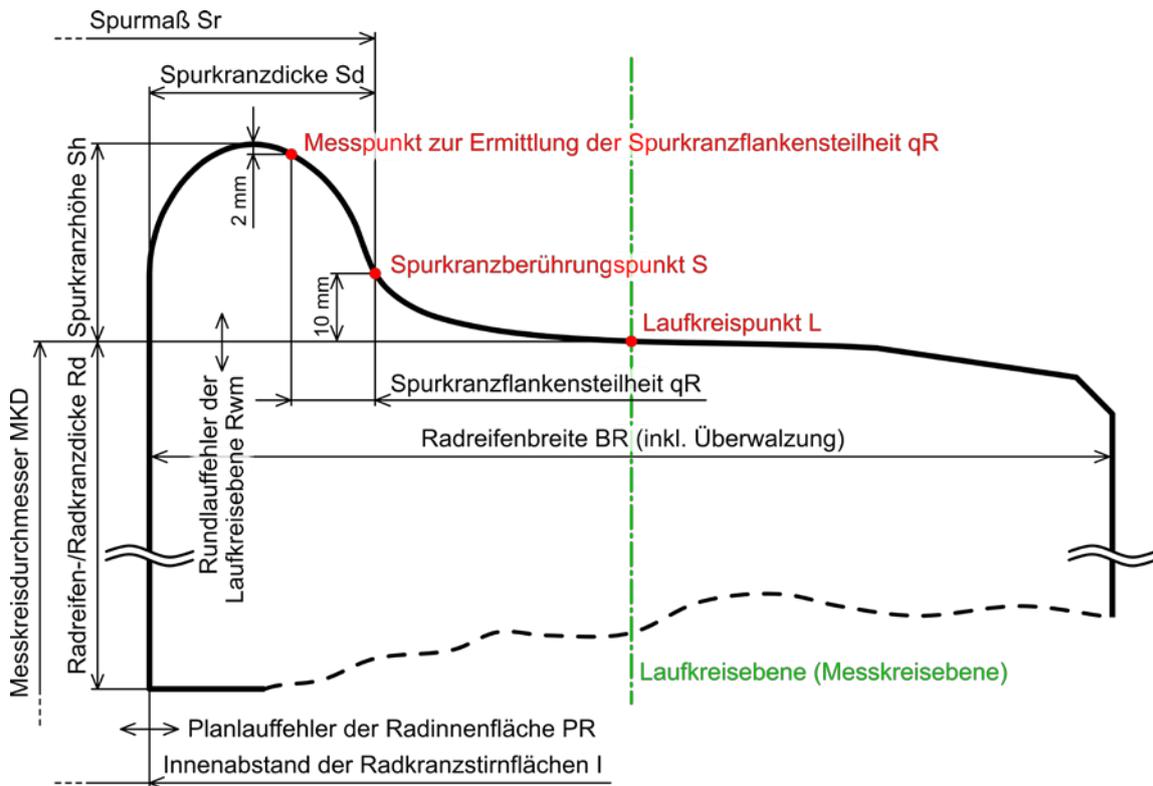


Abb. 5-1: Definition der Radparameter bei Rad ohne Verschleiß

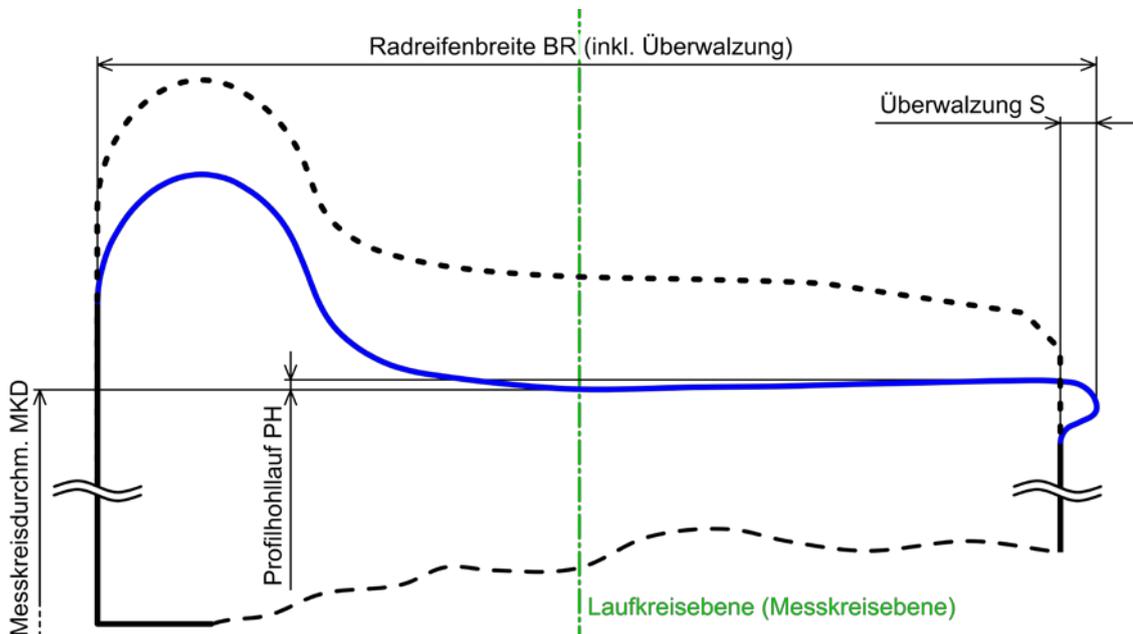


Abb. 5-2: Definition geänderter oder zusätzlicher Radparameter bei Rad mit Verschleiß (Profilhohllauf und Überwälzung)

Die entsprechenden Messergebnisse all dieser Parameter wurden – sofern vorhanden – aus der Datenbank exportiert und mit gewissen Einschränkungen für die weiteren Auswertungen herangezogen. Von einer Übergabe der gemessenen Radprofile wurde

jedoch abgesehen, da diese für jedes Rad und jede Messung manuell exportiert hätten werden müssen und dadurch einen enormen Aufwand entstanden wäre. Zudem waren die Radprofile – da eine eigene Radprofilparameterermittlung aufgrund der Datenbereitstellung durch den Auftraggeber obsolet wurde – lediglich zur Veranschaulichung angedacht, sodass der Verzicht der Profile keine negativen Auswirkungen auf die weiteren Auswertungen zur Folge hatte. Für die Interpretation der Radparameterwerte ist folgendes zu beachten:

- Messkreisdurchmesser MKD_n (einer n -ten Messung) werden im Zuge der berührungslosen Messungen mit dem Calipri Messgerät nicht direkt erfasst, sondern indirekt über die Spurkranzhöhe Sh_n , sowie dem Messkreisdurchmesser MKD_{n-1} und der Spurkranzhöhe Sh_{n-1} der vorangegangenen Messung wie folgt berechnet:

$$MKD_n = MKD_{n-1} - 2 \cdot (Sh_n - Sh_{n-1})$$

Bei dieser Berechnung wird davon ausgegangen, dass der Spurkranz keinem Verschleiß unterliegt. Im Fall eines starken Verschleißes im Bereich der Spurkranzflanke kann sich jedoch ein Grat an der Spurkranzkuppe ausbilden, wodurch die Spurkranzhöhe Sh_n über- und in weiterer Folge der Messkreisdurchmesser MKD_n unterschätzt wird. Dem gegenüber können Schläge auf den Spurkranz auch Abflachungen der Kuppe bzw. Überschätzungen des Messkreisdurchmessers MKD_n hervorrufen. Gemäß Einschätzung von Experten der ÖBB, ist bei den betrachteten Fahrzeugen der Schnellbahnstrecke S45 nicht von einem übermäßig hohen Verschleiß an der Spurkranzflanke auszugehen, weshalb erster Fall (Gratbildung an der Spurkranzkuppe) als unwahrscheinlich eingestuft wird.

- Die maximalen Messkreisdurchmesserdifferenzen an Radsätzen $MKDMDIFF$, an Drehgestellen DM_DIFF_DG und an Fahrzeugen DM_DIFF werden aufgrund der Unsicherheiten bei der indirekten Berechnung nicht in der Datenbank angezeigt. Für die nachfolgenden Auswertungen werden die Differenzen aus den Messkreisdurchmessern erneut berechnet, wenngleich hier von größeren Unsicherheiten ausgegangen werden muss.
- Die Radreifenbreite BR und die Überwälzung S werden nur bei der berührungslosen Profilmessung ermittelt. Da diese Messungen den taktilen Ein- und Ausgangsmessungen bei Reprofilierungen zumeist mit kurzem zeitlichen Abstand vorangehen und eine rasche Änderung dieser beiden Parameter unwahrscheinlich ist, hat dies keine Auswirkungen auf die nachfolgenden Auswertungen.

- Auch die Radreifendicke Rd wird durch die Eingangs- und Ausgangsmessungen bei Reprofilierungen nicht erfasst. Diese Dicke wird jedoch aus der Änderung des Messkreisdurchmessers einer gültigen, vorangegangenen Messung nachgebildet (Änderung der Radreifendicke entspricht der halben Änderung des Messkreisdurchmessers), sofern kein Achstausch vorhanden ist. Dadurch werden bei Reprofilierungen fehlende Sprünge der Radreifendicke wieder hergestellt bzw. die danach auftretenden mittleren Abnahmeraten der Dicke korrekt berechnet.
- Der Planlauffehler der Radinnenflächen PR und die Rundlauffehler der Laufkreisebene Rwm werden nicht bei der berührungslosen Profilmessung erfasst und sind daher in der Regel nur vereinzelt in der Datenbank vorhanden. Da von diesen beiden Parametern ein vernachlässigbarer Einfluss auf die Entstehung auffälliger Kurvengeräusche zu erwarten ist, werden diese beiden Parameter im Folgenden nicht weiter betrachtet.
- Obwohl der Profilhohllauf PH bei allen Messungen stets geprüft wird, werden beim Export aus der Radreifendatenbank nur Werte größer als Null ausgegeben. Da letzteres bei anderen Parametern gleichbedeutend mit einer fehlenden Messung ist, wurden bei allen Datensätzen fehlende Profilhohllaufwerte auf Null gesetzt.

Ergänzend wurden vom Auftraggeber ÖBB für die verschiedenen Radparameter auch die Grenzmaße für einen betriebssicheren Zustand (Betriebsgrenzmaß) und Grenzmaße, ab welchen entsprechende Maßnahmen einzuleiten sind (Inspektionsgrenzmaß) genannt. Die Kenntnis darüber erlaubt eine bessere Einschätzung über den Zustand eines Radprofils und kann damit bei der Interpretation von Ergebnissen dienlich sein.

5.2. Zuggarnituren und deren Orientierung

Zur Zuordnung der erfassten Emissionen zu den verkehrenden Schnellbahngarnituren der Baureihen A und B wurde seitens des Auftraggebers ÖBB Daten über Planzeiten der verschiedenen Garnituren aus der Fuhrparksoftware COSware zur Verfügung gestellt. Basierend auf den jeweiligen Ankunftszeiten der Garnituren in den beiden, den Messstellen jeweils nachfolgenden Stationen Gersthof (ca. 250 m nach MQ1) und Oberdöbling (ca. 1250 m nach MQ2) wurde zunächst ein automatisierter Abgleich mit den Messzeitpunkten durchgeführt. Bei diesem wurden nach einer empirisch ermittelten Offsetkorrektur für mittlere Fahrzeiten und Systemzeitungenauigkeiten den Emissionsmessungen jene Schnellbahngarnituren zugeordnet, deren Messzeitpunkte in einer zeitlichen Umgebung von etwa -2,5 bis +7,5 min zur jeweiligen Ankunftszeit lagen.

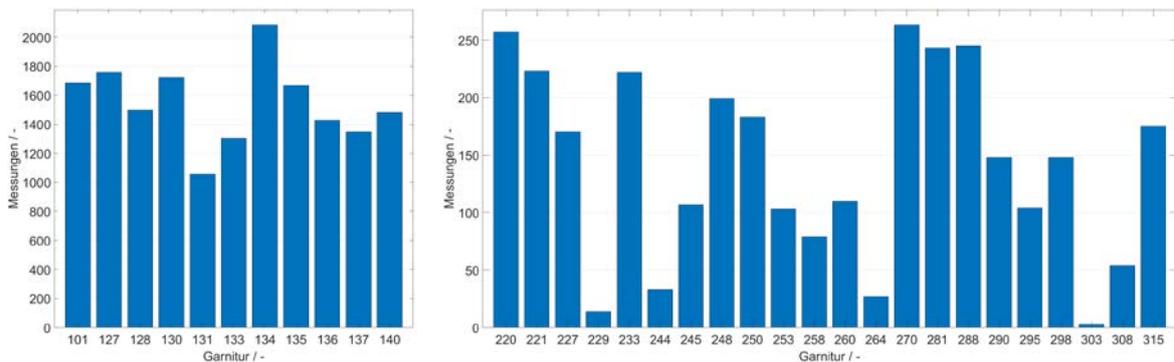


Abb. 5-3: Übersicht der Vorbeifahrten je Garnitur von Schnellbahnen der Baureihe A (links) und B (rechts)

Nach einer manuellen Korrektur von zeitlich nicht interpretierbaren Vorbeifahrten, welche beispielsweise bei Überstellungsfahrten, größere Verspätungen, etc. auftreten, konnten letztlich für 99,6 % der 20143 erfassten Schnellbahnen die Garniturnummern laut der COSware ermittelt werden. Abb. 5-3 gibt einen Überblick über die Anzahl an Vorbeifahrten je Garnitur für die Baureihe A, bei welcher 11 verschiedene Garnituren im Messzeitraum laut COSware im Einsatz waren (linke Grafik) und für die Baureihe B mit 22 verschiedenen Garnituren (rechte Grafik). Bei letzterer führten der seltenere Einsatz und die größere Anzahl an Garnituren zu einer vergleichsweise geringen (und stark schwankenden) Anzahl an zur Verfügung stehenden Messungen je Garnitur.

Die auf der S45 verkehrende Schnellbahngarnitur der Baureihe B besteht aus einem Triebwagen, einem Zwischenwagen und einem Steuerwagen. Anhand der unterschiedlichen Achsabstände in den Drehgestellen und zwischen den Drehgestellen des Triebwagens und des Steuer- bzw. des Zwischenwagen kann die Orientierung der die Messstellen passierenden Garnituren anhand der gemessenen Achsabstände zuverlässig ermittelt werden (vgl. Abb. 5-4, rechts).

Demgegenüber besteht bei den Schnellbahnen der Baureihe A ein symmetrischer Garnituraufbau, bei welchem das erste und das letzte Drehgestell angetrieben sind und die mittleren drei Drehgestelle als nicht angetriebene Jakobsdrehgestelle ausgeführt sind. Zwar kann vermutet werden, dass durch den symmetrischen Garnituraufbau die Kenntnis der Orientierung an Bedeutung verliert. Trotz dessen wurden verschiedene Möglichkeiten geprüft, die Orientierung zu bestimmen, um bei Detailauswertungen darauf zurückgreifen zu können. Letztendlich zeigte sich die Auswertung von Führerstandsdaten, die bei jedem Fahrzeug aufgezeichnet werden und unter anderem Aufschluss über den jeweils aktiven Führerstand geben, als zuverlässigster Ansatz. Allerdings konnten diese Daten nur über einen Zeitraum von rund drei Wochen für jede der 11 Schnellbahngarnituren erhoben

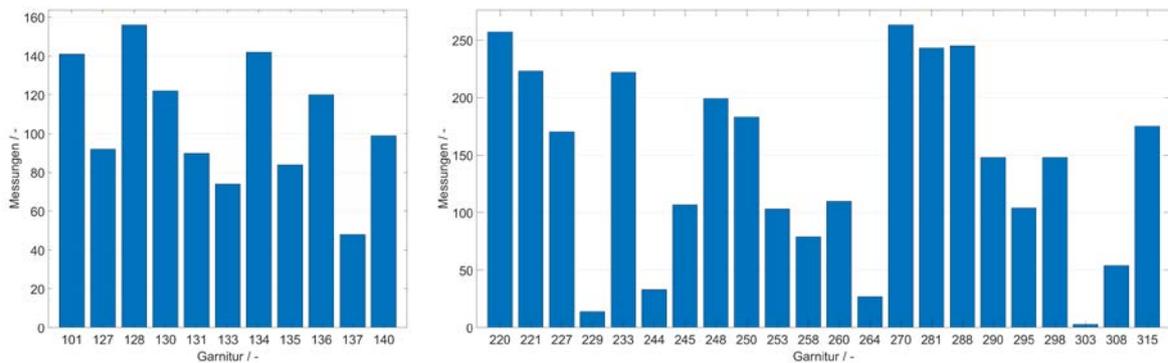


Abb. 5-4: Übersicht der Vorbeifahrten je Schnellbahngarnitur der Baureihe A (links), bei welchen die Orientierung der Garnituren nur innerhalb eines 3-wöchigen Ausschnitts der gesamten Messzeit bestimmt werden konnte und im Vergleich dazu die Schnellbahnbaureihe B (rechts), bei welcher die Orientierung bei allen Vorbeifahrten ermittelbar war

werden, sodass die Orientierung nur für einen kurzen Bereich des gesamten Messzeitraumes für die weiteren Auswertungen zur Verfügung steht. Der Zeitraum konnte auch nicht mit Hilfe einer Analyse aller in COSware hinterlegten Fahrten der Schnellbahngarnituren zur Identifikation etwaiger Dreiecksfahrten erweitert werden, da des Öfteren Lücken in den Aufzeichnungen vorhanden und Dreiecksfahrten damit nicht auszuschließen sind. Letztendlich ist daher nur eine geringe Anzahl an Vorbeifahrtsmessungen mit bekannter Garniturorientierung vorhanden (vgl. Abb. 5-3 und Abb. 5-4, jeweils linke Grafik).

6. ANALYSE VON EINFLUSSGRÖSSEN

Im folgenden Kapitel werden mögliche Einflussgrößen für das Auftreten von tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten näher betrachtet. Neben der Unterteilung in Zugkategorien und Geschwindigkeitsbereiche, wird vor allem auch der Einfluss von unterschiedlichen Witterungsbedingungen, sowohl auf das Entstehen der Geräusche im Bogen als auch auf das Verhalten bzw. den Minderungseffekt einer Schienenkopfkonditionieranlage, untersucht. Darüber hinaus werden auch die Auswirkungen von Radprofileigenschaften auf das Auftreten akustischer Auffälligkeiten analysiert.

Auf Grund der Einteilung der Messdaten in unterschiedlichste Bedingungen werden in weiterer Folge die beiden am häufigsten verkehrenden Zugkategorien PZ Typ A und B näher untersucht. Die restlichen Kategorien können auf Grund der geringen Anzahl an gemessenen Vorbeifahrten in diesem Kapitel nicht näher betrachtet werden.

6.1. Jahreswitterungsverlauf

Im folgenden Kapitel wird zunächst die Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit unterschiedlicher Witterungsbedingungen für die Zugkategorien PZ Typ A und B, jeweils für die Geschwindigkeiten 35-45 km/h, 45-55 km/h und 55-65 km/h am Messquerschnitt MQ2 dargestellt. Dabei wird zwischen tonalen (800 Hz-6,3 kHz) und breitbandigen (70 dB) Auffälligkeiten unterschieden. Die Häufigkeit der Auffälligkeiten wird einerseits in einem Diagramm, abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schientemperaturen und keinem Regen und andererseits in zwei weiteren Diagrammen in Abhängigkeit der Schienen- bzw. Lufttemperatur aufgezeigt. Dabei werden für eine übersichtliche Darstellung Klassifikationen der verschiedenen Parameter vorgenommen, wobei die angegebenen Klassenwerte stets die obere Grenze der Klasse beziffern. Beispielweise definiert eine Klasse von 90 % Luftfeuchtigkeit den Wertebereich von $> 80 \%$ bis $\leq 90 \%$.

Darauffolgend wird der abgeschätzte A-bewertete längenbezogene Schalleistungspegel LW'_{\sim} (für die Berechnung siehe Kapitel 7) für die Zugkategorien PZ Typ A und B, jeweils für die Geschwindigkeiten 35-45 km/h, 45-55 km/h und 55-65 km/h am Messquerschnitt MQ2 dargestellt. Dabei wird zwischen allen Fahrten, unauffälligen und auffälligen Fahrten unterschieden. Der Schalleistungspegel wird einerseits abhängig von der Luftfeuchtigkeit und andererseits in Abhängigkeit von der Schienen- bzw. Lufttemperatur aufgezeigt.

Um einen Überblick über die Verteilung der Vorbeifahrten bei bestimmten Witterungsbedingungen zu erhalten, wurden die Daten in Tabellen angeordnet welche die

| | | Alle | Luftfeuchte [%] | | | | | | | Taupunkt | | | |
|--------------|--------------|------|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------------|----------------|-------|
| | | | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | > Schiene [°C] | < Schiene [°C] | |
| Regen | Luft [°C] | 0 | 0,0% | | | | 0,0% | 0,0% | 0,0% | | 0,0% | 0,0% | |
| | | 10 | 1,9% | 0,0% | 0,0% | 7,7% | 3,0% | 3,9% | 0,7% | 0,0% | 1,7% | 2,2% | |
| | | 20 | 3,6% | | | 0,0% | 7,1% | 0,0% | 9,5% | 2,5% | 0,0% | 2,2% | 4,3% |
| | | 30 | 10,0% | | | | 0,0% | 0,0% | 33,3% | | | | 10,0% |
| | | 40 | | | | | | | | | | | |
| | Schiene [°C] | -10 | | | | | | | | | | | |
| | | 0 | 3,2% | | | 50,0% | 0,0% | 11,1% | 1,9% | 0,0% | 2,8% | 4,8% | |
| | | 10 | 2,3% | | 0,0% | 8,3% | 4,8% | 5,3% | 0,0% | 0,0% | 0,8% | 4,4% | |
| | | 20 | 2,2% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 14,3% | 1,9% | 0,0% | 5,3% | 1,4% | |
| | | 30 | 7,1% | | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 50,0% | | | 7,1% | |
| kein Regen | Luft [°C] | 0 | 6,7% | | 41,7% | 52,6% | 21,4% | 16,0% | 0,0% | 0,0% | 1,4% | 36,7% | |
| | | 10 | 8,6% | 0,0% | 10,5% | 8,9% | 11,2% | 11,3% | 5,5% | 1,5% | 5,6% | 10,5% | |
| | | 20 | 8,1% | 0,0% | 11,3% | 2,8% | 7,7% | 13,2% | 8,3% | 8,3% | 0,0% | 4,4% | 8,5% |
| | | 30 | 2,2% | 0,0% | 1,1% | 1,0% | 4,0% | 3,4% | 0,0% | 0,0% | | | 2,2% |
| | | 40 | 0,0% | | | 0,0% | | | | | | | 0,0% |
| | Schiene [°C] | -10 | 15,8% | | | 0,0% | 50,0% | 25,0% | | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 42,9% |
| | | 0 | 7,9% | | 35,0% | 16,4% | 13,5% | 13,2% | 3,1% | 0,0% | 35,0% | 4,3% | 15,7% |
| | | 10 | 9,2% | 57,1% | 8,0% | 11,0% | 11,5% | 9,7% | 5,8% | 2,0% | | 4,8% | 11,6% |
| | | 20 | 7,9% | 0,0% | 0,0% | 2,6% | 7,1% | 12,3% | 10,6% | 8,2% | 0,0% | 3,3% | 8,3% |
| | | 30 | 3,7% | 0,0% | 3,1% | 2,7% | 4,8% | 5,6% | 0,0% | 0,0% | | | 3,7% |
| Schiene [°C] | 40 | 0,8% | 0,0% | 0,0% | 0,9% | 1,3% | 0,0% | | | | | 0,8% | |
| | 50 | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | | | | | | 0,0% | |

Tab. 6-1: tonale Auffälligkeiten 800-6300 Hz der Kategorie PZ TYP A, 45-55 km/h, MQ2

einzelnen Kombinationen der Witterungsparameter Regen, Luftfeuchte, Schienen- und Lufttemperatur, sowie Taupunkt darstellen und die einzelnen Felder entsprechend der Anzahl der vorhandenen Messdaten farblich markiert. In Tab. 6-1 sind beispielhaft die Ergebnisse der Häufigkeiten von tonalen Auffälligkeiten der Kategorie PZ TYP A bei 50 km/h dargestellt. Jene Bereiche welche rot markiert sind, verfügen nur über < 10 Vorbeifahrten und wurden in den Auswertungen nicht berücksichtigt. Die weiteren Farben zeigen, dass jeweils eine Anzahl von 10-19 Vorbeifahrten (orange), 20-49 Vorbeifahrten (hellgrün) und > 50 Vorbeifahrten (grün) für die Berechnung der Häufigkeit herangezogen wurden. Die Auswertungen jener Bereiche mit einer ausreichenden Anzahl an Vorbeifahrten (≥ 10) sind in den folgenden Kapitel dargestellt. Die Tabellen der anderen Kategorien und Geschwindigkeiten, sowie der exakten Anzahl an Messfahrten sind in Anhang A dargestellt.

6.1.1. Anteil an auffälligen Fahrten – Kat. PZ TYP A

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

In Abb. 6-1 ist die prozentuelle Auftretshäufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit für Schienentemperaturen von 0 °C bis 40 °C aufgetragen. Daraus ist Ausnahme bildet die Häufigkeit der breitbandigen Auffälligkeiten bei einer

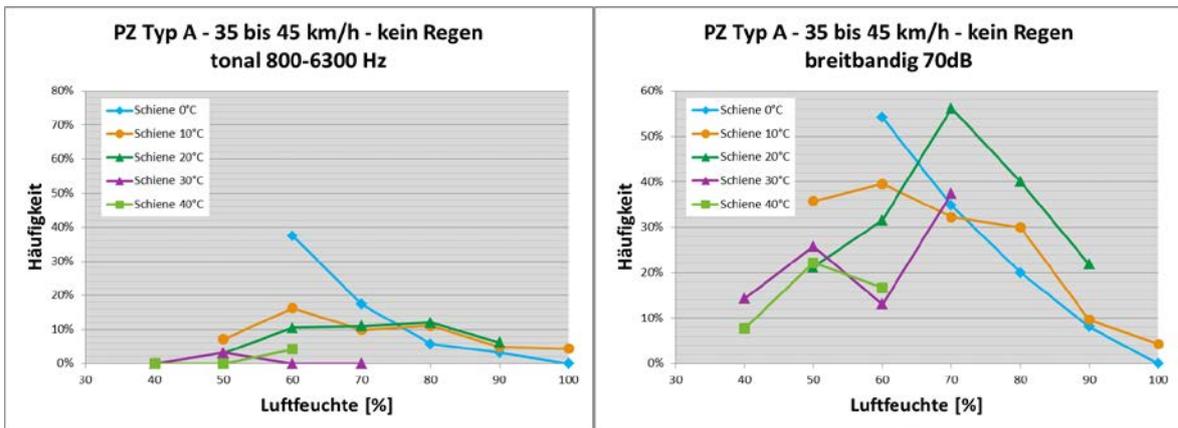


Abb. 6-1: Häufigkeit von Auffälligkeiten abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

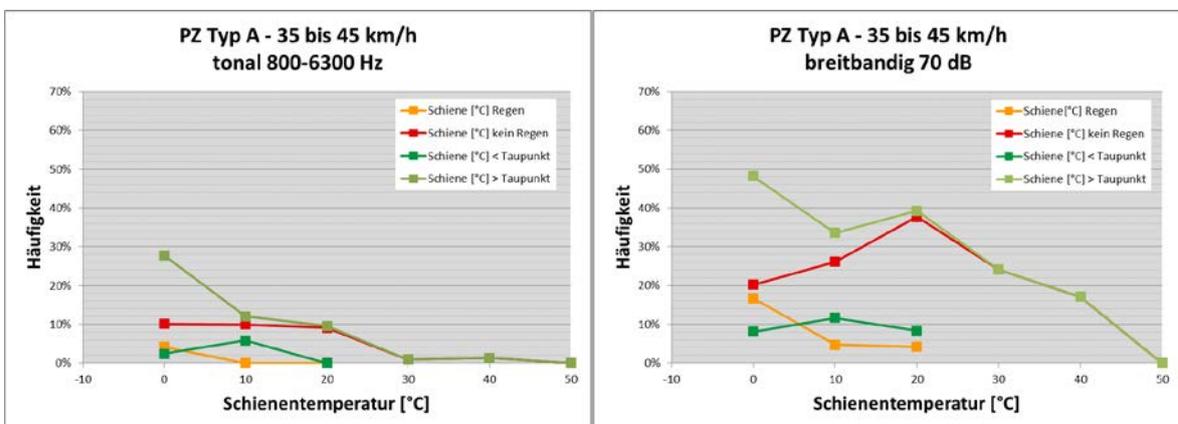


Abb. 6-2: Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

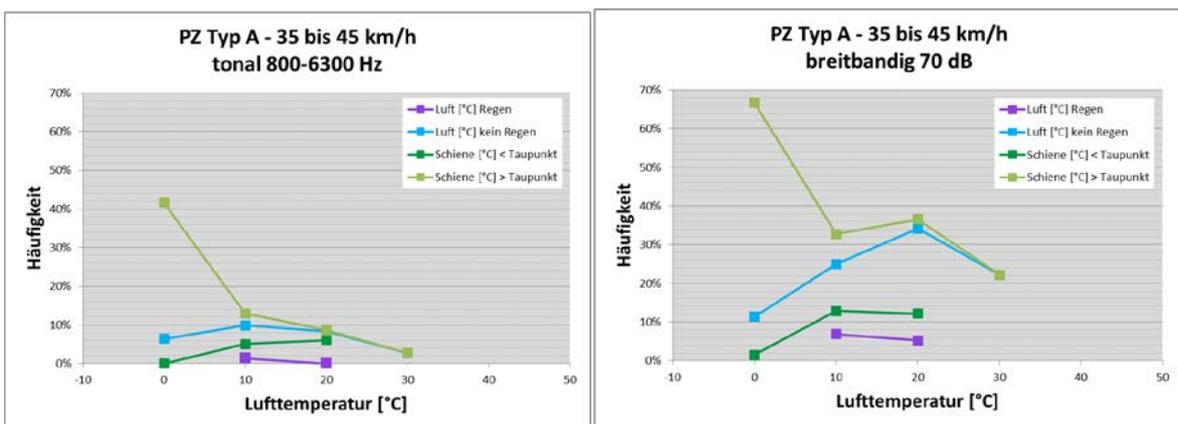


Abb. 6-3: Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Lufttemperatur für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

Schienentemperatur von 30 °C – diese steigt bis zur 50 % Luftfeuchte an, nimmt dann bis zur 60 % Luftfeuchte wieder ab und steigt danach mit steigender Luftfeuchtigkeit an.

In Abb. 6-2 und Abb. 6-3 sind die Auffälligkeiten abhängig von der Schienen- bzw. Lufttemperatur dargestellt. Die Häufigkeit nimmt für Schienentemperaturen über dem

Taupunkt mit steigender Temperatur ab. Die Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten ist bei Schienentemperaturen unter dem Taupunkt geringer als bei Temperaturen darüber. Betrachtet man die Häufigkeit der tonalen Auffälligkeit ohne Regen, nimmt diese ab etwa 20 °C mit steigender Temperatur ab. Die Häufigkeit der breitbandigen Auffälligkeit ohne Regen nimmt bis etwa 20 °C mit steigender Temperatur zu und ab 20 °C mit steigender Temperatur ab. Bei Regen ist die prozentuelle Häufigkeit von Auffälligkeiten geringer.

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

In Abb. 6-4 ist die prozentuelle Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit für Schienentemperaturen von 0 °C bis 40 °C aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, dass die Häufigkeit tonaler als auch breitbandiger Auffälligkeiten bis hin zur 70 % Luftfeuchte ansteigt und dann ab etwa 80 % Luftfeuchte wieder abnimmt. Die Häufigkeit der tonalen (800 Hz-6,3 kHz) sowie breitbandigen Auffälligkeiten für die Schienentemperaturen von 0 °C und 10 °C haben eine starke Häufigkeitsabnahme im Luftfeuchtigkeitsbereich von 40-50 % bzw. 50-60 %.

In Abb. 6-5 und Abb. 6-6 sind die Auffälligkeiten abhängig von der Schienen- bzw. Lufttemperatur dargestellt. Die Häufigkeit nimmt für Schienentemperaturen über dem Taupunkt mit steigender Temperatur ab. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Schienentemperatur erreicht die Häufigkeit bei -10 °C das Maximum. Die Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten ist bei Schienentemperaturen unter dem Taupunkt eindeutig geringer als bei Schienentemperaturen darüber. Betrachtet man die Häufigkeit der Auffälligkeit ohne Regen, nimmt diese mit steigender Schienentemperatur ab. Die Auftrittshäufigkeit der Auffälligkeit bei Regen nimmt ab 20 °C mit steigender Lufttemperatur zu. Bei Regen ist die prozentuelle Häufigkeit von Auffälligkeiten geringer.

Geschwindigkeitsbereich 55 bis 65 km/h

In Abb. 6-7 ist die prozentuelle Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit für Schienentemperaturen von -10 °C bis 50 °C aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, dass die Häufigkeit tonaler als auch breitbandiger Auffälligkeiten bis hin zur 70 % Luftfeuchte ansteigt und danach mit steigender Luftfeuchtigkeit abnimmt. Die Auffälligkeit für Schienentemperaturen von -10 °C und 0 °C nimmt mit steigender Feuchtigkeit ab. Für die Schienentemperatur 10 °C nimmt die Häufigkeit zuerst im Bereich 40-50 % Luftfeuchte ab, steigt dann bis 70 % Luftfeuchte an und ab 70 % mit steigender Luftfeuchtigkeit ab.

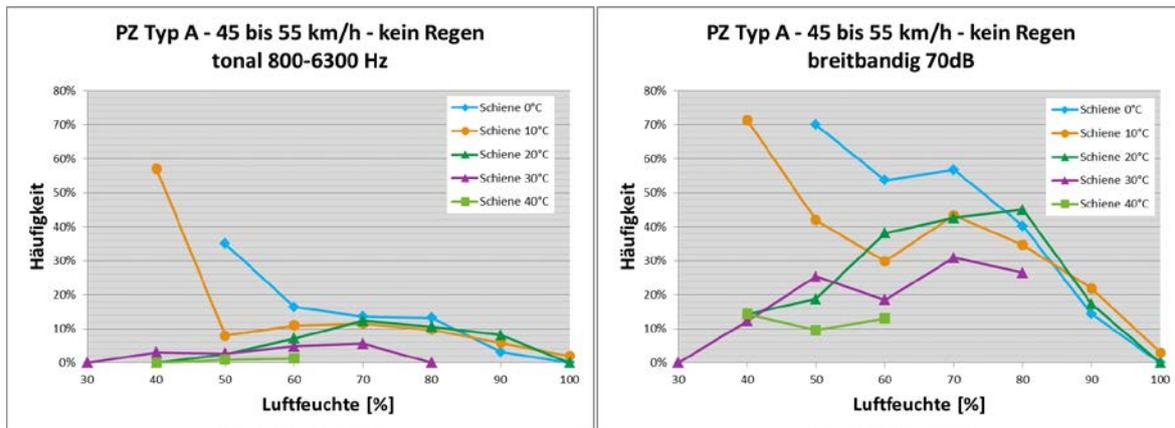


Abb. 6-4: Häufigkeit von Auffälligkeiten abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

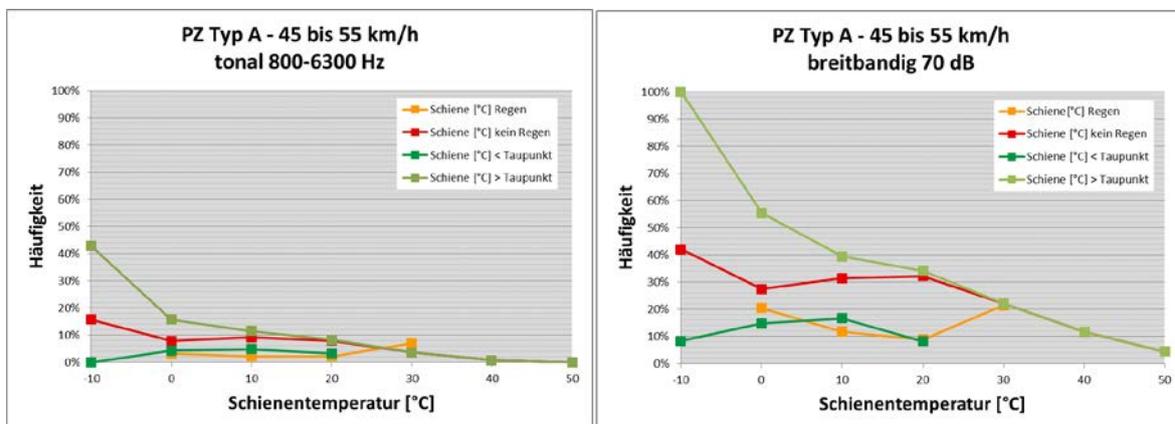


Abb. 6-5: Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

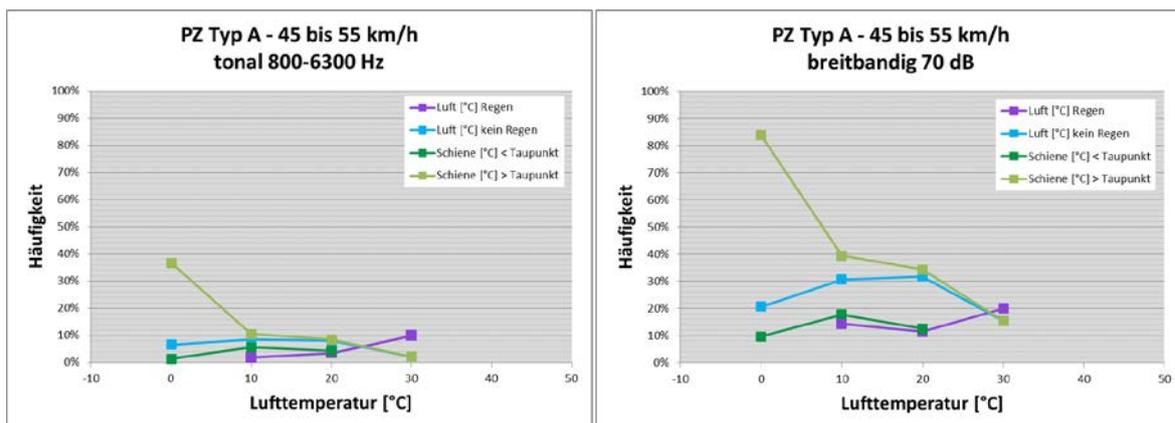


Abb. 6-6: Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Lufttemperatur für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

In Abb. 6-8 und Abb. 6-9 sind die Auffälligkeiten abhängig von der Schienen- bzw. Lufttemperatur dargestellt. Die Häufigkeit nimmt für Schienentemperaturen über dem Taupunkt mit steigender Temperatur ab. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten erreicht die Häufigkeit bei -10 °C fast 100%. Die Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten ist bei

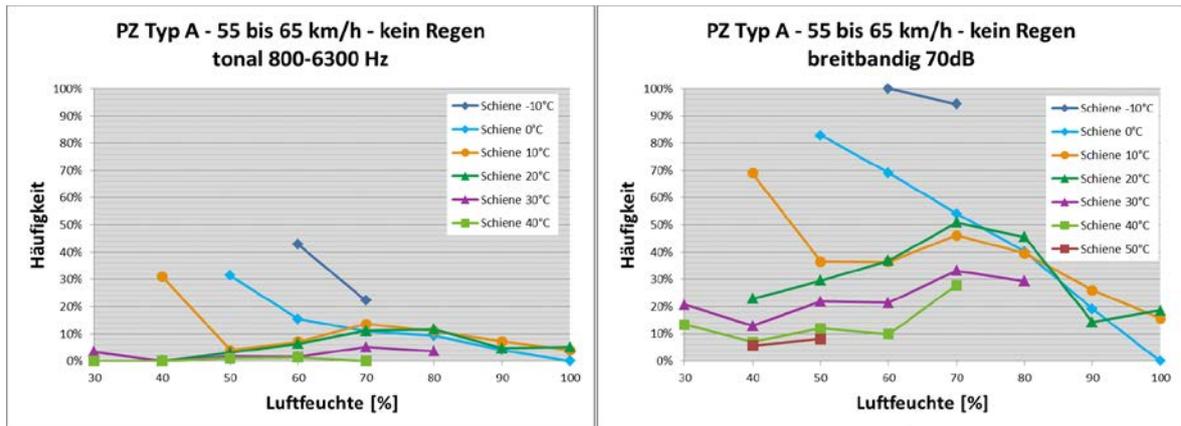


Abb. 6-7: Häufigkeit von Auffälligkeiten abhängig von der Luftfeuchtigkeit für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

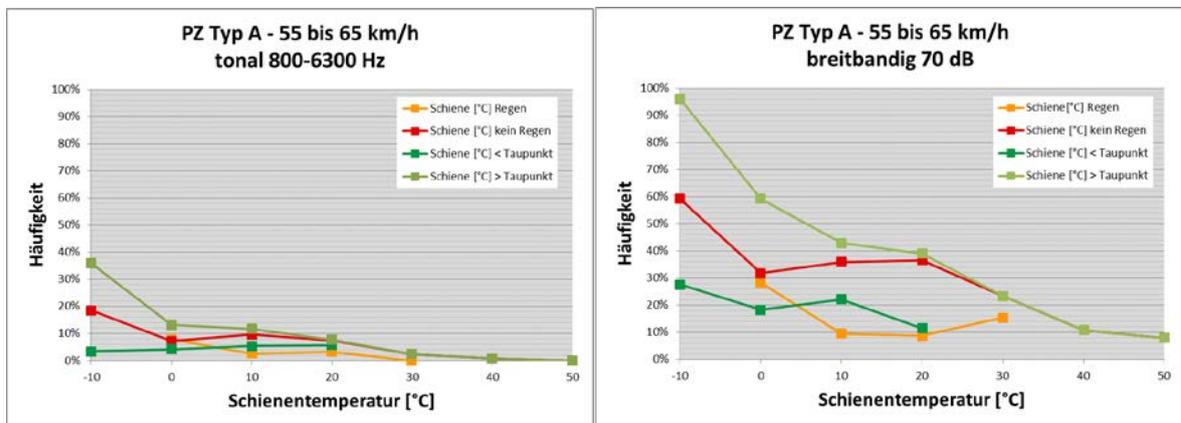


Abb. 6-8: Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Schientemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

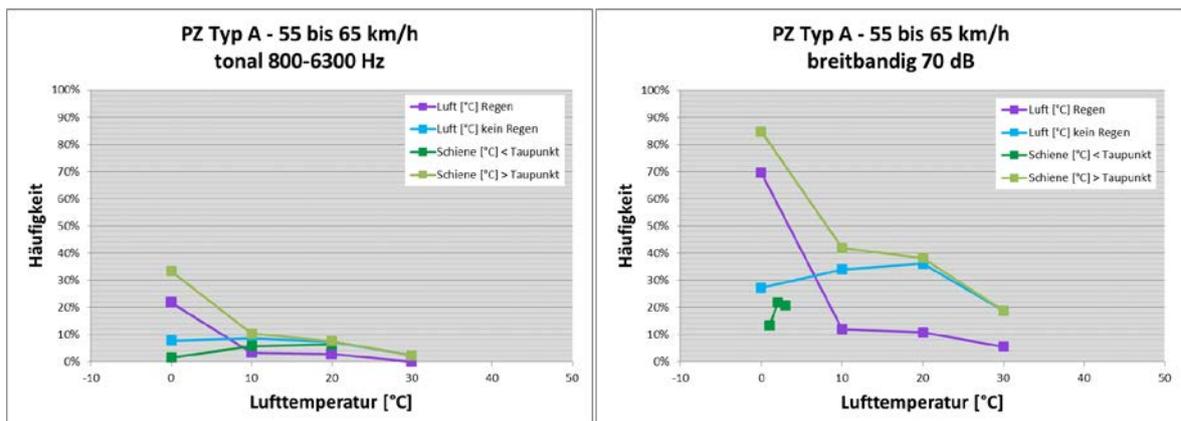


Abb. 6-9: Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Lufttemperatur für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

Schientemperaturen unter dem Taupunkt eindeutig geringer als bei Schientemperaturen darüber. Betrachtet man die Häufigkeit der Auffälligkeit ohne Regen, nimmt diese ab 20 °C mit steigender Temperatur ab. Die Häufigkeit der Auffälligkeit in Abhängigkeit der Lufttemperatur bei Regen nimmt mit steigender

Lufttemperatur ab, vor allem sehr stark im Bereich von 0 °C bis 10 °C. Bei Regen ist die prozentuelle Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Schienentemperatur geringer, in Abhängigkeit der Lufttemperatur ist dies bis 10 °C umgekehrt der Fall.

Unabhängig von der Geschwindigkeit der Züge ist erkennbar, dass die Häufigkeit der Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Schienentemperatur bei Regen geringer als bei Wetterverhältnissen ohne Regen ist. Die Häufigkeit für Schienentemperaturen unter dem Taupunkt nimmt mit steigender Temperatur ab. In Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit steigt die Häufigkeit der Auffälligkeiten bis etwa 60/70 % Luftfeuchte an und nimmt ab etwa 70/80 % Luftfeuchte mit steigender Luftfeuchtigkeit ab.

6.1.2. Anteil an auffälligen Fahrten – Kat. PZ TYP B

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

Die Anzahl der Daten der vorbeifahrenden Züge der Kategorie PZ TYP B für die Geschwindigkeit von 35-45 km/h ist so gering, dass keine Darstellung der Häufigkeit der

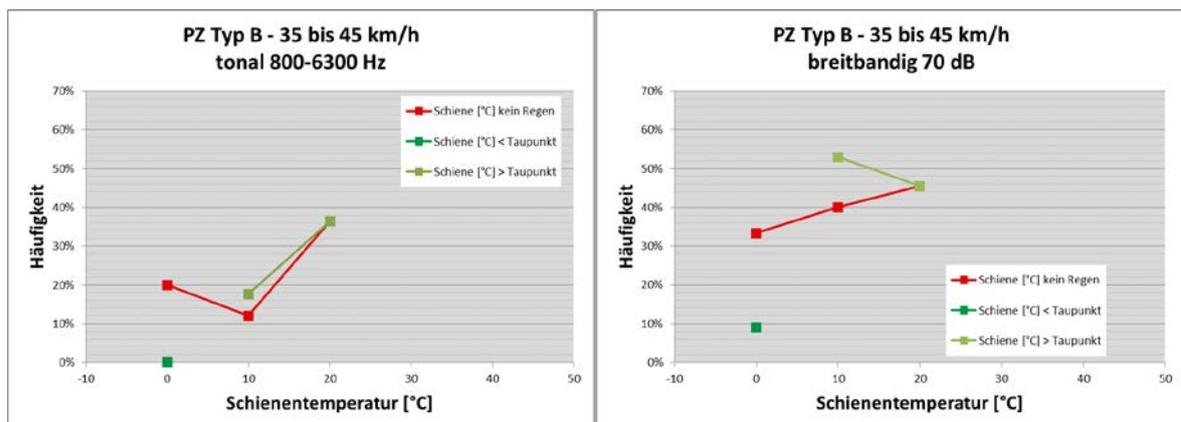


Abb. 6-10: Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

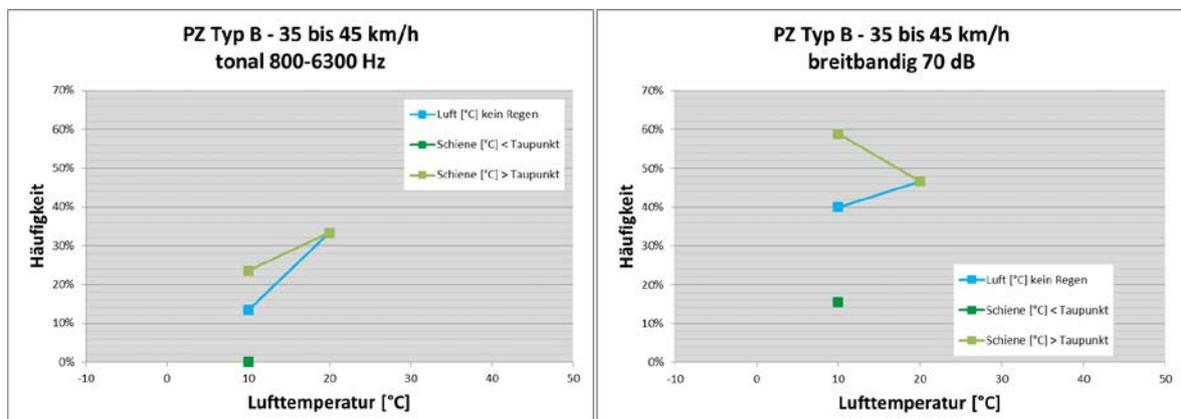


Abb. 6-11: Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Lufttemperatur für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit erfolgt (siehe Anhang A). Die somit verwendbaren Daten sind in Abb. 6-10 und Abb. 6-11 dargestellt und zeigen die prozentuelle Häufigkeit der Auffälligkeiten, abhängig von der Schienen- bzw. Lufttemperatur.

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

In Abb. 6-12 ist die prozentuelle Auftretshäufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit für Schienentemperaturen von 0 °C bis 40 °C aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, dass die Häufigkeit tonaler als auch breitbandiger Auffälligkeiten bis hin zur 60 % Luftfeuchte ansteigt und dann ab etwa 90 % Luftfeuchte wieder abnimmt. Ausnahme bildet die Häufigkeit tonaler Auffälligkeiten bei Schienentemperatur 20 °C – diese steigt bis zur 60 % Luftfeuchte an, nimmt dann bis zur 70 % Luftfeuchte wieder ab und steigt danach mit steigender Luftfeuchtigkeit an.

In Abb. 6-13 und Abb. 6-14 sind die Auffälligkeiten abhängig von der Schienen- bzw. Lufttemperatur dargestellt. Die Häufigkeit nimmt für Schienentemperaturen unter dem Taupunkt mit steigender Temperatur zu und vice versa mit steigender Temperatur ab. Bei Regen ist die Auftretshäufigkeit von Auffälligkeiten niedriger. Betrachtet man die Häufigkeit der Auffälligkeit für Schienentemperatur ohne Regen, nimmt diese mit steigender Temperatur ab, für Lufttemperatur ohne Regen hingegen, nimmt diese bis etwa 20 °C mit steigender Temperatur zu.

Geschwindigkeitsbereich 55 bis 65 km/h

In Abb. 6-15 ist die prozentuelle Auftretshäufigkeit von Auffälligkeiten über der Luftfeuchtigkeit für Schienentemperaturen von 0 °C bis 50 °C aufgetragen. Die Häufigkeit der Auffälligkeiten steigt bis zu einer Luftfeuchte von etwa 50 % an und nimmt dann ab 80 % Luftfeuchte mit steigender Luftfeuchtigkeit ab.

In Abb. 6-16 und Abb. 6-17 sind die Auffälligkeiten abhängig von der Schienen- bzw. Lufttemperatur dargestellt. Die Häufigkeit nimmt für Schienentemperaturen unter dem Taupunkt mit steigender Temperatur zu und vice versa mit steigender Temperatur ab. Bei Regen ist die Auftretshäufigkeit von Auffälligkeiten niedriger. Die Häufigkeit der Auffälligkeit ohne Regen nimmt bis etwa 20 °C zu oder ist tendenziell gleichbleibend und nimmt ab etwa 20 °C mit steigender Temperatur ab.

Unabhängig von der Geschwindigkeit der Züge ist erkennbar, dass die Häufigkeit der Auffälligkeiten bei Regen geringer als bei Wetterverhältnissen ohne Regen ist und dass die Häufigkeit der Auffälligkeiten ab etwa 20 °C mit steigender Temperatur sowie ab etwa 70 % Luftfeuchtigkeit mit steigender Luftfeuchtigkeit abnimmt.

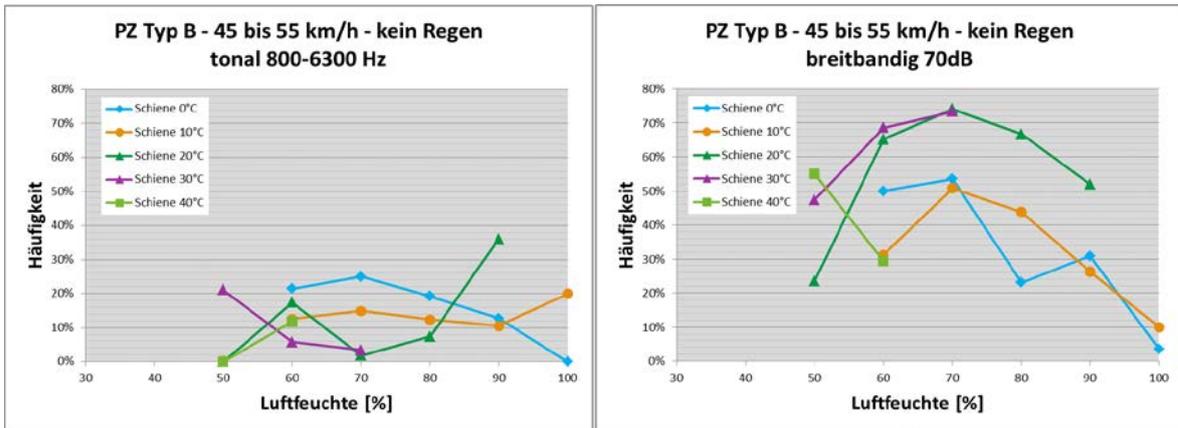


Abb. 6-12: Häufigkeit von Auffälligkeiten abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

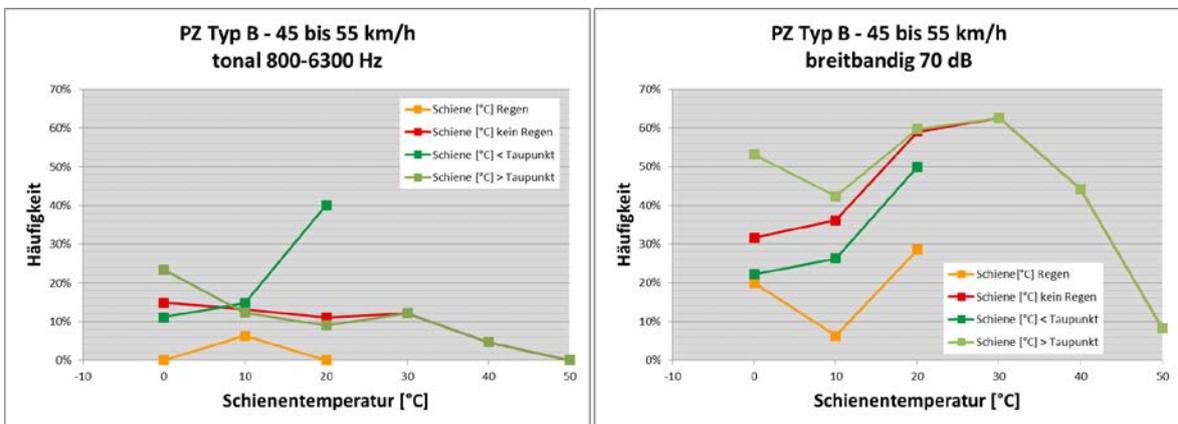


Abb. 6-13: Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

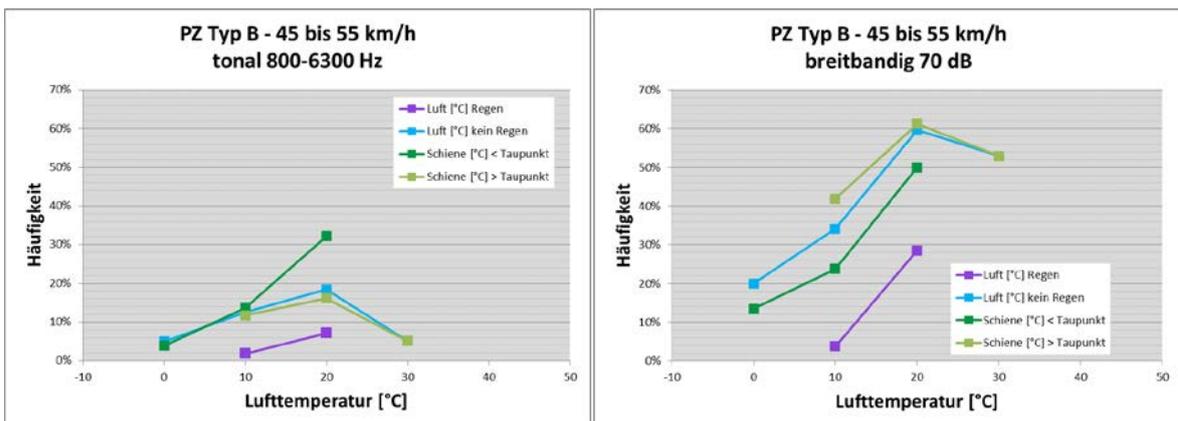


Abb. 6-14: Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Lufttemperatur für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

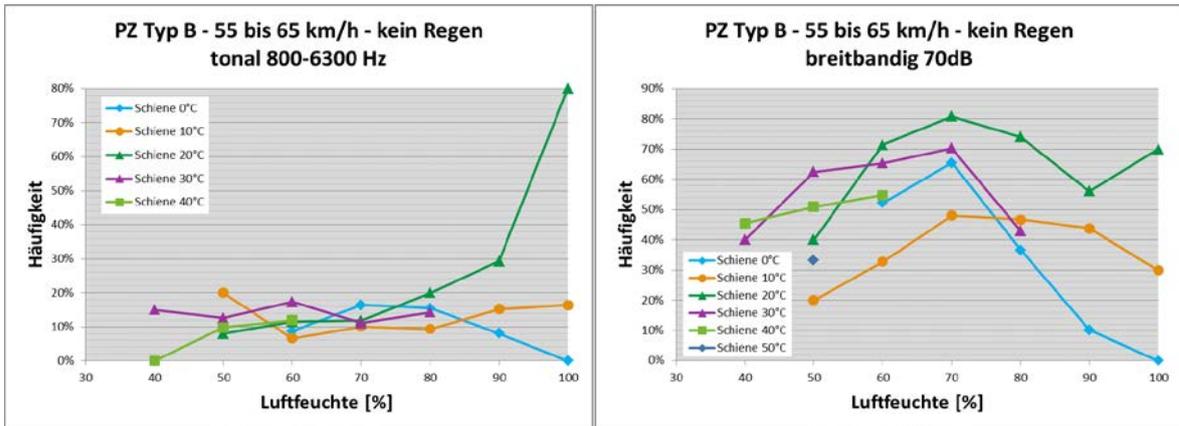


Abb. 6-15: Häufigkeit von Auffälligkeiten abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

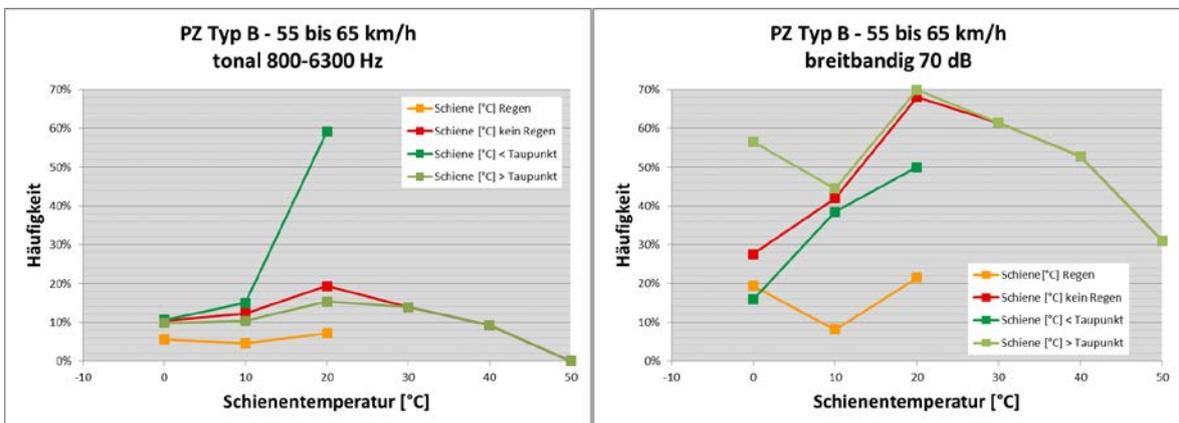


Abb. 6-16: Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

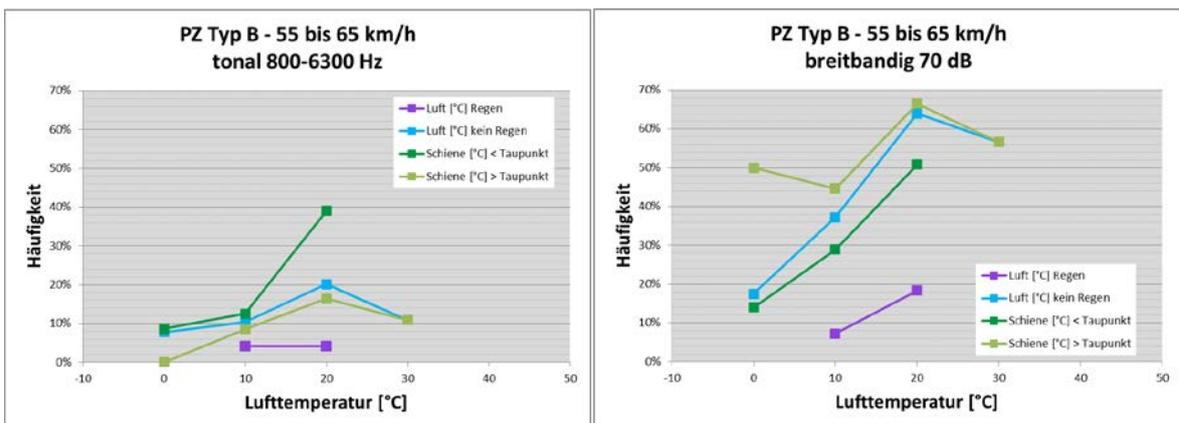


Abb. 6-17: Häufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Lufttemperatur für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

6.1.3. Abschätzung des A-bewerteten längenbezogenen Schalleistungspegels – Kat. PZ TYP A

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

Abb. 6-18 zeigt den Schalleistungspegelverlauf für Schienentemperaturen zwischen 0 °C und 40 °C abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Die Pegeldifferenz bei der Betrachtung aller Fahrten reicht bis 10 dB zwischen den Schienentemperaturen 0 °C und 30 °C bei einer Luftfeuchte von 60 %. Bei den unauffälligen Fahrten steigt der Schalleistungspegel mit steigender Luftfeuchtigkeit. Bei den auffälligen Fahrten liegt die Pegeldifferenz bei 2 dB bei einer Luftfeuchtigkeit von 70 % zwischen den Schienentemperaturen 10 °C und 20 °C. In Abb. 6-19 ist erkennbar, dass der Schalleistungspegel mit steigender Schienentemperatur abnimmt. Ausnahme bildet der Pegelverlauf bei unauffälligen

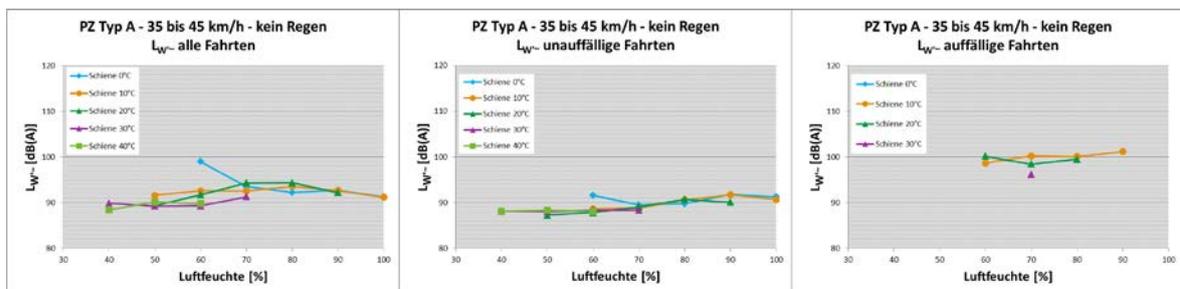


Abb. 6-18: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W\sim}$ abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

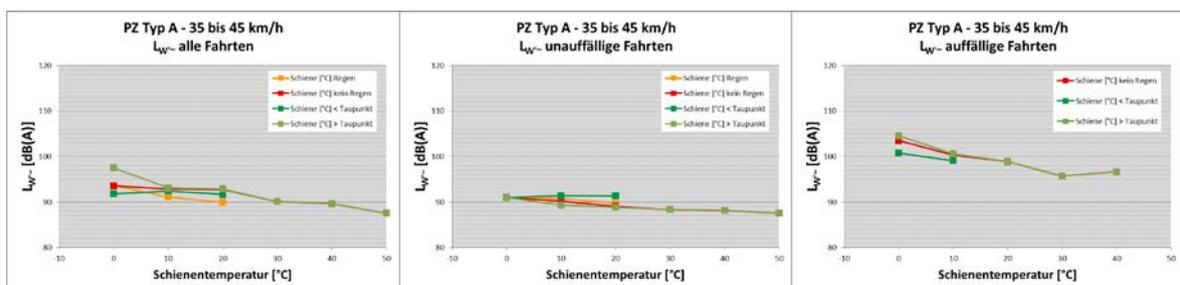


Abb. 6-19: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W\sim}$ in Abhängigkeit der Schienentemperatur für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

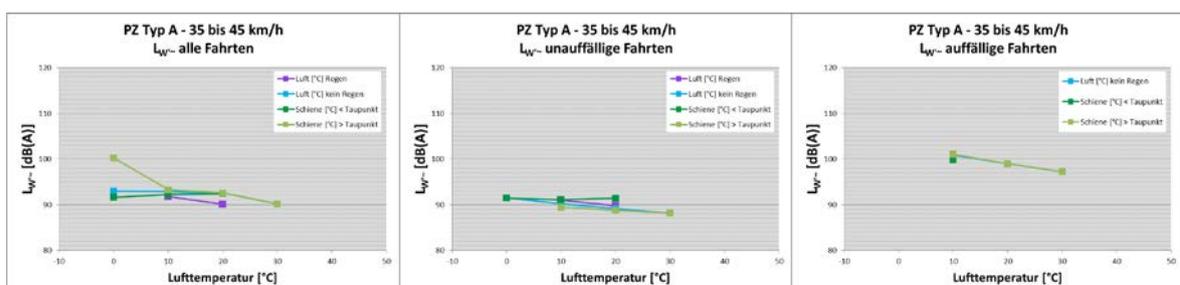


Abb. 6-20: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W\sim}$ in Abhängigkeit der Lufttemperatur für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

Fahrten für Schientemperaturen unter dem Taupunkt liegend – dieser steigt mit steigender Temperatur an. Bei der Betrachtung aller Fahrten kommt es zu einem Pegelunterschied von 6 dB bei 0 °C zwischen Schientemperaturen über und unter dem Taupunkt sowie zu einer Pegeldifferenz von 3 dB bei 20 °C bei der Betrachtung mit und ohne Regen. Bei den auffälligen Fahrten wird aufgrund zu geringer Daten der Schallpegelverlauf bei Regen sowohl für Schienen- als auch Lufttemperatur nicht dargestellt (siehe Tabelle Anhang A). Der Pegelunterschied bei 0 °C liegt hier bei etwa 4 dB zwischen Temperaturen über und unter dem Taupunkt.

Abb. 6-20 zeigt vergleichsweise einen ähnlichen Verlauf des Schallpegels für unterschiedliche Lufttemperaturen. Auch hier nimmt der Schalleistungspegel mit steigender Temperatur ab. Bei der Betrachtung aller Fahrten kommt es zu einem Pegelunterschied von 8 dB bei 0 °C zwischen Schientemperaturen über und unter dem Taupunkt sowie zu einer Pegeldifferenz von etwa 2 dB bei 20 °C bei der Betrachtung mit und ohne Regen. Bei den unauffälligen Fahrten beträgt die maximale Pegeldifferenz bei 20 °C in etwa 3 dB. Bei den auffälligen Fahrten stimmt der Pegelverlauf ohne Regen mit dem bei Schientemperaturen über dem Taupunkt überein.

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

Abb. 6-21 zeigt den Schalleistungspegel für Schientemperaturen zwischen -10 °C und 50 °C abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Die Pegeldifferenz bei der Betrachtung aller Fahrten reicht bei 40 % Luftfeuchte bis 12 dB. Bei den unauffälligen Fahrten kommt es nur zu geringen Pegelunterschieden. Bei den auffälligen Fahrten kommt es bei 50 % Luftfeuchte zu einer Differenz von etwa 10 dB zwischen der Schientemperatur 0 °C und 40 °C. Je niedriger die Schientemperatur ist, desto höher ist der Schalleistungspegel im Mittel der Luftfeuchtigkeit.

In Abb. 6-22 ist erkennbar, dass der Schalleistungspegel mit steigender Schientemperatur abnimmt. Die maximale Pegeldifferenz liegt bei -10 °C bei etwa 9 dB zwischen Schientemperaturen unter und über dem Taupunkt.

In Abb. 6-23 sind die Pegelverläufe für unterschiedliche Lufttemperaturen dargestellt. Die maximale Pegeldifferenz bei allen Fahrten liegt bei etwa 8 dB zwischen Schientemperaturen unter und über dem Taupunkt bei 0 °C. Bei den unauffälligen und auffälligen Fahrten kommt es nur zu geringen Pegelunterschieden bis etwa 2 dB. Der Schalleistungspegel nimmt mit steigender Temperatur ab – Ausnahme bildet der Pegelverlauf bei allen Fahrten bei Regen – dieser nimmt ab 20 °C mit steigender Temperatur zu.

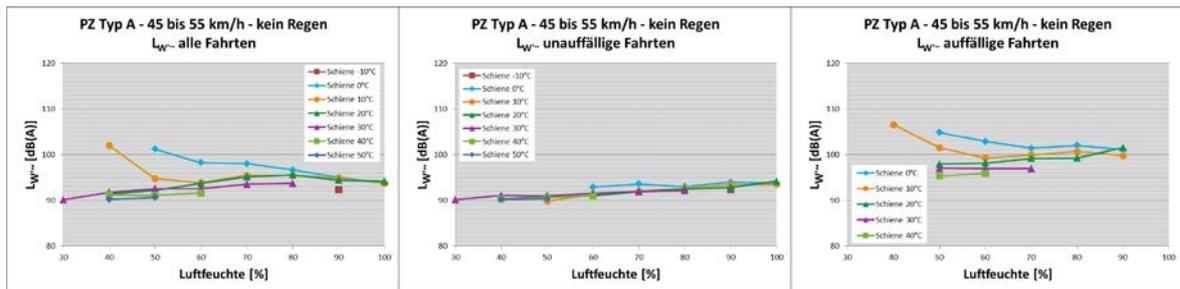


Abb. 6-21: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W'}$ abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

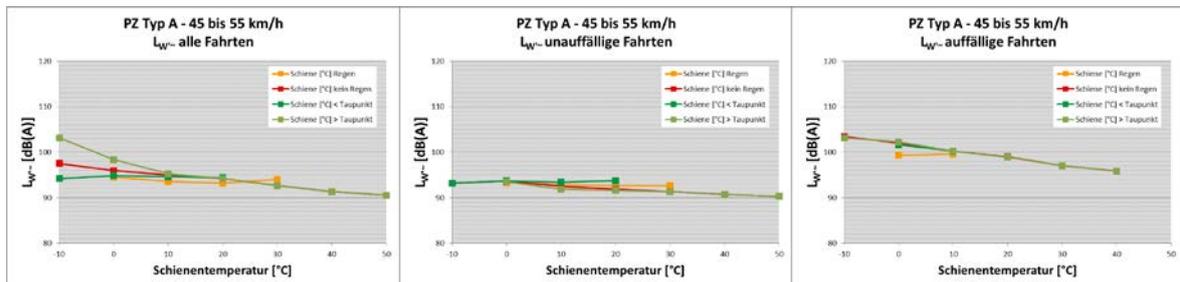


Abb. 6-22: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W'}$ in Abhängigkeit der Schienentemperatur für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45 55 km/h

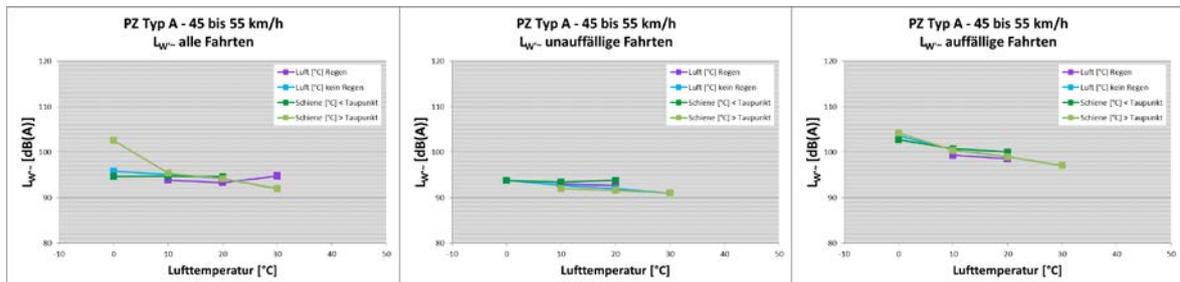


Abb. 6-23: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W'}$ in Abhängigkeit der Lufttemperatur für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

Geschwindigkeitsbereich 55 bis 65 km/h

Abb. 6-24 zeigt den Schalleistungspegel für Schienentemperaturen zwischen -10 °C und 50 °C, abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Die Pegeldifferenz bei der Betrachtung aller Fahrten reicht bis 11 dB. Bei den unauffälligen Fahrten kommt es nur zu geringen Pegelunterschieden. Bei den auffälligen Fahrten kommt es zu Differenzen des Schalleistungspegels von etwa 9 dB. Je niedriger die Schienentemperatur ist, desto höher ist der Schalleistungspegel im Mittel der Luftfeuchtigkeit.

In Abb. 6-25 ist erkennbar, dass der Schalleistungspegel mit steigender Schienentemperatur abnimmt. Die maximale Pegeldifferenz zwischen Schienentemperaturen bei -10 °C unter und über dem Taupunkt liegt bei allen Fahrten bei etwa 6 dB.

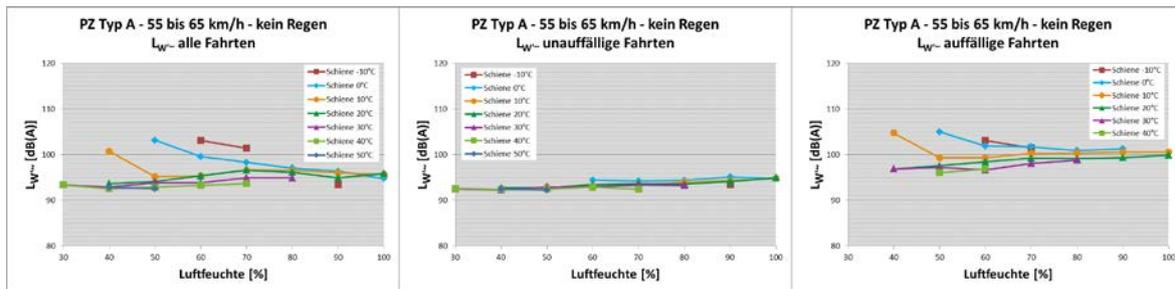


Abb. 6-24: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W_{\sim}}$ abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

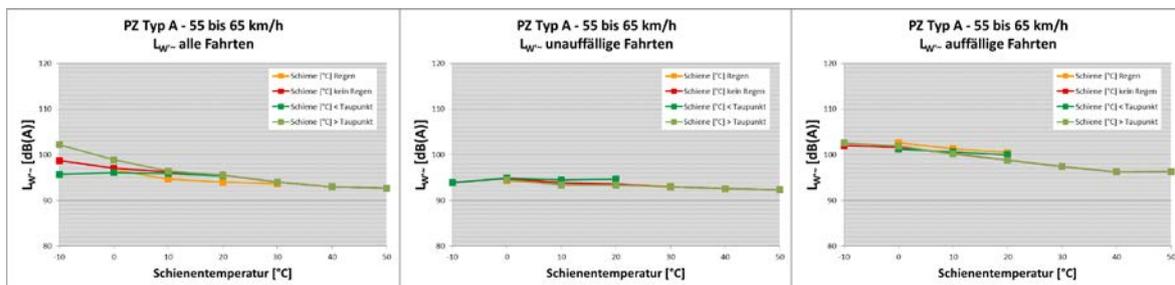


Abb. 6-25: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W_{\sim}}$ in Abhängigkeit der Schienentemperatur für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

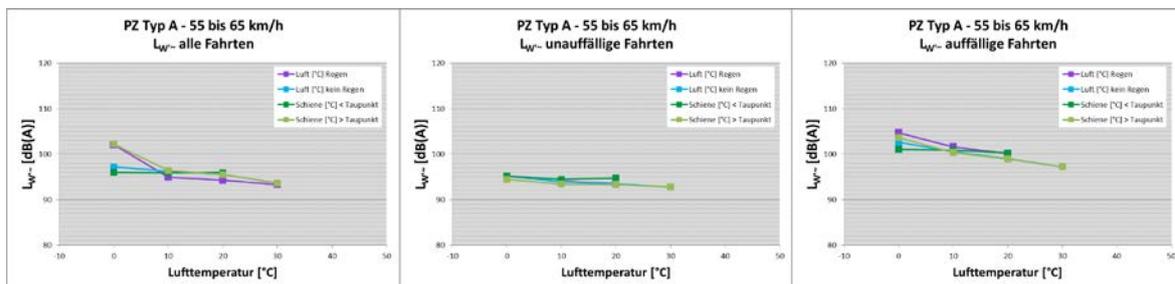


Abb. 6-26: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W_{\sim}}$ in Abhängigkeit der Lufttemperatur für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

In Abb. 6-26 sind die Pegelverläufe für unterschiedliche Lufttemperaturen dargestellt. Die maximale Pegeldifferenz bei allen Fahrten liegt bei etwa 6 dB zwischen Schienentemperaturen unter und über dem Taupunkt bei 0 °C. Bei den unauffälligen Fahrten kommt es nur zu geringen Pegelunterschieden. Bei den auffälligen Fahrten ist der Schalleistungspegel bei Regen höher als bei keinem Regen. Die maximale Pegeldifferenz beträgt bei auffälligen Fahrten bei 0 °C, etwa 4 dB. Der Schalleistungspegel nimmt mit steigender Temperatur ab.

Unabhängig von der Geschwindigkeit steigt der Schalleistungspegel für die Zugkategorie PZ TYP A mit steigender Temperatur. Bei den unauffälligen Fahrten kommt es unabhängig von der Geschwindigkeit nur zu geringen Pegelunterschieden und der Schalleistungspegel nimmt mit steigender Luftfeuchtigkeit zu. Für die Geschwindigkeiten

zwischen 45 km/h und 65 km/h ist der Schalleistungspegel im mittleren Luftfeuchtigkeitsbereich betrachtet höher, umso geringer die Schienentemperatur ausfällt.

6.1.4. Abschätzung des A-bewerteter längenbezogenen Schalleistungspegels – Kat. PZ TYP B

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

Es sind nur wenige Daten der Kategorie PZ TYP B für Geschwindigkeiten 35-45 km/h vorhanden, wodurch keine aussagekräftige Darstellung der Schalleistungspegelverläufe, wie in Abb. 6-27 und Abb. 6-28 erkennbar, vorhanden ist. Aufgrund dessen erfolgt keine Darstellung des Schalleistungspegels unterschiedlicher Schienentemperaturen in Abhängigkeit der Luftfeuchte.

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

In Abb. 6-29 sind die A-bewerteten, längenbezogenen Schalleistungspegel für Schienentemperaturen zwischen 0 °C und 40 °C abhängig von der Luftfeuchtigkeit dargestellt. Betrachtet man alle Fahrten, ist ersichtlich, dass der maximale Pegelunterschied im Bereich 50-80 % Luftfeuchte bei etwa 4 dB liegt und die Pegeldifferenz mit steigender Luftfeuchtigkeit abnimmt. Bei den unauffälligen Fahrten kommt es lediglich zu geringen Pegeldifferenzen. Bei den auffälligen Fahrten kommt es bei einer Luftfeuchte von 60 % zu einem Pegelunterschied von 6 dB.

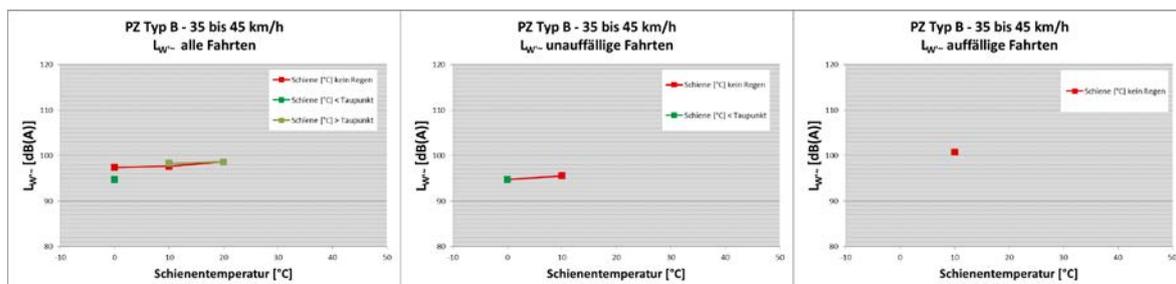


Abb. 6-27: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W'}$ in Abhängigkeit der Schienentemperatur für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

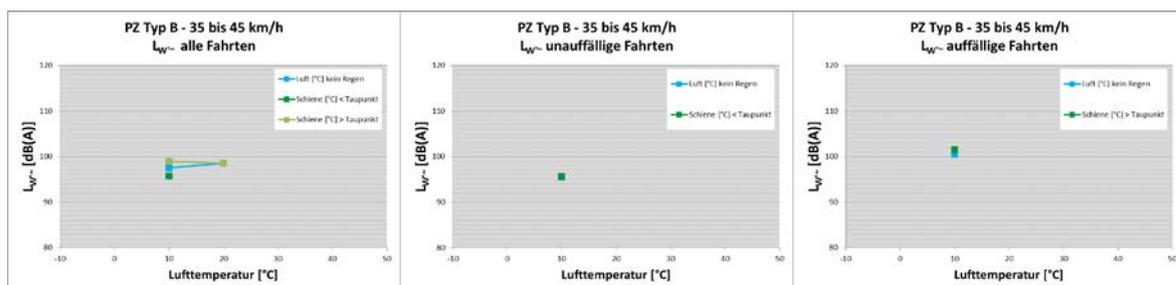


Abb. 6-28: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W'}$ in Abhängigkeit der Lufttemperatur für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

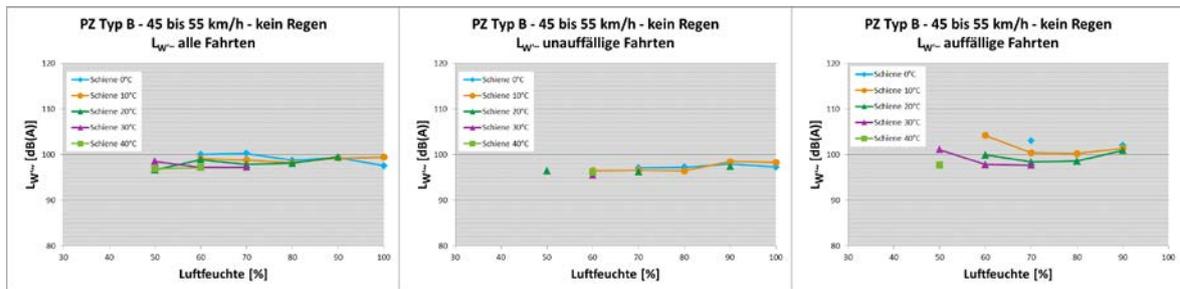


Abb. 6-29: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W, \sim}$ abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

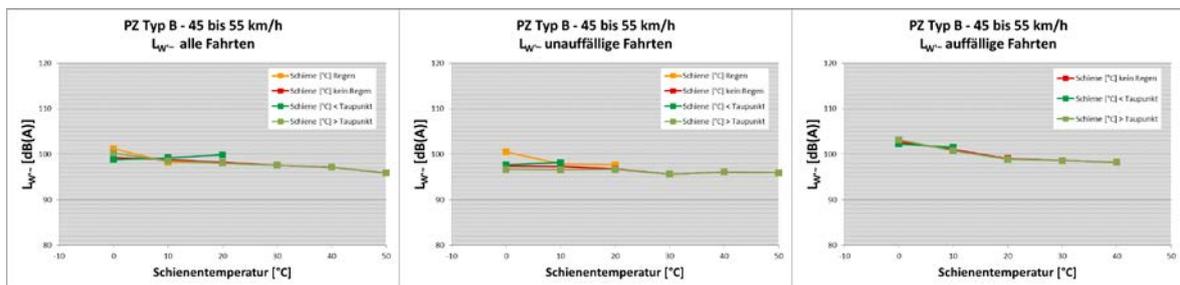


Abb. 6-30: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W, \sim}$ in Abhängigkeit der Schienentemperatur für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

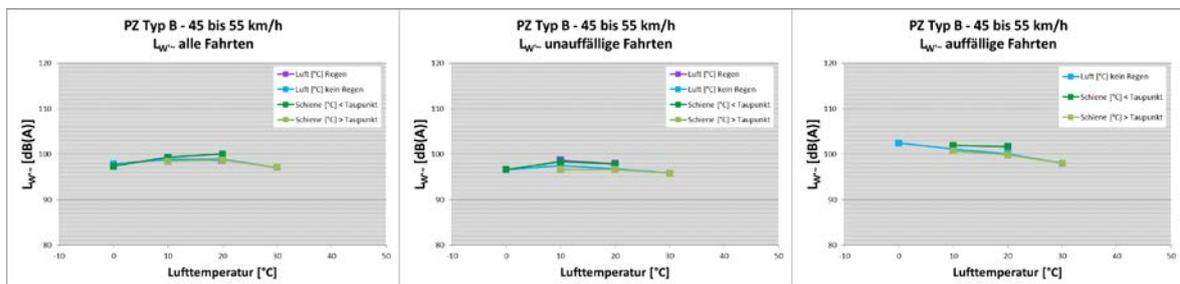


Abb. 6-31: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W, \sim}$ in Abhängigkeit der Lufttemperatur für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

In Abb. 6-30 ist erkennbar, dass der Schalleistungspegel mit steigender Schienentemperatur abnimmt und der maximale Pegelunterschied für den Fall Regen und kein Regen für die Temperatur von 0 °C bei etwa 3 dB liegt. Bei den auffälligen Fahrten wird aufgrund zu geringer Daten der Schallpegelverlauf bei Regen, sowohl für Schienen- als auch Lufttemperatur, nicht dargestellt (siehe Anhang A).

In Abb. 6-31 ist der Schalleistungspegel für unterschiedliche Lufttemperaturen erkennbar. Bei den auffälligen Fahrten nimmt der Pegel mit steigender Temperatur ab. Bei der Betrachtung aller Fahrten stimmt der Schalleistungspegel bei Regen mit jenem ohne Regen überein. Bei den unauffälligen Fahrten liegt der maximale Pegelunterschied bei einer Lufttemperatur von 10 °C bei 2 dB. Bei den auffälligen Fahrten wurde aufgrund der gering vorhandenen Daten auf die Darstellung des Pegels bei Regen verzichtet (siehe

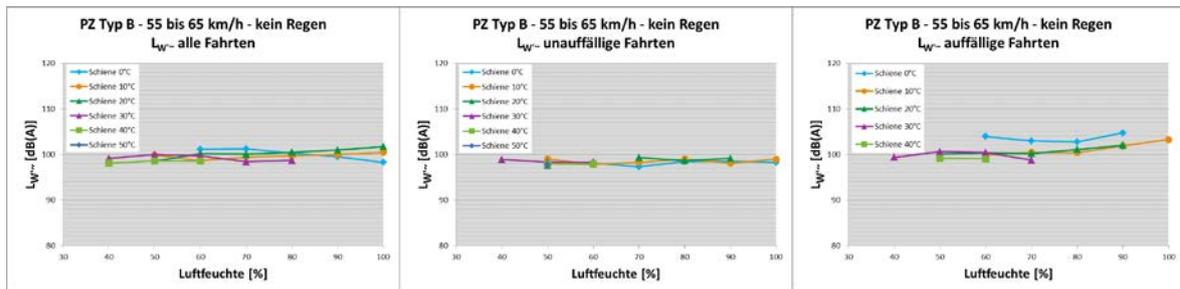


Abb. 6-32: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W'}_{\sim}$ abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

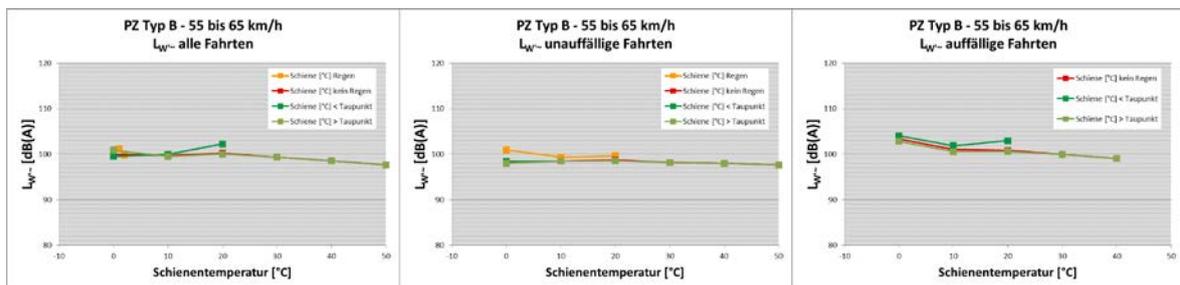


Abb. 6-33: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W'}_{\sim}$ in Abhängigkeit der Schienentemperatur für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

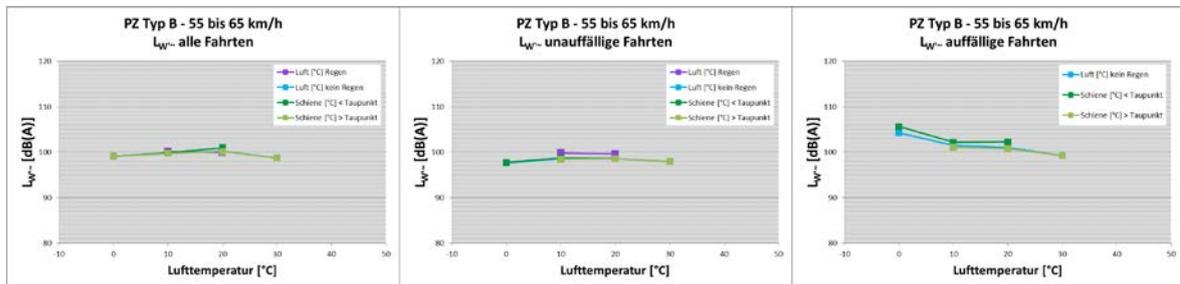


Abb. 6-34: Abschätzung des längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W'}_{\sim}$ in Abhängigkeit der Lufttemperatur für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

Tabelle Anhang A). Für alle drei Fahrten ist ersichtlich, dass der Pegel für Schienentemperaturen unter dem Taupunkt liegend, etwas höher ausfällt als für Schienentemperaturen über dem Taupunkt.

Geschwindigkeitsbereich 55 bis 65 km/h

Abb. 6-32 zeigt den Schalleistungspegel für Schienentemperaturen zwischen 0 °C und 50 °C abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Die Pegeldifferenz bei der Betrachtung aller Fahrten reicht bis 4 dB. Bei den unauffälligen Fahrten kommt es nur zu geringen Pegelunterschieden. Bei den auffälligen Fahrten kommt es für die Schienentemperatur von 0 °C zum maximalen Schalleistungspegel. Hier kommt es bei 70 % Luftfeuchte zu einer Differenz von etwa 4 dB zwischen Schienentemperatur 0 °C und 30 °C.

In Abb. 6-33 nimmt der Schalleistungspegel mit steigender Schienentemperatur ab. Bei den auffälligen Fahrten liegt der Pegel für Schienentemperaturen unter dem Taupunkt betrachtet über dem Pegelverlauf für Schienentemperaturen über dem Taupunkt. Bei den unauffälligen Fahrten ist der Schalleistungspegel bei Regen höher als bei Wetterbedingungen ohne Regen. Bei den auffälligen Fahrten wird aufgrund zu geringer Daten der Schallpegelverlauf bei Regen, sowohl für Schienen- als auch Lufttemperatur, nicht dargestellt (siehe Tabelle Anhang A).

In Abb. 6-34 ist der Schalleistungspegel für unterschiedliche Lufttemperaturen dargestellt. Der Verlauf ist analog zu jenem bei Geschwindigkeiten von 55-65 km/h. Der Pegel für Schienentemperaturen unter dem Taupunkt liegt nur bei den unauffälligen Fahrten über dem Schalleistungspegel für Schienentemperaturen über dem Taupunkt.

Der Schalleistungspegelverlauf stimmt für Schienentemperaturen ohne Regen mit dem betrachteten Fall der Schienentemperaturen unter dem Taupunkt liegend über den gesamten betrachteten Temperaturbereich überein. Ausnahme bilden die Fahrten für Geschwindigkeiten 35-45 km/h. Hier sind wenige Daten vorhanden, wodurch keine aussagekräftige Betrachtung erfolgen kann. Die maximalen Pegelschwankungen von 4 dB sind bei allen Fahrten, sowie den auffälligen Fahrten in Abhängigkeit der Luftfeuchte, erkennbar.

6.1.5. Fazit

Die Analyse der Auftrittshäufigkeiten von tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten zeigt für den Parameter Luftfeuchtigkeit einen Anstieg der Auffälligkeiten mit steigender Luftfeuchtigkeit bis zu einem Prozentbereich von 70-80 %. Ab einer Luftfeuchtigkeit von >80 % fallen die Häufigkeiten stark ab und erreichen im Bereich von 90-100 % Luftfeuchte die niedrigsten Werte. Dies gilt generell sowohl für die tonalen als auch die breitbandigen Auffälligkeiten sowie für beide Zugtypen. Bei der Kategorie PZ TYP B zeigt sich jedoch mit steigender Temperatur ein nicht mehr ganz so starker Abfall und für den Geschwindigkeitsbereich von 60 km/h und tonale Auffälligkeiten erkennt man hier sogar einen starken Anstieg bis auf 80 % Häufigkeit. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass für diesen Wert die geringste verwendete Anzahl an Zügen (10) für ein Ergebnis herangezogen wurde.

Die entsprechenden Ergebnisse der abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegel zeigen für das Datenpool mit „alle Fahrten“ (Vorbeifahrten mit und ohne Auffälligkeiten) auch hier ein leichtes Maximum im Luftfeuchtebereich von 70-80 %. Für die Kategorie PZ TYP A werden jedoch bei der Geschwindigkeit laut VzG (60 km/h)

für tiefe Temperaturen ($< 10\text{ °C}$) zum Teil deutlich höhere Schalleistungspegel im niedrigen Luftfeuchtebereich erreicht. Bei geringeren Geschwindigkeiten nehmen diese „Ausreißer“ ab.

Bei den unauffälligen Fahrten liefern die höheren Geschwindigkeiten erwartungsgemäß die höheren Schalleistungspegel. Die Höhe nimmt generell mit steigender Luftfeuchte zu. Bei auffälligen Fahrten scheinen die Ergebnisse relativ konstant, sowohl was die Geschwindigkeit als auch die Luftfeuchte anbelangt, wobei auch hier bei höheren Geschwindigkeiten erhöhte Schalleistungspegel bei niedriger Luftfeuchte auftreten.

Bei der Analyse der Temperaturabhängigkeit zeigt sich, dass die Ergebnisse sowohl von Luft- als auch von Schienentemperatur relativ ähnliche Werte liefern, wird das Datenpool auf Grundlage der Schienentemperatur aufgeteilt zeigt sich jedoch ein wesentlich breiterer Wertebereich (Temperaturen bis 50 °C).

Die tonalen Auffälligkeiten zeigen eine fallende Tendenz mit steigender Temperatur, bei beiden Kategorien und Geschwindigkeiten. Die breitbandigen Auffälligkeiten zeigen zwar vor allem bei der Kategorie PZ TYP A ebenfalls eine fallende Tendenz, jedoch ist hier auch deutlich ein Maximum im Temperaturbereich von $10\text{-}20\text{ °C}$ zu erkennen.

Betrachtet man die abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegel so zeigt sich sowohl bei den unauffälligen als auch den auffälligen Fahrten beider Kategorien ebenfalls ein mit der steigenden Temperatur sinkender Pegel. Erwartungsgemäß liefern die unauffälligen Fahrten wieder höhere Schalleistungspegel bei höheren Geschwindigkeiten, während bei den auffälligen Fahrten die Pegelwerte nahezu ident sind.

6.2. Schienenkopfconditionierung

Im folgenden Kapitel wird zunächst die Differenz der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten zwischen den Messquerschnitten MQ1 und MQ2 während der Conditionierungsphase bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen für die Zugkategorien PZ TYP A sowie PZ TYP B jeweils für die Geschwindigkeiten $35\text{-}45\text{ km/h}$, $45\text{-}55\text{ km/h}$ und $55\text{-}65\text{ km/h}$ beschrieben. Dabei wird zwischen tonalen ($800\text{-}6300\text{ Hz}$) und breitbandigen (70 dB) Auffälligkeiten unterschieden. Die prozentuelle Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten wird in Form von Prozentpunkten in den Diagrammen aufgezeigt. Unter Prozentpunkt versteht man den absoluten Unterschied zwischen zwei relativen Angaben, die in Prozent vorliegen. Ein positiver Wert besagt, dass um so viele Prozentpunkte weniger Auffälligkeiten beim konditionierten Messquerschnitt MQ1 detektiert wurden.

Die Differenzen der Auffälligkeiten werden einerseits in einem Diagramm abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen bei keinem Regen und

andererseits in zwei weiteren Diagrammen in Abhängigkeit der Schienen- bzw. Lufttemperatur aufgezeigt.

Im Anschluss werden die Differenzen der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten am Messquerschnitt MQ1 mit und ohne Konditionierung bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen für die Zugkategorien PZ TYP A sowie PZ TYP B jeweils für die Geschwindigkeiten 35-45 km/h, 45-55 km/h und 55-65 km/h dargestellt.

Am Ende dieses Kapitels werden die Differenzen der Häufigkeiten von Auffälligkeiten zwischen den Messquerschnitten MQ1 (unkonditioniert) und MQ2 (unkonditioniert) bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen für die Zugkategorien PZ TYP A und PZ TYP B jeweils für die Geschwindigkeiten 35-45 km/h, 45-55 km/h und 55-65 km/h dargestellt. Die Differenzen werden wiederum in Form von Prozentpunkten angegeben. Positive Prozentwerte bedeuten, dass mehr Auffälligkeiten am Messquerschnitt MQ1 auftreten. Liegen die Verläufe auf der 0 %-Achse, so sind die beiden unkonditionierten Messstellen ident zueinander. Bei negativen Prozentpunkten kommt es bei Messquerschnitt MQ2 zu mehr Auffälligkeiten.

6.2.1. Vergleich der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 und MQ2 während der Konditionierungsphase Kategorie PZ TYP A

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

In Abb. 6-35 ist der Prozentpunkt der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit für Schientemperaturen von 0 °C bis 40 °C dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass durch die Schienenkonditionierung bei den breitbandigen Auffälligkeiten bis zu 65 % und bei den tonalen Auffälligkeiten bis zu etwa 30 % weniger Auffälligkeiten detektiert wurden. Bei den tonalen Auffälligkeiten (800 Hz-6,3 kHz) werden bei Schientemperatur 30 °C nicht weniger Auffälligkeiten durch die Konditionierung erzielt.

In Abb. 6-36 ist erkennbar, dass der Prozentpunkt mit steigender Schientemperatur abnimmt. Es werden durch die Schienenkopfkonditionierung bis zu 50 % weniger Auffälligkeiten detektiert. Der Punktsatz für Schientemperaturen unter dem Taupunkt liegend ist bei allen Auffälligkeiten geringer als für Schientemperaturen über dem Taupunkt.

In Abb. 6-37 nimmt der Prozentpunkt für Schientemperaturen über dem Taupunkt liegend mit steigender Lufttemperatur ab. Bei Regen ist die Differenz zwischen MQ2 und MQ1 erwartungsgemäß geringer, da die SKK bei diesen Wetterbedingungen deaktiviert ist. Der Punktsatz für Schientemperaturen unter dem Taupunkt liegend, ist bei allen Auffälligkeiten geringer als für Schientemperaturen über dem Taupunkt.

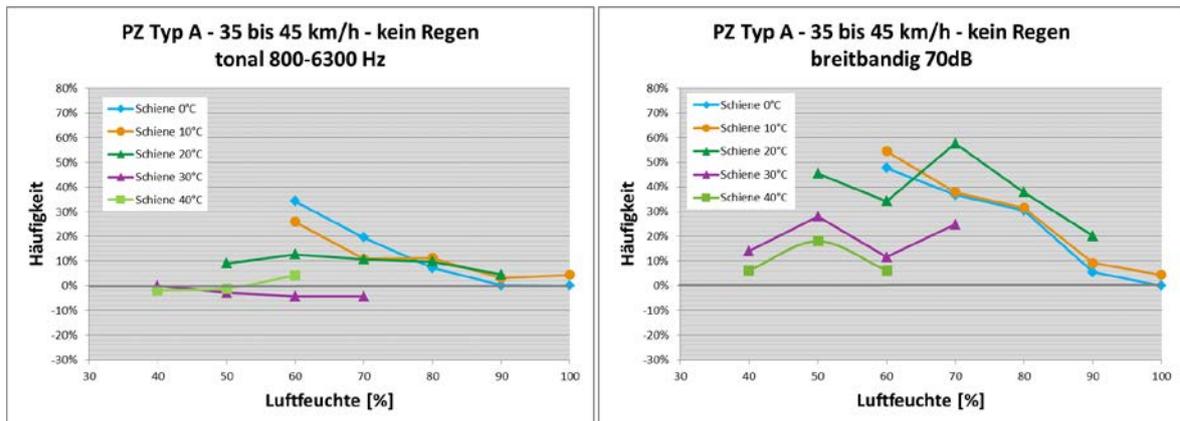


Abb. 6-35: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

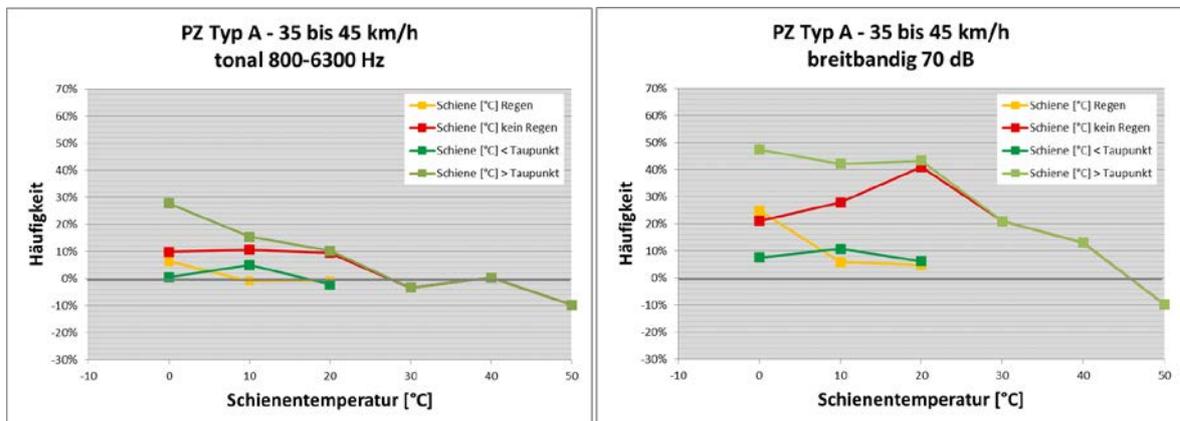


Abb. 6-36: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

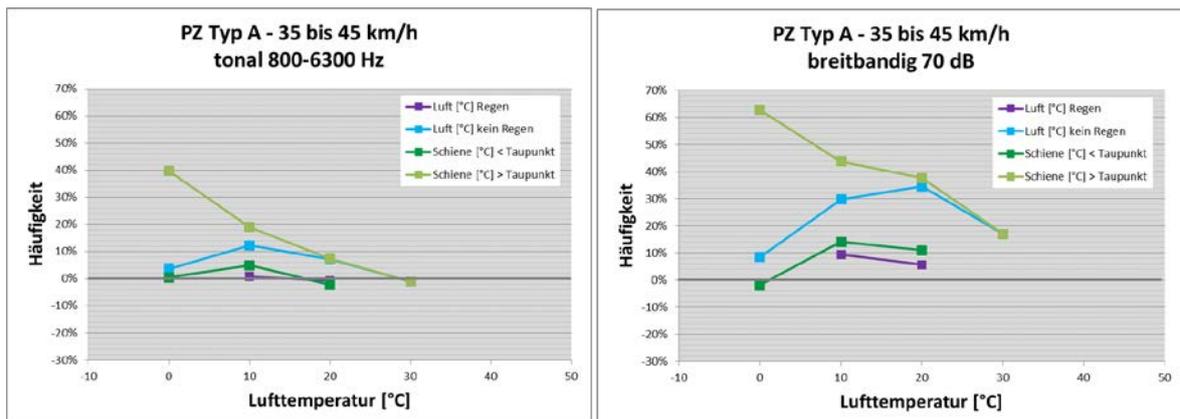


Abb. 6-37: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

In Abb. 6-38 ist der Prozentpunkt der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit für Schienentemperaturen von 0 °C bis 40 °C dargestellt. Daraus ist

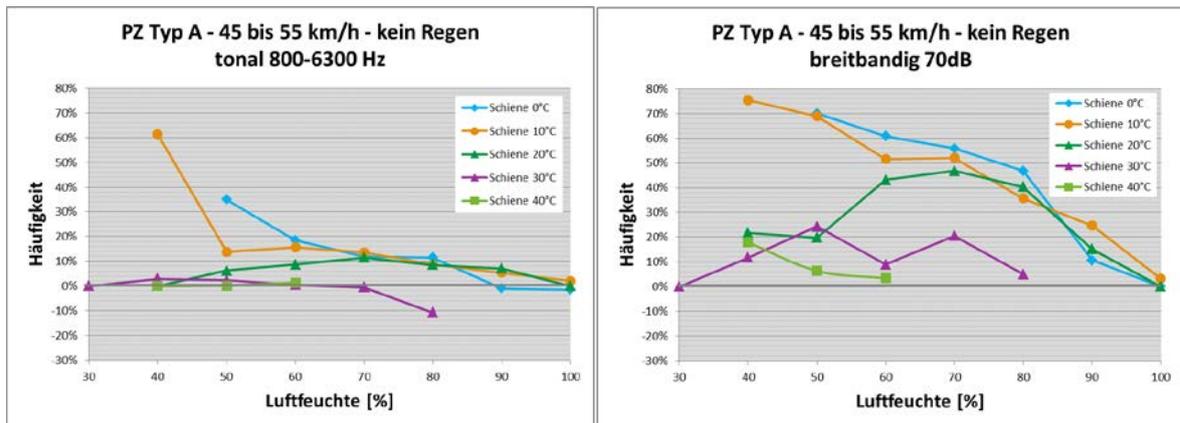


Abb. 6-38: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schientemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

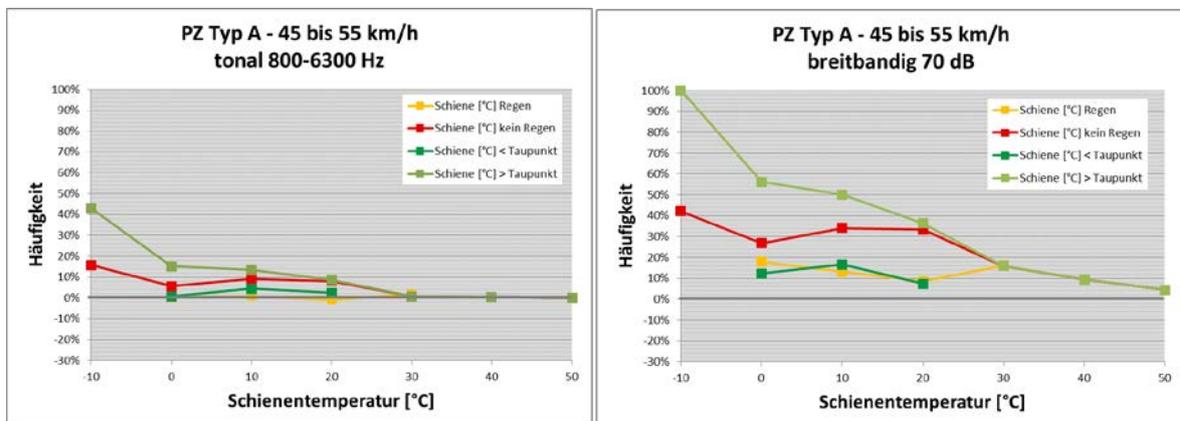


Abb. 6-39: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Schientemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

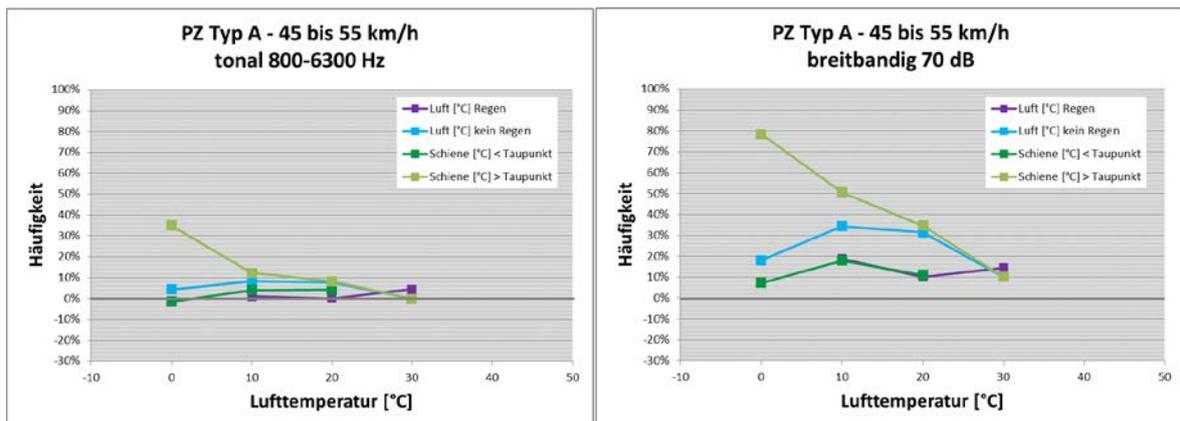


Abb. 6-40: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

ersichtlich, dass durch die Schienenkonditionierung bei den breitbandigen Auffälligkeiten bis zu 75 % und bei den tonalen Auffälligkeiten (800 Hz-6,3 kHz) bis zu 60 % weniger

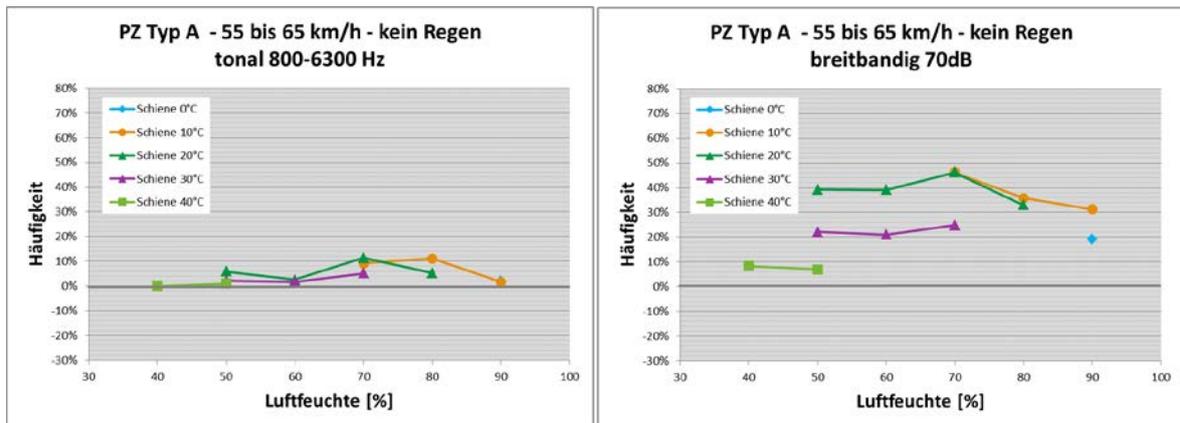


Abb. 6-41: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schientemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

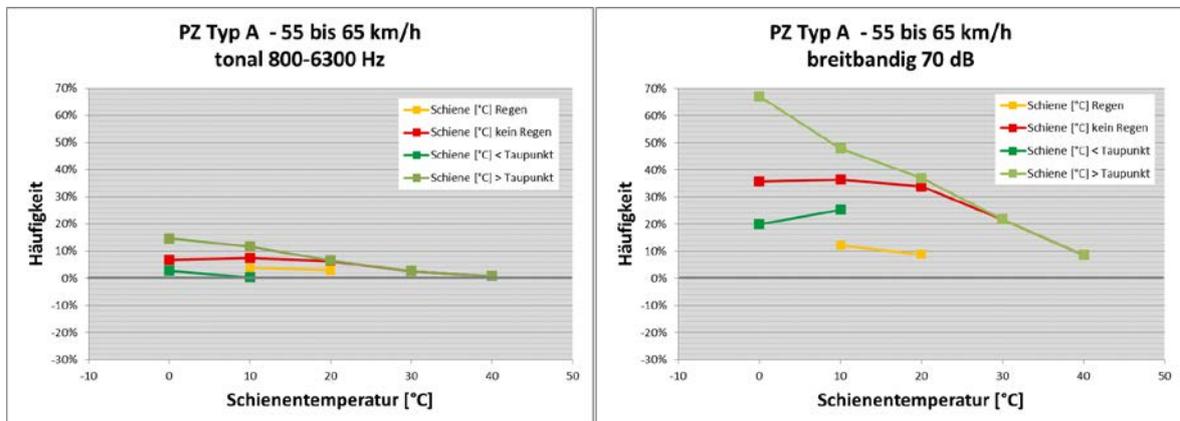


Abb. 6-42: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Schientemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65km/h

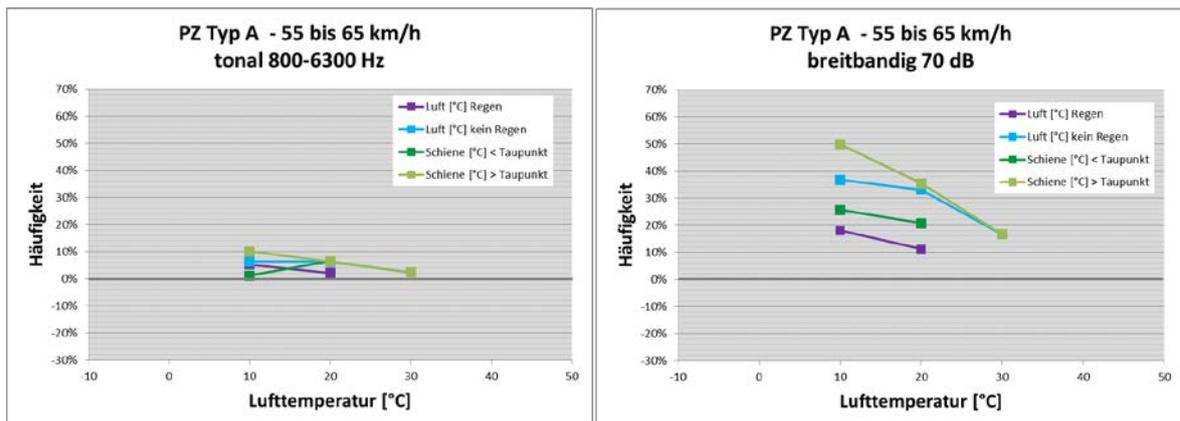


Abb. 6-43: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65km/h

Auffälligkeiten detektiert wurden. Bei den tonalen Auffälligkeiten werden bei Schientemperatur 30 °C im Bereich 70-80 % Luftfeuchte nicht weniger Auffälligkeiten durch die Konditionierung erzielt.

In Abb. 6-39 wird bei den breitbandigen Auffälligkeiten bei -10 °C der maximale Prozentpunkt für den Fall Schienentemperaturen über dem Taupunkt erreicht. Sowohl bei den tonalen als auch den breitbandigen Auffälligkeiten nimmt der Prozentpunkt mit steigender Schienentemperatur ab. In Abb. 6-40 reicht der Prozentpunkt bei den breitbandigen Auffälligkeiten bis zu 80 %. Bei Schienentemperaturen über dem Taupunkt wurden weniger Auffälligkeiten beim konditionierten Messquerschnitt MQ1 detektiert als bei Schienentemperaturen unter dem Taupunkt. Bei Regen ist die Differenz zwischen MQ2 und MQ1 erwartungsgemäß geringer.

Geschwindigkeitsbereich 55 bis 65 km/h

In Abb. 6-41 ist der Prozentpunkt der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit für Schienentemperaturen von 0 °C bis 40 °C dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass bei 60 km/h ein deutlich geringerer Prozentpunkt im Vergleich zu den geringeren Geschwindigkeiten erzielt werden konnte.

In Abb. 6-42 und Abb. 6-43 nimmt die Differenz der Häufigkeit der Auffälligkeiten mit steigender Temperatur ab. Bei allen Betrachtungen wurden positive Prozentpunkte erzielt, was bedeutet, dass in allen Fällen weniger an Auffälligkeiten beim konditionierten Messquerschnitt MQ1 erfasst wurden.

Unabhängig von der Geschwindigkeit der Züge der Kategorie PZ TYP A ist erkennbar, dass bei Betrachtung der Häufigkeit abhängig von der Luftfeuchtigkeit mit steigender Schienentemperatur der Punktsatz geringer wird und die Schienenkonditionierung somit eine weniger positive Wirkung auf die Auffälligkeiten hat. Der Punktsatz für Schienentemperaturen unter dem Taupunkt ist sowohl bei den tonalen als auch breitbandigen Auffälligkeiten geringer als für Schienentemperaturen über dem Taupunkt liegend.

6.2.2. Vergleich der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 und MQ2 während der Konditionierungsphase Kategorie PZ TYP B

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

Es sind nur wenige Daten der Kategorie PZ TYP B für Geschwindigkeiten 35-45 km/h vorhanden, wodurch keine aussagekräftige Darstellung der Differenz der Häufigkeit der Auffälligkeiten abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen erfolgen konnte. Somit wurden aus den geringen Daten in Abb. 6-44 und Abb. 6-45 die Differenzen der Auftrittshäufigkeiten abhängig von der Schienen- bzw. Lufttemperatur dargestellt.

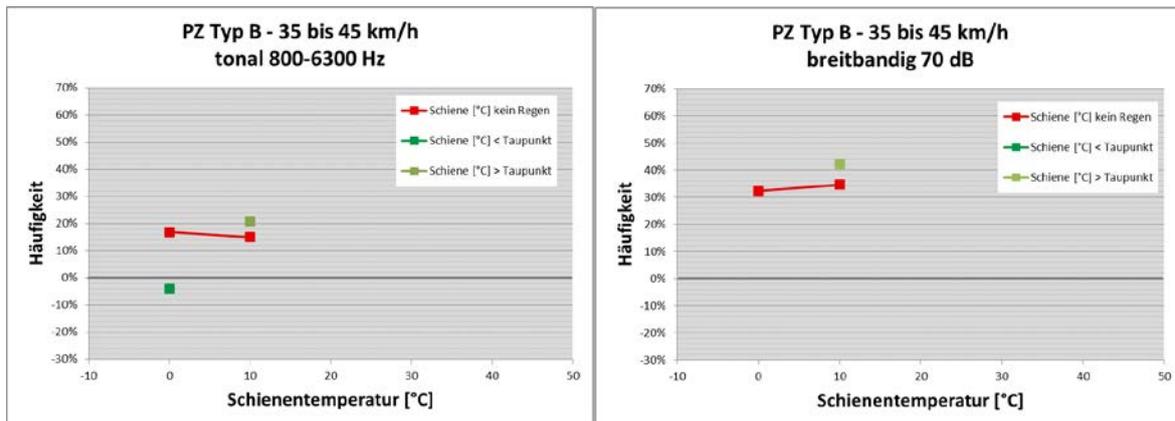


Abb. 6-44: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Schientemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 35-45km/h

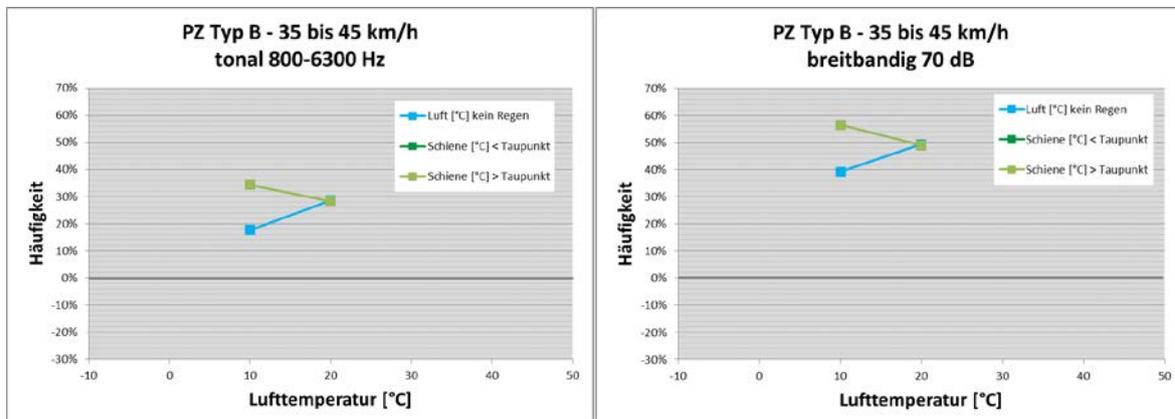


Abb. 6-45: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 35-45km/h

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

In Abb. 6-46 ist der Prozentpunkt der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit für Schientemperaturen von 0 °C bis 40 °C aufgetragen. Daraus ist ersichtlich, dass bei den breitbandigen Auffälligkeiten durch die Schienenkonditionierung im Bereich 60-90 % Luftfeuchte abhängig von der Schientemperatur zwischen 20 % und 70 % weniger Auffälligkeiten detektiert wurden. Hingegen kommt es bei den tonalen Auffälligkeiten (800 Hz-6,3 kHz) bei Schientemperaturen von 20 °C bis 40 °C zu keiner geringeren Detektion der Auffälligkeiten durch die Schienenkopfkonditionierung. Bei den Schientemperaturen unter 10 °C reicht der Prozentpunkt bis zu 25 %.

In Abb. 6-47 ist ersichtlich, dass der Punktsatz bei den tonalen Auffälligkeiten für Schientemperaturen ohne Regen sowie für Schientemperaturen unter dem Taupunkt liegend mit steigender Temperatur abnimmt. Umso geringer die Temperatur ist, desto weniger Auffälligkeiten konnten durch die Konditionierung festgestellt werden. Betrachtet

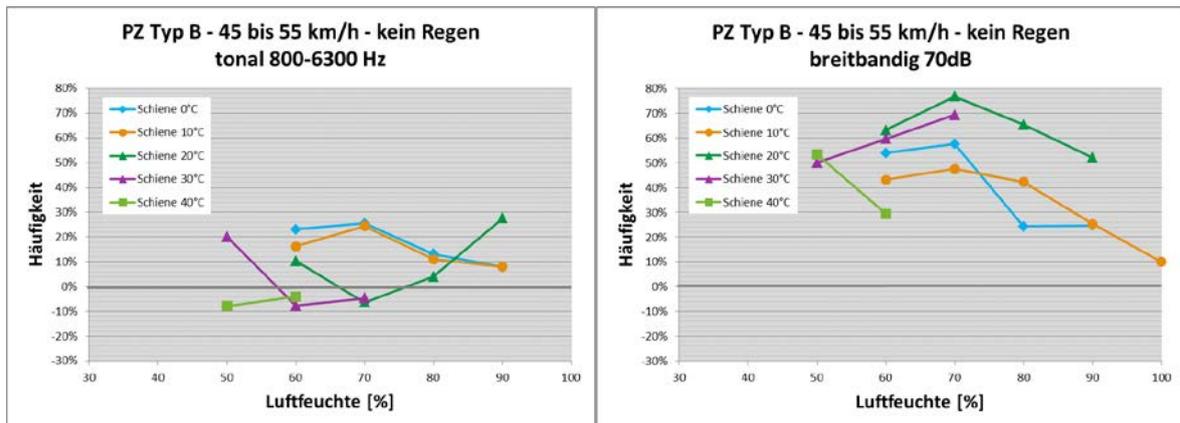


Abb. 6-46: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

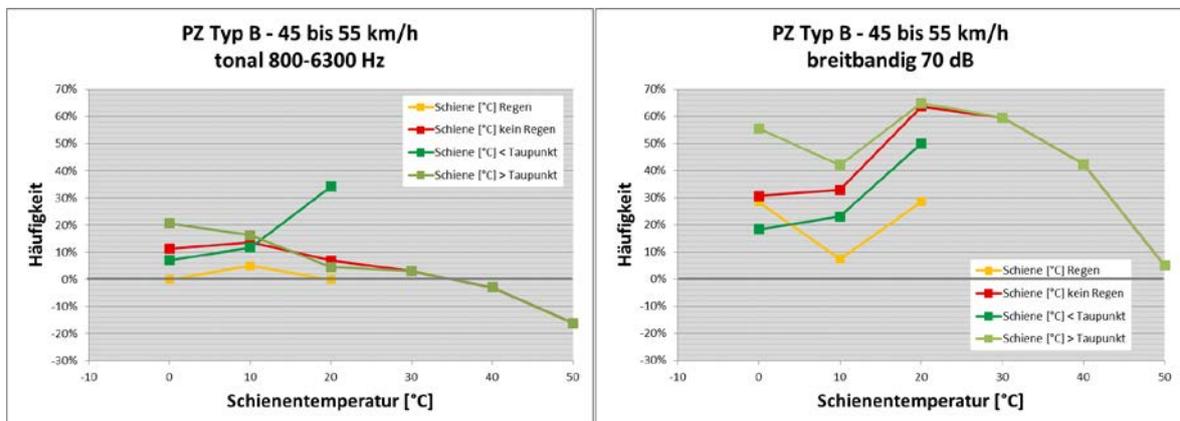


Abb. 6-47: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

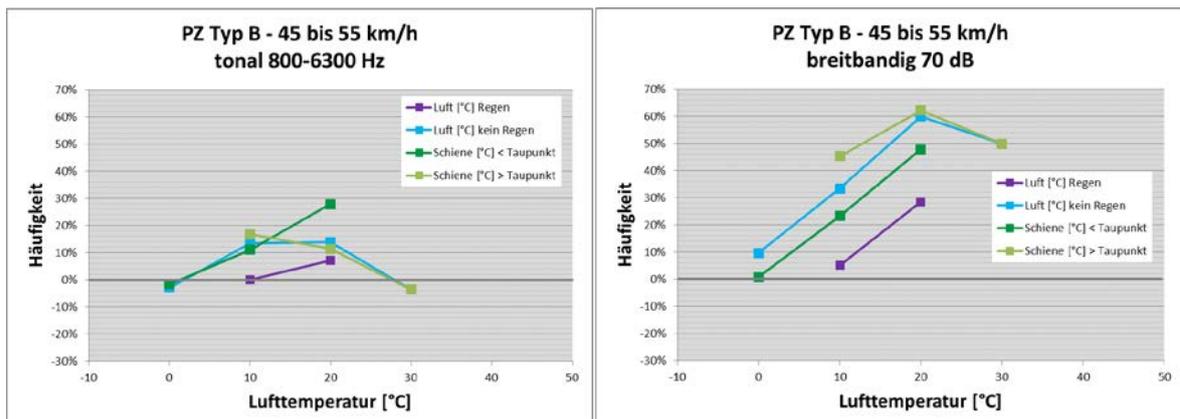


Abb. 6-48: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

man die tonalen Auffälligkeiten (800 Hz-6,3 kHz) so erkennt man, dass ab 40 °C sowohl durch die Konditionierung mehr Auffälligkeiten detektiert wurden. Bei den breitbandigen

Auffälligkeiten nimmt der Punktsatz bis 20 °C zu und nimmt dann mit steigender Temperatur ab. Hier werden Werte von bis zu 60 % erzielt.

Abb. 6-48 zeigt die Differenz der Auffälligkeiten für unterschiedliche Lufttemperaturen. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten steigt der Prozentpunkt bis 20 °C mit steigender Temperatur an. Bei den tonalen Auffälligkeiten wird eine ‚positive‘ Differenz von bis zu 30 % erreicht.

Geschwindigkeitsbereich 55 bis 65 km/h

Auch bei den Geschwindigkeiten 55-65 km/h wurde aufgrund zu geringer Daten auf die Darstellung des Punktsatzes abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schientemperaturen verzichtet. In Abb. 6-49 und Abb. 6-50 wurde aus den vorhandenen Daten der Punktsatz abhängig von der Schienen- und Lufttemperatur dargestellt. Durch die Schienenkopfkonditionierung kommt es bis auf die tonalen

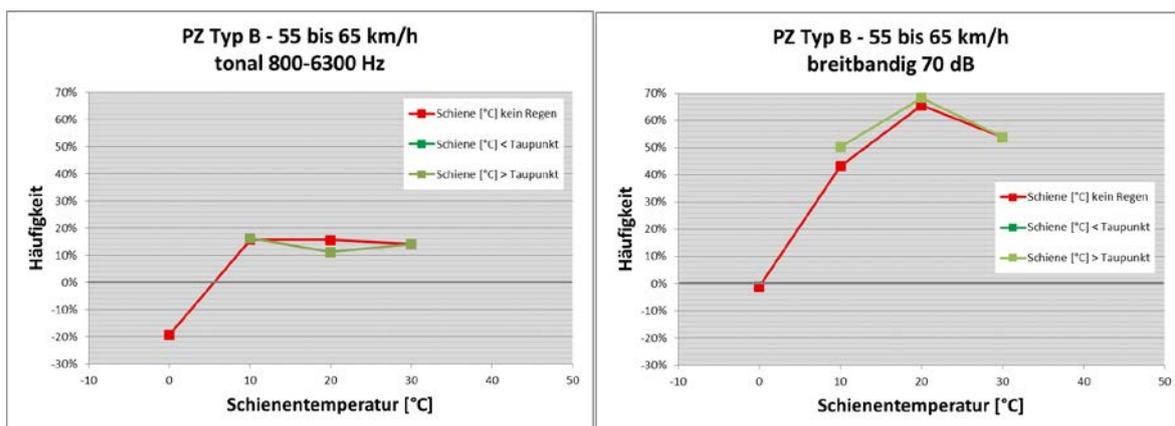


Abb. 6-49: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Schientemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

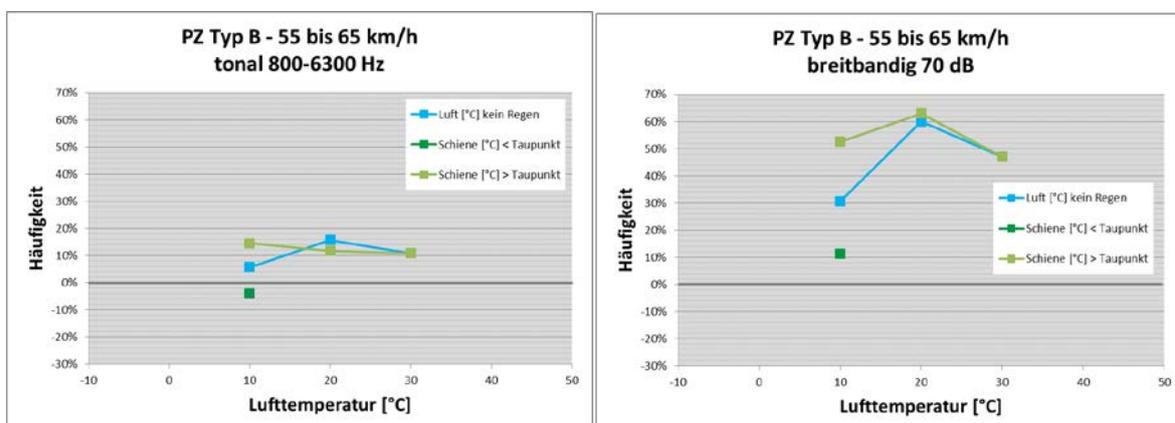


Abb. 6-50: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

Auffälligkeiten (800 Hz-6,3 kHz) bei Schientemperaturen ohne Regen zu weniger Auffälligkeiten.

Unabhängig von der Geschwindigkeit der Züge der Kategorie PZ TYP B zeigt sich, dass durch die Konditionierung der Schienen bis auf wenige Ausnahmen bei tonalen Auffälligkeiten (800 Hz-6,3 kHz) insgesamt weniger Auffälligkeiten detektiert werden konnten. Der maximale Punktsatz wurde bei einer Luftfeuchte zwischen 60 % und 70 % sowie bei Temperaturen um 20 °C erzielt. Bei Wetterbedingungen ohne Regen ist die Reduktion der Häufigkeit der Auffälligkeiten deutlich höher als bei Regen und somit deaktivierter SKK.

6.2.3. Differenz des abgeschätzten, A-bewerteten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 und MQ2 während der Konditionierungsphase Kategorie PZ TYP A

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

Abb. 6-51 zeigt die Differenz der Schalleistungspegel für Schientemperaturen zwischen 0 °C und 40 °C abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Betrachtet man alle Fahrten so sind für Temperaturen >20 °C über den gesamten Prozentbereich der Luftfeuchte deutliche Pegelminderungen von bis zu 10 dB erkennbar. Diese Pegelminderungen nehmen mit der steigenden Luftfeuchte ab. Für Temperaturen >20 °C zeigen sich keine Minderungen bzw. sogar geringfügig höhere Pegelwerte. Sowohl bei den unauffälligen als auch den auffälligen Fahrten sind leichte Pegelreduktionen durch die SKK von 1-3 dB erkennbar.

In Abb. 6-52 ist erkennbar, dass die Pegelreduktion zwischen MQ2 und MQ1 mit steigender Schientemperatur abnimmt und bei Temperaturen <20 °C keine bzw. bereits höhere Pegel liefert. Eine Ausnahme bilden die Pegelreduktionen bei unauffälligen Fahrten, diese steigen mit steigender Temperatur an. Die Höchsten Pegelreduktionen liefern die Fahrten mit einer Schientemperatur die geringer ist als die Taupunkttemperatur. Hier liegen die Pegelreduktionen im Temperaturbereich <20 °C zwischen 5 dB und 9 dB.

Abb. 6-53 zeigt einen ähnlichen Verlauf des Schallpegels für unterschiedliche Lufttemperaturen. Auch hier nimmt der Schalleistungspegel, bis auf die Gruppe der unauffälligen Fahrten, mit steigender Temperatur ab und die höchsten Pegelreduktionen können für die Fahrten, welche bei einer Schientemperatur < Taupunkttemperatur erfolgten, erzielt werden.

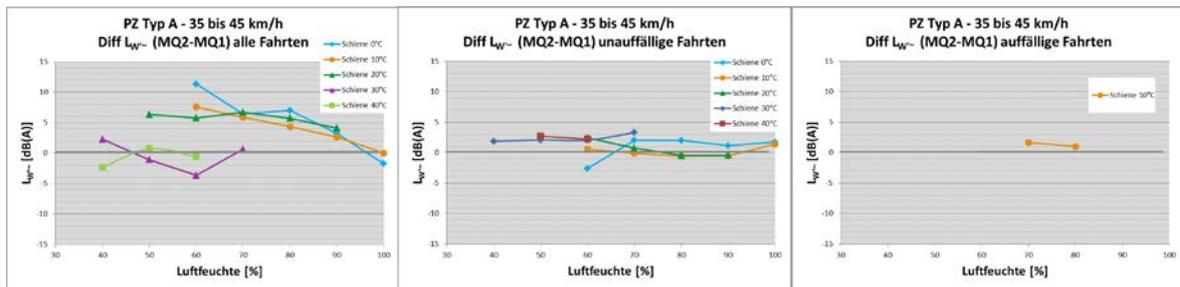


Abb. 6-51: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Luftfeuchte, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

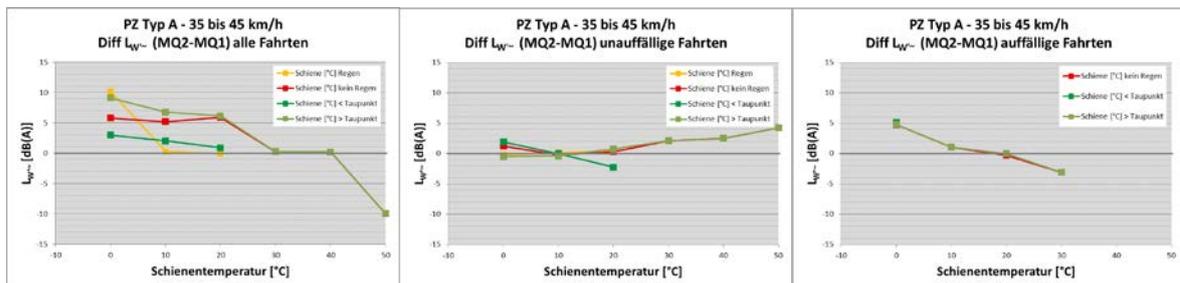


Abb. 6-52: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

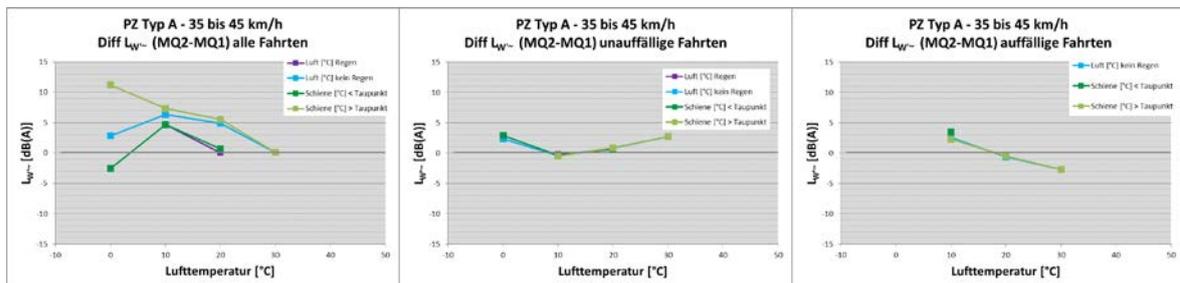


Abb. 6-53: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

Abb. 6-54 zeigt die Differenz der Schalleistungspegel für Schienentemperaturen zwischen -10 °C und 50 °C abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Betrachtet man alle Fahrten so sind wieder, für Temperaturen <20 °C, über den gesamten Prozentbereich der Luftfeuchte deutliche Pegelminderungen von bis zu 10 dB erkennbar. Diese Pegelminderungen nehmen für die Schienentemperaturen <10 °C mit der steigenden Luftfeuchte ab. bei Fahrten im Temperaturbereich von 10-20 °C ist zuerst ein Anstieg bis 90% Luftfeuchte erkennbar und danach ein Abfall auf einen Bereich von unter 0 dB. Bei den unauffälligen Fahrten zeigen sich nur für den Temperaturbereich <0 °C eindeutige Pegelreduktionen von bis zu 3 dB. Während bei den anderen Bedingungen die

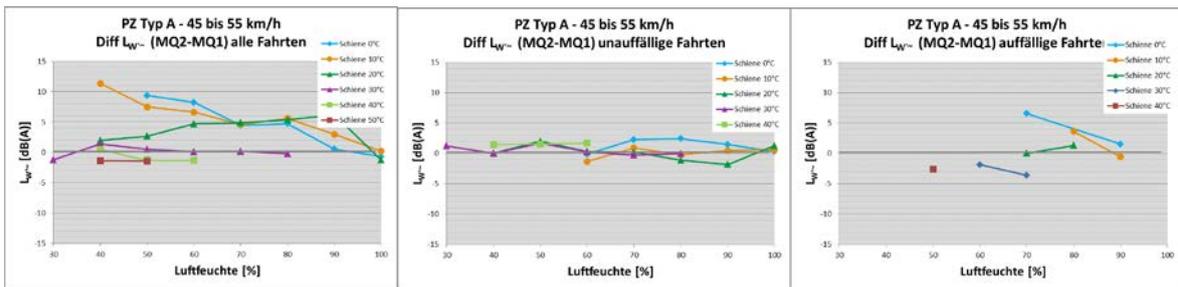


Abb. 6-54: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Luftfeuchte, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

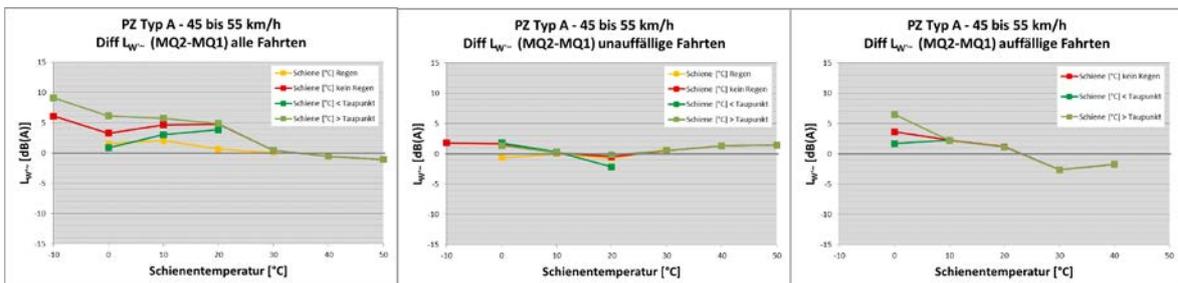


Abb. 6-55: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

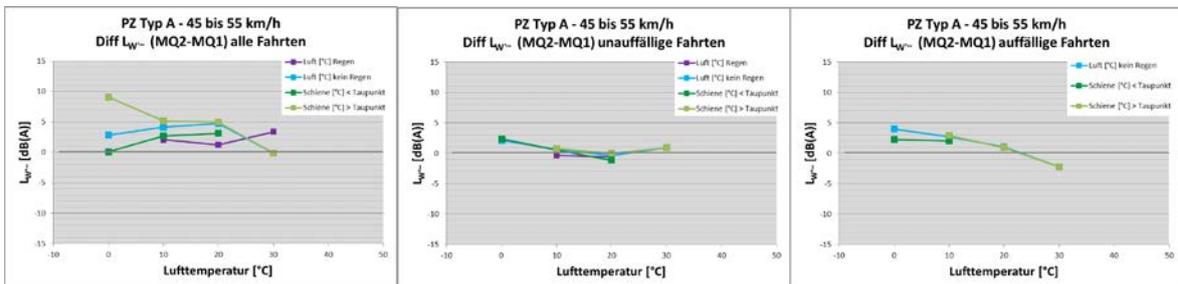


Abb. 6-56: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

Pegeldifferenzen gering sind. Bei den auffälligen Fahrten zeigt sich auch hier, dass Pegelreduktionen nur für die tiefen Temperaturen erkennbar sind.

In Abb. 6-55 ist erkennbar, dass die Pegelreduktion zwischen MQ2 und MQ1 mit steigender Schienentemperatur abnimmt und bei Temperaturen >20 °C keine bzw. bereits höhere Pegel liefert. Eine Ausnahme bilden die Pegelreduktionen bei unauffälligen Fahrten, diese zeigen nur im Bereich <0 °C sowie >20 °C leichte Pegelreduktionen am MQ mit der SKK. Die höchsten Pegelreduktionen liefern wieder die Fahrten mit einer Schienentemperatur die geringer ist als die Taupunkttemperatur. Hier liegen die Pegelreduktionen im Temperaturbereich <20 °C zwischen 5 dB und 9 dB.

Abb. 6-56 zeigt wieder einen ähnlichen Verlauf des Schalleistungspegels für unterschiedliche Lufttemperaturen. Auch hier nimmt die Pegelreduktion, bis auf die

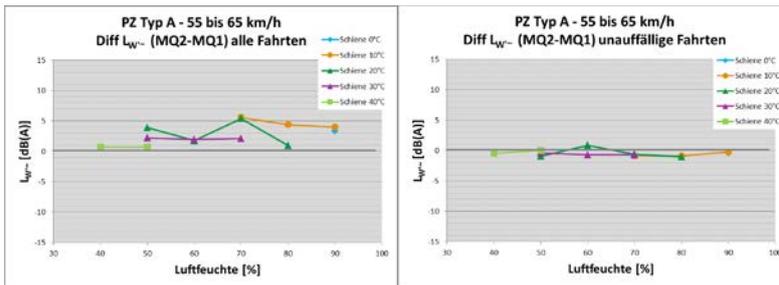


Abb. 6-57: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Luftfeuchte, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

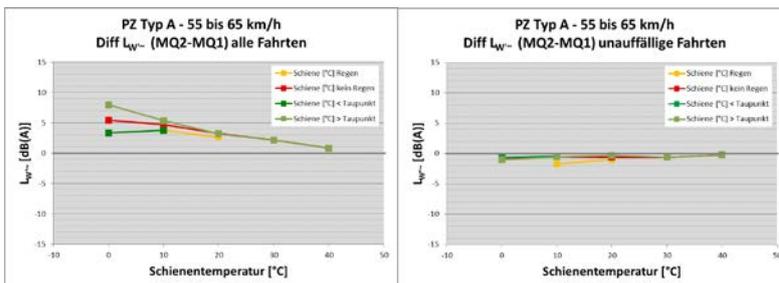


Abb. 6-58: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

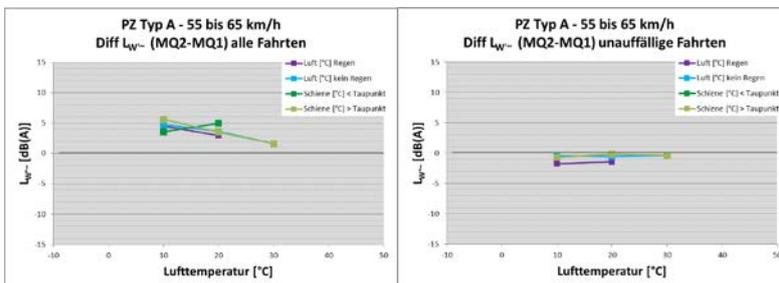


Abb. 6-59: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

Gruppe der unauffälligen Fahrten, mit steigender Temperatur ab und die höchsten Pegelreduktionen können für die Fahrten, welche bei einer Schienentemperatur < Taupunkttemperatur erfolgten, erzielt werden.

Geschwindigkeitsbereich 55 bis 65 km/h

Abb. 6-57 zeigt die Differenz der Schalleistungspegel für Schienentemperaturen zwischen -10 °C und 40 °C abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Betrachtet man alle Fahrten so sind bei dieser Geschwindigkeit auch Pegelminderungen für Temperaturen zwischen 20 °C und 30 °C erkennbar, wenn auch geringer. Diese Pegelminderungen haben ihr Maximum bei 70 % Luftfeuchte. Bei den unauffälligen Fahrten sind keine

Pegelminderungen erkennbar. Für die auffälligen Fahrten wurden auf Grund der geringen Anzahl an Auffälligkeiten, keine Grafiken angefertigt.

In Abb. 6-58 erkennt man wieder deutlich die fallende Pegelreduktion mit steigender Temperatur. Betrachtet man nur die unauffälligen Fahrten so ist praktisch keine Differenz erkennbar. Die höchsten Pegelreduktionen liefern wieder die Fahrten mit einer Schienentemperatur die geringer ist als die Taupunkttemperatur. Hier liegen die Pegelreduktionen für „alle Fahrten“ zwischen 1 dB und 8 dB.

Abb. 6-59 zeigt wieder einen ähnlichen Verlauf des Schalleistungspegels für unterschiedliche Lufttemperaturen. Auch hier nimmt die Pegelreduktion für „alle Fahrten“ mit steigender Temperatur ab, während für die unauffälligen Fahrten keine Pegelreduktion feststellbar ist.

6.2.4. Differenz des abgeschätzten A-bewerteten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 und MQ2 während der Konditionierungsphase Kategorie PZ TYP B

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

Abb. 6-60 zeigt die Differenz der Schalleistungspegel für Schienentemperaturen zwischen 0 °C und 40 °C abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Betrachtet man alle Fahrten so sind für Temperaturen <10 °C über den gesamten Prozentbereich der Luftfeuchte deutliche Pegelminderungen von bis zu 7 dB erkennbar. Diese Pegelminderungen nehmen mit der steigenden Luftfeuchte ab. Für Temperaturen >20 °C zeigen sich keine Minderungen bzw. sogar geringfügig höhere Pegelwerte. Bei den unauffälligen Fahrten sind für die Temperaturen <10 °C unabhängige von der Luftfeuchte relativ konstante Pegelreduktionen von etwa 2-3 dB erkennbar. Bei den auffälligen Fahrten gibt es lediglich einen Wert welcher eine Erhöhung im konditionierten Abschnitt von 5 dB erreicht.

In Abb. 6-61 erkennt man wieder deutlich die fallende Pegelreduktion mit steigender Temperatur. Betrachtet man nur die unauffälligen Fahrten so ist praktisch keine Differenz erkennbar. Für Temperaturen >20 °C sind wieder Pegelerhöhungen feststellbar. Bei den auffälligen Fahrten zeigen sich sogar relativ hohe Erhöhungen von bis zu 7 dB.

Abb. 6-62 zeigt wieder einen ähnlichen Verlauf des Schalleistungspegels für unterschiedliche Lufttemperaturen. Auch hier nimmt die Pegelreduktion für „alle Fahrten“ mit steigender Temperatur ab.

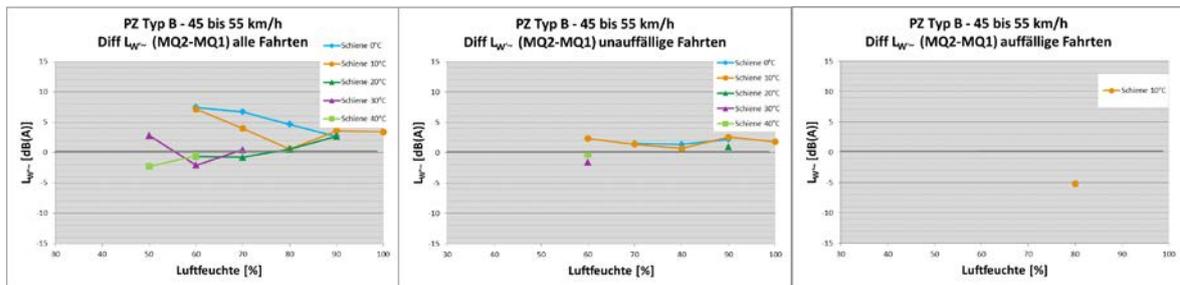


Abb. 6-60: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Luftfeuchte, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

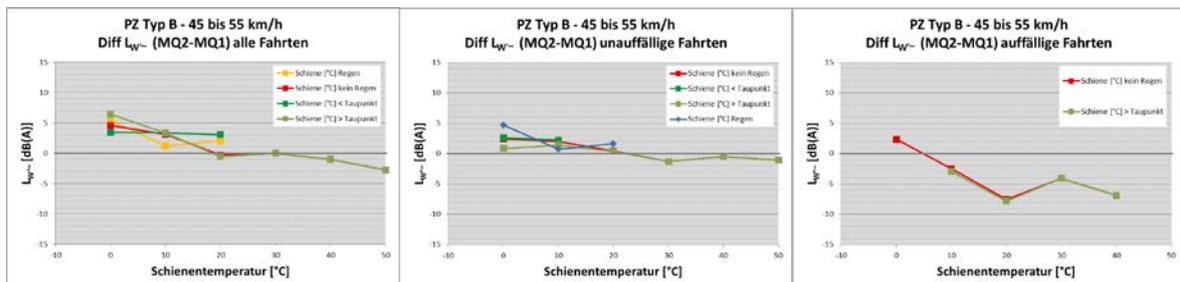


Abb. 6-61: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

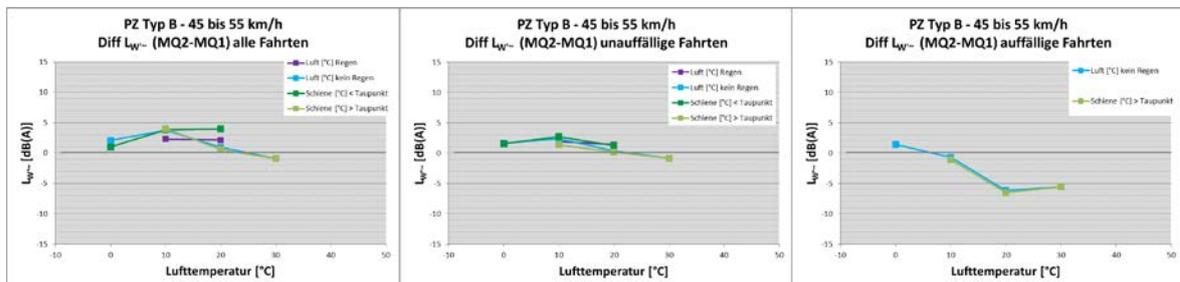


Abb. 6-62: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

Geschwindigkeitsbereich 55 bis 65 km/h

Auf Grund der geringen Anzahl an Fahrten in den einzelnen Luftfeuchteprozentbereichen entfällt diese Darstellung bei diesem Geschwindigkeitsbereich. In Abb. 6-63 sind die Ergebnisse bei unterschiedlicher Schienentemperatur dargestellt. Betrachtet man die Ergebnisse so erkennt man Pegelreduktionen von 3-4 dB für alle Fahrten, während die Reduktionen bei den unauffälligen Fahrten gering sind.

Abb. 6-64 zeigt wieder einen ähnlichen Verlauf des Schalleistungspegels für unterschiedliche Lufttemperaturen. Bei den unauffälligen Fahrten zeigt sich wieder keine Pegelreduktion während für „alle Fahrten“ die Reduktionen zwischen 2 und 4 dB liegen.

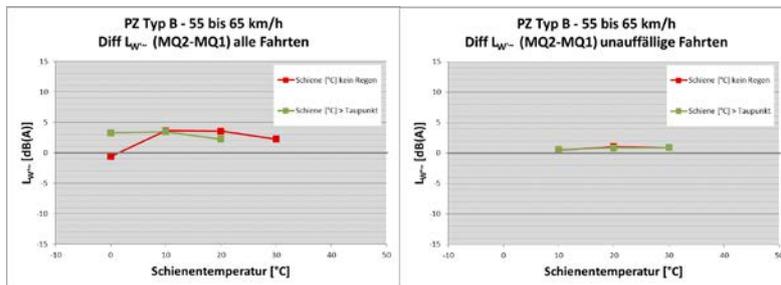


Abb. 6-63: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

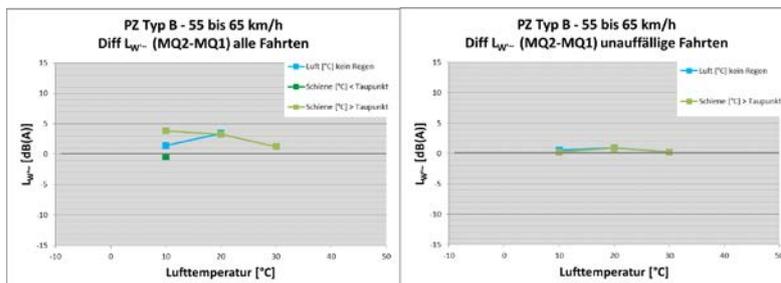


Abb. 6-64: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (konditioniert) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

6.2.5. Vergleich der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten in MQ1 für den Zeitraum mit deaktivierter und den Zeitraum mit aktivierter SKK Kat. PZ TYP A

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

In Abb. 6-65 ist der Prozentpunkt der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit für Schienentemperaturen von 0 °C bis 40 °C dargestellt. Es ist erkennbar, dass mit steigender Luftfeuchtigkeit die Wirkung der Konditionierung abnimmt. Beim konditionierten MQ1 konnten bei den tonalen (800 Hz-6,3 kHz) im Mittel bis zu 10 % und bei den breitbandigen Auffälligkeiten bis zu etwa 50 % weniger Auffälligkeiten detektiert werden als im nicht-konditionierten Abschnitt MQ1.

In Abb. 6-66 sieht man, dass die tonalen Auffälligkeiten (800 Hz-6,3 kHz) ab einer Schienentemperatur von 20 °C die positive Prozentpunkt-Achse für die Fälle Schienentemperatur ohne Regen und Schienentemperatur über Taupunkt unterschreiten – somit hat die Konditionierung in diesem Temperaturbereich in beiden Fällen keine positive Wirkung auf die Auffälligkeiten im tonalen Bereich zwischen 800 Hz und 6,3 kHz. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten nimmt die Wirkung der Konditionierung mit steigender Schienentemperatur zu und nimmt ab 10 °C mit steigender Temperatur ab. Das erreichte Maximum liegt hier bei 10 °C bei etwa 50 %.

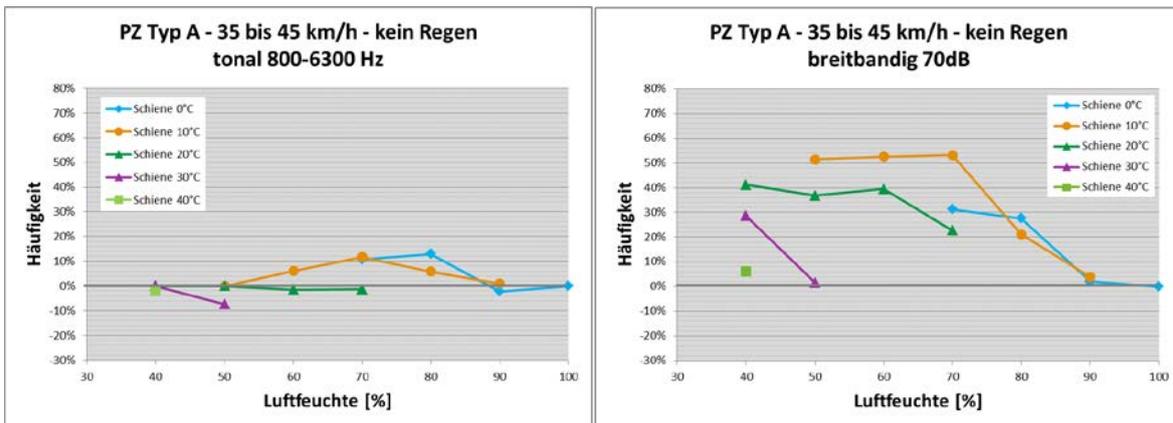


Abb. 6-65: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht-konditioniert abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

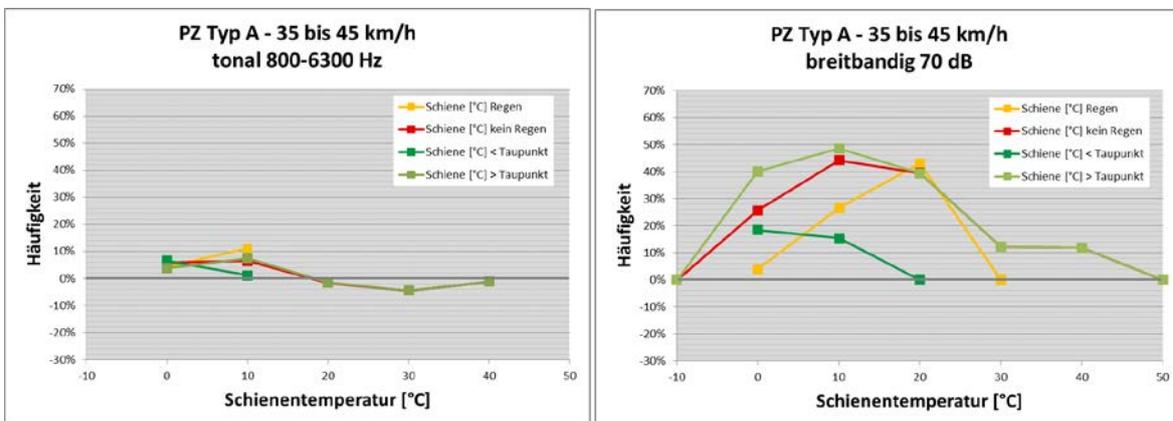


Abb. 6-66: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

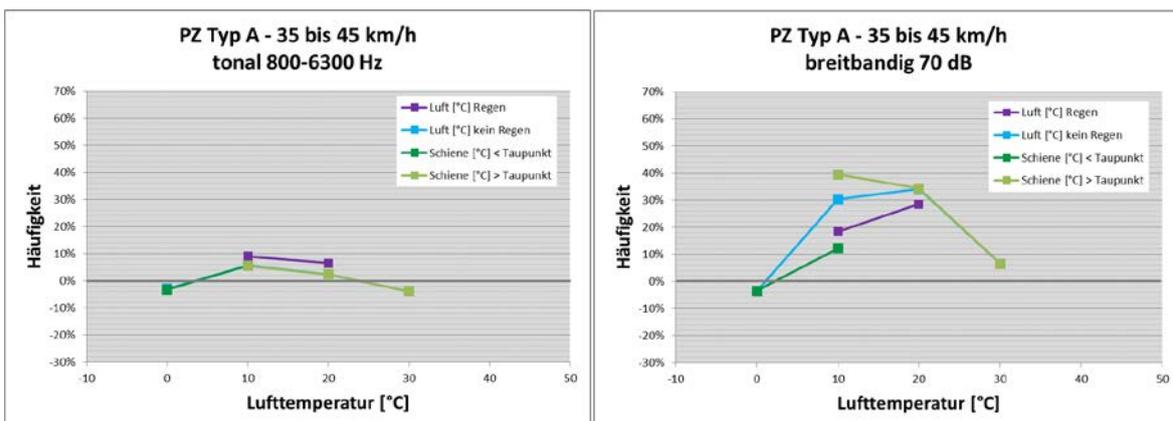


Abb. 6-67: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

In Abb. 6-67 nimmt die Differenz der Auffälligkeiten ab 10 °C mit steigender Lufttemperatur ab. Die Konditionierung weist eine geringere Wirkung für Schienentemperaturen unter dem Taupunkt liegen auf.

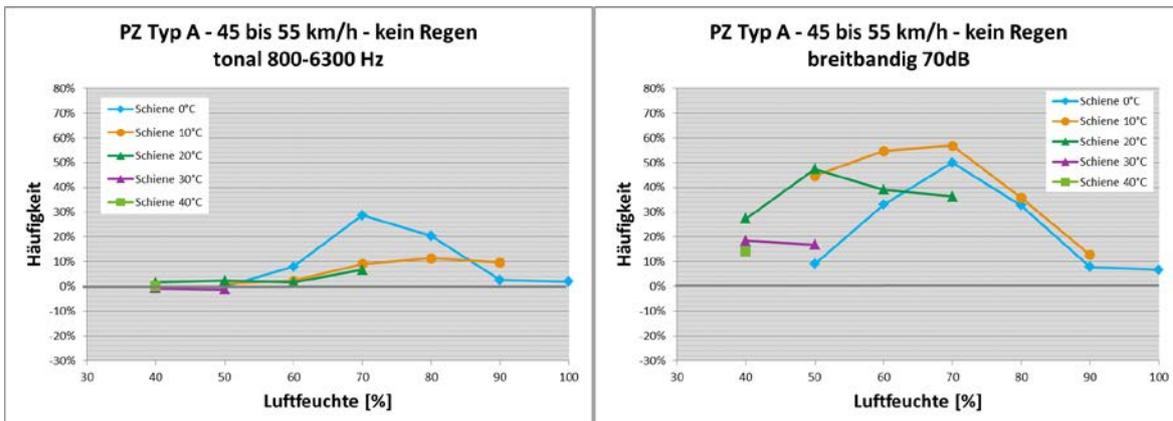


Abb. 6-68: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht-konditioniert abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

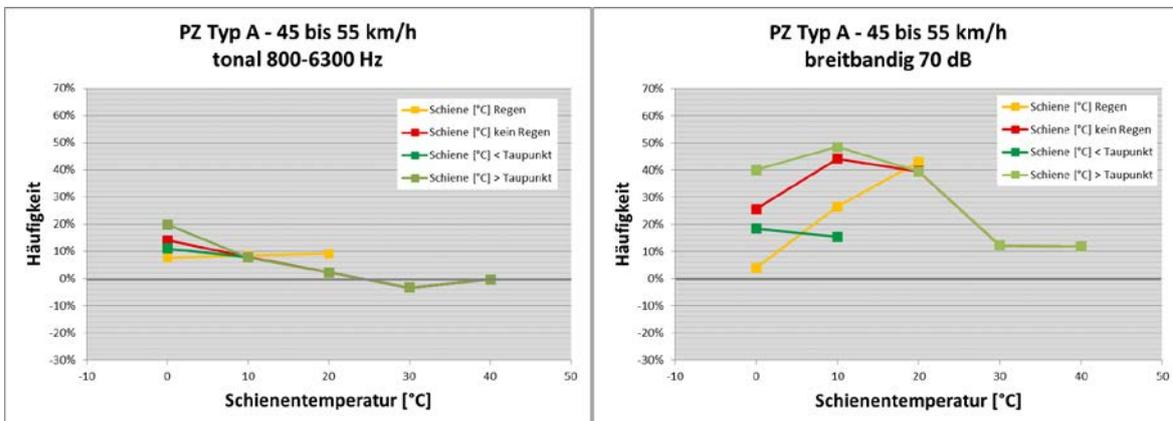


Abb. 6-69: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

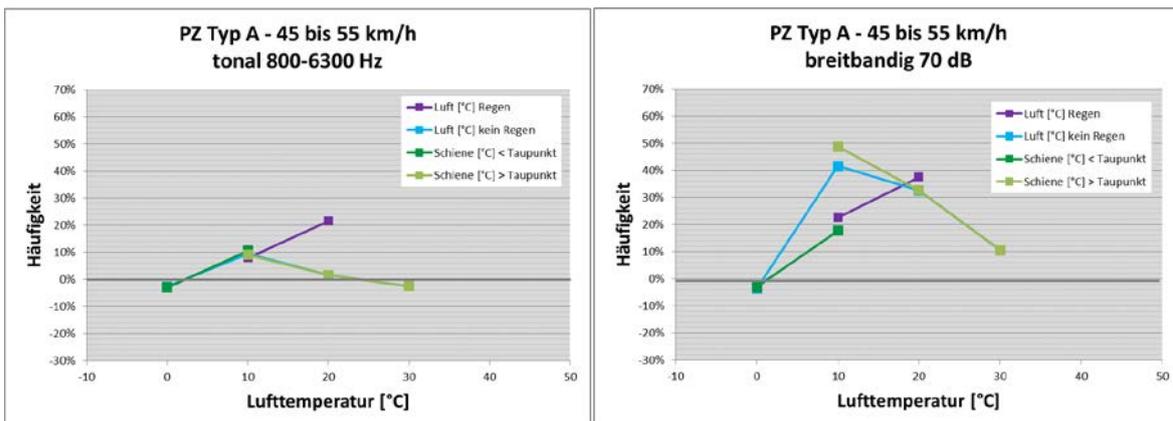


Abb. 6-70: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

Abb. 6-68 zeigt den Prozentpunkt der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit für Schienentemperaturen von 0 °C bis 40 °C. Der

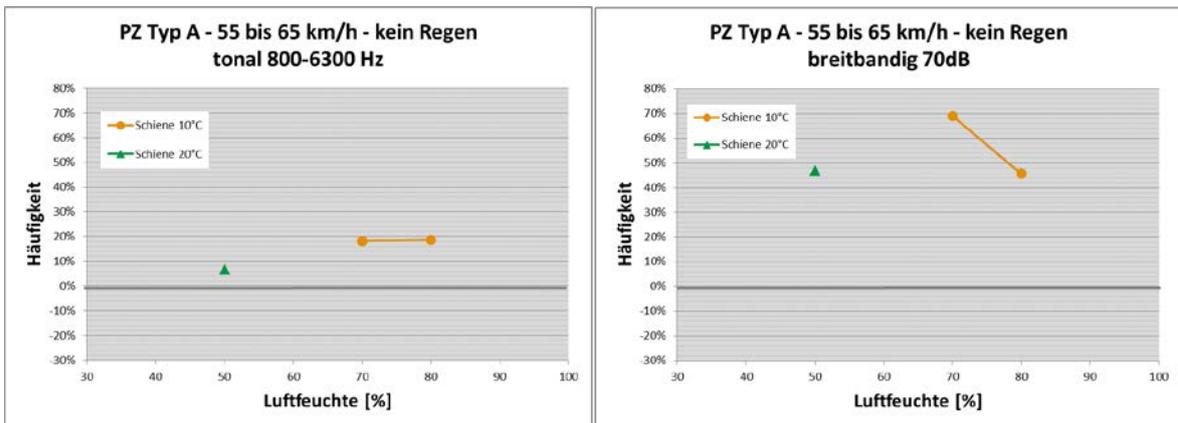


Abb. 6-71: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht-konditioniert abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

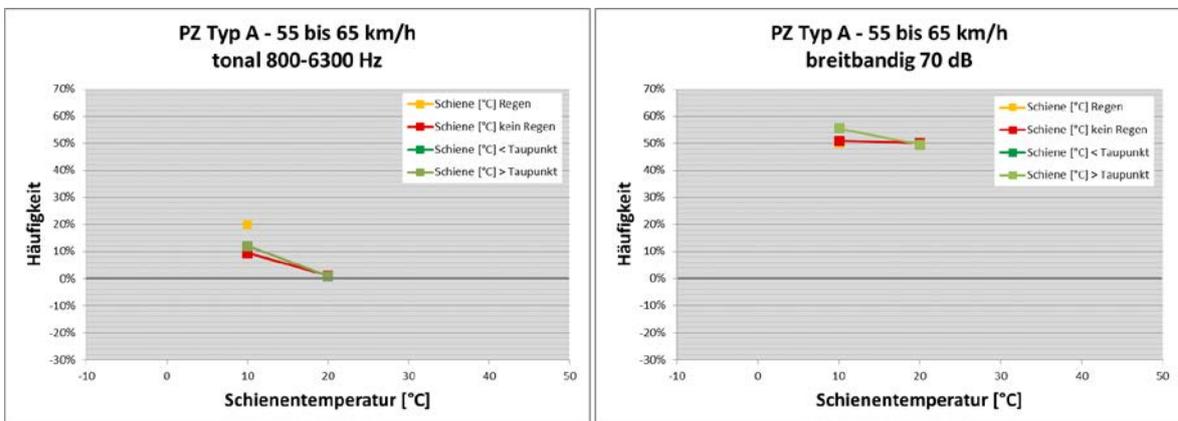


Abb. 6-72: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Schientemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

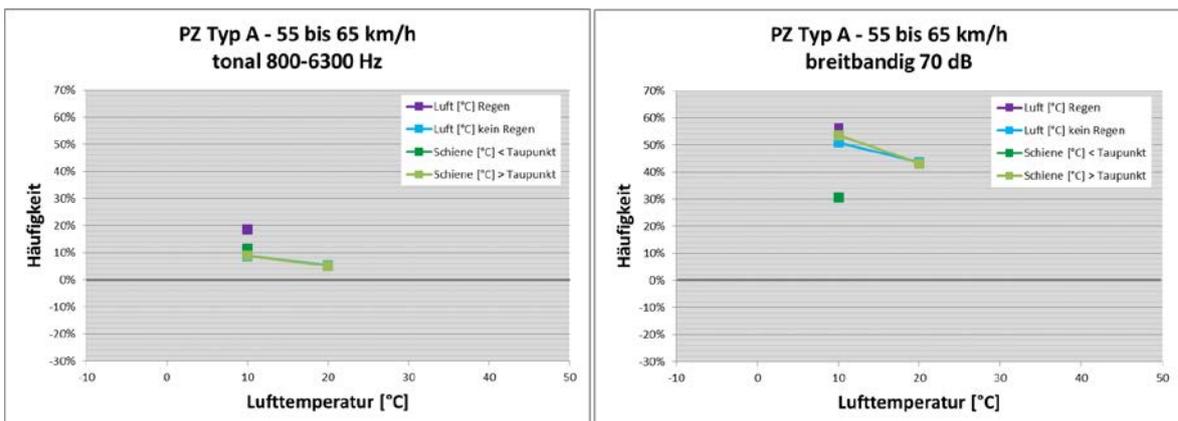


Abb. 6-73: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

Prozentpunkt nimmt mit steigender Schientemperatur als auch steigender Luftfeuchte ab.

In Abb. 6-69 und Abb. 6-70 ist der Prozentpunkt der Häufigkeit, abhängig von der Schiene- bzw. Lufttemperatur dargestellt. In Abhängigkeit der Schienentemperatur nimmt dieser mit steigender Temperatur ab. In Abhängigkeit der Lufttemperatur nimmt die Differenz zuerst zu und dann ab 10 °C mit steigender Lufttemperatur ab.

Geschwindigkeitsbereich 55 bis 65 km/h

Für die Zugkategorie PZ TYP A ist für die Geschwindigkeit 55-65 km/h nur eine geringe Anzahl an Daten vorhanden, die in Abb. 6-71, Abb. 6-72 und Abb. 6-73 ersichtlich ist. Wie bei den geringeren Geschwindigkeiten ist hier erkennbar, dass der Prozentpunkt tendenziell mit steigender Temperatur als auch Luftfeuchtigkeit abnimmt.

Für die Zugkategorie PZ TYP A lässt sich zusammenfassend sagen, dass durch die Konditionierung der Schienen die Auffälligkeiten reduziert werden können. Der Prozentpunkt nimmt mit steigender Temperatur und Luftfeuchtigkeit ab.

6.2.6. Vergleich der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten in MQ1 für den Zeitraum mit deaktivierter und den Zeitraum mit aktivierter SKK Kat. PZ TYP B

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

Es sind nur wenige Daten der Kategorie PZ TYP B für Geschwindigkeiten 35-45 km/h vorhanden, wodurch auf die Darstellung der Differenz der Häufigkeit der Auffälligkeiten abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen verzichtet wurde. In Abb. 6-74 und Abb. 6-75 wurde mit den vorhandenen Daten der Prozentpunkt für die Schienen- bzw. Lufttemperatur aufgetragen. Betrachtet man, die Auftrittshäufigkeit in Abhängigkeit der Schienentemperatur ist erkennbar, dass bei den tonalen Auffälligkeiten (800 Hz-6,3 kHz) der Prozentpunkt mit steigender Temperatur abnimmt. Im Vergleich dazu nimmt der Prozentpunkt für die breitbandigen Auffälligkeiten mit steigender Temperatur zu.

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

In Abb. 6-76 ist der Prozentpunkt der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit für Schienentemperaturen von 0 °C bis 20 °C dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Prozentpunkte für die einzelnen Schienentemperaturen stark voneinander abweichen und sowohl für die tonalen als auch breitbandigen Auffälligkeiten keinen vergleichbaren Verlauf liefern.

In Abb. 6-77 und Abb. 6-78 sind die Differenzen der Häufigkeiten der Auffälligkeiten am Messquerschnitt MQ1 (konditioniert und nicht-konditioniert) abhängig von der Schienen-

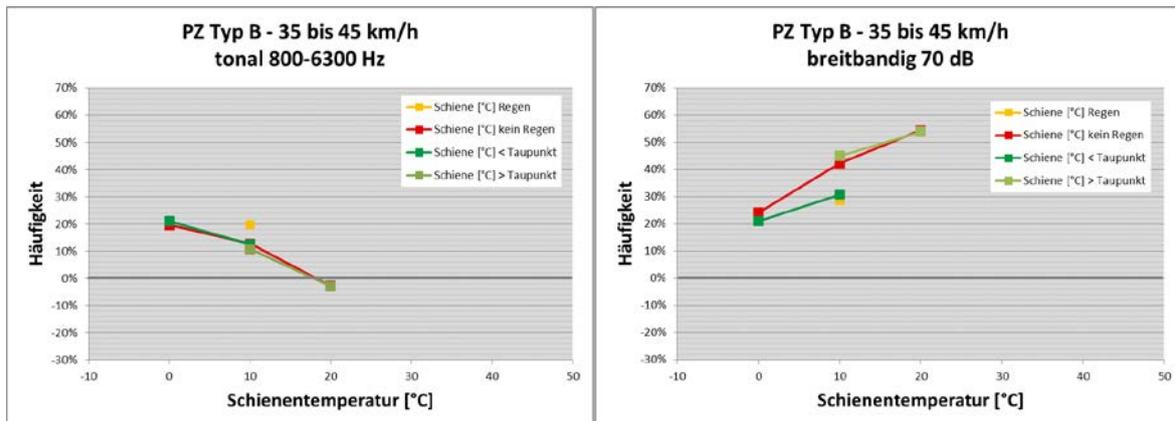


Abb. 6-74: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

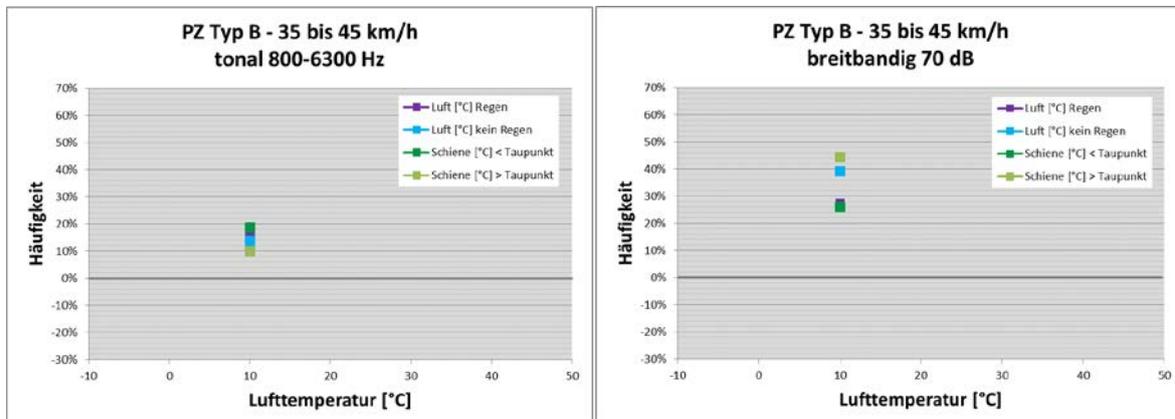


Abb. 6-75: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

bzw. Lufttemperatur dargestellt. Durch die Konditionierung konnten bei den tonalen Auffälligkeiten (800 Hz-6,3 kHz) bis zu 30 % weniger und bei den breitbandigen bis zu 70 % bzw. 50 % weniger an Auffälligkeiten beim konditionierten MQ1 Abschnitt detektiert werden.

Insgesamt sind für die Zugkategorie PZ TYP B für die Betrachtung des Messquerschnittes MQ1 im konditionierten als auch nicht-konditionierten Zustand wenige Daten vorhanden, wodurch keine Ergebnisdarstellungen für die Geschwindigkeit 55-65 km/h erfolgt. Insgesamt kann auch hier die Aussage getroffen werden, dass unabhängig von der Geschwindigkeit der Züge durch die Schienenkopfkonditionierung weniger Auffälligkeiten detektiert werden konnten.

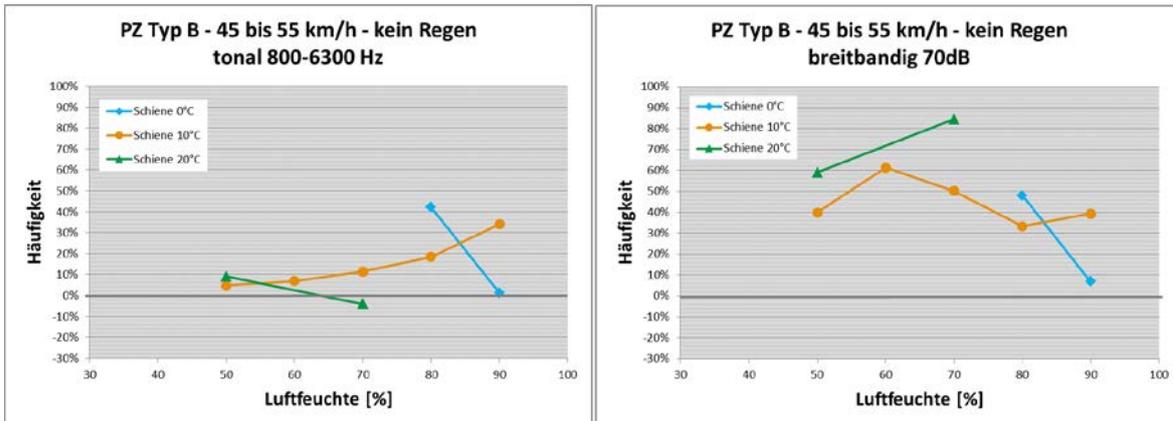


Abb. 6-76: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht-konditioniert abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

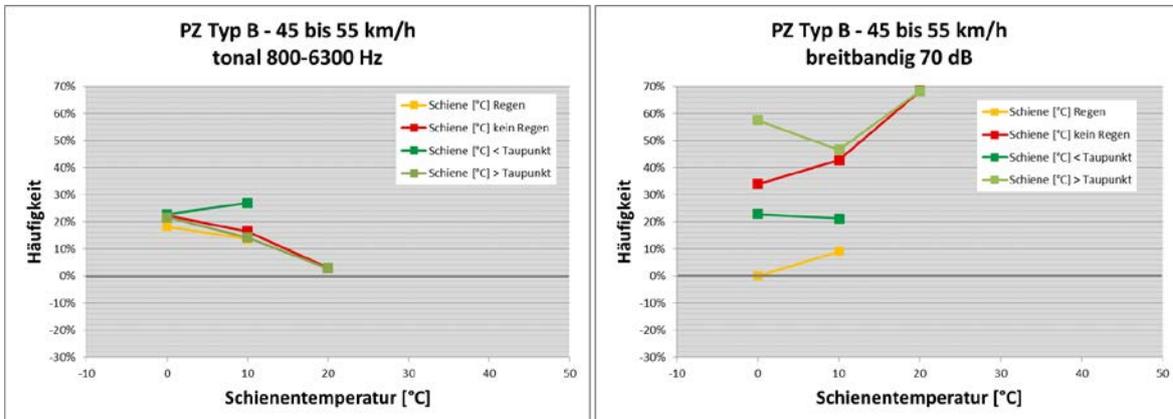


Abb. 6-77: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

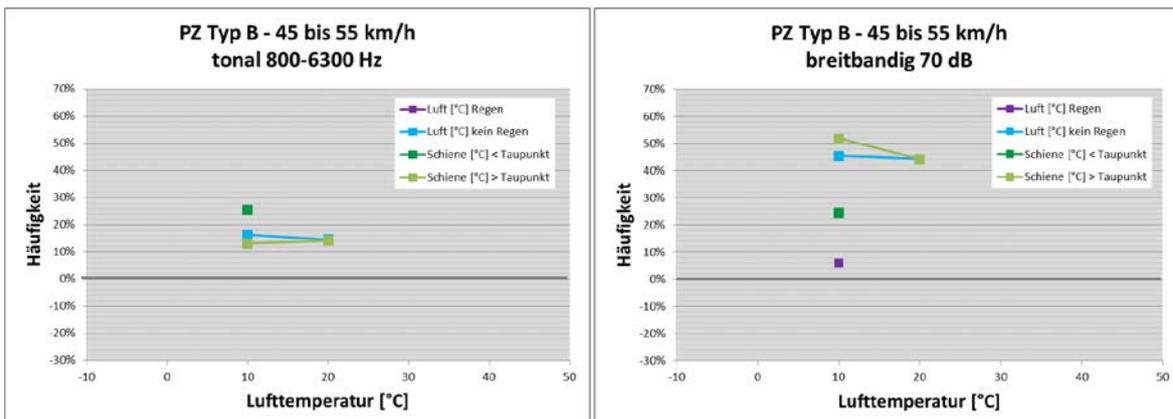


Abb. 6-78: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

6.2.7. Differenz des abgeschätzten, A-bewerteten längenbezogenen Schalleistungspegel MQ1 zwischen dem Zeitraum mit deaktivierter und dem Zeitraum mit aktivierter SKK Kategorie PZ TYP A

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

In Abb. 6-79 ist erkennbar, dass die Pegelreduktion in MQ1 zwischen der Phase mit aktiver SKK im Vergleich zur Phase mit inaktiver SKK für „alle Fahrten“ mit steigender Luftfeuchte abnimmt und bei Temperaturen >20 °C keine bzw. bereits höhere Pegel liefert.

Sowohl für die unauffälligen Fahrten als auch die auffälligen Fahrten ergeben sich keine bzw. nur geringfügige Pegelreduktionen.

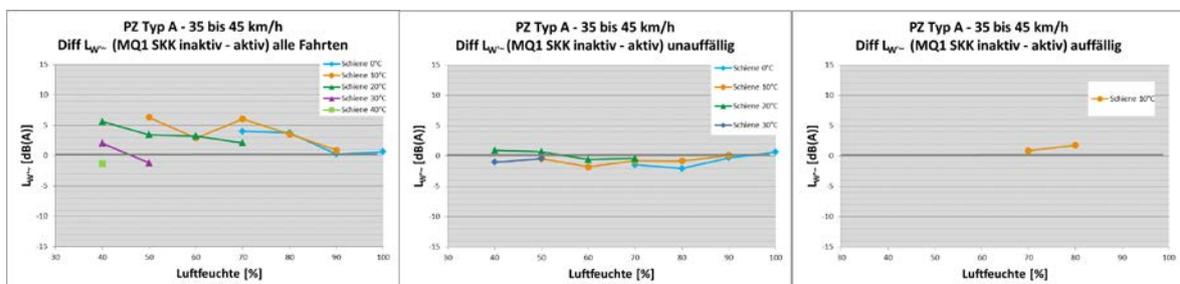


Abb. 6-79: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Luftfeuchte, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

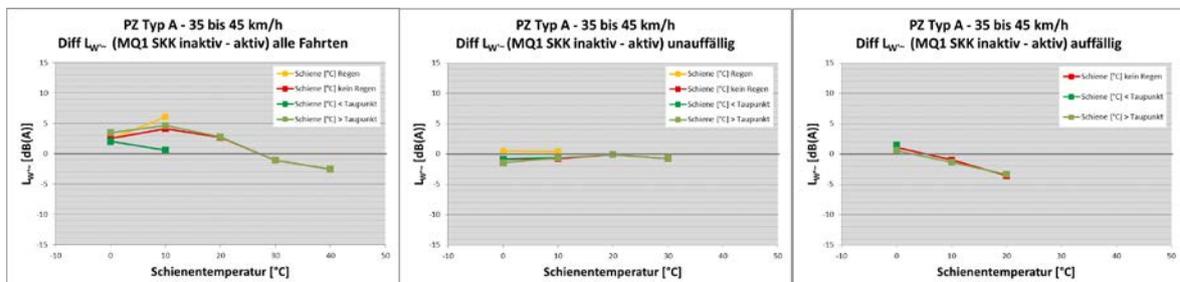


Abb. 6-80: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

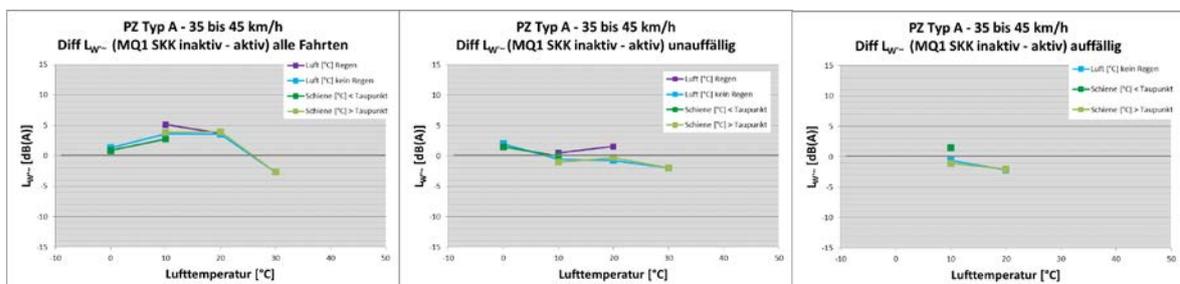


Abb. 6-81: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

In Abb. 6-80 ist erkennbar, dass für Temperaturen $<20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis zu 5 dB Pegelreduktion für „alle Fahrten“ erzielt werden. Bei den unauffälligen Fahrten sind die Ergebnisse hingegen durchwegs ident. Während bei den auffälligen bei Temperaturen im Bereich von $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ eher höhere Pegelwerte gemessen wurden.

Abb. 6-81 zeigt einen ähnlichen Verlauf des Schallpegels für unterschiedliche Lufttemperaturen. Auch hier zeigt vor allem die Gruppe „alle Fahrten“ Pegelreduktionen von bis zu 5 dB. Sowohl bei den unauffälligen Fahrten als auch den auffälligen Fahrten sind die Reduktionen gering bzw. zeigen sich sogar höhere Pegelwerte.

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

In Abb. 6-82 sind die Pegelreduktionen für unterschiedlichen Prozentbereiche der Luftfeuchte angegeben. Für alle Fahrten sind wieder Pegelreduktionen von bis zu 5 dB

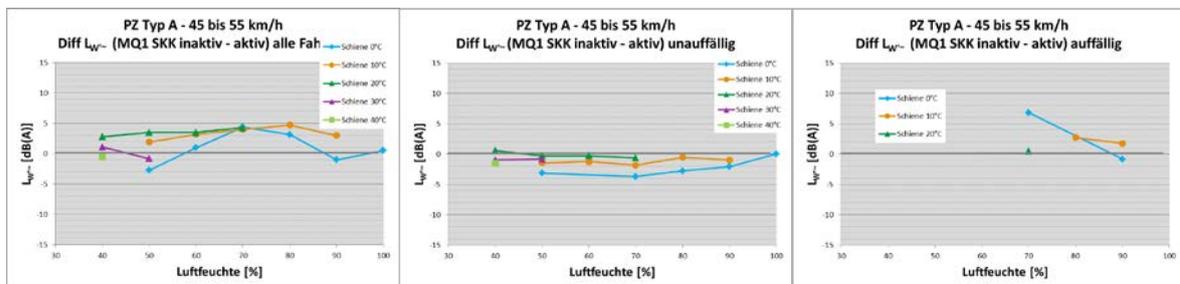


Abb. 6-82: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

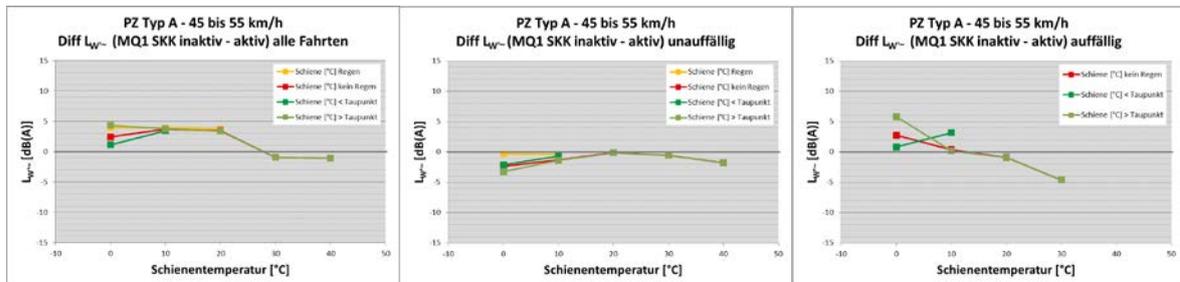


Abb. 6-83: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Luftfeuchte, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

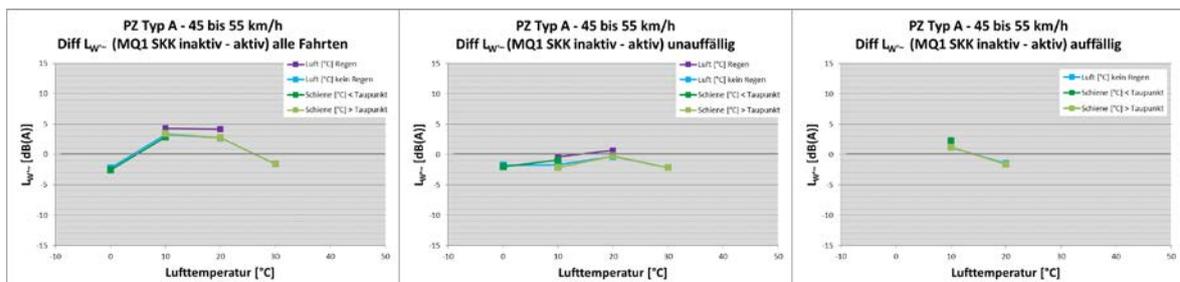


Abb. 6-84: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

erkennbar. Während für die Fahrten bei Schienentemperaturen von 0 °C bis 20 °C relativ konstante Pegelreduktionen erkennbar sind, ist bei Fahrten <0 °C vor allem der Bereich um 60-80 % Luftfeuchte jener mit der höchsten Pegelreduktion. Temperaturen über 20 °C zeigen keine Differenzen. Bei den unauffälligen Fahrten zeigen sich durchwegs höhere Pegelwerte, während die Ergebnisse für auffällige Fahrten geringer Werte liefern.

In Abb. 6-83 erkennt man für alle Fahrten sowie für die auffälligen Fahrten eine sinkende Wirkung mit steigender Schienentemperatur. Für die unauffälligen Fahrten ist jedoch eher ein Anstieg erkennbar, wobei hier durchwegs negative Werte und damit Pegelerhöhungen durch die SKK erkennbar sind.

Abb. 6-84 zeigt einen ähnlichen Verlauf des Schallpegels für unterschiedliche Lufttemperaturen. Auch hier zeigt vor allem die Gruppe „alle Fahrten“ Pegelreduktionen von bis zu 5 dB. Sowohl bei den unauffälligen Fahrten als auch den auffälligen Fahrten sind die Reduktionen gering bzw. zeigen sich sogar höhere Pegelwerte.

Geschwindigkeitsbereich 55 bis 65 km/h

In Abb. 6-85 sind Pegelreduktionen für alle Fahrten und für unauffällige Fahrten dargestellt. Für die auffälligen Fahrten war die gemessene Anzahl zu gering (<10 Fahrten) je Ausprägung um diese sinnvoll gegenüberzustellen. Die Ergebnisse zeigen für alle Fahrten leichte Pegelreduktionen während die unauffälligen Fahrten mit SKK leicht höhere Werte liefern.

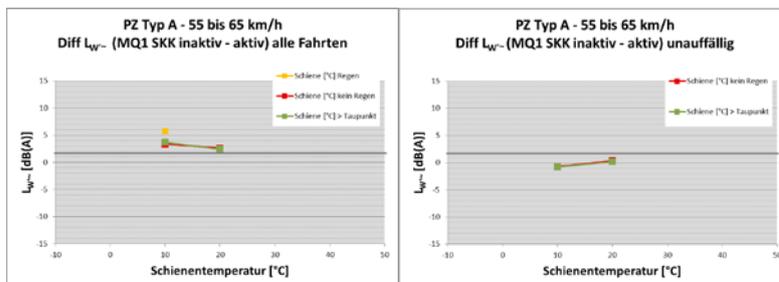


Abb. 6-85: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

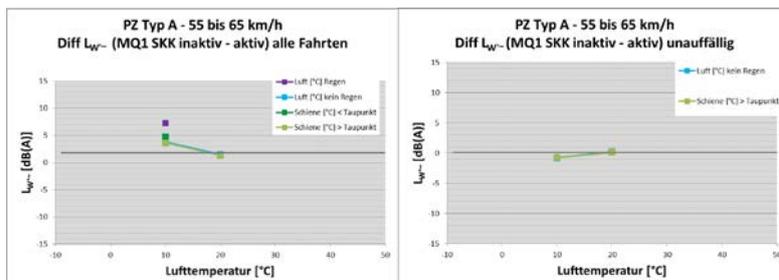


Abb. 6-86: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

In Abb. 6-86 sind Pegelreduktionen für die Lufttemperatur dargestellt. Die Ergebnisse sind ähnlich zu den Ergebnissen bei Schienentemperatur, leichte Pegelreduktion bei allen Fahrten und nahezu idente Werte für unauffällige Fahrten.

6.2.8. Differenz der abgeschätzte A-bewerteten längenbezogenen Schalleistungspegel MQ1 zwischen dem Zeitraum mit deaktivierter und dem Zeitraum mit aktivierter SKK Kategorie PZ TYP B

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

In Abb. 6-87 sind die Pegelreduktionen für unterschiedlichen Prozentbereiche der Luftfeuchte angegeben. Man erkennt sowohl bei allen Fahrten als auch bei den unauffälligen Fahrten Pegelreduktionen von bis zu 3dB. Bei allen Fahrten zeigt sich ein

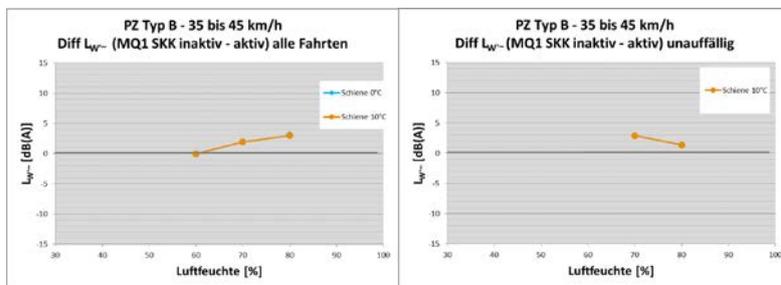


Abb. 6-87: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Luftfeuchte, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

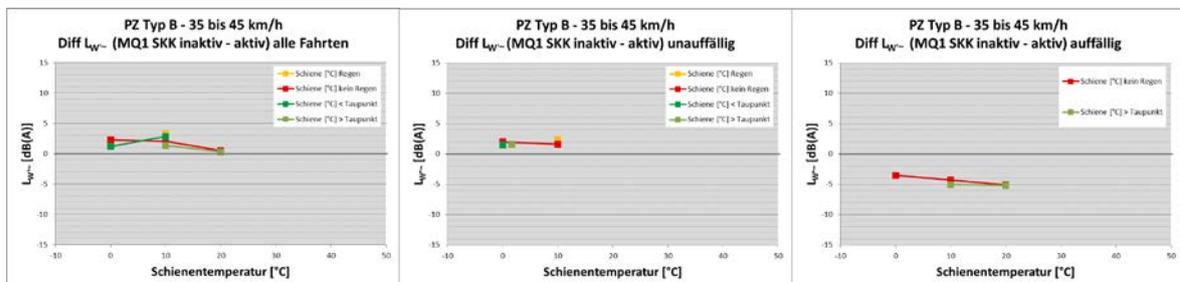


Abb. 6-88: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

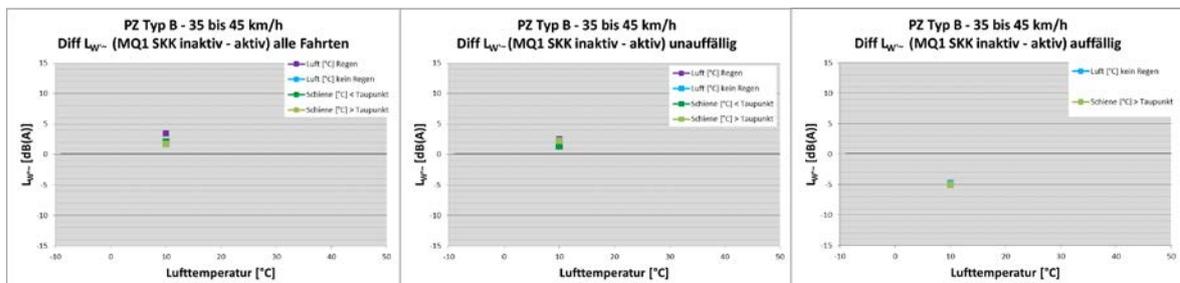


Abb. 6-89: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

Anstieg der Reduktionen mit steigender Luftfeuchte, bei den unauffälligen ist eher ein Abfall erkennbar. Jedoch ist die Zahl der Fahrten bei dieser Geschwindigkeit eher gering. Für die Fahrten mit Auffälligkeiten konnte keine ausreichende Anzahl (<10) Fahrten erfasst werden.

In Abb. 6-88 sind die Pegelreduktionen bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Es zeigen sich leichte Pegelreduktionen bei allen Fahrten sowie bei unauffälligen Fahrten von bis zu 2,5 dB. Bei den auffälligen Fahrten sind Pegelerhöhungen von rund 5 dB erkennbar.

In Abb. 6-89 sind die Pegelreduktionen bei unterschiedlichen Lufttemperaturen dargestellt. Obwohl die Datenlage eher gering ist, ist die Tendenz mit den Ergebnissen aufgeteilt nach Schientemperatur ähnlich.

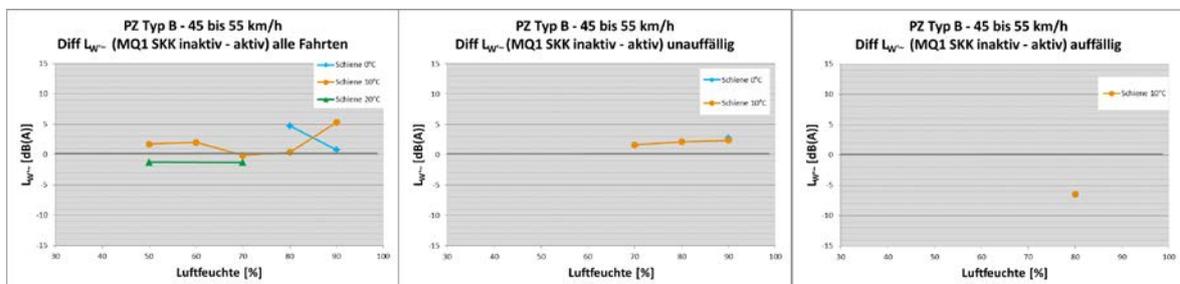


Abb. 6-90: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Luftfeuchte, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

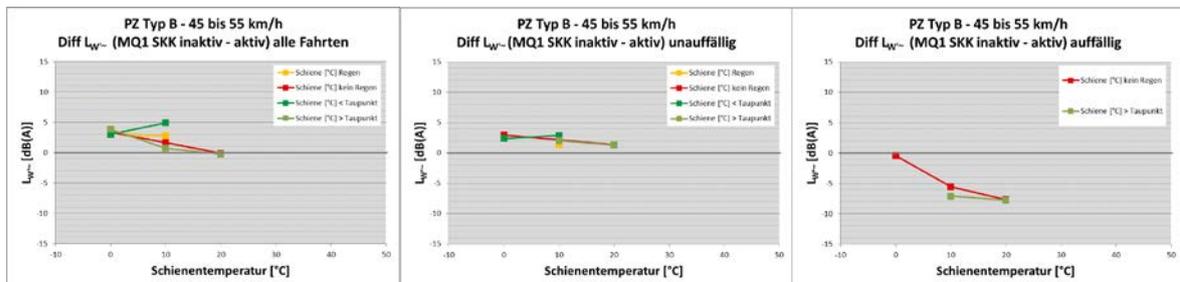


Abb. 6-91: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Schientemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

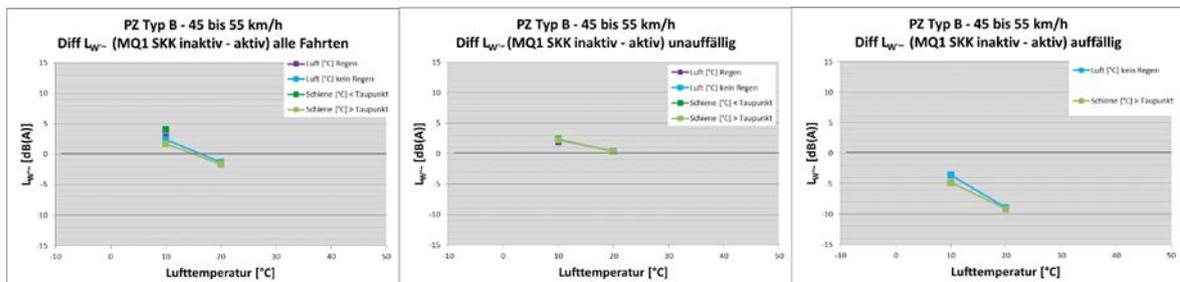


Abb. 6-92: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 konditioniert und nicht konditioniert in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

In Abb. 6-90 sind die Pegelreduktionen für unterschiedlichen Prozentbereiche der Luftfeuchte angegeben. Man erkennt sowohl bei allen Fahrten als auch bei den unauffälligen Fahrten Pegelreduktionen von bis zu 5 dB. Lediglich bei Temperaturen im Bereich von $>10\text{ °C}$ sind leichte Pegelerhöhungen feststellbar. Die auffälligen Fahrten zeigen wieder Pegelerhöhungen um 5 dB.

In Abb. 6-91 sind die Pegelreduktionen für unterschiedlichen Schienentemperaturen angegeben. Für alle Fahrten sowie für unauffällige Fahrten zeigen sich sinkende Reduktionen mit steigender Temperatur. Die auffälligen Fahrten zeigen wieder erhöhte Pegelwerte.

Abb. 6-92 zeigt wieder die Ergebnisse für die Lufttemperatur. Auch hier gilt, dass mit steigender Temperatur die Wirkung der SKK nachlässt. Bei auffälligen Fahrten sind wieder deutliche Pegelerhöhungen feststellbar.

6.2.9. Vergleich der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 Kat. PZ TYP A

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

In Abb. 6-93, Abb. 6-94 und Abb. 6-95 ist erkennbar, dass es tendenziell am Messquerschnitt MQ1 unabhängig von der Luftfeuchte oder Temperatur zu häufigeren tonalen als auch breitbandigen Auffälligkeiten kommt als dies beim Messquerschnitt MQ2 der Fall ist. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten kommt es insgesamt zu einem höheren Prozentpunkt als bei den tonalen Auffälligkeiten.

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

In Abb. 6-96 liegt der Prozentpunkt bei den tonalen Auffälligkeiten um die 0 %-Achse – Ausnahme bildet der Verlauf bei Schienentemperatur um 0 °C . Somit ist eine gute Verhaltensübereinstimmung der Messquerschnitte im nicht-konditionierten Zustand für die Zugkategorie PZ TYP A bei 45-55 km/h gegeben. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten kommt es wiederum am MQ1 zu deutlich mehr Auffälligkeiten. Dieses Ergebnis ist auch bei den Differenzen der Häufigkeiten in Abhängigkeit der Temperatur in Abb. 6-97 und Abb. 6-98 ersichtlich.

Geschwindigkeitsbereich 55 bis 65 km/h

In Abb. 6-99 sind die Differenzen der Häufigkeiten der Auffälligkeiten der Messquerschnitte MQ1 (nicht-konditioniert) und MQ2 für Schienentemperaturen von

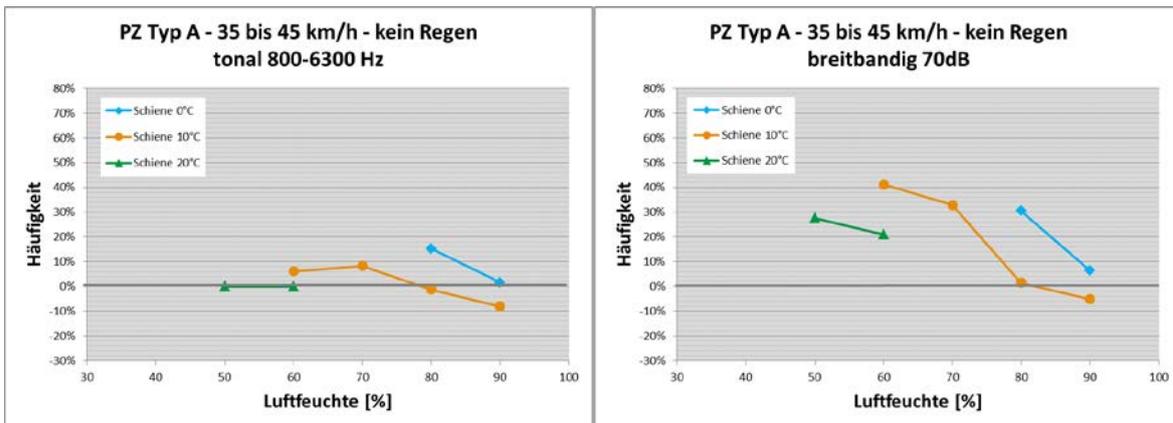


Abb. 6-93: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 nicht-konditioniert und MQ2 abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

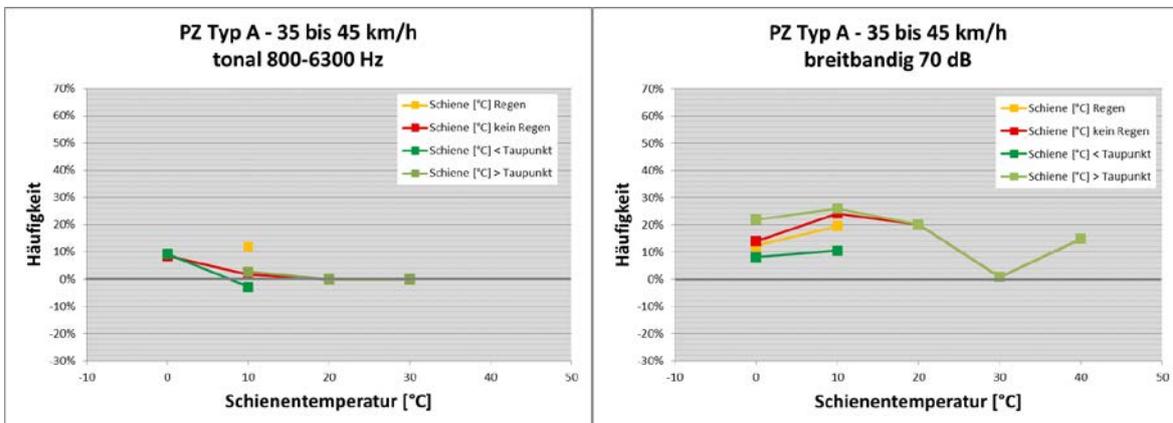


Abb. 6-94: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 nicht-konditioniert und MQ2 in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

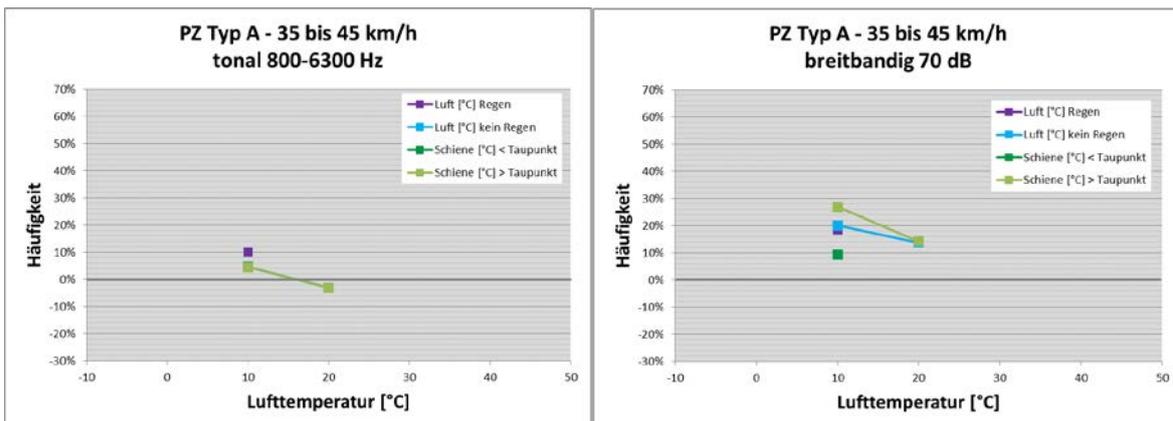


Abb. 6-95: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 nicht-konditioniert und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

10 °C bis 20 °C abhängig von der Luftfeuchtigkeit dargestellt. Aufgrund zu geringer Daten kommt es zu keinem aussagekräftigen Ergebnis.

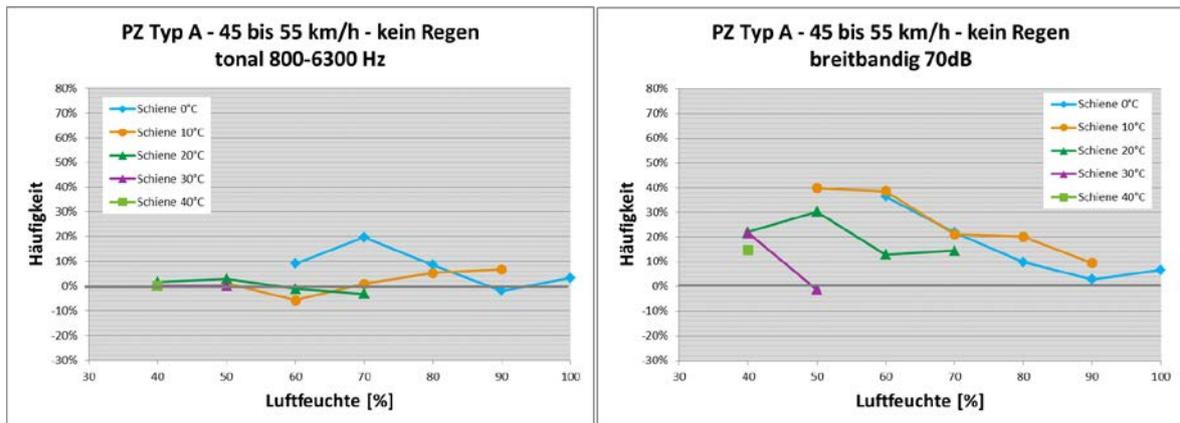


Abb. 6-96: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 nicht-konditioniert und MQ2 abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

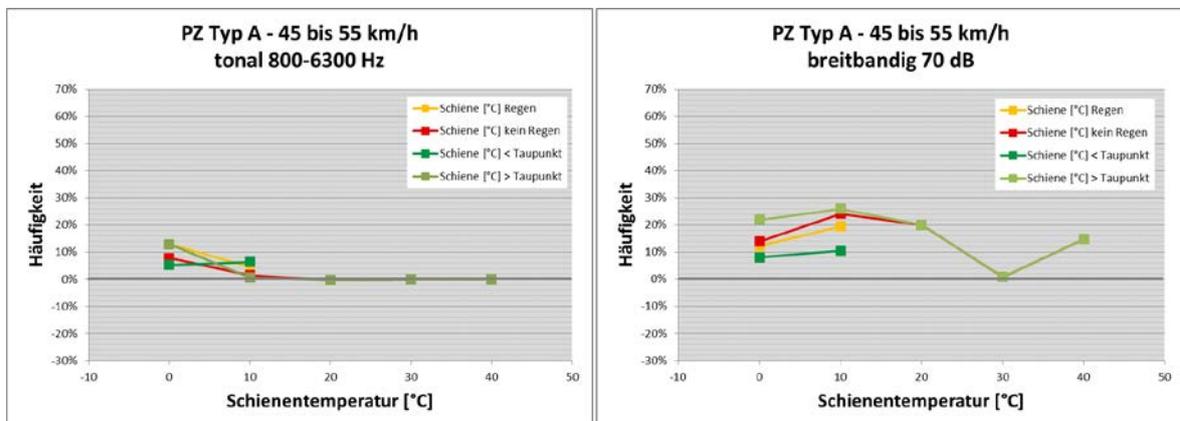


Abb. 6-97: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 nicht-konditioniert und MQ2 in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

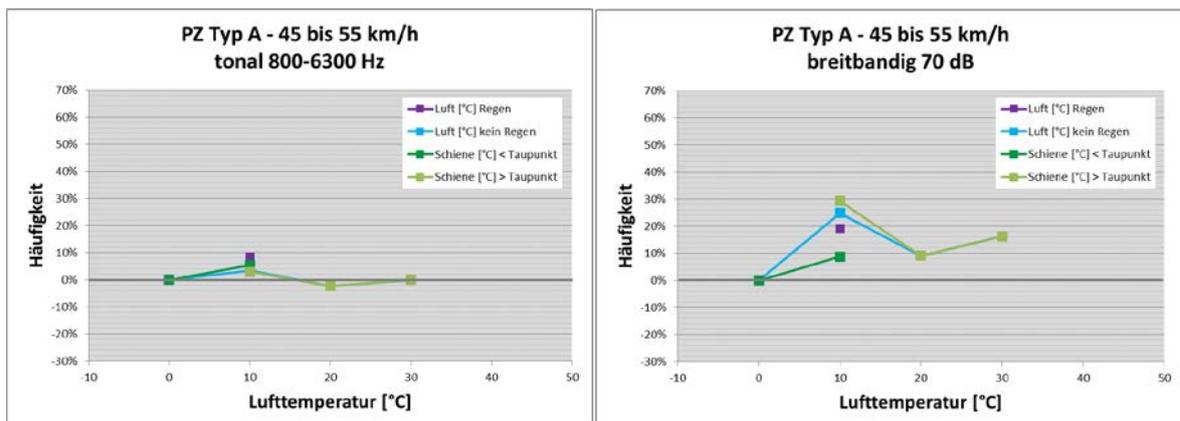


Abb. 6-98: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 nicht-konditioniert und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

In Abb. 6-100 und Abb. 6-101 sind die Prozentpunkte für die Schienen- bzw. Lufttemperatur dargestellt. Bei den tonalen Auffälligkeiten ist ersichtlich, dass bis auf den Zustand Schienen- und Lufttemperatur bei Regen, für welchen wenige Daten vorhanden

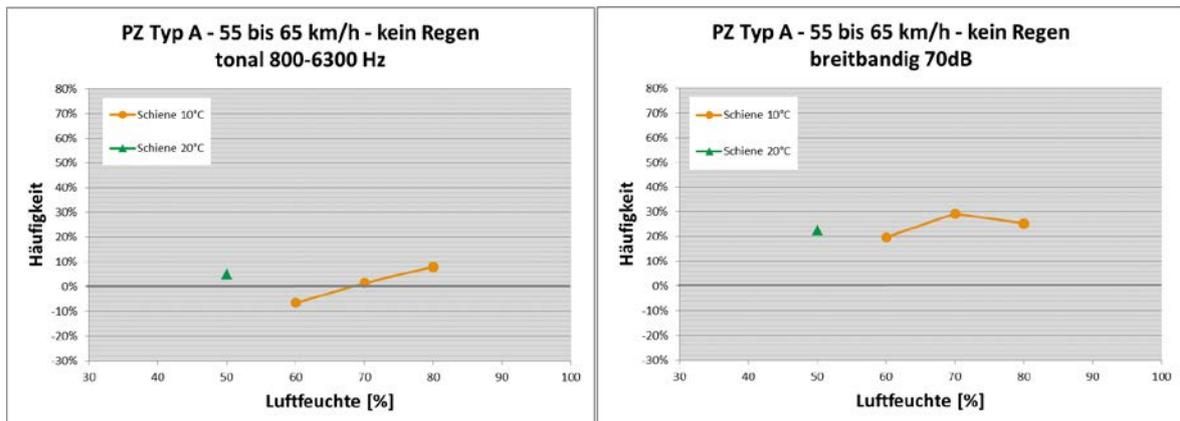


Abb. 6-99: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 nicht-konditioniert und MQ2 abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schienentemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

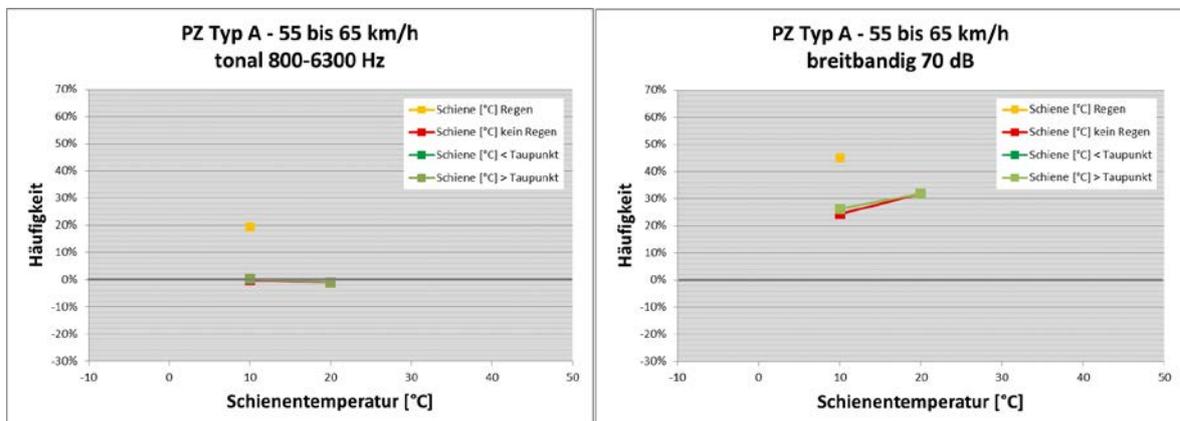


Abb. 6-100: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 nicht-konditioniert und MQ2 in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

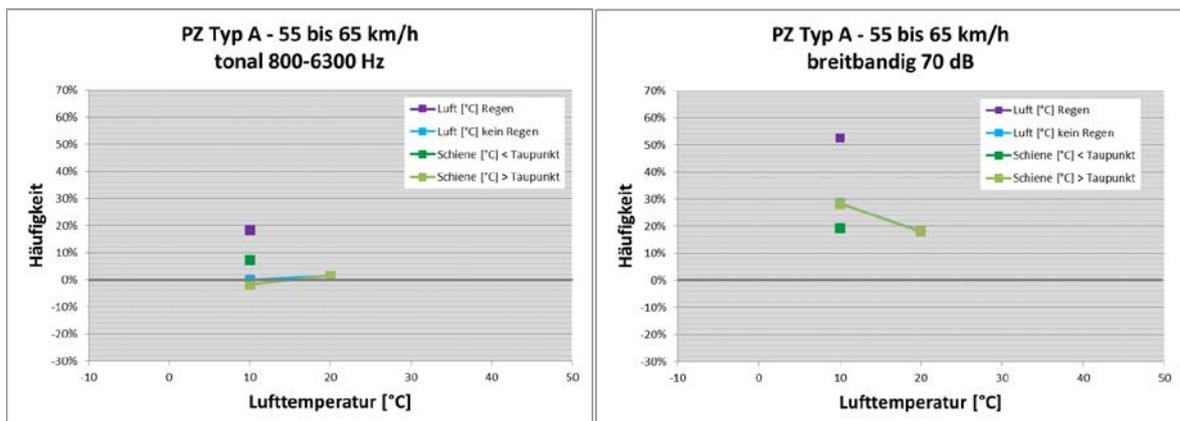


Abb. 6-101: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 nicht-konditioniert und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

sind, die beiden Messquerschnitte akustisch betrachtet identes Verhalten aufweisen. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten kommt es wiederum beim MQ1 zu deutlich mehr Auffälligkeiten als beim MQ2.

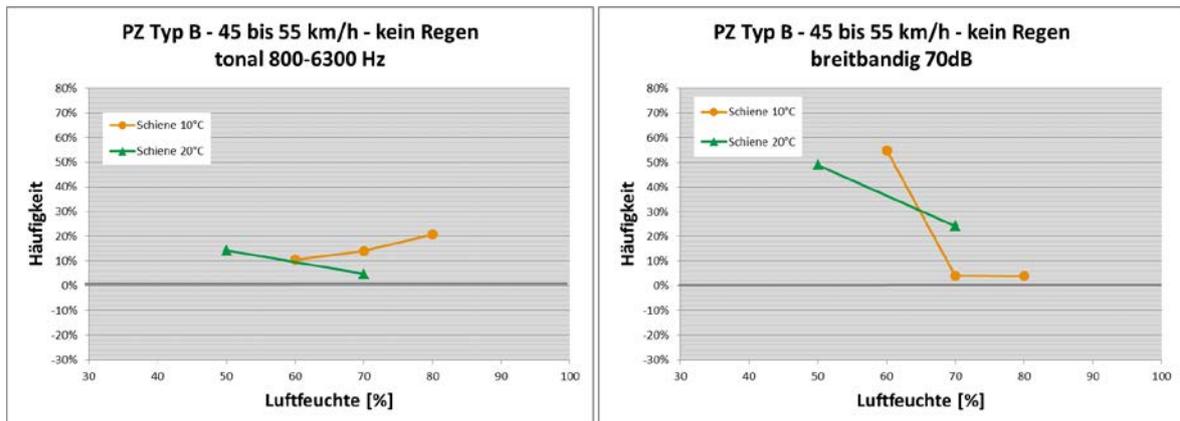


Abb. 6-102: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 nicht-konditioniert und MQ2 abhängig von der Luftfeuchtigkeit für unterschiedliche Schientemperaturen für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

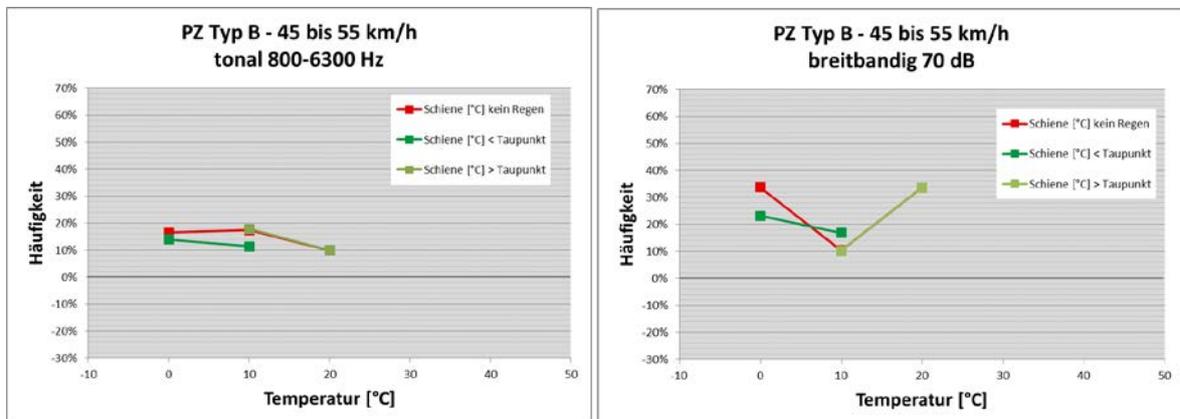


Abb. 6-103: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 nicht-konditioniert und MQ2 in Abhängigkeit der Schientemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

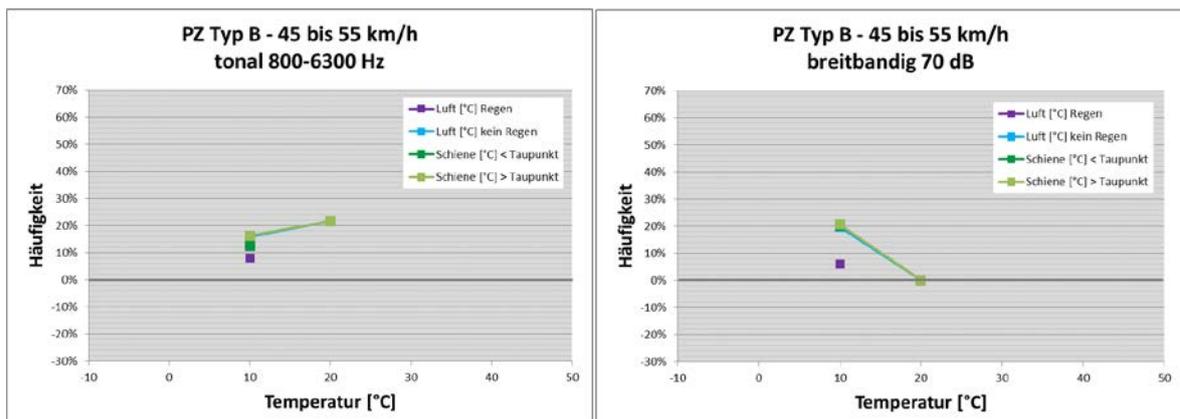


Abb. 6-104: Differenz der Häufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 nicht-konditioniert und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

Unabhängig von der Geschwindigkeit der Züge ist anzumerken, dass es beim Messquerschnitt MQ1 tendenziell zu mehr breitbandigen Auffälligkeiten kommt. In Bezug auf tonale Auffälligkeiten sind die beiden Messquerschnitte miteinander vergleichbar.

6.2.10. Vergleich der Auftrittshäufigkeit von Auffälligkeiten zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 Kat. PZ TYP B

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

In Abb. 6-102 sind die Differenzen der Häufigkeiten der Auffälligkeiten der Messquerschnitte MQ1 (nicht-konditioniert) und MQ2 für Schienentemperaturen von 10 °C bis 20 °C abhängig von der Luftfeuchtigkeit dargestellt. Daran ist erkennbar, dass tendenziell die Auffälligkeiten am Messquerschnitt MQ1 höher sind und aufgrund der geringen Datenanzahl, auch keine auf die Temperatur oder Luftfeuchte bezogene Aussage getroffen werden kann.

In Abb. 6-103 und Abb. 6-104 ist bei den tonalen (800 Hz-6,3 kHz) und breitbandigen Auffälligkeiten erkennbar, dass die Prozentpunkte im positiven Bereich liegen und somit die Auffälligkeiten am MQ1 tendenziell höher sind.

Für die Zugkategorie PZ TYP B sind nur wenige Daten vorhanden, wodurch kein Ergebnis bezogen auf die Temperatur oder Luftfeuchtigkeit getroffen werden kann. Die beiden Messquerschnitte weisen im unkonditionierten Zustand akustisch betrachtet kein übereinstimmendes Verhalten auf.

6.2.11. Differenz des abgeschätzten, A-bewerteten längenbezogenen Schalleistungspegel zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 Kategorie PZ TYP A

Geschwindigkeitsbereich 35 bis 45 km/h

In Abb. 6-105 ist die Pegeldifferenz zwischen dem Messquerschnitt MQ2 und MQ1 während der Phase mit deaktivierter SKK dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl alle Fahrten als auch die unauffälligen Fahrten um bis zu 7dB höhere Werte auf MQ1 liefern als auf dem Referenzabschnitt MQ2. Die Ergebnisse der auffälligen Fahrten sind ident.

Abb. 6-106 zeigt die Ergebnisse bei unterschiedlicher Schienentemperatur. Sowohl alle Fahrten als auch die unauffälligen Fahrten zeigen Differenzen von bis zu 7 dB. Während die unauffälligen Fahrten konstant bei etwa 4 dB Pegelerhöhung auf MQ2 liegen, ist bei allen Fahrten die Schienentemperatur von 0°-10 °C nahezu ident. Auch hier liefern die auffälligen Fahrten ähnliche Werte.

Abb. 6-107 zeigt die Differenz der Schalleistungspegel zwischen dem Messquerschnitt MQ2 und MQ1 während der Phase mit deaktivierter SKK. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl alle Fahrten als auch die unauffälligen Fahrten um etwa 3 dB höhere Werte auf

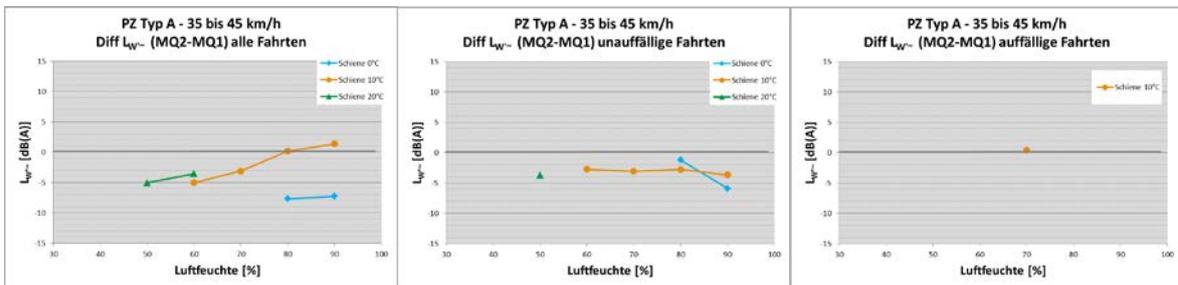


Abb. 6-105: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 in Abhängigkeit der Luftfeuchte, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

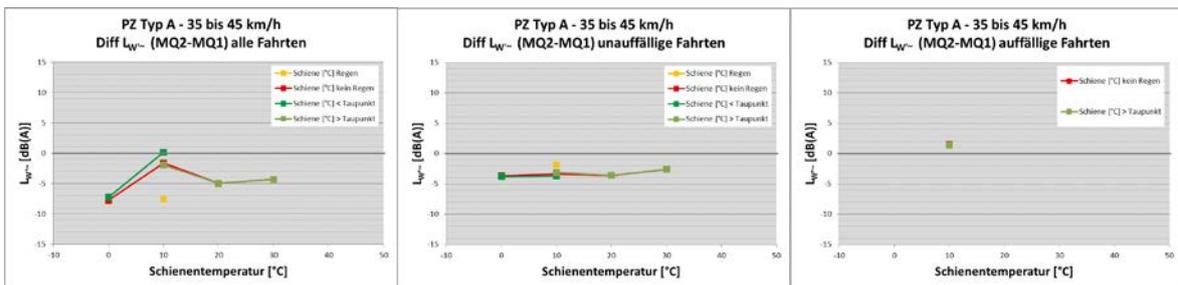


Abb. 6-106: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 in Abhängigkeit der Schienentemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

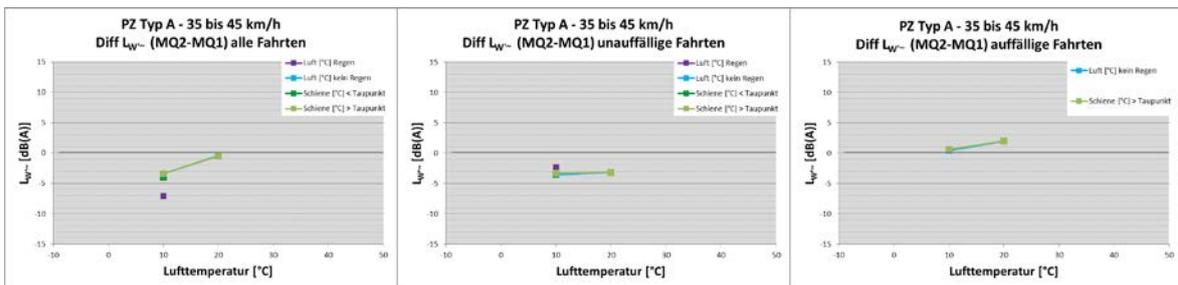


Abb. 6-107: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 35-45 km/h

MQ1 liefern als auf dem Referenzabschnitt MQ2. Die Ergebnisse der auffälligen Fahrten sind nahezu ident.

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

In Abb. 6-108 ist die Pegeldifferenz zwischen dem Messquerschnitt MQ2 und MQ1 während der Phase mit deaktivierter SKK dargestellt. Die Ergebnisse zeigen für alle Fahrten, sowie für die unauffälligen Fahrten Differenz von etwa 2,5 dB, bei den auffälligen Fahrten liegen die Pegel in einem relativ ähnlichen Bereich. Ein Zusammenhang in Bezug auf Luftfeuchte ist nicht erkennbar.

In Abb. 6-109 ist die Pegeldifferenz für unterschiedliche Schienentemperaturen dargestellt. Auch hier zeigt sich eine eher gleichmäßige Verteilung über die Temperatur

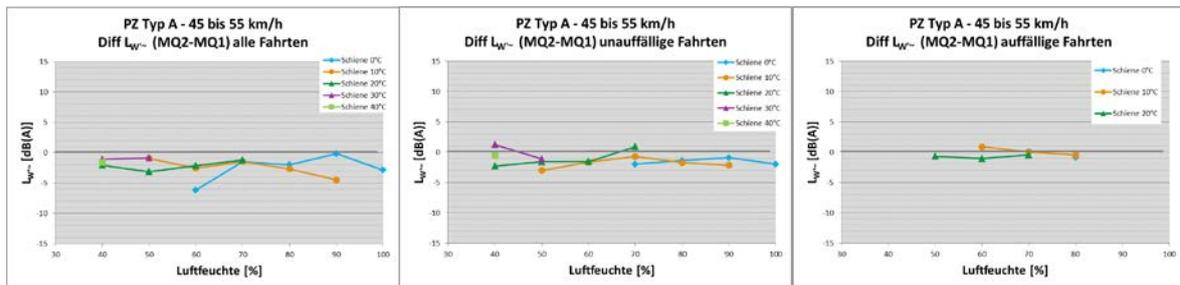


Abb. 6-108: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 in Abhängigkeit der Luftfeuchte, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

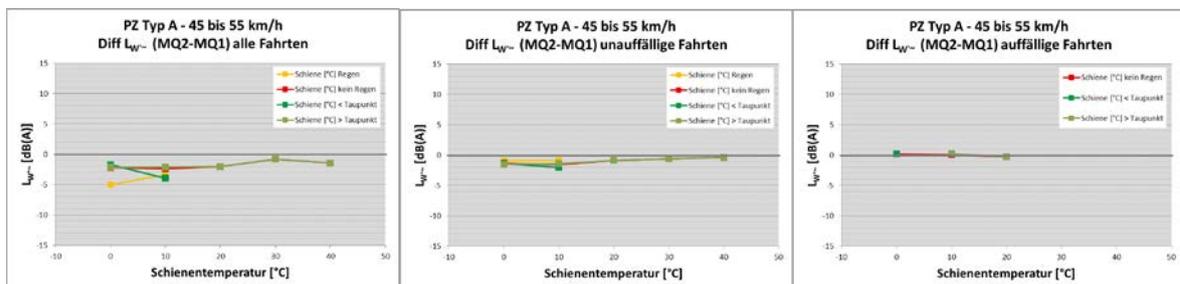


Abb. 6-109: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 in Abhängigkeit der Schientemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

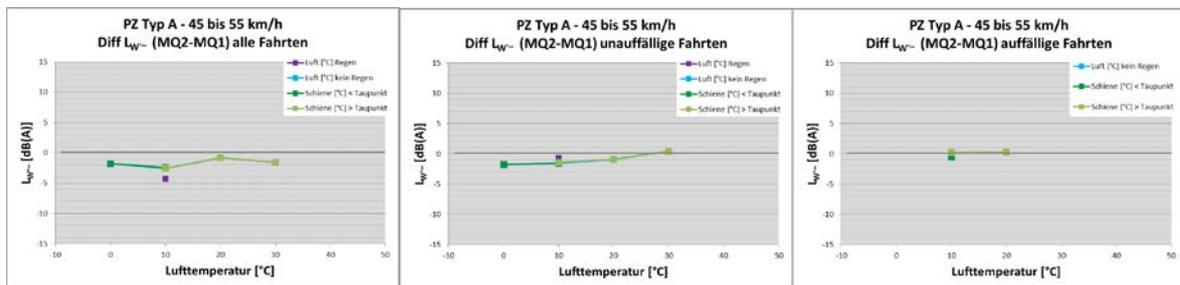


Abb. 6-110: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

mit keinen eindeutigen Tendenzen. Für alle Fahrten und für die unauffälligen Fahrten sind leicht höhere Werte bei MQ2 gemessen worden, bei den auffälligen Fahrten sind die Pegel ident.

In Abb. 6-110 sind die Ergebnisse für die Lufttemperatur dargestellt. Diese zeigen wieder ähnliche Tendenzen wie die Schientemperatur. Für die unauffälligen Fahrten ist jedoch ein leichter Anstieg mit der Lufttemperatur erkennbar.

Geschwindigkeitsbereich 55 bis 65 km/h

In Abb. 6-111 ist die Pegeldifferenz für unterschiedliche Luftfeuchte dargestellt. Die Ergebnisse zeigen relativ ähnliche Werte. Anzahl der unauffälligen Fahrten war so gering das keine sinnvolle Darstellung möglich war.

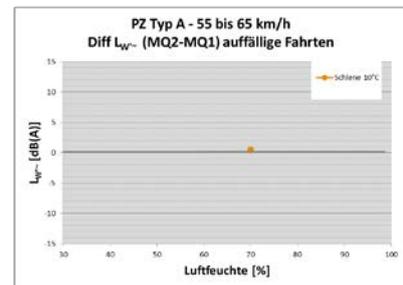
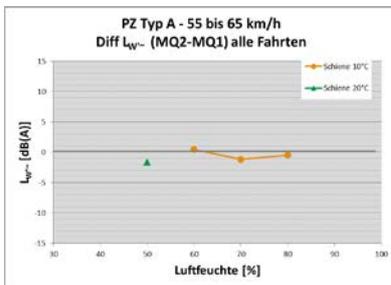


Abb. 6-111: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 in Abhängigkeit der Luftfeuchte, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

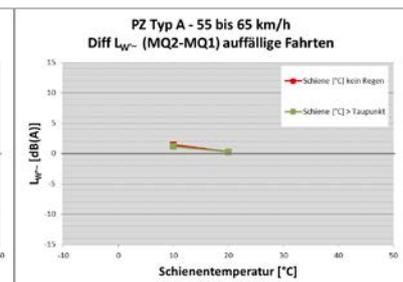
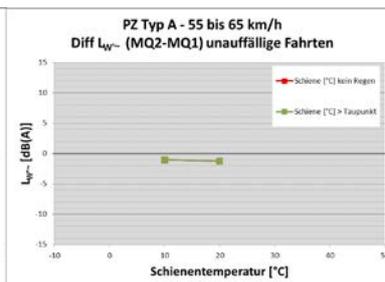
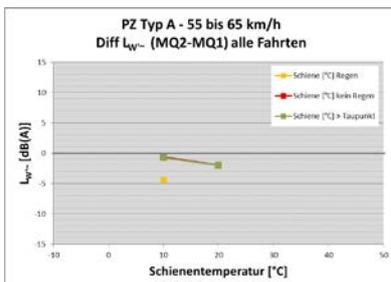


Abb. 6-112: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 in Abhängigkeit der Schientemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

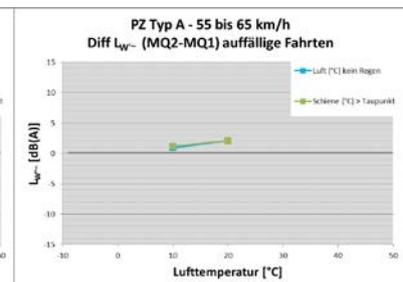
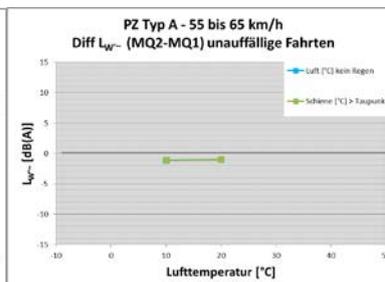
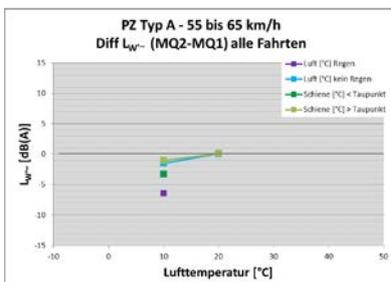


Abb. 6-113: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP A bei einer Geschwindigkeit von 55-65 km/h

In Abb. 6-112 ist die Pegeldifferenz für unterschiedliche Schientemperatur dargestellt. Auch hier sind die Unterschiede zwischen den Messquerschnitten eher gering. Für alle Fahrten und für unauffällige Fahrten ergeben sich etwa 1 dB höhere Werte auf MQ1. Die Ergebnisse für die auffälligen Fahrten sind in einem ähnlichen Bereich.

In Abb. 6-113 ist die Pegeldifferenz für die Lufttemperatur dargestellt. Die Ergebnisse zeigen das gleich Bild wie schon zuvor bei der Schientemperatur, leichte Erhöhungen auf MQ2 für alle und unauffällige Fahrten, und eine leichte geringer Pegelwerte für die auffälligen Fahrten.

6.2.12. Differenz der abgeschätzten A-bewerteten längenbezogenen Schalleistungspegel zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 Kategorie PZ TYP B

In Abb. 6-114 ist die Pegeldifferenz zwischen dem Messquerschnitt MQ2 und MQ1 während der Phase mit deaktivierter SKK dargestellt. Die Ergebnisse zeigen für alle Fahrten, für die unauffälligen als auch die auffälligen Fahrten Differenz von 1 dB bis 5 dB. Ein Zusammenhang in Bezug auf die Luftfeuchte ist nicht erkennbar.

Geschwindigkeitsbereich 45 bis 55 km/h

In Abb. 6-115 ist die Pegeldifferenz für unterschiedliche Schientemperaturen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen wieder für alle drei Einteilungen um etwa 2,5 dB

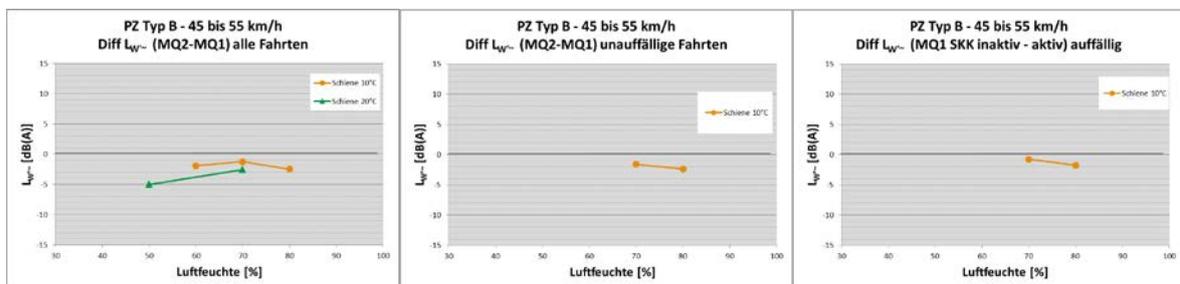


Abb. 6-114: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 in Abhängigkeit der Luftfeuchte, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

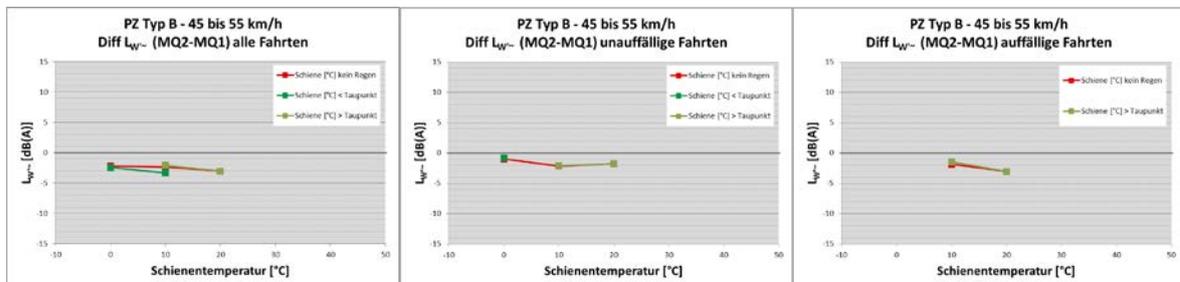


Abb. 6-115: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 in Abhängigkeit der Schientemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

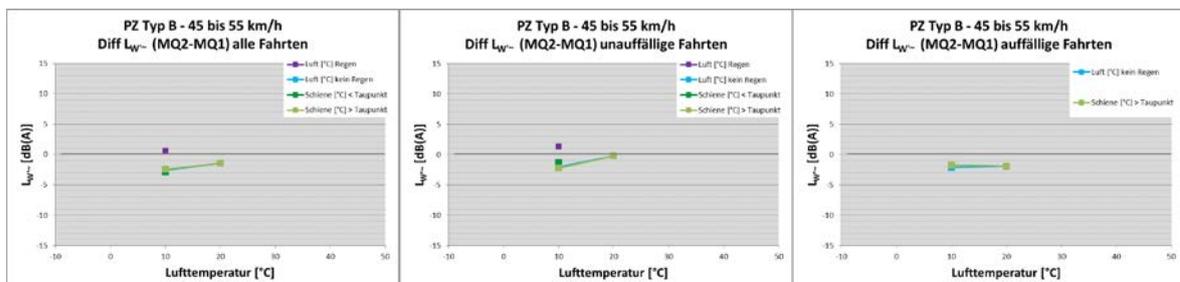


Abb. 6-116: Differenz des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels zwischen MQ1 (Zeitbereich mit deaktivierter SKK) und MQ2 in Abhängigkeit der Lufttemperatur, für die Zugkategorie PZ TYP B bei einer Geschwindigkeit von 45-55 km/h

höhere Pegel auf MQ1. Sowohl der Einfluss der Schientemperatur als auch des Taupunktes ist hierbei vernachlässigbar.

In Abb. 6-116 ist die Pegeldifferenz wieder für die Lufttemperatur dargestellt. Die Ergebnisse zeigen wieder für alle, unauffällige und auffällige Fahrten höhere Pegel bei MQ1. Lediglich bei Regen sind bei beiden Abschnitten idente Werte erreicht worden.

6.2.13. Fazit

Um einen grundsätzlichen Vergleich der Auftrittshäufigkeiten zwischen den zwei Messquerschnitten zu erhalten wurde die Phase vor Aktivierung der SKK untersucht und mit dem unkonditionierten Messquerschnitt 2 verglichen. Diese Daten zeigen, dass für die Kategorie PZ TYP A die tonalen Auffälligkeiten relativ ähnliche Werte liefern. Bei der Kategorie PZ TYP B treten am Messquerschnitt MQ1 um 10 % - 20 % höhere Häufigkeiten auf. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten zeigen sich bei beiden Kategorien höhere Häufigkeiten auf MQ1 in der Höhe von etwa 20 % - 30 %. Die Absolutpegel liegen bei MQ1 den unauffälligen Fahrten durchwegs in einem Bereich von 3 dB über den Pegeln von MQ2, während die auffälligen Fahrten nahezu idente Werte liefern.

Beim Vergleich der Wirkung der Schienenkopfkonditionierung zeigt sich, dass die Häufigkeit der tonalen Auffälligkeiten über einen weiten Prozentbereich der Luftfeuchte gleichbleibend reduziert wird. Im oberen und unteren Prozentbereich nimmt die Wirkung prinzipiell eher ab, wobei hier generell die Häufigkeiten auch geringer sind. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten zeigt sich analog zur Auftrittshäufigkeit wieder eine maximale Wirkung im Luftfeuchtebereich von 60 % - 80 %. Die höchsten Reduktionen sind bei den niedrigeren Geschwindigkeiten erreicht worden. Bei der Betrachtung der Schienen- und Lufttemperaturen zeigt sich für die Kategorie PZ TYP A eine Abnahme der Wirkung mit steigender Temperatur sowohl bei den tonalen als auch bei den breitbandigen Auffälligkeiten. Bei der Kategorie PZ TYP B erreicht die Wirkung im Temperaturbereich von 20 °C ein Maximum. Bei den absoluten Schalleistungspegeldifferenzen zeigt sich, dass die Wirkung vor allem bei allen Fahrten erkennbar ist und damit durch die Verringerung der Häufigkeiten erzielt wird. Die Pegeldifferenzen bei Vergleich von unauffälligen ohne und mit Konditionierung, wie auch bei Vergleich von auffälligen Fahrten mit und ohne Konditionierung sind bei der Kategorie PZ TYP A eher gering, bei der Kategorie PZ TYP B lassen sich sogar Erhöhungen bei den auffälligen Fahrten erkennen, die mit der Schientemperatur ansteigen. Auch bei dieser Kategorie ist die Pegelreduktion aber bei allen Fahrten und damit maßgeblich durch die Änderung der Häufigkeit verursacht, feststellbar.

6.3. Radeigenschaften

Die Untersuchungen des Einflusses von Radeigenschaften beruhen auf der in Kap. 5.2 beschriebenen Differenzierung zwischen den Garnituren der Schnellbahnen. Aufgrund der dadurch verringerten Anzahl an verfügbaren Vorbeifahrten je betrachteten Fall werden vorrangig Garnituren der Schnellbahnbaureihe A für die Analysen herangezogen und nur bei ausreichendem Datenmaterial auch Garnituren der Baureihe B behandelt. Dabei wird ausschließlich auf Emissionsmessungen im Messquerschnitt 2 (MQ2) ohne Schienenkopfkonditionierung zurückgegriffen.

Um einen Überblick zu erhalten, in welchen Bereichen des Zugverbandes akustische Auffälligkeiten auftreten und inwiefern sich diese häufen, wird zunächst eine achsbezogene Auswertung durchgeführt. Im Anschluss wird anhand von Zeitreihen (Verläufe) akustischer Auffälligkeiten abgeschätzt, inwiefern Unterschiede über den Messzeitraum bestehen, sowie Zeitreihen der Radeigenschaften im Hinblick auf augenscheinliche Korrelationen zu den Verläufen akustischer Auffälligkeiten betrachtet. Durch statistische Auswertungen wird letztlich geprüft, ob Abhängigkeiten akustischer Auffälligkeiten von Radeigenschaften bestehen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der bei den folgenden Ausführungen in Kap. 6.1 verwendete Begriff „akustische Auffälligkeiten“ nur die Vereinigungsmenge von tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten adressiert, während in den anderen Teilen des Berichts, insbesondere bei den Korrekturfaktoren in Kap. 7, zusätzlich noch hochfrequente, tonale Komponenten berücksichtigt werden. Diese Abweichung der begrifflichen Konvention in diesem Unterkapitel beruht darauf, dass zum Teil breitbandige oder tonale Komponenten, welche jeweils für einen der beiden Entstehungsmechanismen (Spurkranzanlauf oder lateraler Stick-Slip Effekt am Schienenkopf) kennzeichnend sind, sowohl gesondert, wie auch gemeinsam behandelt werden und daher ein direkter Bezug der Zugzahlen möglich sein soll. Eine signifikante Auswirkung auf dargestellte Ergebnisse aufgrund dieser begrifflichen Unschärfe ist jedoch nicht zu erwarten, da nur äußerst selten hochfrequente, tonale Komponenten isoliert von tonalen oder breitbandigen Auffälligkeiten auftreten (in MQ1 0,12 % und in MQ2 0,08 % aller Züge) und demgegenüber tonale oder breitbandige Auffälligkeiten um ein Vielfaches höhere Auftrittshäufigkeiten aufweisen (vgl. Kap. 4.2).

6.3.1. Achsbezogene Auswertung auffälliger Emissionen

Im Falle von auffälligen breitbandigen oder tonalen Emissionskomponenten einer Garnitur werden die in unmittelbarer zeitlichen Umgebung der Achsvorbeifahrtspunkte vorliegende

Schallsituation hinsichtlich auffällige Komponenten bewertet und etwaige Auffälligkeiten den Achsen zugeordnet. Dies erlaubt es, markante Unterschiede in der Häufigkeit innerhalb der Garnituren, sowie etwaige Unterschiede zwischen den Garnituren zu identifizieren. Bei der Zuordnung akustischer Auffälligkeiten zu den Achsen ist jedoch zu beachten, dass nicht jede Achse, bei deren Überfahrt eine akustische Auffälligkeit erkannt wurde, zwangsläufig als Verursacher dieser Auffälligkeit zu werten ist. Vielmehr werden aufgrund des Messabstandes von 7,5 m zur Gleisachse auffällige Emissionskomponenten für gewöhnlich bei mehreren Achsen in der Umgebung der akustisch auffälligen Achse zu beobachten sein, sodass nur eine grobe Abschätzung des Entstehungsorts auf Fahrzeug- bzw. Drehgestellebene möglich ist.

Breitbandige Auffälligkeiten

Werden alle Garnituren der Schnellbahnbaureihe A gemeinsam betrachtet so zeigt die Verteilung der breitbandigen Auffälligkeiten sowohl ohne Ausrichtung der Garnituren, sodass die Achsnummerierung der Reihenfolge der Achsvorbeifahrt während der Messung entsprechen (siehe Abb. 6-117, links), wie auch mit nachträglicher Ausrichtung gemäß der tatsächlichen Achsnummerierung der Garnituren (Abb. 6-117, rechts) ein ähnliches Bild, bei welchem die Auffälligkeiten am häufigsten beim vorletzten Drehgestell bzw. letzten Jakobsdrehgestell (Achsen 7 und 8) zu verzeichnen sind. Die Ähnlichkeit in beiden Diagrammen entsteht dadurch, dass während der dem rechten Diagramm zugrunde liegenden, dreiwöchigen Phase, in welcher Daten bzgl. der Position der 1. Garniturachse bei der Messung und damit deren Orientierung bei der Vorbeifahrt vorlagen, bei 64 % der erfassten Züge die gemessene Achsreihenfolge mit der tatsächlichen Achsnummerierung übereinstimmten. Detailbetrachtung der einzelnen Garnituren zeigen, dass innerhalb dieses Zeitabschnittes die Orientierung aller Garnituren bestehen blieb und dass jene 4 Garnituren 127, 128, 130 und 137

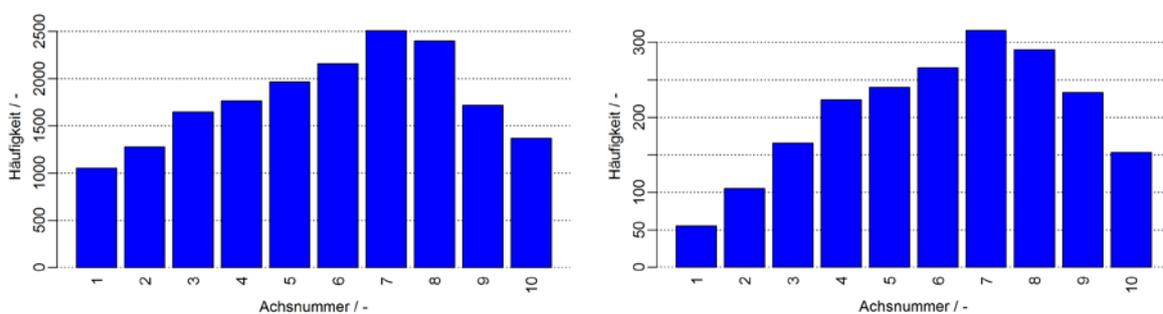


Abb. 6-117: achsbezogene Auswertung aller 10-achsigen Schnellbahngarnituren der Baureihe A in MQ2 für niederschlagsfreie Zeitabschnitte - Häufigkeiten der breitbandigen Auffälligkeiten ohne Ausrichtung der Garnituren (3879 Züge; linkes Diagramm) und mit Ausrichtung für einen ca. 3-wöchigen Zeitabschnitt (442 Züge; rechtes Diagramm)

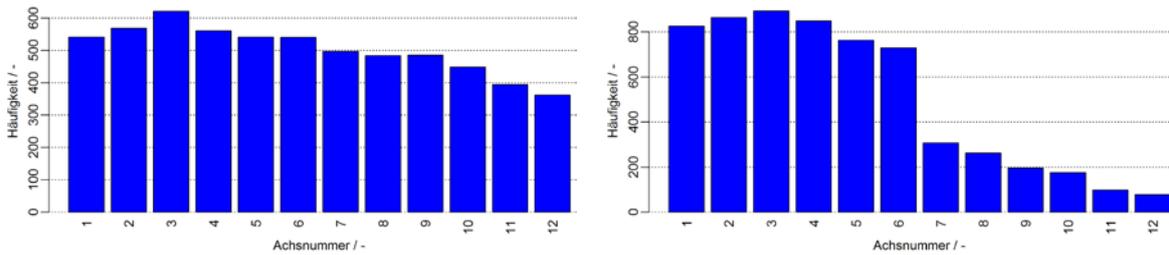


Abb. 6-118: achsbezogene Auswertung aller 12-achsigen Schnellbahngarnituren der Baureihe B in MQ2 für niederschlagsfreie Zeitabschnitte - Häufigkeiten der breitbandigen Auffälligkeiten ohne Ausrichtung (1074 Züge; linkes Diagramm) und mit Ausrichtung der Garnituren (1074 Züge; rechtes Diagramm)

der Baureihe A mit gegenläufiger Achsnummerierung von Fahrzeug und Messung, eine gespiegelte Verteilung aufzeigen (vgl. Anhang B.1 und B.2). Dies deutet allerdings darauf hin, dass die in Abb. 6-117 dargestellten, verschiedenen Auftrittshäufigkeiten innerhalb der Schnellbahngarnitur nicht unterschiedlichen Achs- oder Radparametern geschuldet, sondern unabhängig von der Garniturorientierung durch ein- bzw. auftretende Bedingungen begründet sein könnten.

Bei der Schnellbahnen der Baureihe B ist anhand der Häufigkeitsverteilungen (sowohl bei Betrachtung aller Garnituren in den beiden Diagrammen in Abb. 6-118, wie auch bei den in den Anhängen B.3 und B.4 angeführten, nach Garnituren separierten Darstellungen) klar zu erkennen, dass im Bereich des Triebwagens und des angrenzenden Drehgestells breitbandige Auffälligkeiten vermehrt auftreten. Dieses Verhalten steht im Einklang mit den Beobachtungen aus dem Projekt BEGEL (siehe Ergebnisbericht Kap. 6.3.1 und Anhang G in Abb. G-1 und Abb. G-2), bei welchen sowohl bei den 12-achsigen Einfachgarnituren, wie auch bei den 24-achsigen Doppelgarnituren die Bereiche des Triebwagens, sowie der angrenzenden Drehgestelle von häufigeren, breitbandigen Auffälligkeiten geprägt waren.

Der Triebwagen ist gegenüber dem Steuer- und dem Zwischenwagen beinahe doppelt so schwerer und weist einen um 0,2 m höheren Achsabstand innerhalb der Drehgestelle auf. Durch Letzteres werden aufgrund der geometrischen Zusammenhänge grundsätzlich höhere Anlaufwinkel und in weiterer Folge Spurkranzanläufe begünstigt. Inwieweit diese Eigenschaften jedoch ursächlich für die häufigeren, breitbandigen Auffälligkeiten sind, konnte weder in BEGEL noch in vorliegendem Projekt geklärt werden.

Tonale Auffälligkeiten

In MQ2 traten tonale Komponenten im Frequenzbereich von 0,8 kHz bis 6,3 kHz gegenüber breitbandigen Auffälligkeiten bei beiden Schnellbahngarnituren weitaus

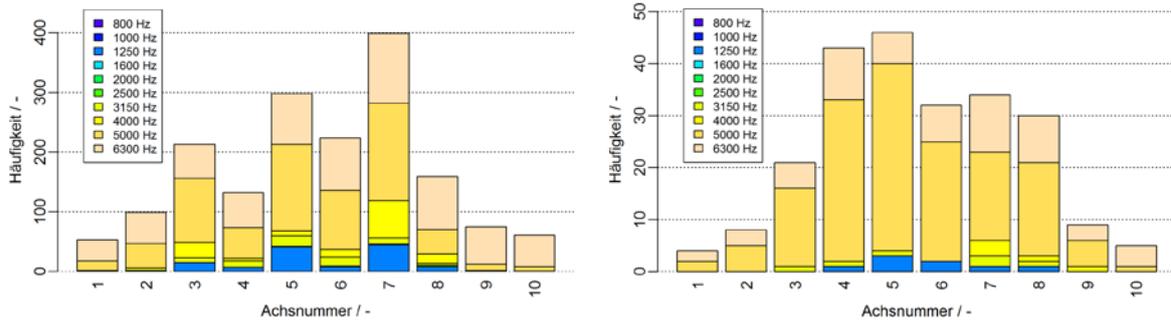


Abb. 6-119: achsbezogene Auswertung aller 10-achsigen Schnellbahngarnituren der Baureihe A in MQ2 für niederschlagsfreie Zeitabschnitte - Häufigkeiten der tonalen Auffälligkeiten ohne Ausrichtung der Garnituren (919 Züge; linkes Diagramm) und mit Ausrichtung für einen ca. 3-wöchigen Zeitabschnitt (100 Züge; rechtes Diagramm)

seltener auf (die Anzahl der Züge mit tonalen Auffälligkeiten beträgt rund $\frac{1}{4}$ der Züge mit breitbandigen Auffälligkeiten). Dementsprechend ist gerade bei der Interpretation der Auftrittshäufigkeiten einzelner Schnellbahngarnituren auf die Anzahl an betrachteten Züge zu achten.

Die Auftrittshäufigkeiten tonaler Auffälligkeiten innerhalb der Garnituren sind zusammengefasst für alle Schnellbahngarnituren der Baureihe A in Abb. 6-119 (links entsprechend der gemessenen Achsreihenfolge und rechts ausgerichtet nach den Fahrzeugachsnummern für einen dreiwöchigen Zeitabschnitt) dargestellt. Die tonalen Auffälligkeiten werden dabei entsprechend der Terzbänder des Auftretens farblich unterschieden. In Anhang B.5 und B.6 finden sich für die 11 verschiedenen Garnituren der Baureihe A getrennte Darstellungen, wobei die Diagramme mit ausgerichteten Garnituren mit Ausnahme der Garnituren 128 und 131 zu geringe Zugzahlen für eine Interpretation aufweisen und nur zum Zwecke der vollständigen Dokumentation in den Anhang aufgenommen wurden. Ähnliches gilt auch für das rechte Diagramm in Abb. 6-119, da dieses von den beiden erwähnten Garnituren dominiert wird (61 der 100 dargestellten Fahrten entfallen auf diese beiden Garnituren) und damit nicht als Querschnitt über die verschiedenen Garnituren gewertet werden kann.

Bei Betrachtung der Auftrittshäufigkeiten ohne Ausrichtung der Garnituren in Abb. 6-119 (links) und in Anhang B.5 ist der bereits in Abb. 4-20 (siehe Kap. 4.2.2) dargestellte, große Anteil tonaler Auffälligkeiten im 5 kHz und im 6,3 kHz Terzband zu erkennen. Auffallend ist jedoch, dass über alle Terzbänder hinweg der Eindruck entsteht, dass bei den drei mittleren Jakobsdrehgestellen die vorlaufende Achse häufiger tonale Auffälligkeiten aufweist. Dies widerspricht jedoch den bisherigen Beobachtungen, dass tonale Komponenten aufgrund des Messabstandes von 7,5 m zur Gleisachse in der Regel zumindest bei beiden Achsen eines Drehgestells gleichermaßen auftreten (bei 4-achsigen

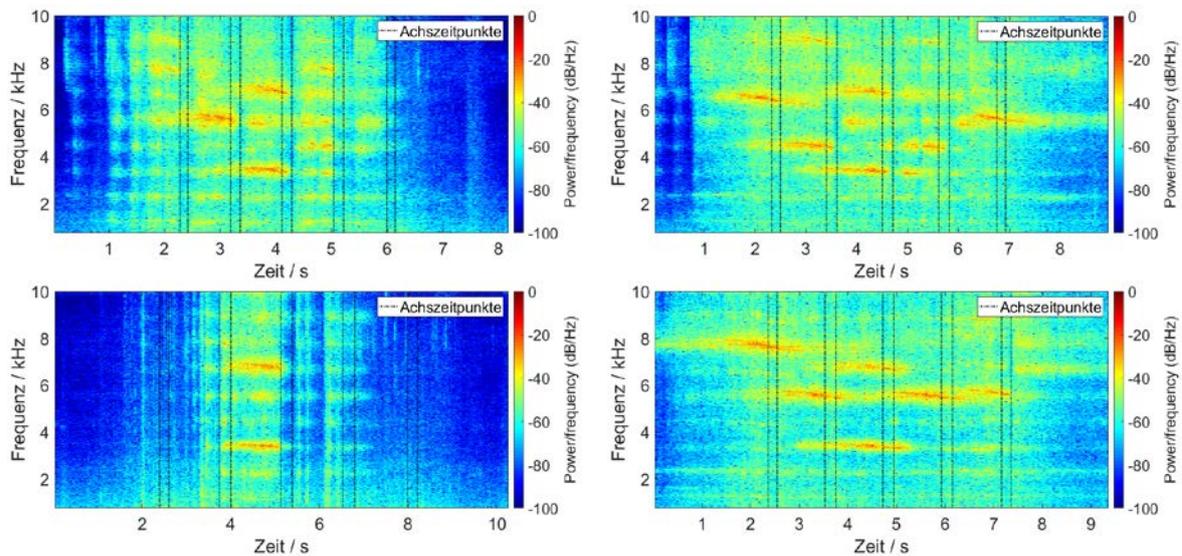


Abb. 6-120: Spektrogramme der Emissionen von Schnellbahnen der Baureihe A in MQ2 mit tonalen Komponenten – zwei unterschiedliche Beispiele für abrupte Enden tonaler Komponente zwischen der 1. und 2. Achse der mittleren drei Drehgestelle (oben links mit stärkeren, breitbandigen und zum Teil länger anhaltenden Einbruch, während oben rechts vor allem die tonalen Komponenten enden), sowie zwei Beispiele die ein davon abweichendes Verhalten zeigen (unten links breitbandige Einbrüche unabhängig von Achszeitpunkten und unten rechts Vorbeifahren der gleichen Garnitur wie oben rechts jedoch ohne jegliche Einbrüche)

Fahrzeugen sind häufig zusätzlich auch noch die Achsen des nächstgelegene Drehgestells am angrenzenden Fahrzeug betroffen).

Eine stichprobenbasierte, manuelle Detailanalyse der Emissionsspektren von tonal auffälligen Schnellbahnen der Baureihe A hat ergeben, dass wiederholt tonale Komponenten zwischen der 1. und der 2. Achse der mittleren drei Drehgestelle abrupt enden. In Abb. 6-120 (oben) sind hierfür zwei Beispiele mit unterschiedlichen Ausprägungen dargestellt. Während es beim linken Diagramm zu einer kurzzeitigen, breitbandigen und gegenüber den Achszeitpunkten geringfügig verschobenen Senkung des Schalldrucks kommt, scheinen im rechten Diagramm nur die tonalen Komponenten abgesenkt zu werden. Aufgrund dieser Ausprägungen sind folgende Ursachen grundsätzlich denkbar:

- die Schallquelle befindet sich an der mikrofonabgewandten Fahrzeugseite bzw. Schiene, sodass die Einbrüche durch Abschattungen der Drehgestelle entstehen;
- auch bei der mikrofonzugewandten Fahrzeugseite (insbesondere bei Spurkranzanlauf, bei welchem ein zusätzlicher Kontaktpunkt an der Spurkranzflanke in Fahrtrichtung vor dem eigentlichen Kontaktpunkt der Radlauffläche entsteht) bewirken Abschattungseffekte durch das Rad eine Richtwirkung der Schallemissionen;

- aufgrund der kurzen Bogenlänge (und des damit einhergehenden kurzen Abstandes zum Bogenbeginn) oder/und durch die Gleisgeometrie zeigen die Achsen beim Passieren des Messquerschnitts noch stärker intermittierendes Anlaufverhalten.

Allerdings gibt es auch Beispiele, die gegen einige dieser Thesen sprechen: so treten auch öfters breitbandige Sprünge, wie sie bei geringgradigem Kurvenkreischen vorkommen, unabhängig von Achszeitpunkten auf (siehe Abb. 6-120, unten links). Ebenso treten bei Vorbeifahrten der gleichen Garnituren diese Einbrüche nicht immer auf (vgl. Emissionen der gleichen Garnitur in Abb. 6-120 oben rechts und unten rechts). Des Weiteren sind in Messquerschnitt 1 (während der unkonditionierten Phase) keine Erhöhungen der Häufigkeiten an den vorlaufenden Achsen der Jakobsdrehgestelle erkennbar. Zwar treten auch hier phasenweise breitbandige Sprünge der Schalldrücke auf, jedoch scheinen diese durchwegs unabhängig von Achszeitpunkten zu sein. Aufgrund dessen wird davon ausgegangen (auch wenn die konkrete Ursache ungeklärt bleibt), dass die höheren Auftrittshäufigkeiten der vorlaufenden Achsen ein Spezifikum des Bogens und/oder der Messungen in MQ2 sind, weshalb sie nicht weiter untersucht werden.

Bei den nach Garnituren getrennten Darstellungen in Anhang B.6 zeigt sich die Variationsbandbreite in der Frequenzzusammensetzung der tonalen Auffälligkeiten. Gegenüber dem allgemeinen Bild heben sich vor allem die beiden Garnituren 101 und 140 der Baureihe A etwas hervor. Erstere Garnitur ist von einem vergleichsweise unterdurchschnittlichen Anteil an tonalen Komponenten im 5 kHz Terzband und von einem überdurchschnittlich hohen Anteil im darunterliegenden 4 kHz Band geprägt, wobei diese Auffälligkeiten meist im Bereich des 1. und des letzten Jakobsdrehgestells auftreten (mit häufigem Ende der tonalen Komponente bei der nachlaufender Drehgestellachse). Die Garnitur 140 zeigt hingegen überdurchschnittlich häufig tonale Auffälligkeiten bei 3,15 kHz im Bereich der Jakobsdrehgestelle, wohingegen tonalen Komponenten im 5 kHz Band kaum vorhanden sind. Bei alle anderen Garnituren überwiegen meist die Auffälligkeiten im 5 kHz und im 6,3 kHz Band deutlich, wobei Unterschiede in der Aufteilung zwischen diesen beiden Bändern bestehen. Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass – wie in Kap. 4.2.2 erläutert – tonale Auffälligkeiten sehr häufig mit breitbandigen Auffälligkeiten einhergehen und es anhand der beobachteten Emissionen dieser Schnellbahnbaureihe schwierig ist, auf den Entstehungsmechanismus zu schließen.

Für die Schnellbahnbaureihe B sind die Auftrittshäufigkeiten tonaler Auffälligkeiten innerhalb der 12-achsigen Garnituren bei Messquerschnitt 2 in Abb. 6-121 dargestellt

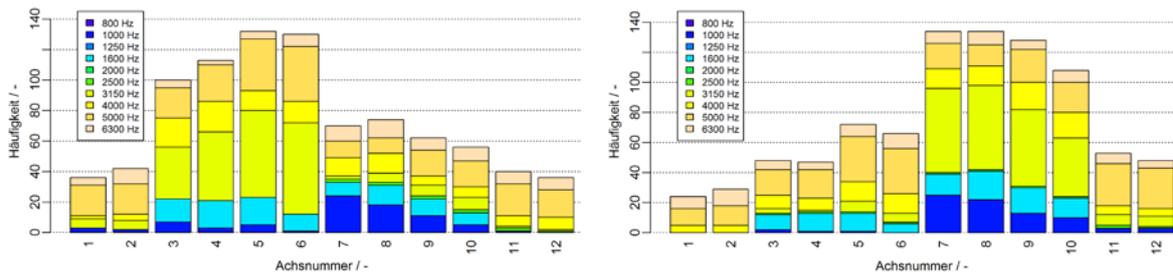


Abb. 6-121: achsbezogene Auswertung aller 12-achsigen Schnellbahngarnituren der Baureihe B in MQ2 für niederschlagsfreie Zeitabschnitte - Häufigkeiten der tonalen Auffälligkeiten ohne Ausrichtung (300 Züge; linkes Diagramm) und mit Ausrichtung der Garnituren (300 Züge; rechtes Diagramm)

(links entsprechend der Achsreihenfolge bei den Emissionsmessungen und rechts nach Ausrichtung mit dem Triebwagen am Zugbeginn bzw. von Achse 1 bis 4). Die für die 22 verschiedenen Garnituren separaten Darstellungen sind in den Anhangsteilen B.7 und B.8 zu finden. Ähnlich wie bei der Baureihe A (aber nicht ganz so ausgeprägt) sind die zwei Garnituren 281 und 315 der Baureihe B hervorzuheben. Abgesehen davon, dass an diesen beiden Garnituren ein Drittel aller tonalen Auffälligkeiten aufgetreten ist, fällt Garnitur 281 durch die häufigen Auffälligkeiten im 3,15 kHz Band und Garnitur 315 durch häufige Auffälligkeiten im 1,25 kHz und im 1,6 kHz Terzband - beide im Bereich der Achsen 7 bis 10 im ausgerichteten Zustand (2. Drehgestell des Zwischenwagens und 1. Drehgestell des anschließenden Steuerwagens) - auf. Bei allen anderen Garnituren sind Interpretationen entweder aufgrund der geringen Zugzahlen nicht sinnvoll, oder es bestehen wie bei den beiden Garnituren 270 und 288 trotz Zugzahlen von zumindest über 30 keine interpretierbaren Häufungspunkte.

6.3.2. Verläufe auffälliger Schallemissionen

Um einen Überblick über die zeitliche Variation auffälliger Emissionskomponenten zu erhalten, aber gleichzeitig auch für tonale und breitbandige Auffälligkeiten getrennte Vergleiche mit Radparametern zu erlauben, wurden für die Verlaufsdarstellung folgende drei Größen herangezogen:

- breitbandige oder tonale Auffälligkeiten innerhalb eines Zuges
- breitbandige Auffälligkeiten in der unmittelbaren Umgebung einer Achse
- tonale Auffälligkeiten in der unmittelbaren Umgebung einer Achse

Für eine anschauliche Darstellung wurden aus diesen binären Größen jeweils wertdiskrete Größen mittels gleitendem Mittelwert (über 20 Binärwerte bei Zugdarstellungen bzw. über 10 Binärwerte bei Achsdarstellungen mit entsprechenden

Verkürzungen der betrachteten Punkte an den Randbereichen) gebildet und entsprechend der jeweiligen Messzeitpunkte in Diagramme mit einer einheitlichen, absoluten Zeitskala über den gesamten Messzeitraum eingetragen. Beispiele für derartige Diagramme sind in Abb. 6-122 (Verlauf der akustischen Auffälligkeiten einer Garnitur) und in Abb. 6-123 (Verläufe der breitbandigen Auffälligkeiten aller Achsen einer Garnitur) dargestellt. In beiden Abbildungen sind zeitliche Abschnitte zu erkennen, in welchen keine Messdaten vorliegen und die durch einen der folgenden Umstände begründet sind:

- Ausblendung von Messergebnissen aufgrund von detektiertem Niederschlag
- kein Umlauf der betrachteten Garnitur (Werkstättenaufenthalte, etc.)
- fehlende Vorbeifahrten durch etwaige Streckensperren oder Messunterbrechungen des Systems acramos[®] (die Zeitabschnitte ≥ 24 h, in welchen keine Vorbeifahrten vorhanden sind, betragen in Summe rund 8 % der ca. 11-monatigen Messzeit)
- fehlende Wetterdaten von 20. Juni bis 18. Juli 2016 seitens des Systems acramos[®]

Zu beachten ist, dass durch die Mittelwertbildung unabhängig von den Abschnitten mit fehlenden Messdaten erfolgt. Das bedeutet in weiterer Konsequenz, dass Mittelwerte unmittelbar vor (oder nach) solchen Abschnitten auch von dem Vorhandensein von Auffälligkeiten nach (oder vor) den Abschnitten unabhängig von der zeitlichen Ausdehnung der Abschnitte beeinflusst werden. Ein alternativer Weg, welcher diesen Nachteil nicht aufweist, wäre eine gleitende Mittelwertbildung über einen konstanten Zeitbereich anstatt über eine konstante Zuganzahl. Allerdings beziehen sich dann die Mittelungen auf unterschiedliche Zuganzahlen. Aufgrund dieses für die Interpretation gravierenden Nachteils wurde von einer solchen Mittelung jedoch abgesehen.

In Abb. 6-122 und Abb. 6-123 sind jene Zeitpunkte durch vertikale, rote Linien gekennzeichnet, bei welchen für die betrachtete Garnitur Einträge von Radmessungen im Rahmen verschiedener Werkstättenaufenthalte vorliegen. Es ist daher davon auszugehen, dass zu diesen Zeitpunkten bzw. in der näheren zeitlichen Umgebung die Garnitur im Allgemeinen nicht im Umlaufbetrieb eingesetzt war (eine Ausnahme hiervon stellt laut ÖBB-TS beispielsweise die Vermessungen neuer Achsen dar, welche bereits zu einem Zeitpunkt stattfinden kann, bei welchen sich die Garnitur noch im Einsatz befindet). Die Einträge von Radmessungen werden für die folgenden Untersuchungen in die drei Kategorien unterteilt:

- BUTF – Reprofilierung auf der Unterflurdrehbank mit Ein- und Ausgangsmessungen (durchgezogene Linie)

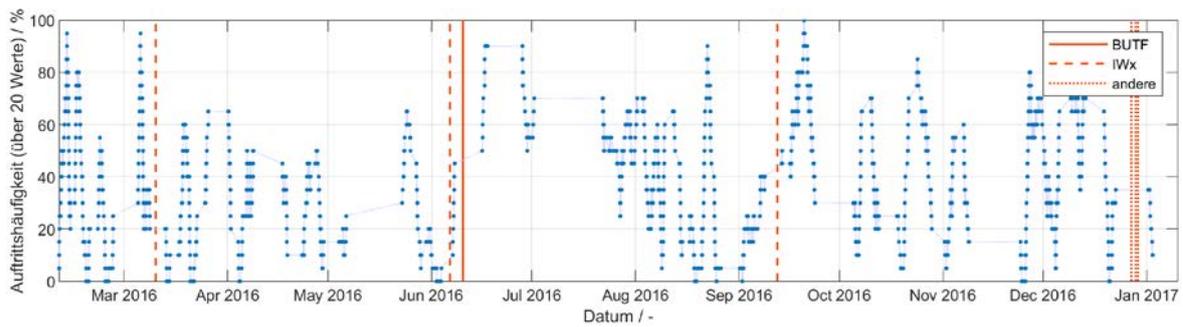


Abb. 6-122: Exemplarischer Zeitverlauf akustischer Auffälligkeiten einer Schnellbahngarnitur während niederschlagsfreier Phasen, welcher durch gleitende Mittelwertbildung über die binäre Größe „breitbandige oder tonale Auffälligkeiten eines Zuges“ gebildet wird inkl. Kennzeichnung der Zeitpunkte von Werkstättenaufenthalten durch vertikale, rote Linien

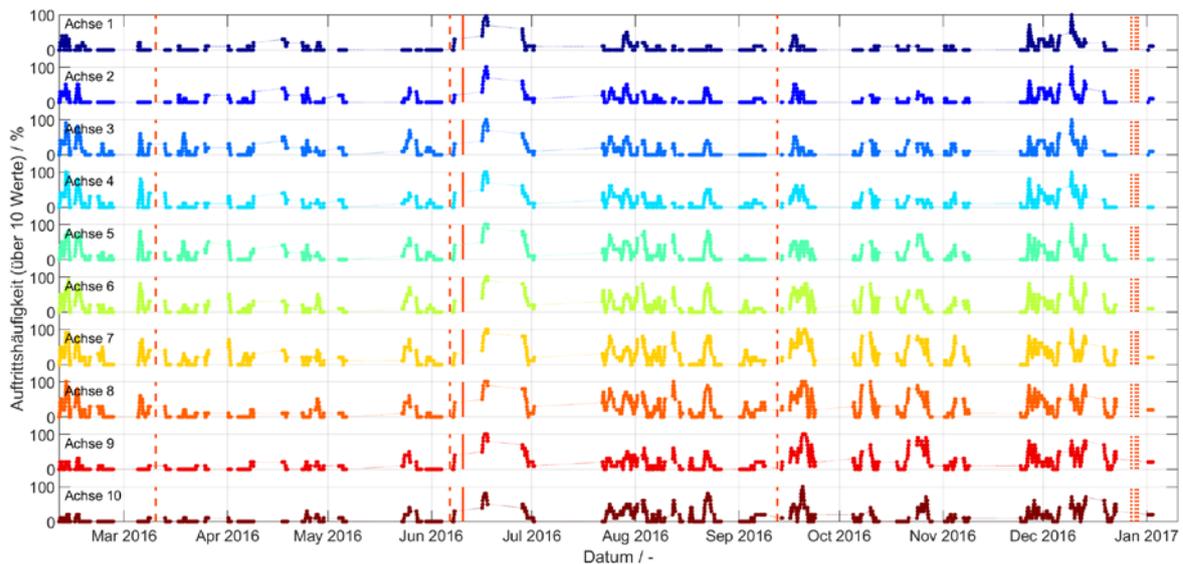


Abb. 6-123: Exemplarische Zeitverläufe breitbandiger Auffälligkeiten aller Achsen einer Schnellbahngarnitur während niederschlagsfreier Phasen, welche durch gleitende Mittelwertbildung über die jeweilige binäre Größe „breitbandige Auffälligkeiten in der unmittelbaren Umgebung einer Achse“ gebildet werden inkl. Kennzeichnung der Zeitpunkte von Werkstättenaufenthalten durch vertikale, rote Linien

- IWx (umfasst IW1, IW2, IW21, IW22, IW3, IW31, IW4 und IW5) – Instandhaltung bzw. Wartung (strichlierte Linie)
- andere – alle weiteren Werkstättenaufenthalte, bei welchen Radparameter erfasst werden (punktierte Linie)

Im Gegensatz zu Reprofilierungen sind die Zeitpunkte der deutlich seltener durchgeführten Achstausche nicht aus der Art des Werkstättenaufenthaltes eindeutig ableitbar. Im Allgemeinen zeichnen sie sich unter anderem durch einen deutlichen, positiven Sprung des Messkreisdurchmessers aus und sind daher in den im folgenden Kapitel 6.3.3 beschriebenen Verläufen von Radparametern eindeutig erkennbar, weshalb diese bei Interpretationen bzgl. der Werkstättenaufenthalte einzubeziehen sind.

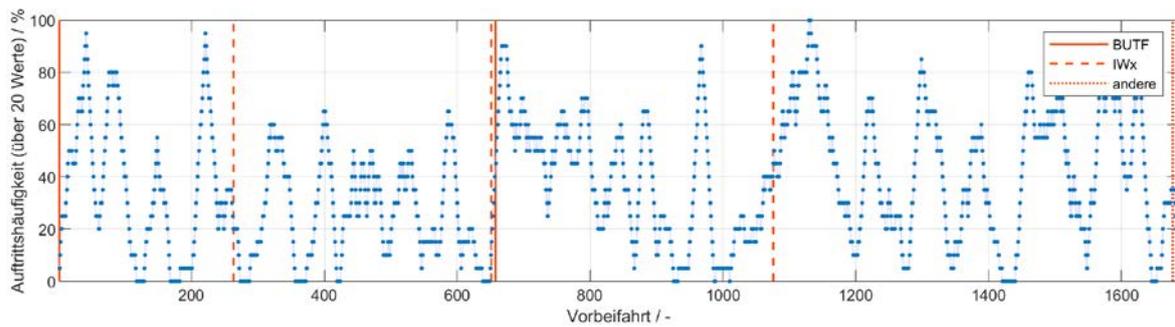


Abb. 6-124: Exemplarischer Verlauf akustischer Auffälligkeiten einer Schnellbahngarnitur während niederschlagsfreier Phasen aus Abb. 6-122, bei welchem zur Ausblendung der messwertfreien Zeitabschnitte statt dem jeweiligen Zeitpunkt der Messungen die fortlaufende Vorbeifahrtsnummer der jeweiligen Garnitur als Abszisse verwendet wurde

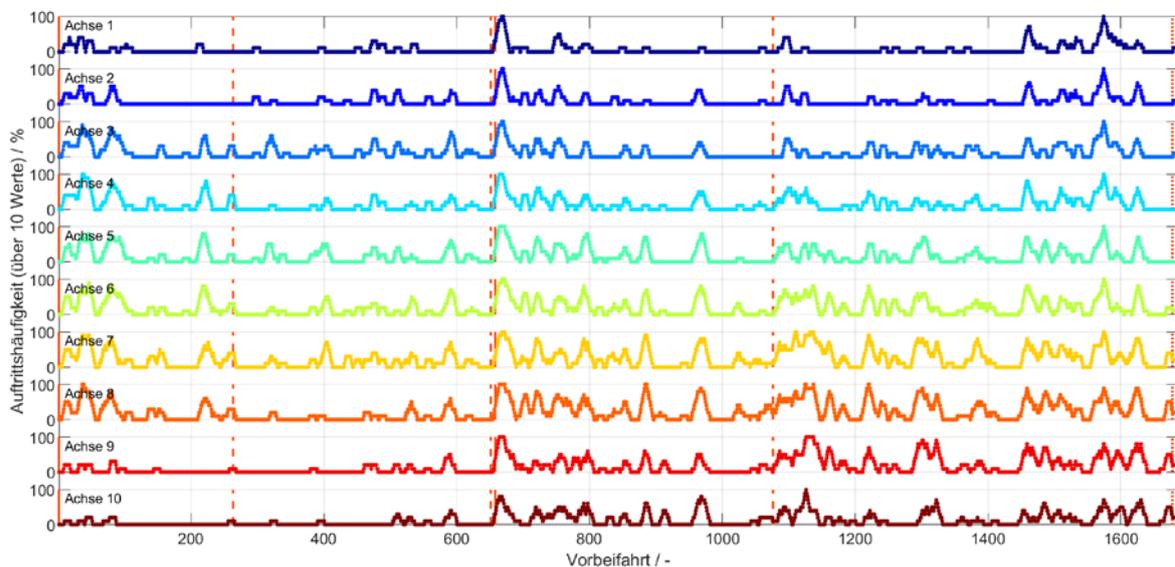


Abb. 6-125: Exemplarische Verläufe breitbandiger Auffälligkeiten aller Achsen einer Schnellbahngarnitur während niederschlagsfreier Phasen aus Abb. 6-123, bei welchen zur Ausblendung der messwertfreien Zeitabschnitte statt den jeweiligen Zeitpunkten der Messungen die fortlaufende Vorbeifahrtsnummern der jeweiligen Garnitur als Abszissen verwendet wurden

Wie in Abb. 6-122 und Abb. 6-123 zu erkennen ist, erschweren die Zeitabschnitte ohne vorliegende Messdaten die visuelle Interpretation der Verläufe. Aus diesem Grund wurden zusätzlich Diagramme erstellt, in welchen die Verläufe über einer fortlaufenden Vorbeifahrtsnummer aufgetragen werden (exemplarische Darstellung der Verläufe aus Abb. 6-122 und Abb. 6-123 in Abb. 6-124 und Abb. 6-125).

Die beschriebenen Verläufe akustischer Auffälligkeiten sind für den in den weiteren Auswertung der Radeigenschaften betrachteten, unkonditionierten Messquerschnitts 2 in Anhang C enthalten. Bei achsbasierten Verläufen der Schnellbahnbaureihe A (siehe Anhang C.1) entspricht die Achsnummerierung – um den gesamten Messzeitraum darstellen zu können – der Reihenfolge der jeweiligen Vorbeifahrt bei den

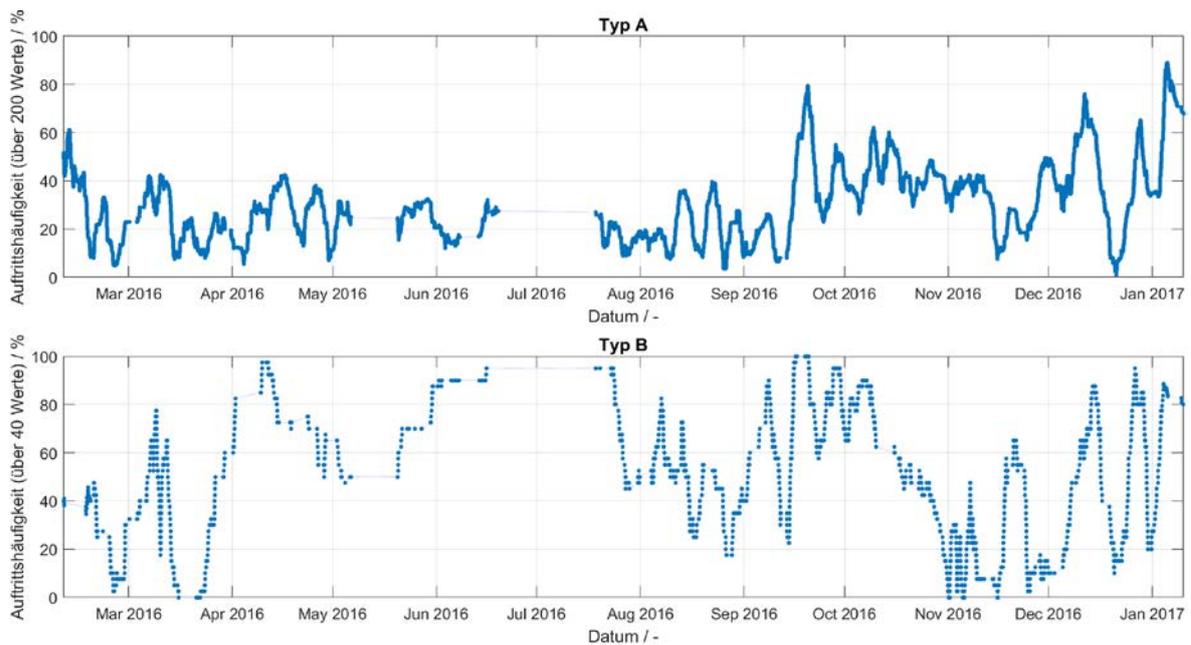


Abb. 6-126: Zeitverläufe akustischer Auffälligkeiten aller Schnellbahngarnituren der Baureihe A (oben) und B (unten) in MQ2 während niederschlagsfreier Phasen, welche durch gleitende Mittelwertbildung über die binäre Größe „breitbandige oder tonale Auffälligkeiten eines Zuges“ gebildet werden - zur besseren Vergleichbarkeit der Diagramme wurden die Fenstergrößen der gleitenden Mittelwerte entsprechend dem ungefähren Verhältnis der Zugzahlen gewählt

Emissionsmessungen. Obwohl für die Garnituren der Baureihe B nur vergleichsweise wenige Vorbeifahrten mit meist längeren Zeitabschnitten ohne Messungen vorhanden sind, werden zumindest 18 der 22 Garnituren mit mehr als 15 verwertbaren Vorbeifahrten im Anhang C.2 angeführt. Im Gegensatz zur Baureihe A erfolgt hier eine Ausrichtung entsprechend der tatsächlichen Achsnummerierung.

Anhand der Durchsicht aller Verlaufsdiagramme der Baureihe A können folgende Punkte festgehalten werden:

- Über die absolute Zeitskala betrachtet sind grundsätzlich keine übergeordneten Trends in den akustischen Auffälligkeiten erkennbar. Werden hingegen alle Garnituren der Baureihe A wie in Abb. 6-126 (oben) gemeinsam betrachtet, so sind bei Ausblendung der Messungen während Niederschlag Unterschiede zu erkennen: die Auftretshäufigkeiten von akustischen Auffälligkeiten verdoppeln sich im Mittel ab etwa Mitte Sept. 2016 bzw. fluktuieren sie ab Mitte Nov. 2016 stärker als in der Phase von Mitte Februar bis Mitte September. Der in Abb. 6-126 (unten) zum Vergleich dargestellte Verlauf akustischer Auffälligkeiten bei der Schnellbahnbaureihe B zeigt zum Teil ähnliches, zum Teil unterschiedliches Verhalten: so deuten der ähnliche Anstieg Mitte Sept. und die hohen Schwankungen ab Dez. 2016 auf externe Einflüsse

hin, während die ausgeprägt unterschiedlichen Tendenzen in der 1. Hälfte der Messzeit (von Feb. bis Sept. 2016 nehmen die Häufigkeiten bei der Baureihe B im Mittel deutlich zu, bei der Baureihe A bleiben sie in etwa konstant niedrig) dem entgegenstehen.

Zur Abschätzung, inwiefern dieses Verhalten mit Änderungen der Witterungsbedingungen in Zusammenhang steht, wurden analog zu den Zeitverläufen der akustischen Auffälligkeiten Verläufe für die erfassten Witterungsparameter Luft- und Schienentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Taupunkt, sowie für die Differenzen von Luft- und Schienentemperatur gegenüber dem Taupunkt zur Abbildung von Kondensationseffekten (in Form von Nebel bzw. Niederschlag an der Schiene) erstellt und einander gegenübergestellt (siehe Anhang E). Zur Verdeutlichung einer etwaigen Kondensation der Luftfeuchtigkeit wurde bei der Differenz zwischen Schienentemperatur und Taupunkt zusätzlich auch die Vorzeichenfunktion $\text{sgn}(x)$ angewandt (nicht jedoch für die Lufttemperatur, da diese während des gesamten Messzeitraumes stets über dem Taupunkt liegt). Wie in der Detaildarstellung Abb. 6-127 der Schnellbahnbaureihe A gut zu erkennen ist, nehmen die Verläufe der

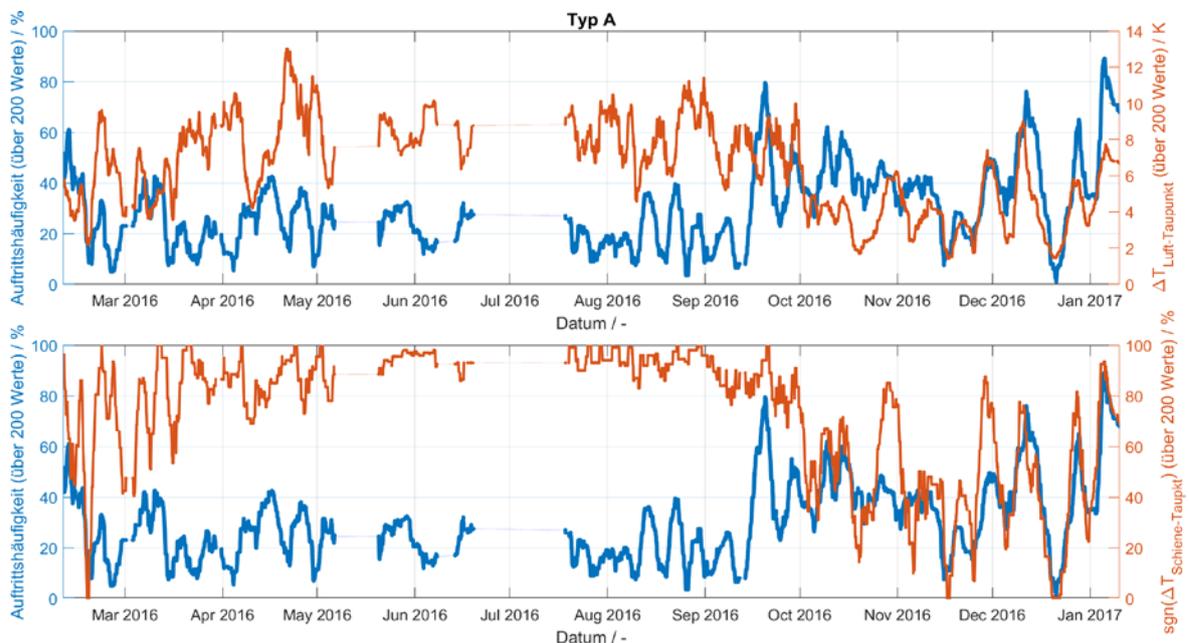


Abb. 6-127: Gegenüberstellung des Zeitverlaufs akustischer Auffälligkeiten aller Schnellbahngarnituren der Baureihe A in MQ2 während niederschlagsfreier Phasen aus Abb. 6-126 und der Zeitverläufe der Differenz zwischen Lufttemperatur und Taupunkt $\Delta T_{\text{Luft-Taupkt}}$ (oben) und der Vorzeichenfunktion der Differenz zwischen Schienentemperatur und Taupunkt $\text{sgn}(\Delta T_{\text{Schiene-Taupkt}})$ (unten) - Verlaufsdarstellung erfolgt jeweils durch gleitende Mittelwertbildung über 200 Werte

Temperaturdifferenzen zum Taupunkt ab Mitte November 2016 einen zum Verlauf der akustischen Auffälligkeiten zunehmend ähnlicheren Verlauf an, während in der Zeit davor kaum Analogien auszumachen sind. Ähnliches Verhalten ist auch, wenngleich aufgrund des geringeren Datenumfanges weniger deutlich, bei der Schnellbahnbaureihe B festzustellen. Von den weiteren Witterungsparametern zeigen nur noch die Windstärke und (mit umgedrehten Vorzeichen) die Luftfeuchtigkeit eine vergleichbare Charakteristik, jedoch mit geringer Ausprägung. Anhand der dargestellten Verlaufsähnlichkeiten kann grundsätzlich keine Aussage getroffen werden, ob bzw. welcher der vier Parameter (Temperaturdifferenzen $\Delta T_{\text{Luft-Taupkt}}$ und $\text{sgn}(\Delta T_{\text{Schiene-Taupkt}})$, sowie Windgeschwindigkeit v_{Wind} und Luftfeuchtigkeit φ) in kausalem Zusammenhang mit den Auftrittshäufigkeiten steht. Anhand der bekannten Abhängigkeit auffälliger Emissionen von Reibwertänderung im Rad-Schiene Kontakt (vgl. Reibwertminderung durch Wasser an der Schiene in Kap. 2) liegt jedoch die Vermutung nahe, dass die die Kondensationsneigung beschreibenden Temperaturdifferenzen, sowie die damit direkt in Beziehung stehende Luftfeuchtigkeit (zunehmende Luftfeuchtigkeit hebt die Taupunkttemperatur) entscheidend sind, während die Windgeschwindigkeit mit den Temperatur- bzw. Taupunktentwicklung lediglich korrelieren.

Für die weiteren Auswertungen ist aufgrund der Ähnlichkeiten der Verläufe davon auszugehen, dass innerhalb des Messzeitraumes ab Mitte November 2016 die Witterung, insbesondere Kondensationseffekte in der kalten Jahreszeit, einen übergeordneten Einfluss auf die Entstehung oder die Unterdrückung auffälliger Bogengeräusche hatte. Nicht erklärbar ist jedoch der erwähnte, wohl ebenfalls extern bedingte, sprunghafte Anstieg der Häufigkeiten Mitte September bei beiden Schnellbahnbaureihen und die erhöhten Häufigkeiten in den darauffolgenden zwei Monaten. Laut Auftraggeber ÖBB fanden keine Schleifarbeiten statt, weshalb dadurch hervorgerufene Änderungen des Schienenprofils als mögliche Ursache ausscheiden.

- Der Vergleich der Verläufe von breitbandigen und tonalen Auffälligkeiten verdeutlicht das Ungleichgewicht zwischen diesen beiden Arten von Kurvengeräuschen. So treten kaum zeitliche zusammenhängende Phasen mit erhöhten Auftrittshäufigkeiten tonaler Komponenten auf. Und die wenigen Phasen weisen Ähnlichkeiten mit den Verläufen der breitbandigen Auffälligkeiten auf (vgl. Garnituren 131 und 133 der Baureihe A), wodurch sich der Eindruck eines Zusammenhangs, der bereits in Kap. 4.2.2

angedeutet wurde, verhärtet. Auch die beiden, in Kap. 6.3.1 erwähnten Garnituren 101 und 140 der Baureihe A mit tonalen Auffälligkeiten im 4 kHz bzw. im 3,15 kHz Terzband sind hiervon zumeist nicht ausgenommen. Aufgrund dessen spielen die Verläufe tonaler Komponenten hier eine untergeordnete Rolle.

- Bei mehreren Garnituren scheinen Reprofilierungen einen Anstieg von akustischen Auffälligkeiten hervorzurufen, welche dann über einen längeren Zeitraum hinweg zum Teil wieder abklingen (vgl. Garnituren 127, 128, 135 und 140 der Baureihe A). Bei anderen Garnituren sind hingegen keine Auswirkungen zu erkennen (vgl. Garnitur 134 und 136 der Baureihe A bei der jeweils ersten Reprofilierung). Ein Beispiel für eine starke Abnahme liegt hingegen einzig bei der Garnitur 136 Baureihe A (zweite Reprofilierung) vor.
- Sehr vereinzelt sind auch nach Instandhaltungsaufenthalten (Kategorie IWx) ohne Veränderung von Radprofilen kurzfristig andauernden Erhöhungen von Auftrittshäufigkeiten zu verzeichnen - vgl. bei Baureihe A die Aufenthalte der Garnituren 127 im Dez. 2016, 131 im Sept. 2016 oder 133 im März 2016. Allerdings können erstere durch die zuvor erwähnten, externen Einflüsse verursacht worden sein und bei letzterer wurde kurz darauf eine Reprofilierung durchgeführt, sodass keine Aussage über die Dauer der Erhöhung gemacht werden kann. Der überwiegende Anteil an den Instandhaltungsaufenthalten, sowie die anderen Aufenthalte zeigen hingegen keinen klar erkennbaren Einfluss.
- Auch ohne Werkstättenaufenthalte traten kurzfristig deutliche Zu- oder Abnahmen der Auftrittshäufigkeiten ohne ersichtliche Gründe auf (stichprobenweise Vergleiche mit den Verläufen verschiedener Wetterparameter brachten keine eindeutigen Ergebnisse hervor) – vgl. beispielsweise bei Baureihe A die Garnituren 128 (Spitze im Sept. 2016), 130 (Sept. 2016), 131 (Dez. 2016) oder 135 (Aug. 2016). Aber auch hier fällt der überwiegende Teil in den Zeitbereich, in dem externe Beeinflussungen der akustischen Auffälligkeiten vermutet werden.

Zusammenfassend sind die Verläufe akustischer, insbesondere breitbandiger Auffälligkeiten der 11 Garnituren von variierendem Verhalten geprägt, wann bzw. wie rasch Auftrittshäufigkeiten ansteigen oder wieder abfallen können. Zum Teil wird hier ein Witterungseinfluss vermutet, zum Teil kann der Eindruck gewonnen werden, dass nach Reprofilierungen für eine gewisse Zeit höhere Auftrittshäufigkeiten akustischer Auffälligkeiten als vorher bestehen.

Die Verlaufsdiagramme der Baureihe B lassen aufgrund der nur kurzen Einsätze der Garnituren auf der S45 kaum Interpretationen in Bezug auf Werkstättenaufenthalte oder erkennbare Trends über längere Zeiträume zu. Lediglich bei der ersten der beiden in Kap. 6.3.1 erwähnten Garnituren 281 und 315 der Baureihe B sind tonale Auffälligkeiten von Achse 3 bis 6 ausschließlich während eines 3-tägigen Einsatzes von 25. bis 28. Sept. 2016 mit einer hohen, mittleren Auftrittshäufigkeit von rund 73 % (bei 56 Vorbeifahrten) zu erkennen, während bei den restlichen 135 Fahrten selten tonale Auffälligkeiten (mittlere Auftrittshäufigkeit von ca. 10 %) vorhanden waren. Da sich der Triebwagen während des dreitägigen Zeitraums Ende Sept. ausschließlich am Ende der Garnitur befand und während der restlichen Zeit mit dem Triebwagen am Zugbeginn verkehrte, deutet dies darauf hin, dass die Orientierung mit nachlaufendem Triebwagen (bzw. die von der Orientierung abhängigen Eigenschaften wie Vorzeichen der Raddurchmesserunterschieden im Radsatz, zuglängsdynamische Effekte, etc.) in MQ2 das Auftreten tonaler Komponenten im Bereich des Übergangs zwischen Steuer- und Mittelwagen begünstigt. Bei der Garnitur 315 der Baureihe B waren die tonalen Auffälligkeiten hingegen über drei kurze Einsätze Ende Mai, Mitte Sept. und Anfang Dez. 2016 verteilt, weshalb eine Gegenüberstellung mit der Orientierung nicht zielführend ist.

6.3.3. Verläufe von Radparameter

Wie in Kap. 5.1 dargelegt werden die Radparameter im Zuge von Werkstättenaufenthalten erfasst. Da keine näheren Daten über die Änderungsraten der einzelnen Radeigenschaften vorliegen, beruhen die zeitlichen Verläufe der Parameterwerte auf linearen Interpolationen zwischen diesen Messzeitpunkten.

Die Radparameterverläufe wurden separat für die einzelnen Garnituren der beiden Schnellbahnbaureihen erstellt. Dabei wurden die Abszissenachsen analog zu den Verläufen akustischer Auffälligkeiten mit einer absoluten, den gesamten Messzeitraum abdeckenden Zeitskala (siehe Abb. 6-128), sowie mit einer während niederschlagsfreier Zeitabschnitte fortlaufende Vorbeifahrtsnummer (siehe Abb. 6-129) gewählt. Jedes Diagramm zeigt farblich getrennt alle Achsen einer Garnitur. Im Fall der absoluten Zeitskala wurden die Vorbeifahrtszeitpunkte zudem durch Punkte auf den Interpolationslinien gekennzeichnet, um einen Überblick über jene Bereich zu bekommen, in welchen Emissionsdaten zur Verfügung stehen. Die Zeitpunkte von Werkstättenaufenthalten einer Garnitur sind analog zu den Verläufen akustischer Auffälligkeiten durch vertikale Linien angedeutet (Details siehe Kap. 6.3.2).

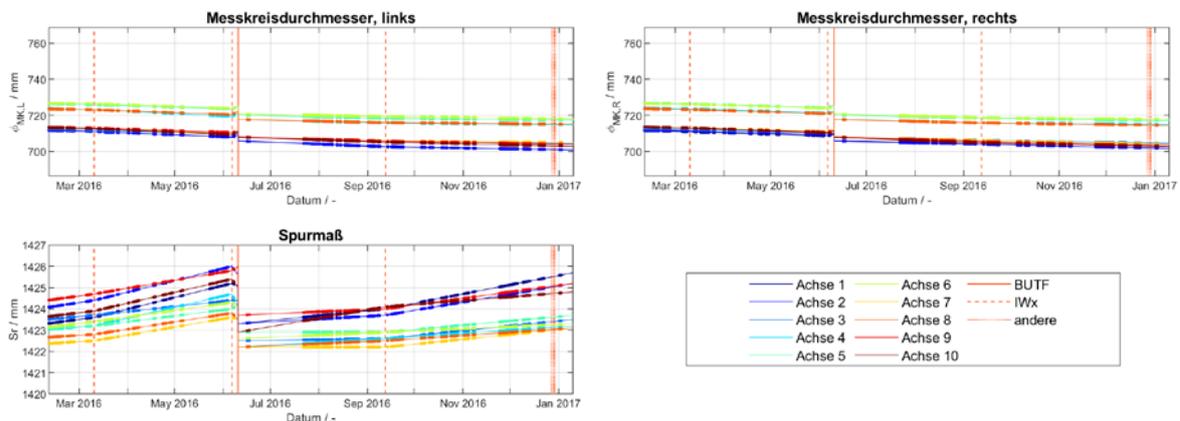


Abb. 6-128: Exemplarische Zeitverläufe dreier Radparameter (Messkreisdurchmesser links und rechts, sowie Spurmaß) für alle Achsen einer Schnellbahngarnitur, welche durch lineare Interpolation zwischen den Erfassungszeitpunkten der Parameter gebildet werden inkl. Kennzeichnung der Zeitpunkte von Werkstättenaufenthalten durch vertikale, rote Linien und Darstellung von Vorbeifahrtszeitpunkten der Schnellbahngarnitur in MQ2 in regenfreien Zeitabschnitten durch Punkte auf den Interpolationslinien

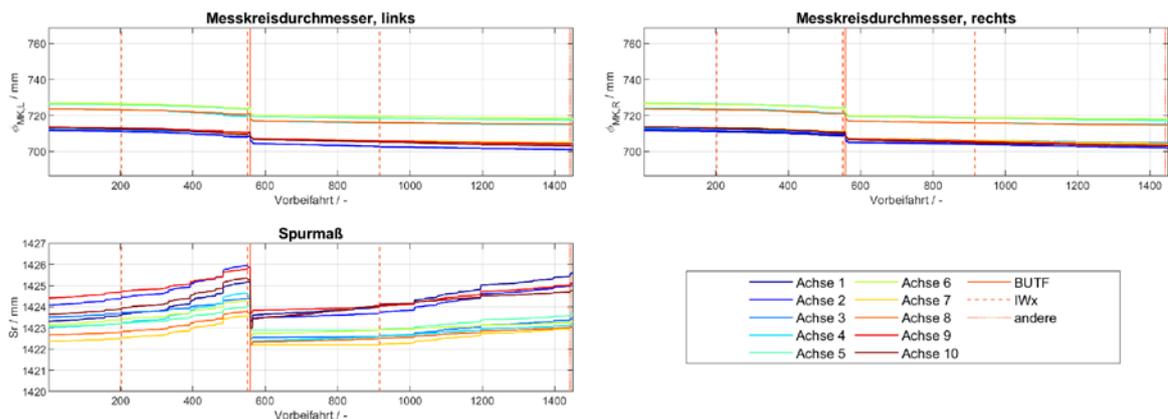


Abb. 6-129: Exemplarische Verläufe dreier Radparameter (Messkreisdurchmesser links und rechts, sowie Spurmaß) für alle Achsen einer Schnellbahngarnitur aus Abb. 6-128, bei welchen zur Ausblendung der Zeitabschnitte ohne Vorbeifahrten statt der absoluten Zeitachse die fortlaufende Vorbeifahrtsnummer der jeweiligen Garnitur als Abszissenwerte verwendet wurden

Zwar wurden grundsätzlich für alle von der ÖBB zur Verfügung gestellten Radparameter derartige Verläufe erstellt, Jedoch wurden durch theoretische Überlegungen für folgende Parameter eine Beeinflussung auffälliger Kurvengeräuschen als unwahrscheinlich eingestuft oder nähere Untersuchungen als nicht erforderlich erachtet:

- Messkreisdurchmesserdifferenz am Fahrzeug *DM_DIFF*: dieser Parameter erscheint für die vorliegende Fragestellung nicht von Relevanz und wird daher nicht weiter betrachtet.
- Radreifenbreite *BR* (links und rechts) und Überwälzung *S* (links und rechts): die Radreifenbreite abzüglich Überwälzung sollte grundsätzlich keinem Verschleiß

unterliegen und wird als statische Größe angesehen. Die Radreifenbreite BR (inkl. Überwälzung) und die Überwälzung S beinhalten daher die gleiche Information. Aus Sicht der Autoren steht eine Überwälzung an der Radaußenseite zudem in keinerlei Zusammenhang mit den Rolleigenschaften und in weiterer Folge mit der Entstehung von auffälligen Kurvengeräuschen.

- Radreifendicke Rd (links und rechts): Radreifendicke Rd und Messkreisdurchmesser MKD enthalten die gleiche Verschleißinformation, weshalb nur letzterer Parameter betrachtet wird.
- Innenabstand I : die Spurkranzdicken Sd von beiden Rädern und das Spurmaß Sr beschreiben den Innenabstand I vollständig. Da letzterer etwaige Änderungen in der Rad-Schiene Kontaktgeometrie (im Bereich der äußeren Spurkranzflanke und der Spurkranzkehle) nur indirekt wiedergibt, wurde auf eine gesonderte Auswertung dieses Parameters verzichtet.

Für die verbleibenden 11 Radparameter

- Messkreisdurchmesser MKD bzw. zur besseren Lesbarkeit als \varnothing_{MK} bezeichnet (links und rechts),
- Differenz der Messkreisdurchmesser an Radsätzen $MKDMDIFF$ bzw. zur besseren Lesbarkeit als $\Delta\varnothing_{MK,RS}$ bezeichnet,
- Differenz der Messkreisdurchmesser im Drehgestell DM_DIFF_DG bzw. zur besseren Lesbarkeit als $\Delta\varnothing_{MK,DG}$ bezeichnet,
- Spurkranzhöhen Sh (links und rechts),
- Spurkranzdicken Sd (links und rechts),
- Spurkranzflankenmaße qR (links und rechts),
- Profilhohlläufe Ph (links und rechts) und
- Spurmaß Sr

sind die Verläufe für die 11 verschiedenen, 10-achsigen Schnellbahngarnituren der Baureihe A in Anhang D.1 und für 18 der 22 verschiedenen, 12-achsigen Schnellbahngarnituren der Baureihe B mit mindestens 15 verwertbare Vorbeifahrten in Anhang D.2 dargestellt. Zur Unterscheidung von Größen des linken und des rechten Rades einer Achse wurden bei den jeweiligen Bezeichnungen „L“ und „R“ als Index hinzugefügt.

Die Radparameterverläufe der beiden in Kap. 6.3.1 erwähnten Garnituren 101 und 140 der Baureihe A mit tonalen Auffälligkeiten zeigen keine offensichtlichen Unterschiede im Vergleich zu den Verläufen der anderen Garnituren. Zudem spiegeln sich die zeitlichen Parameterentwicklungen der betroffenen, symmetrisch angeordneten Achsen (bei Garnitur 101 vor allem Achse 3 und 7 und bei Garnitur 140 die mittleren Achsen 4 bis 7) in keiner Weise in den von Häufungspunkten geprägten, Zeitverläufen der tonalen Auffälligkeiten wider. Aufgrund dessen scheint für diese beiden Garnituren kein direkter Zusammenhang der tonalen Auffälligkeiten zu den Eigenschaften der Radprofile gegeben zu sein.

Bei Garnituren der Schnellbahnbaureihe B liegen die Kilometerlaufleistungen der Radsätze (nicht dargestellt) über den Messzeitraum gesehen auf nahezu gleichem Niveau wie bei Garnituren der Baureihe A. Trotz dessen scheinen einige Parameter wie beispielsweise die Spurkranzhöhe, das Spurkranzflankenmaß oder das Spurmaß deutlich geringeren Änderungsraten als bei der Baureihe A zu unterliegen.

Bei den beiden in Kap. 6.3.1 erwähnten Garnituren 281 und 315 der Baureihe B sind keine offensichtlichen Zusammenhänge zu den Radparametern zu erkennen: bei der Garnitur 281 sind bei allen Vorbeifahrten kaum Unterschiede in den Radparametern zu verzeichnen, während sich die tonalen Auffälligkeiten zeitlich auf einen dreitägigen Zeitabschnitt konzentrieren, wodurch die erwähnte Vermutung einer Abhängigkeit der Triebwagenanordnung im Zugverband unterstrichen wird. Demgegenüber sind bei der Garnitur 315 zwar Unterschiede in den Radparametern vorhanden, jedoch nehmen die Parameterwerte in dem zeitlich relevanten Bereich keine außergewöhnlich hohen oder niedrigen Werte im Vergleich zu anderen Garnituren ohne derartige tonale Auffälligkeiten an. Insofern kann auch bei der Baureihe B anhand der Parameterverläufe nicht auf einen direkten Konnex zu den tonalen Auffälligkeiten geschlossen werden.

Bereits an dieser Stelle sei angemerkt, dass sich bei beiden Schnellbahnbaureihen bei verschiedenen Parametern durch die Reprofilierungszyklen ein zeitlich vergleichbares Verhalten zeigt. Durch die Reprofilierung nehmen mehrere Parameter zum gleichen Zeitpunkt definierte Werte an, bevor sie sich aufgrund des Verschleißes wieder verändern (meist erhöhen). Diese ähnlichen Verlaufstendenzen sind jedoch nachteilig, da sie eine differenzierte Betrachtung der akustischen Auswirkungen verschiedener Parameter stark einschränken.

6.3.4. Statistische Auswertung

Ziel ist mittels Statistik zu prüfen, inwieweit zwischen Radparametern und dem Auftreten akustischer Auffälligkeiten Zusammenhänge im Sinn von Korrelationen – also einer beobachteten Beziehung zwischen Merkmalen der jeweils betrachteten Größen – zu erkennen sind. Es sei an dieser Stelle hervorgehoben, dass selbst im Fall erkannter, enger Beziehungen kein ursächlicher Zusammenhang (Kausalität) zwischen den Größen bestehen muss, sondern lediglich kann.

In den folgenden Ausführungen wird nicht nur zufolge der größeren Anzahl an Vorbeifahrten, sondern auch wegen des während des Messzeitraumes durchgängigeren Einsatzes der Garnituren der Fokus auf die Schnellbahnbaureihe A gelegt. Zudem werden primär die Vorbeifahrten aller Garnituren gemeinsam betrachtet, um Aufschluss über etwaige, allgemeine Zusammenhänge zu erhalten.

Regressionsansatz

Sofern eine Beziehung zwischen Radparametern und akustischen Auswirkung besteht, kann von einer gerichteten Abhängigkeit ausgegangen werden. Aus diesem Grund werden statt den allgemeinen Korrelationsanalysen für Wechselbeziehungen nachfolgend Regressionen betrachtet.

Als abhängige Variable (Zielvariable) der Regressionen dient die dichotome (binäre) Größe „Vorhandensein einer akustischen Auffälligkeit“, welche die Werte ja/nein bzw. 1/0 annehmen kann. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf die Vereinigungsmenge von tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten gelegt, insbesondere wegen des in Kap. 4.2.2 beschriebenen Eindrucks eines häufig vorhandenen Zusammenhangs der beiden Geräuscharten bei der Schnellbahnbaureihe A. Wie bereits in Kap. 6.3.1 erwähnt, fehlt wegen der Überlagerung der Schallemissionen mehrerer Achsen im 7,5 m zur Gleisachse entfernt liegenden Messpunkt die Möglichkeit auffällige Geräuschanteile einzelnen Achsen zuzuordnen zu können. Als Konsequenz kann für die Auswertungen nur die Information über das Vorhandensein akustischer Auffälligkeiten auf Zugsebene herangezogen werden.

Die Radparameter stellen grundsätzlich die unabhängigen Variablen der Regressionen dar. Allerdings sind sie analog zur Zielgröße auf die Zugsebene zu beziehen. Zu diesem Zweck wurden jeweils die Maximal-, die Mittel- und die Minimalwerte über alle Räder eines Zuges gebildet. Durch die beiden Extremwerte sollen vor allem auffällige (hohe oder niedrige) Radparameter adressiert werden, während durch die Mittelung gerade dem Umstand Rechnung getragen wird, dass in der Regel alle Räder einer Garnitur während

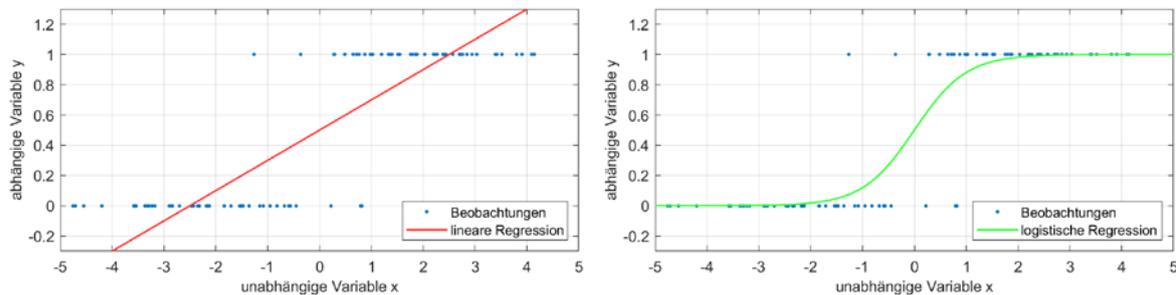


Abb. 6-130: Skizzen der Ansätze einer linearen Regression (links) und einer logistischen Regression (rechts) bei binärer abhängiger Variable y

einer Unterflurbehandlung überdreht werden und daher einige Radparameter wie die Spurkranzhöhe und –breite oder das Spurkranzflankenmaß über weite Bereiche nur eine geringe Streuung zwischen den Rädern aufweisen. Durch diese Aggregation der Radparameter auf jeweils die Garnitur beschreibende Parameterwerte wird die über weite Messphasen fehlende Information über die Orientierung von Schnellbahnen bei der Baureihe A obsolet. Gleichzeitig sind jedoch auch Verschlechterungen der Regressionsergebnisse zu erwarten, da die zugbezogenen Parameter im Fall von vorhandenen Abhängigkeiten durch die Mittelung weniger sensitiv bzw. bei der Extremwertbildung mit größeren Unsicherheiten behaftet sind.

Bei binären, abhängigen Variablen ist der Ansatz einer linearen Regression ungeeignet: wie Abb. 6-130 (links) verdeutlicht, liefert die Regressionsgerade einerseits nicht interpretierbare Werte < 0 bzw. > 1 . Andererseits wird durch die Gerade mit steigender (oder fallender) unabhängiger Variable eine Änderung der abhängigen Variablen prognostiziert. Dies ist bei einer abhängigen Variablen mit nur zwei Ausprägungen jedoch in der Regel nicht sinnvoll, sondern es werden sich Änderungen der Abhängigkeiten vielmehr in den Häufigkeiten äußern, mit der die Ausprägungen auftreten.

Der Ansatz der logistischen Regression, welcher sich für dichotome, abhängige Variablen eignet und daher im Weiteren verfolgt wird, versucht nicht die Zielvariable vorherzusagen, sondern die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ereignis eintritt. Die Schätzwerte der abhängigen Variable werden nicht unmittelbar durch eine lineare Funktion bestimmt, sondern es wird zunächst die Regressionsgerade in einen nichtlinearen Verlauf transformiert (vgl. Abb. 6-130, rechts). Der allgemeine Modellansatz für n unabhängige Variablen lautet [22]

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad \text{mit } z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$$

wobei die Modellparameter b_i ($i = 0 \dots n$) mit der Maximum-Likelihood Methode geschätzt werden. Im Gegensatz zur linearen Regression fließen die Regressionskoeffizienten und

die unabhängigen Variablen nur indirekt und nichtlinear über die e -Funktion ein. Dies hat zur Folge, dass die Interpretation der Koeffizienten b_i deutlich komplexer wird, da sie weder untereinander vergleichbar sind noch der Einfluss der unabhängigen Variablen über ihren Wertebereich konstant ist [22]. Zwar können auf einfache Weise anhand der Vorzeichen Tendenzaussagen getroffen werden, eine quantitative Aussage kann jedoch nur durch die Wirkung der Variation einzelner unabhängiger Variable auf die Chancenverhältnisse (Odds Ratios) abgeleitet werden: erhöht sich eine unabhängige Variable x_i um eine Einheit, so vergrößert sich das Chancenverhältnis – das bedeutet das Verhältnis der Chancen für $Y = 1$ vor dem Anstieg Variable x_i zu den Chancen nach dem Anstieg – um den Faktor e^{b_i} . Für vorliegende Fragestellung würde sich eine derartige Vorgehensweise zur Einschätzung von Einflussstärken der verschiedenen Radparameter wegen der Heterogenität in der Bedeutung konkreter Werte schwierig gestalten, weshalb die verschiedenen Radparameter jeweils getrennt voneinander betrachtet werden.

Zur Beschreibung der Anpassungsgüte des Regressionsmodells (Modellgüte) steht im linearen Fall das Bestimmtheitsmaß R^2 als Verhältnis von erklärter Varianz zur Gesamtvarianz zu Verfügung. Für logistische Regressionen besteht hingegen kein derartiges Maß, sondern es wurden verschiedene Pseudo-Bestimmtheitsmaße eingeführt. Wolf und Best [23] beschreiben als Pseudo- R^2 -Varianten unter anderem die Maße nach McFadden R^2_{McFadden} , nach Cox & Snell $R^2_{\text{Cox\&Snell}}$ und nach Nagelkerke $R^2_{\text{Nagelkerke}}$, wobei zumindest für das Maß R^2_{McFadden} die Daumenregel angegeben wird, dass bereits Werte zwischen 0,2 und 0,4 einer exzellenten Modellanpassung entsprechen. Das Pseudo-Bestimmtheitsmaß nach Nagelkerke $R^2_{\text{Nagelkerke}}$ ist hingegen als einziges der drei so normiert, dass es auch den Wert 1 erreichen kann, weshalb es stets die höchsten Werte der betrachteten Maßzahlen annimmt. Bensch [22] führt an, dass sich $R^2_{\text{Nagelkerke}}$ als beste Möglichkeit beim Versuch erwiesen hat, den Anteil der erklärten „Variation“ des logistischen Regressionsmodells zu quantifizieren, weshalb bei nachfolgenden Auswertungen vor allem auf dieses Maß Bezug genommen wird. Gleichzeitig wird von Wolf und Best aber auch darauf hingewiesen, dass die Interpretation von Pseudo-Bestimmtheitsmaßen mit Bedacht durchzuführen ist, da sich diese Maße nicht auf die erklärte Varianz beziehen.

Die Bewertung von Regressionen für das Auftreten akustischer Auffälligkeiten anhand der Anpassungsqualität erscheint vor allem für den Vergleich zwischen den verschiedenen Parametern zweckmäßig. Aus diesem Grund werden als Indiz für unterschiedliche Anpassungsgüten die drei erwähnten Parameter bei den logistischen Regressionen stets

berechnet und in den Diagrammen angeführt, während die Interpretation der absoluten Werte nicht vorgesehen ist. Aus dem gleichem Grund wird auf die Darstellung weiterer Parameter wie dem Akaike oder dem Bayessche Informationskriterium (AIC oder BIC) abgesehen.

Analyse des Witterungseinflusses zur Definition des betrachteten Zeitbereichs

Der Eindruck einer Witterungsabhängigkeit der Auftrittshäufigkeiten akustischer Auffälligkeiten ab Mitte Nov. 2016 wurde, ebenso wie ein nicht erklärbarer Anstieg Mitte Sept. 2016 in Kap. 6.3.2 beschrieben. Mit Hilfe der zuvor beschriebenen, logistischen Regression wurden initial die Abhängigkeiten von den Witterungsparametern Luft- und Schienentemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Taupunkt, sowie von den Differenzen zwischen der Lufttemperatur bzw. der Schienentemperatur und dem Taupunkt näher untersucht, um für die nachfolgende Analyse der Radparameter etwaige Einflüsse durch die Witterung sinnvoll senken zu können.

Bei den Regressionen wurden jeweils alle Garnituren einer Schnellbahnbaureihe betrachtet, um primär übergeordnete (garniturunabhängige) Effekte zu beleuchten. Die gesamten Ergebnisse der Regressionen sind für alle Witterungsparameter und beide Schnellbahnbaureihen jedoch für verschiedene Zeitabschnitte innerhalb des Messzeitraumes in Anhang F zusammengestellt. Vor allem die Regressionsergebnisse der beiden Zeitbereiche 10. März bis 9. Sept. 2016 (siehe Abb. 6-131 und Abb. 6-133) und 10. Nov. 2016 bis 10. Jän. 2017 (siehe Abb. 6-132 und Abb. 6-134) sind im Hinblick auf den Witterungseinfluss wegen ihrer großen Unterschiede bemerkenswert. So sind im Bereich November bis Jänner die Abhängigkeiten von der Luftfeuchtigkeit, sowie von den beiden Taupunktdifferenzen bei beiden Schnellbahnbaureihen ausgeprägt vorhanden, während diese in den Frühlings- und Sommermonaten verschwinden bzw. sehr schwach gegenläufigen Tendenzen der Abhängigkeiten zu erkennen sind. Die Differenz $\Delta T_{\text{Luft-Taupunkt}}$ nimmt von November bis Jänner bei den akustisch unauffälligen Vorbeifahrten sehr oft nur Werte knapp über 0 K und die Differenz $\Delta T_{\text{Schiene-Taupunkt}}$ großteils Werte unter 0 K an. Bei letztgenannter Bedingung einer Schienentemperatur unterhalb des Taupunkts ist eine Kondensation der Luftfeuchtigkeit an der Schienenoberfläche zu erwarten, sodass die Reduktion der akustischen Auffälligkeiten bei negativen Differenzen für eine Reibwertminderung als Folge einer benetzten Schienenoberfläche spricht. Auch dass von März bis September die Temperaturen höher und die Taupunktdifferenzen in der Regel deutlich über 0 K liegen und in diesem

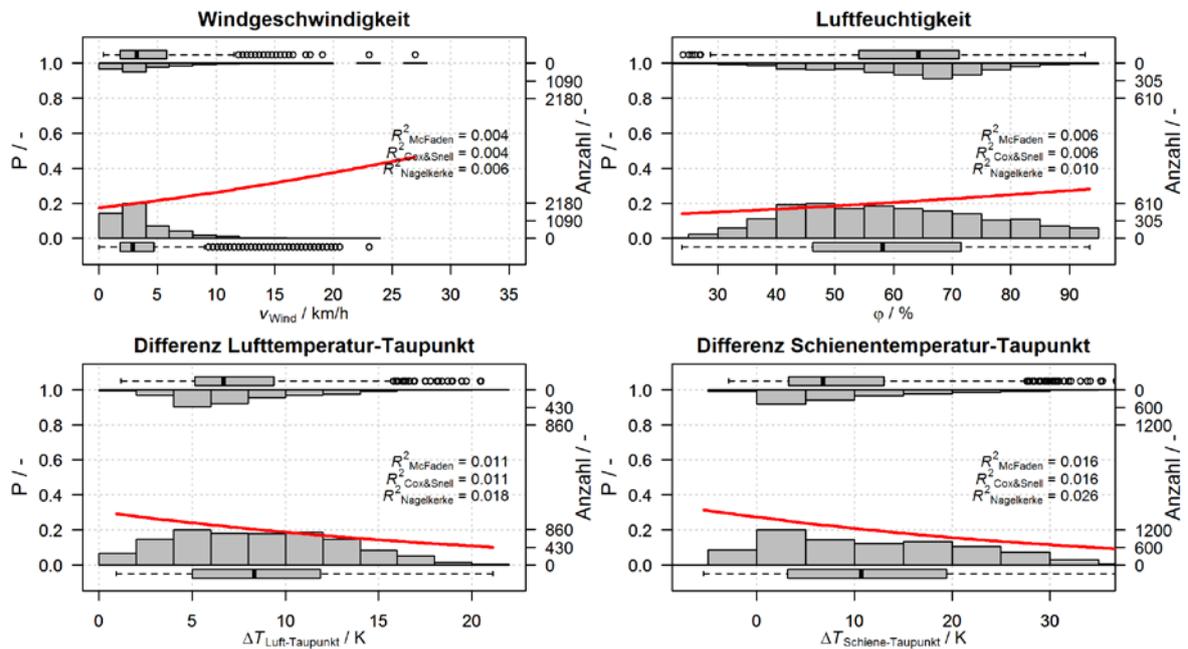


Abb. 6-131: Logistische Regression in Abhängigkeit ausgewählter Witterungsparameter (rote Linien) inkl. Histogramme der zugrunde liegenden Auftrittshäufigkeiten von akustisch unauffälligen Schnellbahngarnituren der Baureihe A (jeweils unteres Histogramm) und von tonal oder breitbandig auffälligen Garnituren (jeweils oberes Histogramm) während niederschlagsfreier Phasen in MQ2 im Zeitbereich 10. März 2016 bis 9. Sept. 2016 (6762 Züge)

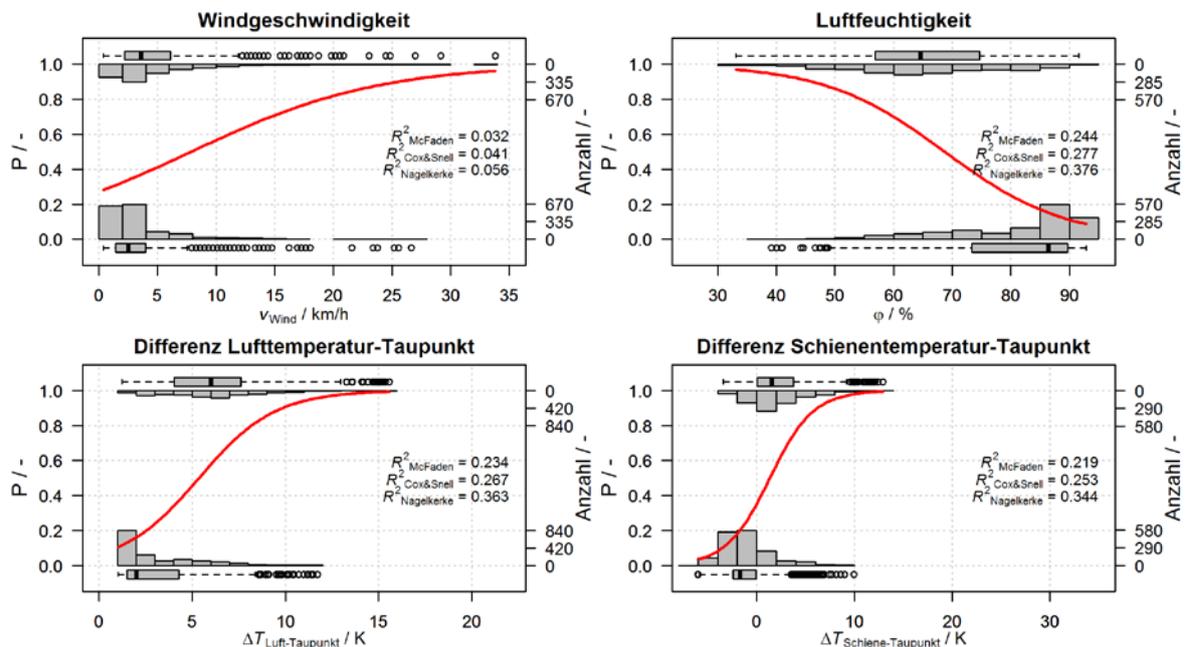


Abb. 6-132: : Logistische Regression in Abhängigkeit ausgewählter Witterungsparameter (rote Linien) inkl. Histogramme der zugrunde liegenden Auftrittshäufigkeiten von akustisch unauffälligen Schnellbahngarnituren der Baureihe A (jeweils unteres Histogramm) und von tonal oder breitbandig auffälligen Garnituren (jeweils oberes Histogramm) während niederschlagsfreier Phasen in MQ2 im Zeitbereich 10. Nov. 2016 bis 10. Jän. 2017 (2673 Züge)

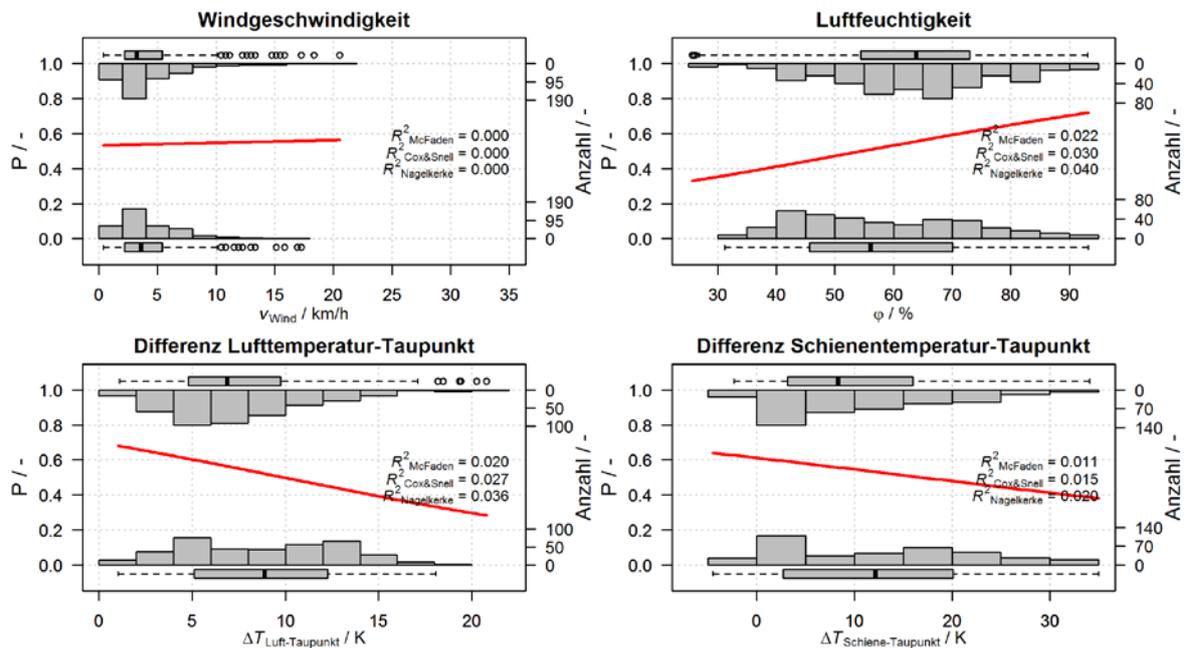


Abb. 6-133: Logistische Regression in Abhängigkeit ausgewählter Witterungsparameter (rote Linien) inkl. Histogramme der zugrunde liegenden Auftrittshäufigkeiten von akustisch unauffälligen Schnellbahngarnituren der Baureihe B (jeweils unteres Histogramm) und von tonal oder breitbandig auffälligen Garnituren (jeweils oberes Histogramm) während niederschlagsfreier Phasen in MQ2 im Zeitbereich 10. März 2016 bis 9. Sept. 2016 (804 Züge)

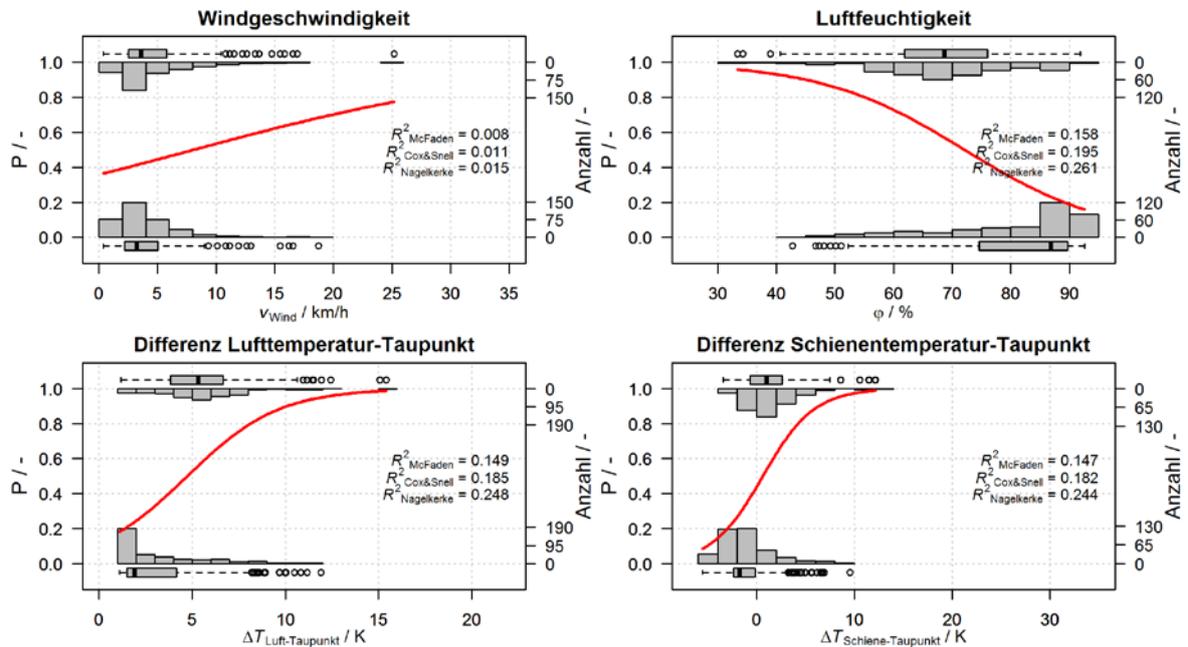


Abb. 6-134: Logistische Regression in Abhängigkeit ausgewählter Witterungsparameter (rote Linien) inkl. Histogramme der zugrunde liegenden Auftrittshäufigkeiten von akustisch unauffälligen Schnellbahngarnituren der Baureihe B (jeweils unteres Histogramm) und von tonal oder breitbandig auffälligen Garnituren (jeweils oberes Histogramm) während niederschlagsfreier Phasen in MQ2 im Zeitbereich 10. Nov. 2016 bis 10. Jän. 2017 (635 Züge)

Zeitbereich die Regressionsergebnisse keine derartigen Witterungsabhängigkeiten der akustischen Auffälligkeiten andeuten, unterstreicht diese Vermutung.

Gleiche Erkenntnisse liefern auch direkte Vergleiche einzelner Messmonate (vgl. Anhang F): so liegt die Modellgüte der Regression der drei temperaturbezogenen Parameter im letzten Messmonat (10. Dez. 2016 bis 10. Jän. 2017, vgl. Abb. F-7) etwas über den des vorletzten Monats (10. Nov. bis 9. Dez. 2016, vgl. Abb. F-6), in welchem die Histogramme etwas höhere Luft- und Schienentemperatur bestätigen. Das erste Messmonat (10. Feb. bis 9. März 2016, vgl. Abb. F-2) folgt diesem Trend: gegenüber den letzten beiden Messmonaten sind entsprechend der Histogramme im Mittel etwas höhere Temperaturen zu verzeichnen bzw. nimmt die Differenz $\Delta T_{\text{Schiene-Taupunkt}}$ meist Werte $> 0 \text{ K}$ an und bei beiden Schnellbahngarnituren ist bereits eine deutlich verminderter Zusammenhang bzw. im Fall der Schnellbahngarnitur B auch eine sehr schwache Trendumkehr der Regressionen zu bemerken. Gleiches gilt für die beiden Messmonate von 10. Sept. bis 9. Okt. 2016 (vgl. Abb. F-11) und von 10. Okt. bis 9. Nov. 2016 (vgl. Abb. F-12): mit zunehmender Temperaturen bzw. Taupunktdifferenzen schwinden auch hier die Abhängigkeiten von den drei Witterungsparametern bzw. kehren sich die Tendenzen geringfügig ins Gegenteil um. Zusammenfassend kann daher festgehalten werden, dass mit steigender Temperatur (insbesondere im Bereich niedriger Temperaturwerte) die mittels Regression geschätzte Witterungsabhängigkeit rasch abnimmt.

Im Hinblick auf die verschiedenen Witterungsparameter weist – entgegen der ersten Einschätzungen auf Basis der Zeitverlaufvergleiche in Kap. 6.3.2 – ein Vergleich der Regressionsergebnisse ab 10. Nov. der Windgeschwindigkeit in allen Fällen eine deutlich schlechtere und der Luftfeuchtigkeit in der Regel eine ähnliche (meist sogar eine geringfügig bessere) Modellgüte als den beiden Taupunktdifferenzen aus. Letzteres ist vermutlich auf die direkte Wechselbeziehung zwischen Luftfeuchtigkeit und Taupunkt zurückzuführen. Etwaige statistische Zusammenhänge zwischen der Windgeschwindigkeit und den Parametern Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur und Taupunkt erscheinen sehr komplex, weshalb in vorliegender Arbeit von einer weiterführenden Interpretation abgesehen wird.

Im Bezug zu der in Kap. 2 erhobene Literatur werden die vorliegenden Erkenntnisse des Verhaltens von Luftfeuchtigkeit und Taupunktdifferenzen bei kälteren Bedingungen (wie in Abb. 6-132 und Abb. 6-134 dargestellt) durch jene Untersuchungsergebnisse gestützt, welche eine Senkung der Auftrittswahrscheinlichkeit von Kurvenkreischen und -quietschen aufgrund einer feuchtigkeitsabhängigen Reduktion des Reibwertes

beschreiben (vgl. Thompson [2]). Die bei wärmeren Bedingungen beobachtete, wenngleich sehr schwach ausgeprägte Umkehr bei der Abhängigkeit zur Luftfeuchtigkeit (mit zunehmender Luftfeuchtigkeit treten häufiger akustische Auffälligkeiten auf, vgl. Abb. 6-131 und Abb. 6-133) stimmt hingegen mit den Ausführungen von Liu und Meehan [7] oder von Meehan et al. [8] zumindest teilweise überein (zumal bei diesen Publikationen nicht auf die jeweils vorherrschenden Umgebungstemperaturen eingegangen wurde und damit die Möglichkeit besteht, dass kalte Bedingungen nicht betrachtet wurden). So zeigen vorliegende Messungen bei einer Unterteilung der Luftfeuchtigkeit in Klassen mit einer Breite von 10 % für die Schnellbahnbaureihe A zwischen 20 % und 80 % eine Zunahme der akustischen Auffälligkeiten von ca. 10 % auf 30 %, während sie in den beiden oberen Klassen bei abnehmenden Zugzahlen auf ca. 13 % bzw. 5 % fallen. Bei der Schnellbahnbaureihe B steigen bei deutlich geringen Zugzahlen die relativen Auftretshäufigkeiten mit der Luftfeuchtigkeit von etwa 25 % auf rund 60 % bis 70 % an, wobei ab einer Luftfeuchtigkeit von 60 % im Mittel die Werte konstant bleiben. Gerade für die Klassen mit hoher Luftfeuchtigkeit (> 70 %) ist im Hinblick auf deren Aussagekraft zu berücksichtigen, dass der überwiegende Teil der Vorbeifahrten beider Baureihen bei Differenzen $\Delta T_{\text{Schiene-Taupunkt}} < 5 \text{ K}$ gemessen wurden, weshalb hier die Wahrscheinlichkeit einer benetzten Schiene zunimmt. Auch ist festzuhalten, dass bei den erwähnten Arbeiten zum Teil andere Rahmenbedingungen bestanden (Laborversuche, vorwiegend Güterverkehr bei Feldmessungen, etc.), wodurch etwaige Abweichungen begründet sein können.

In Anbetracht der durch die Regression aufgezeigten Abhängigkeiten sind als Voraussetzung für belastbare Ergebnisse von Regressionen mit Radparametern grundsätzlich Emissionsdaten von jenen Zeitabschnitten zu vermeiden, in welchen die akustischen Auffälligkeiten große Abhängigkeiten von der Witterung zeigen. Letztlich wurde der Zeitbereich des 2. bis zum 7. Messmonat (10. März bis 9. Sept. 2016) gewählt, da nur in diesem Bereich vergleichsweise geringe Anteile an negativen Differenzen $\Delta T_{\text{Schiene-Taupunkt}}$ vorhanden sind. Der starke Anstieg auffälliger Emissionsanteile Mitte Sept. 2016 konnte zwar nicht durch die Witterung erklärt werden, jedoch wird dieser durch die Bereichswahl ebenfalls ausgeblendet. Um auch innerhalb dieses 6-monatigen Zeitbereichs das Vorhandensein von durch Kondensation benetzten Schienen und damit eine direkte Beeinflussung akustischer Auffälligkeiten weitgehend ausschließen zu können, werden zudem alle Vorbeifahrten ausgeblendet, bei welchen die Differenz zwischen Schienentemperatur und Taupunkt $\Delta T_{\text{Schiene-Taupunkt}}$ Werte $< 5 \text{ K}$ annimmt.

Ergebnisse und Interpretation

Entsprechend des beschriebenen Regressionsansatzes und mit den erläuterten witterungsbedingten Einschränkungen der Vorbeifahrten wurden zunächst logistische Regressionen für Maximal-, arithmetische Mittel- und Minimalwerte ausgewählter Rad- bzw. Achsparameter, die anhand aller Räder bzw. Achsen eines Zuges gebildet werden, berechnet. Die Auswahl der Parameter orientierte sich an den für die Verlaufsdarstellungen in Kap. 6.3.3 gewählten 11 Parametern. Durch die für die zugbasierte Auswertung erforderliche Aggregation werden nicht nur Werte über die Achsen, sondern auch jene Parameter, die gesondert für linke und rechte Räder vorliegen zusammengefasst. Auf eine Auswertung des Profilhohllaufs Ph wurde verzichtet, da dieser Parameter bei der im Fokus liegenden Schnellbahnbaureihe stets den Wert 0 mm aufweist. Hingegen wurde als weiterer Achsparameter die Achsgeschwindigkeit v_{Achse} einbezogen, um etwaige Abhängigkeiten zu akustischen Auffälligkeiten abschätzen zu können. Die logistischen Regressionen wurden folglich für die acht Parameter Messkreisdurchmesser \varnothing_{MK} , Differenz der Messkreisdurchmesser am Radsatz $\Delta\varnothing_{\text{MK,RS}}$ und im Drehgestell $\Delta\varnothing_{\text{MK,DG}}$, Spurkranzhöhe Sh , Spurkranzdicke Sd , Spurkranzflankenmaß qR , Spurmaß Sr und Achsgeschwindigkeit v_{Achse} berechnet.

In Abb. 6-135 sind die Regressionen für alle Garnituren der Schnellbahnbaureihe A und in Abb. 6-136 für alle Garnituren der Baureihe B auf Basis von Parametermittelwerten dargestellt. In Anhang G.1 und G.2 finden sich zudem auch die Regressionsergebnisse für minimale und maximale Rad- bzw. Achsparameter der Garnituren.

Ein erster Vergleich aller Regressionen verdeutlicht, dass sich die Modellgüten generell auf einem niedrigen Niveau befinden, wobei dies aufgrund des entsprechend der Messkonfiguration erforderlichen, zugbasierten Auswertansatzes zu erwarten war. Die Schnellbahnbaureihe A zeigt gegenüber der Baureihe B zumeist höhere Modellgüten. Ob sich dies letztlich durch die deutlich geringere Anzahl an betrachteten Ereignissen (nur rund ein Neuntel der Vorbeifahrten der Baureihe A) begründen lässt, die höhere Heterogenität im Wagenmaterial (doppelt so hohe Anzahl an Garnituren) wesentlich beiträgt oder ob doch eine größere Unabhängigkeit akustischer Auffälligkeiten von Rad- oder Achsparametern besteht, lässt sich anhand der Datenlage nicht klären. Als Konsequenz des größeren Messdatenumfangs wird in den weiteren Betrachtungen jedoch vorwiegend auf die Baureihe A eingegangen.

Anhand der drei Aggregierungsvarianten lässt sich erkennen, dass sich die Verläufe der logistischen Funktionen mit Ausnahme der Durchmesserdiffferenz im Drehgestell $\Delta\varnothing_{\text{MK,DG}}$

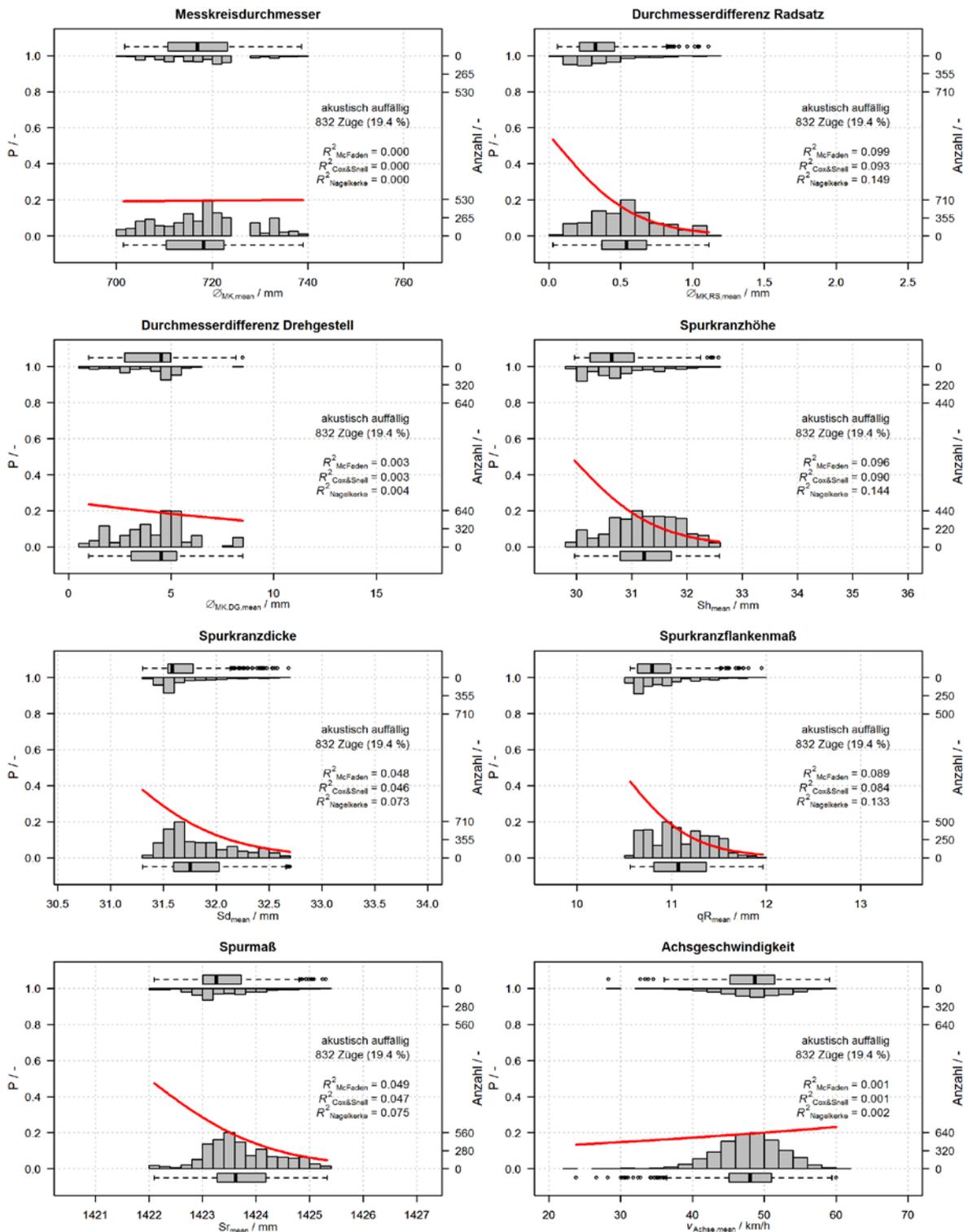


Abb. 6-135 Logistische Regression in Abhängigkeit der Mittelwerte ausgewählter Rad- und Achsparameter (rote Linien) inkl. Histogramme der zugrunde liegenden Auftrittshäufigkeiten von akustisch unauffälligen Schnellbahngarnituren der Baureihe A (jeweils unteres Histogramm) und von tonal oder breitbandig auffälligen Garnituren (jeweils oberes Histogramm) während niederschlagsfreier Phasen und Differenzen $\Delta T_{\text{Schiene-Taupunkt}} \geq 5 \text{ K}$ in MQ2 im Zeitbereich 10. März 2016 bis 9. Sept. 2016 (4281 Züge)

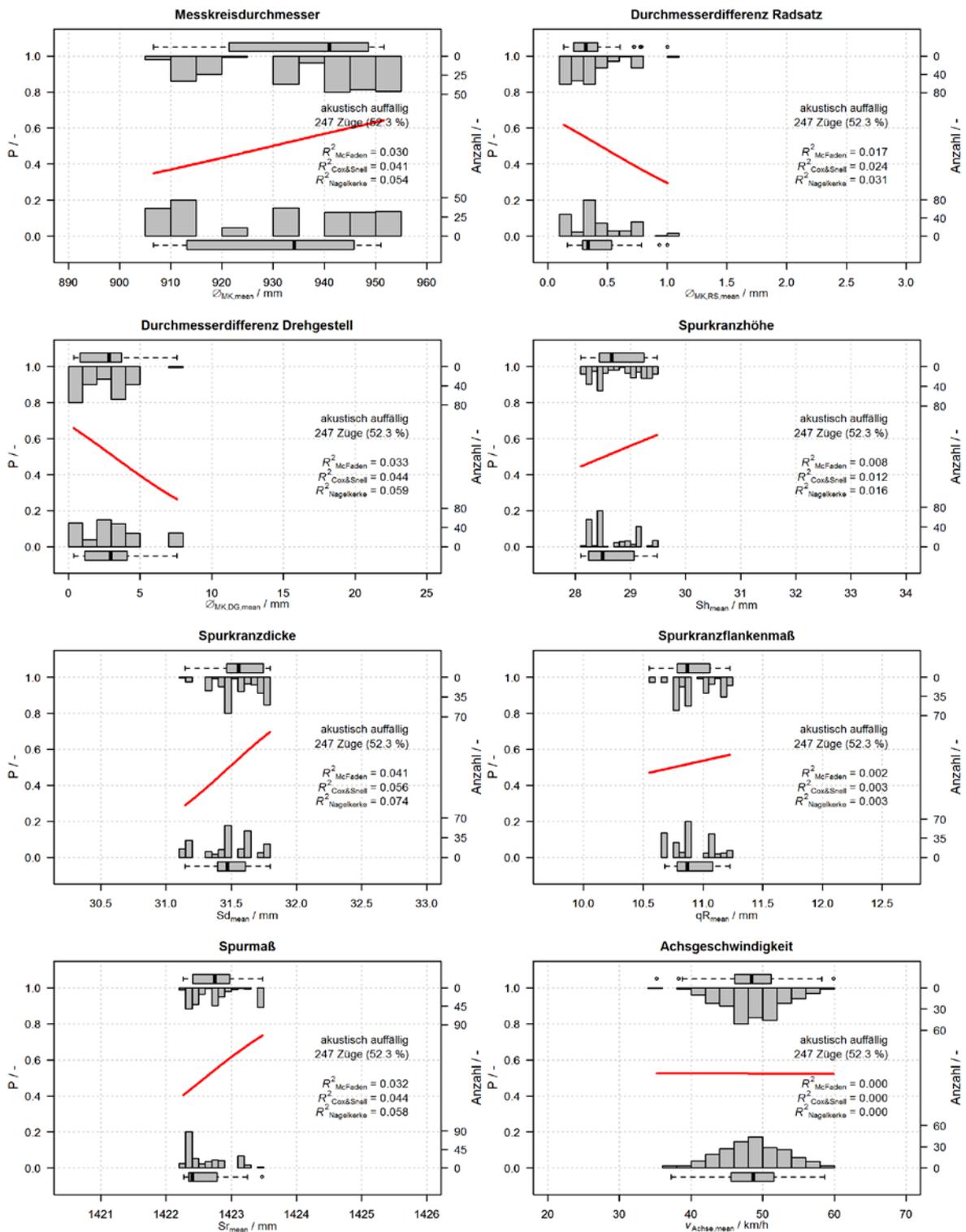


Abb. 6-136: Logistische Regression in Abhängigkeit der Mittelwerte ausgewählter Rad- und Achsparameter (rote Linien) inkl. Histogramme der zugrunde liegenden Auftrittshäufigkeiten von akustisch unauffälligen Schnellbahngarnituren der Baureihe B (jeweils unteres Histogramm) und von tonal oder breitbandig auffälligen Garnituren (jeweils oberes Histogramm) während niederschlagsfreier Phasen und Differenzen $\Delta T_{\text{Schiene-Taupunkt}} \geq 5 \text{ K}$ in MQ2 im Zeitbereich 10. März 2016 bis 9. Sept. 2016 (472 Züge)

bei allen Rad- bzw. Achsparametern sehr ähneln. Regressionen auf Basis von Maximalwerte und die Mittelwerte liefern zudem in der Regel vergleichbare Modellgüten, während die Güten bei Betrachtung der Minimalwerte – ebenfalls mit Ausnahme von $\Delta\varnothing_{MK,DG}$ – oft abfallen. Das zum Teil gegenläufige Verhalten der Durchmesserdifferenz $\Delta\varnothing_{MK,DG}$ scheint die Konsequenz von unterschiedlichen Betriebs- und Inspektionsgrenzwerten für die beiden äußeren, angetriebene Drehgestelle und für die drei nicht angetriebenen Jakobsdrehgestelle zu sein. Da die Radprofilverläufe in Anhang D.1 bestätigen, dass in der Praxis häufig auch deutlich unterschiedliche Parameterwerte zwischen diesen Drehgestellarten auftreten, adressieren Maximalwertbetrachtungen bei der Regression vermutlich die Jakobsdrehgestelle und Minimalwertbetrachtungen die angetriebenen Drehgestelle, während Mittelwertbetrachtungen möglicherweise häufiger von den höheren Werten der Jakobsdrehgestelle dominiert werden.

Für alle anderen Rad- bzw. Achsparameter bestehen die gleichen Grenzwerte für die beiden Drehgestellarten. Die Ähnlichkeit der Regressionsergebnisse der drei Aggregierungsvarianten resultiert wohl aus der in Kap. 6.3.3 beschriebenen Ähnlichkeit der Parameterverläufe aller Räder bzw. Achsen, die sich dadurch ergibt, dass in der Regel alle Räder einer Garnitur gemeinsam reprofiliert werden, die Rad- bzw. Achsparameter danach gleiche Werte annehmen und anschließend durch Verschleiß gleichsinnige Änderungen erfahren. Zur Untersuchung des mittleren Verschleißes werden für die Auswertungen im Folgenden daher (mit Ausnahme der Durchmesserdifferenz $\Delta\varnothing_{MK,DG}$) primär Regressionen auf Basis von Parametermittelwerten herangezogen.

Anhand der Regressionsergebnisse für die vorliegenden Messdaten, welche bei wärmeren Witterungsbedingungen in niederschlagsfreien Phasen erfasst und bei welchen Messungen bei Schientemperaturen im Bereich und unterhalb des jeweils vorherrschenden Taupunkts ausgeschlossen wurden, können folgende Aussagen und Interpretationen – sofern nicht anders erwähnt für die Schnellbahnbaureihe A – abgeleitet werden.

Messkreisdurchmesser \varnothing_{MK}

Eine Abhängigkeit der akustischen Auffälligkeiten von verschleißbedingten Änderungen des Messkreisdurchmessers \varnothing_{MK} kann mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Auch wenn verschiedene Radgrößen grundsätzlich als Einflussfaktoren angesehen werden, deuten die Untersuchungsergebnisse dies nicht an. Auch scheinen Zusammenhänge zu anderen Profilparametern unwahrscheinlich, da sich die während

des Betriebs auftretenden Raddurchmesserwerte aufgrund der Reprofilierungen unabhängig vom eigentlichen Verschleißzustand des Radprofils einstellen können.

Achsgeschwindigkeit v_{Achse}

Eine ähnliche Unabhängigkeit zeigt sich auch bei der Achsgeschwindigkeit v_{Achse} . Zwar sind bei allen drei Aggregierungsvarianten anhand der logistischen Funktion minimale Tendenzen einer mit der Geschwindigkeit zunehmenden Auftrittshäufigkeit zu erkennen. Jedoch sind die Histogramme von akustisch auffälligen und akustisch unauffälligen Zügen nahezu gleich verteilt und sich diese Tatsache in den verschwindend kleinen Pseudo-Bestimmtheitsmaßen widerspiegelt (maximaler Wert 0,003).

Radprofilbeschreibenden Parameter (Sh , Sd , qR , und Sr)

Die radprofilbeschreibenden Parameter Spurkranzhöhe Sh , Spurkranzdicke Sd und Spurkranzflankenmaß qR , aber auch das Spurmaß Sr , welches bei konstantem Innenabstand der Radkranzstirnflächen I ausschließlich von den Spurkranzdicken Sd_L und Sd_R der beiden Räder einer Achse beeinflusst wird, weisen alle eine sehr ähnliche Form der logistischen Funktion auf: mit zunehmenden Parameterwerten tendiert die Wahrscheinlichkeit akustischer Auffälligkeiten gegen Null. Bei den geringsten, beobachteten Werten bewegen sich die prognostizierten Wahrscheinlichkeiten hingegen im Bereich zwischen 0,3 bis 0,5. Auch anhand der Histogramme sind unterschiedliche Schwerpunkte in den Verteilungen gut erkennbar. Dennoch bewegen sich die Modellgüten nur auf dem erwähnten geringen Niveau (R_{McFadden}^2 und $R_{\text{Cox\&Snell}}^2$ bis zu 0,1 und $R_{\text{Nagelkerke}}^2$ bis zu 0,14).

Trotz dieser geringen Modellgüten lassen die in Anhang G.3 für die 11 verschiedenen Schnellbahngarnituren separat durchgeführten Regressionen bei 10 Garnituren gleiche Tendenzen bei den Radprofilparametern erkennen. Einzige Ausnahme stellt die Garnitur 136 der Baureihe A dar, bei der sich keine Abhängigkeiten der akustischen Auffälligkeiten von den vier Radprofilparametern andeuten – weder bei Mittelwert-, noch bei Extremwertbetrachtungen. Bei den 10 Garnituren mit vergleichbaren Tendenzen schwanken die Modellgüten in einem erwartbaren Ausmaß, wobei vereinzelt auch Werte von 0,2 (R_{McFadden}^2 und $R_{\text{Cox\&Snell}}^2$) bzw. von 0,3 ($R_{\text{Nagelkerke}}^2$) überschritten werden. Dass beinahe alle Garnituren ähnliche Tendenzen aufweisen, kann daher als weiteres Indiz für eine generelle, wenngleich schwache Abhängigkeit der akustischen Auffälligkeiten von diesen Parametern gewertet werden.

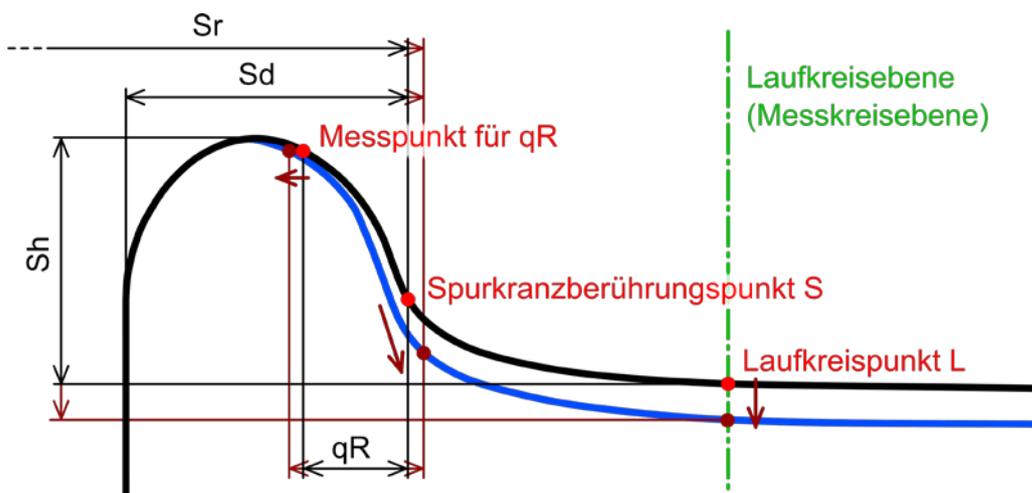


Abb. 6-137: Prinzipskizze über möglichen Verschleiß, der zu einer Vergrößerung der radprofilbeschreibenden Parameter Spurkranzhöhe Sh , Spurkranzdicke Sd , Spurkranzflankenmaß qR und Spurmaß Sr führt

Bei den Variationen der vier radprofilbeschreibenden Parameter in den Histogrammen handelt es sich gemäß den Zeitverläufen durchwegs um Anstiege der Parameterwerte zwischen Reprofilierungen. In Abb. 6-137 ist eine Möglichkeit eines Verschleißprofils skizziert, bei welcher alle vier Radprofilparameter gegenüber dem ursprünglichen Profil zunehmen.

Innerhalb der vier Parameter weisen meist jene Regressionen, die auf der Spurkranzhöhe Sh und der Spurkranzflankensteilheit qR basieren, ähnliche Modellgüten auf, während bei Spurkranzdicke Sd und dem damit in Zusammenhang stehenden Spurmaß Sr geringere Werte zu beobachten sind. Dies ist insofern interessant, da unter der Annahme, dass der Messpunkt für die Ermittlung der Flankensteilheit qR keinem Verschleiß unterliegen würde und unter der Voraussetzung vernachlässigbarer Messabweichungen bei der Profilmessung, die Spurkranzdicke Sd und die Flankensteilheit qR idente Verteilungen in den Histogrammen und in weiterer Folge idente Modellgüten aufweisen müssten. Tatsächlich ist das Flankenmaß jedoch etwas breiter verteilt, als die Spurkranzdicke, weshalb davon ausgegangen wird, dass auch der Messpunkt für qR einem (geringen) Verschleiß unterliegt (vgl. Abb. 6-137).

Obgleich der unterschiedlichen Modellgüten der vier Parameter erscheint eine weitere Wertung zwischen den Parametern aufgrund deren geometrischer Zusammenhänge weder zielführend, noch anhand des vorliegenden Datenmaterials als Folge der meist gleichsinnigen Parameterentwicklungen über der Zeit und der sich daraus ergebenden Problematik differenzierter Betrachtungen möglich.

Durchmesserdifferenzen am Radsatz $\Delta\phi_{MK,RS}$ und im Drehgestell $\Delta\phi_{MK,DG}$

Die Durchmesserdifferenz am Radsatz $\Delta\phi_{MK,RS}$ weist bei vergleichbarer Modellgüte wie Spurkranzhöhe Sh und der Spurkranzflankensteilheit qR die Tendenz einer Abnahme der Auftrittswahrscheinlichkeiten akustischer Auffälligkeiten mit zunehmenden Durchmesserdifferenzen auf. Eine ähnliche Tendenz, jedoch bei geringerer Modellgüte ist auch bei einer minimalwertbasierten Regressionen der Durchmesserdifferenz im Drehgestell $\Delta\phi_{MK,DG}$ vorhanden, welche sich entsprechend der obigen Ausführung vermutlich auf die beiden äußeren, angetriebene Drehgestelle bezieht. Derartige Tendenzen entsprechen weder den Erwartungen noch ist eine höchste Auftrittswahrscheinlichkeit akustischer Auffälligkeiten bei verschwindender Durchmesserdifferenz physikalisch zu erklären – zumindest sofern die Durchmesserdifferenzen im Mittel nicht einseitig gerichtet sind und größere Durchmesser überwiegend an der Bogenausseite einen spurkranzanlauffreien Bogenlauf begünstigen. Abgesehen von diesem unwahrscheinlichen Fall, würden diese Ergebnisse auch plausibel, wenn die meist gleichsinnigen Entwicklung der Radparameter, auf welche bereits in Kap. 6.3.3 hingewiesen wurde, berücksichtigt wird. Geht man von dem zuvor diskutierten, möglichen Einfluss der vier Radprofilparameter aus, so ist mit zunehmendem Verschleiß bzw. zunehmender Laufleistung seit der letzten Reprofilierung oder dem letzten Achstausch eine Abnahme der Auftrittswahrscheinlichkeit akustischer Auffälligkeiten vorhanden. Geht man weiters von einem demgegenüber vernachlässigbaren Einfluss der Durchmesserdifferenzen aus, so würden – da entsprechend der Zeitverläufe beide Durchmesserdifferenzen ($\Delta\phi_{MK,RS}$ und $\Delta\phi_{MK,DG}$) bei Reprofilierungen bzw. Achstauschen in der Regel deutlich verringert werden und anschließend mit zunehmender Laufleistung zumeist wieder ansteigen – auch die Regressionsergebnisse der Durchmesserdifferenzen gleiches Verhalten wie jene der vier Radprofilparameter zeigen. Grundsätzlich kann auch umgekehrt eine Abhängigkeit der Auftrittshäufigkeiten von den Durchmesserdifferenzen und eine scheinbare Abhängigkeit der Radprofilparameter bestehen (insbesondere da durch die erwähnte, erforderliche Aggregation der Radparameter Unsicherheiten in den Ergebnissen erhöht werden). Jedoch wird dies aufgrund der erwähnten, geringen physikalischen Plausibilität von den Autoren als unwahrscheinlich eingestuft.

Prüfung des Einflusses der mittleren Zuggeschwindigkeit

Eine Abhängigkeit des Auftretens akustischer Auffälligkeiten von Achsgeschwindigkeiten konnte nicht festgestellt werden. Dadurch wird jedoch nicht die Frage beantwortet, ob eine

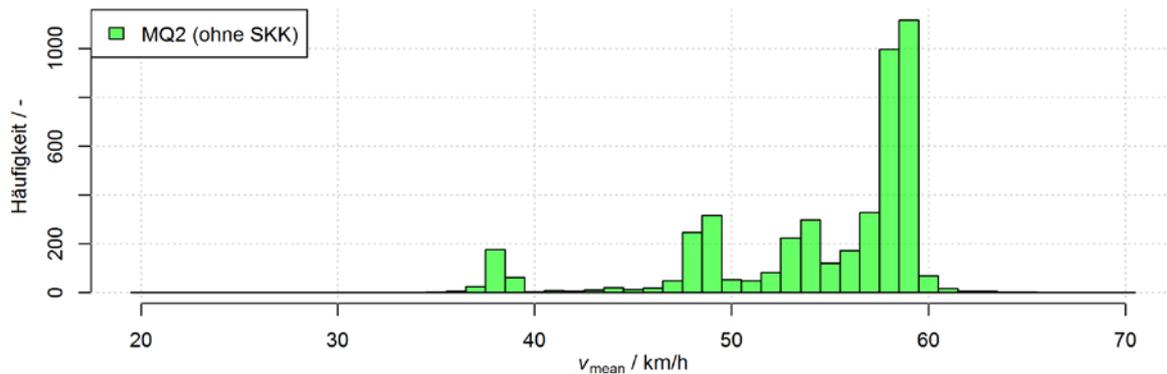


Abb. 6-138: Histogramm der mittleren Zuggeschwindigkeiten v_{mean} der Schnellbahngarnituren der Baureihe A während niederschlagsfreier Phasen und Differenzen $\Delta T_{\text{Schiene-Taupunkt}} \geq 5 \text{ K}$ in MQ2 im Zeitbereich 10. März 2016 bis 9. Sept. 2016 (4499 Züge)

Variation der Abhängigkeiten der anderen Parameter bei verschiedenen Geschwindigkeiten besteht. Um dem nachzugehen wurden logistische Regressionen für unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche gesondert durchgeführt. Entsprechend der in Abb. 6-138 dargestellten Geschwindigkeitsverteilung und in Anlehnung an die in den Vorkapiteln eingeführten Geschwindigkeitsklassen mit einer Breite von 10 km/h werden dabei die drei Klassen 40 km/h, 50 km/h und 60 km/h betrachtet, bei welchen eine ausreichend hohe Anzahl an Vorbeifahrten vorliegt.

Ein Vergleich der drei Aggregierungsvarianten zeigt ähnliches Verhalten zwischen den Geschwindigkeitsklassen, weshalb die Ergebnisse exemplarisch nur für mittlere Rad- bzw. Achsparameter in Anhang G.4 zusammengestellt sind. Gegenüber den von der Geschwindigkeit unabhängigen Regressionen in Abb. 6-135 zeigt die 60 km/h Klasse durchwegs etwas höhere Pseudo-Bestimmtheitsmaße für alle vier radprofilbeschreibenden Parameter ($R_{\text{Nagelkerke}}^2$ steigt beispielsweise bei Spurkranzhöhe Sh und Flankenmaß qR von 0,144 bzw. 0,133 auf knapp über 0,16 an). Demgegenüber liegen die Modellgüten der 50 km/h Klasse (mit Werten von 0,107 und 0,082) unter und die Güten der 40 km/h Klasse (mit Werten von 0,147 und 0,126) wieder auf vergleichbarem Niveau wie bei geschwindigkeitsunabhängigen Regressionen. Es scheint sich damit im betrachteten Geschwindigkeitsbereich kein klar begründbarer Trend abzuzeichnen bzw. sind die beschriebenen, geringen Unterschiede in den Regressionsergebnissen vermutlich das Resultat statistischer Schwankungen.

Prüfung des Einflusses der Luftfeuchtigkeit

Um eine etwaige Beeinflussung der vorliegenden Regressionsergebnisse durch den zuvor beschriebenen Anstieg der relativen Häufigkeiten akustischer Auffälligkeiten bei Zunahme der Luftfeuchtigkeit zu prüfen, wurden die Vorbeifahrten entsprechend der jeweils

vorherrschenden relativen Luftfeuchtigkeit φ in Klassen mit einer Breite von 10 % unterteilt, für diese Klassen separat Regressionen berechnet und die erhaltenen, in Anhang G.5 dargestellten Ergebnisse mit jenen der Regressionen aller Vorbeifahrten aus Abb. 6-135 verglichen. Im Bereich zwischen 20 % und 80 % Luftfeuchtigkeit verhalten sich alle Radparameter, wenngleich unauffällige Schwankungen vorhanden sind, im Großen und Ganzen vergleichbar. Die erfassten Vorbeifahrten bei Luftfeuchtigkeiten $\geq 80\%$ werden beinahe gänzlich durch das Kriterium $\Delta T_{\text{Schiene-Taupunkt}} \geq 5 \text{ K}$ ausgeschieden, weshalb für diesen Bereich kein Vergleich möglich ist (in der Klasse von 80 % bis 90 % Luftfeuchtigkeit sind nur drei Vorbeifahrten und in der Klasse von 90 % bis 100 % Luftfeuchtigkeit sind keine Vorbeifahrten enthalten). Aufgrund der Ähnlichkeiten der Regressionen bei unterschiedlichen Luftfeuchtigkeiten ist daher von keinem wesentlichen Einfluss auf die Regressionsergebnisse auszugehen.

Differenzierung zwischen breitbandigen und tonalen Auffälligkeiten

Sämtliche Regressionen wurden auch gesondert für tonale und breitbandige Komponenten berechnet (vgl. exemplarische Darstellungen der Pendants zu Abb. 6-135 in Anhang G.6). Allerdings tritt hierbei ein deutliches Ungleichgewicht in der Anzahl an auffälligen Zügen ein. Während von den 832 akustisch auffälligen Zügen (vgl. Abb. 6-135) im Zeitbereich von 10. März bis 9. Sept. 2016 806 Züge (~97 %) breitbandige Auffälligkeiten (Kurvenkreischen) aufweisen, sind tonale Auffälligkeiten (Kurvenquietschen) nur bei 102 Zügen (~12 %) vorhanden. Auf Basis dieser wenigen Vorbeifahrten sind für tonale Komponenten keine Abhängigkeiten oder Tendenzen von Radparameter erkennbar (die maximale Modellgüte über alle Aggregierungsvarianten beträgt lediglich 0,025 und tritt bei Raddurchmesserunterschieden am Radsatz und im Drehgestell auf). Die dargestellten Ergebnisse akustischer Auffälligkeiten sind daher von dem für Spurkranzanlauf kennzeichnenden Kurvenkreischen dominiert.

Schnellbahnbaureihe B

Eine Interpretation der Ergebnisse statistischer Auswertungen gestaltet sich bei der Schnellbahnbaureihe B schwieriger als bei der zuvor betrachteten Baureihe A. Zunächst ist die statistische Aussagekraft der Regressionen bei der Baureihe B geringer einzustufen, da die Datengrundlage deutlich kleineren Umfang aufweist. Zudem waren, wie aus den Zeitverläufen von akustischen Auffälligkeiten und von Rad- bzw. Achsparametern in den Kapiteln 6.3.2 und 6.3.3 gut zu erkennen ist, die Schnellbahngarnituren stets für kurze, zeitlich zusammenhängende Phasen auf der S45

im Einsatz, sodass keine Informationen über das Verhalten akustischer Auffälligkeiten bei fortschreitendem Verschleiß der Räder einer Garnitur vorhanden sind. Aufgrund dieser ungünstigeren Ausgangslage werden bei den nachfolgenden statistischen Auswertungen der Radeigenschaften der Schnellbahnbaureihe B stets die Gesamtzahl an Vorbeifahrten betrachtet.

Die in Abb. 6-136 dargestellten Ergebnisse zeigen bei den vier Radprofilparametern Sh , Sd , qR , und Sr bei gleichem Auswertansatz gegenüber der Baureihe A gegenläufige Trends (bei größer werdenden Parameterwerten treten akustische Auffälligkeiten häufiger auf). Die beiden Parameter Spurkranzhöhe Sh und Flankenmaß qR , die bei der Baureihe A gegenüber den anderen beiden Radprofilparametern höhere Modellgüten aufweisen, zeigen Werte nahe Null ($R_{\text{Nagelkerke}}^2$ von 0,016 bzw. 0,003), während die beiden direkt zusammenhängenden Größen Spurkranzdicke Sd und Spurmaß Sr zwar höhere und zu der Baureihe A ähnliche, aber dennoch auf niedrigem Niveau angesiedelte Werte $< 0,1$ aufweisen ($R_{\text{Nagelkerke}}^2$ von 0,074 bzw. 0,058). Die Minimal- und Maximalwertbetrachtungen (siehe Anhang G.2) liefern hier auch keine weiteren Aufschlüsse für die Interpretation, da die Werte stark schwanken. Beispielsweise zeigt in der Regel jeder der vier Parameter bei Minimal- und/oder Maximalwertbetrachtungen auch Modellgüten nahe Null (R_{McFadden}^2 von maximal 0,006). Einzelgarniturbetrachtungen (in vorliegendem Bericht nicht dargestellt) sind nicht zu verwerten, da sich die Radparameter aufgrund des kurzen Einsatzes der Garnituren kaum ändern und durch die größere Anzahl an verschiedenen Garnituren nur sehr geringe Zugzahlen je Garnitur zur Verfügung stehen.

Da die breitbandigen Bogengeräusche überwiegend im Bereich des Triebwagens identifiziert wurden (vgl. Abb. 6-118 in Kap. 6.3.1), wurden die Regressionen auch in Bezug auf Minimal-, Mittel- und Maximalwerte der Parameter für Räder bzw. Achsen der Triebwagen zunächst unabhängig von deren Orientierung erstellt (siehe Anhang G.7, Abb. G-30 bis Abb. G-32). Während bei Maximalwertbetrachtungen nur noch die Spurkranzdicke Sd eine von Null abweichende Modellgüte aufweist ($R_{\text{Nagelkerke}}^2$ von maximal 0,039), steigen bei Mittelwertbetrachtungen bei allen vier Parametern die Güten an ($R_{\text{Nagelkerke}}^2$ von 0,041 für das Flankenmaß qR bis 0,115 für das Spurmaß Sr) bzw. sind bei Minimalwertbetrachtungen mit Ausnahme des Flankenmaßes die höchsten Werte zu beobachten (Spurkranzdicke Sd und Spurmaß Sr mit $R_{\text{Nagelkerke}}^2$ von jeweils 0,131, Spurkranzhöhe mit $R_{\text{Nagelkerke}}^2$ von 0,89, Flankenmaß mit $R_{\text{Nagelkerke}}^2$ von lediglich 0,012). Der Unterschied in der Zunahme der Modellgüten bei Triebwagen- und bei

Gesamtgarniturbetrachtungen ist vermutlich dadurch zu erklären, dass die Werte dieser vier Parameter an Triebwagen überwiegend über jenen von Steuer- und Zwischenwagen liegen (vgl. auch Zeitverläufe der Parameter in Anhang D.2). Bei Parameterbildung über die gesamte Garnitur werden die Minimalwerte daher zumeist von Steuer- und Zwischenwagen dominiert und treten erst bei isolierter Betrachtung des Triebwagens hervor.

Aufgrund der Indizien für eine Abhängigkeit akustischer (wenngleich tonaler) Auffälligkeiten von der Anordnung des Triebwagens im Zugverband (vgl. Kap. 6.3.2) wurden als weiterer Schritt die zuvor beschriebenen Auswertungen mit Betrachtung der Triebwagenparameter getrennt nach der Garniturorientierung durchgeführt. Die in Anhang G.7 dargestellten Regressionen für Garnituren mit nachlaufenden Triebwagen (Abb. G-36 bis Abb. G-38) liefern bei Maximal- oder Mittelwertbetrachtung der Triebwagenradprofilparameter nun die gleichen Tendenzen wie bei der Schnellbahnbaureihe A: mit Zunahme der vier Radprofilparameter Sh , Sd , qR , und Sr nimmt die Häufigkeit akustischer Auffälligkeiten ab. Zudem erreichen die Pseudo-Bestimmtheitsmaße bei diesen, auf lediglich 120 Messungen basierenden Ergebnisse für Spurkranzhöhe Sh , Flankenmaß qR , und Spurmaß Sr sehr hohe Werte ($R_{\text{Nagelkerke}}^2$ liegt zwischen 0,170 und 0,315). Aber auch bei der Spurkranzdicke Sd bewegt sich das Pseudo-Bestimmtheitsmaß $R_{\text{Nagelkerke}}^2$ zwischen 0,97 und 0,105. Demgegenüber fallen bei Minimalwertbetrachtungen die Pseudo-Bestimmtheitsmaße deutlich ab ($R_{\text{Nagelkerke}}^2$ weist Werte von 0,003 bis 0,077 auf) und bei der Spurkranzdicke Sd stellt sich eine Trendumkehr ein. Allerdings wird aufgrund der Bestimmtheitsmaße diesen Ergebnissen keine oder nur eine sehr geringe statistische Aussagekraft zugeschrieben.

Bei Vorbeifahrten mit Triebwagen am Zuganfang sind allerdings die ursprünglichen (gegenüber der Baureihe A gegenläufigen) Trends der vier Radprofilparameter Sh , Sd , qR , und Sr , bei welchen sich akustische Auffälligkeiten mit Zunahme der Parameterwerte einstellen, bei Minimal- und Mittel-, wie auch bei Maximalwerten zu beobachten (siehe Abb. G-33 bis Abb. G-35). Durch die bei dieser Garniturorientierung deutlich höheren Anzahl von 352 Vorbeifahrten sind auch die Trends bei der zuvor beschriebenen, orientierungsunabhängigen, triebwagenprofilparameterbasierten Gesamtbetrachtung zu erklären. Die Pseudo-Bestimmtheitsmaße sind bei Maximalwertbetrachtungen am geringsten ($R_{\text{Nagelkerke}}^2$ bewegt sich im Bereich von 0,047 bis 0,107) und erreichen bei Minimalwertbetrachtungen bei allen vier Parametern jeweils die höchsten Werte von 0,111 bis 0,199. Zwar liegen sie damit unterhalb jener bei Maximalwertbetrachtungen für

nachlaufende Triebwagen, befinden sich aber auf ähnlichem Niveau wie die Ergebnisse bei der Baureihe A.

Während bei nachlaufenden Triebwagen die gleiche physikalische Interpretation wie bei der Baureihe A (vgl. Abb. 6-137) nahe liegt, könnte die Trendumkehr bei Triebwagen am Zugangfang anhand der beschriebenen Auswertungen physikalisch nur durch fahrdynamische Effekte erklärt werden. Allerdings ist bei den Auswertungen der Schnellbahnbaureihe B generell zu beachten, dass durch den zeitlich konzentrierten Einsatz der Garnituren und der geringen Anzahl an betrachteten Messungen (472 erfasste Vorbeifahrten von 16 verschiedenen Garnituren) ein höherer Einfluss durch die jeweils vorhandenen Eigenschaften der Fahrzeuge abseits der Rad- oder Achsparameter vorhanden sein kann (Eindrehwiderstand der Drehgestelle, Kupplungszustände, fahrdynamische Eigenschaften, etc.). Beispielsweise stammen die akustischen Auffälligkeiten bei den höchsten Werten der Spurkranzdicke $Sd \geq 31,7$ mm und des Spurmaßes $Sr \geq 1424$ mm bei Minimalwertbetrachtungen der Parameter am Triebwagen (siehe Anhang G.7) lediglich von 3 bzw. 2 Garnituren der Baureihe B (233, 245 und 270 bzw. 233 und 281), wobei diese Auffälligkeiten bei hohen Parameterwerten einen vergleichsweise großen Einfluss auf den Anstieg in logistischen Funktionen aufweisen.

Die Raddurchmesserunterschiede am Radsatz $\Delta\phi_{MK,RS}$ und im Drehgestell $\Delta\phi_{MK,DG}$ zeigen bei allen Betrachtung – das bedeutet bei Betrachtungen der gesamten Garnitur in Anhang G.2, wie auch der orientierungsunabhängigen und der orientierungsabhängigen Betrachtungen in Anhang G.7 – mit einer einzigen Ausnahme einen abfallenden Trend, sodass mit zunehmender Differenz akustische Auffälligkeiten abnehmen. Die erwähnte Ausnahme besteht in der Minimalwertbetrachtung der gesamten Garnitur, wobei hier das Pseudo-Bestimmtheitsmaß $R^2_{Nagelkerke}$ von lediglich 0,022 die Aussagekraft relativiert. Die mit Abstand höchsten Pseudo-Bestimmtheitsmaße treten erneut bei Maximal- und Mittelwertbetrachtungen von Vorbeifahrten mit nachlaufendem Triebwagen auf ($R^2_{Nagelkerke}$ beträgt hier bei Raddurchmesserunterschieden am Radsatz $\Delta\phi_{MK,RS}$ ca. 0,43 und im Drehgestell $\Delta\phi_{MK,DG}$ ca. 0,27 bis 0,28), ansonsten werden Werte bei beiden Differenzen bis maximal 0,102 verzeichnet.

Diese Ergebnisse der Raddurchmesserunterschiede stützen nur zum Teil die bei der Baureihe A erwähnte Vermutung, dass die akustischen Auffälligkeiten vordergründig durch Radprofilparameter begründet sind und die Durchmesserunterschiede lediglich mit diesen Parametern verschleißbedingt korrelieren. Während die separate Betrachtung der Vorbeifahrten mit nachlaufendem Triebwagen die These klar bestätigen, sprechen bei

vorlaufendem Triebwagen die gegenläufigen Trends von Radprofilparametern und Raddurchmesserdivergenzen gegen derartige Korrelationen, wobei hier die Regressionen der Durchmesserdivergenzen nur mäßig hohe Pseudo-Bestimmtheitsmaße ($R^2_{\text{Nagelkerke}}$ stets kleiner oder gleich 0,95) zeigen. Aufgrund dessen, aber auch da Raddurchmesserdivergenzen an Radsätzen direkten Einfluss auf das Anlaufverhalten von Drehgestellen im Bogen aufweisen, könnte eine vertiefende Untersuchung dieser Differenzen unter Berücksichtigung ihres Vorzeichens und der Garniturorientierung in Bezug auf die Ablenkungsrichtung bei den Bogenfahrten helfen, deren Einfluss auf die Auftrittshäufigkeiten auffälliger Kurvengeräusche besser zu erklären.

Schlussbetrachtung

Der bei der Schnellbahnbaureihe A bereits bei den Zeitverläufen gewonnene Eindruck, das zum Teil höhere Auftrittswahrscheinlichkeiten akustischer Auffälligkeiten – insbesondere beim für Spurkranzanlauf kennzeichnenden Kurvenkreischen – nach Reprofilierungen bestehen, kann durch die statistische Auswertung, bei welcher erkannte Witterungseinflüsse weitgehend eliminiert wurden, bekräftigt werden. Insbesondere die vier radprofilbeschreibenden Parameter Spurkranzhöhe Sh , Spurkranzdicke Sd , Spurkranzflankenmaß qR und Spurmaß Sr zeigen hier Tendenzen abnehmender Häufigkeiten akustischer Auffälligkeiten mit zunehmendem Verschleiß, wenngleich mit erwarteter schwacher Ausprägung. Die ergänzenden Auswertungen der in deutlich geringerer Anzahl erfasster Schnellbahnen der Baureihe B bestätigen dies zum Teil, werfen jedoch auch neue Fragen in Bezug auf die Triebfahrzeuganordnung und die damit zusammenhängende Fahrdynamik auf.

Grundsätzlich ist nach Reprofilierungen durch die mechanische Bearbeitung von erhöhten Radrauheiten der Radlaufflächen auszugehen. Dies kann in weiterer Folge mit einer Erhöhung des Reibwerts im Rad-Schiene Kontakt einhergehen, wodurch auch auffällige Bogengeräusche mit höherer Häufigkeit auftreten können. Allerdings sind laut Experten des Auftraggebers ÖBB die Laufflächen im Allgemeinen bereits nach kurzen Distanzen von einigen 100 km wieder eingefahren. Demzufolge können durch einen derartigen Wirkungszusammenhang die zum Teil beobachteten, deutlich länger andauernden Häufigkeitserhöhungen nicht erklärt werden.

Eine Möglichkeit der Interpretation der Ergebnisse, insbesondere für die Abhängigkeiten von den vier Radprofilparametern, zielt auf das Spurspiel ab: bei neuen Radsätzen oder noch Reprofilierung der Räder ist das Spurspiel am größten und nimmt mit zunehmendem

Verschleiß der Räder ab. Insofern wäre es denkbar, dass sich zunächst größere Anlaufwinkel der Drehgestelle im Bogen einstellen können, wodurch – wie unter anderen von Thompson [2] und Jiang et al. [24] beschrieben – Spurkranzanläufe und in weiterer Folge auffällige Kurvengeräusche grundsätzlich begünstigt werden.

Gleichzeitig ist jedoch festzuhalten, dass wegen einer fehlenden Achszuordnung akustischer Auffälligkeiten differenzierte Betrachtungen einzelner Achsen nicht möglich waren. So konnten gerade die Raddurchmesserunterschiede im Radsatz oder Drehgestell, welche bei Bogenfahrten möglicherweise akustische Auffälligkeiten beeinflussen, aufgrund des meist fluktuierenden Verhaltens von Achse zu Achse bzw. von Drehgestell zu Drehgestell nicht vertiefend betrachtet werden (insbesondere die Berücksichtigung des Vorzeichens der Differenz im Radsatz). Zwar deuten die vorliegenden Untersuchungsergebnisse nicht auf einen ursächlichen Zusammenhang hin, jedoch schließen sie es aufgrund dieser fehlenden Untersuchungstiefe auch nicht aus.

Zu beachten ist des Weiteren, dass die Ergebnisse dieser Untersuchungen unter bestimmten Rahmenbedingungen erhoben wurden, insbesondere für das während der Messungen vorhandene Schienenprofil. Bei Verallgemeinerungen der Ergebnisse auf andere Rahmenbedingungen wäre die Zulässigkeit allenfalls zu prüfen.

7. KORREKTURFAKTOREN

Die ONR 305011 beschreibt ein Rechenverfahren für die Ermittlung von Schallimmissionen durch den Zugverkehr und durch Verschub- und Umschlagbetrieb. Darin werden für unterschiedliche Zugkategorien und unterschiedliche Geschwindigkeiten längenbezogene Schalleistungspegel angegeben, mit welchen die Schallimmissionen eines betroffenen Streckenabschnittes in Abhängigkeit vom Verkehrsmix berechnet werden können. Der längenbezogene Schalleistungspegel L_w in dB(A)/m beschreibt die abgestrahlte Schallenergie pro 1 Meter Fahrzeug.

Wie im Forschungsprojekt BEGEL [1] bereits festgestellt wurde, liegen die Schalleistungspegel für Bögen < 300 m über jenen der Freien Strecken. Um die durch die Bogenfahrt bzw. das Auftreten von Auffälligkeiten erhöhten Schallimmissionen in zukünftige Berechnungsmodelle mit einbeziehen zu können, wurden für alle in diesem Projekt erfassten Vorbeifahrten längenbezogenen Schalleistungspegel berechnet.

Die Ermittlung der längenbezogenen Schalleistungspegel wird in der ÖNORM S5026 beschrieben und erfordert das gleichzeitige Messen an 3 Messpositionen welche in einem Viertelkreis mit gedachten Radius von 15 m um die Gleisachse positioniert sind. Da der Aufwand für diese Art von Messungen sehr hoch ist, wurde bereits im Projekt BEGEL ein Verfahren zur Abschätzung aus dem Standardmesspunkt in 7,5 m Entfernung zum Messgleis sowie in 1,2 m über Schienenoberkante entwickelt. Dieses Umrechnungsverfahren kam auch in diesem Projekt zur Anwendung (siehe 0).

Ausgehend von den aktuellen Werten in der ONR 305011, sollen in weiterer Folge Zuschläge für die in diesem Projekt gemessenen Zugtypen und Witterungsbedingungen ermittelt werden. Neben dem Einfluss des Wetters wird zudem die Wirkung einer Schienenkopfkonditionieranlage erhoben und ebenfalls als Korrekturfaktor dargestellt.

Die Wirkung von unterschiedlichen Witterungsbedingungen auf das Auftreten von breitbandigen, tonalen und tonalen Auffälligkeiten, sowohl für eine unbehandeltes als auch für ein konditioniertes Gleis wurde bereits in Kap. 6 näher beschrieben. Ausgehend von den ermittelten Ergebnissen werden nachfolgend mittlere Korrekturfaktoren, sowie die niedrigsten bzw. höchsten gemessenen Schalleistungspegel und die jeweilige Bedingung bei der diese auftreten, dargestellt. Im Vergleich zu BEGEL wurde diesmal nur eine Variante (Variante B, siehe Ergebnisbericht BEGEL [1], Kap. 8.3.2) für die Bestimmung von Korrekturfaktoren herangezogen, nämlich der direkte Vergleich von unauffälligen und auffälligen Fahrten.

Für jene Zugkategorien und Geschwindigkeiten welche im Projekt messtechnisch erfasst wurden, sind entsprechende Kategorien gem. ONR 305011 [25] ausgewählt worden und die jeweils für die Freie Strecke angegebenen längenbezogenen Schalleistungspegel für die Berechnung der Korrekturfaktoren herangezogen worden. Geschwindigkeitsbereiche für welche in der ONR 305011 keine Schalleistungspegel angegeben werden, wurden entsprechend extra- bzw. interpoliert.

7.1. Witterung

Um den Einfluss der Witterung besser darstellen zu können, werden die Korrekturfaktoren neben den wetterunabhängigen energetischen Mittelwerten aller Fahrten jeweils für die akustisch gesehen lauteste und leiseste Ausprägung je Zugkategorie und Geschwindigkeitsbereich dargestellt. In den dargestellten Diagrammen werden neben der jeweiligen Witterungsausprägung welche den minimalen bzw. maximalen Wert ergibt, auch die jeweilige Anzahl an energetisch gemittelten Fahrten angegeben aus welcher der jeweilige Wert errechnet wurde. Die Minimal- bzw. Maximalwerte sind jeweils jene Mittelungsbereiche welche nach der A-Bewertung und der energetischen Summierung der einzelnen Oktavbänder den höchsten bzw. niedrigsten Einzahlwert des abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegels $L_{W',A}$ ergeben. Dabei wurden nur jene Bereiche berücksichtigt, für welche Messdaten von zumindest 10 Vorbeifahrten zur Verfügung standen.

Als Datenbasis wurden nur die Messergebnisse von MQ2 ohne Konditionierung herangezogen.

In Abb. 7-1 sind die linearen Schalleistungspegel im Oktavband für die Kategorie PZ TYP A dargestellt. Abb. 7-2 zeigt die Ergebnisse der Kategorie PZ TYP A. Der Vollständigkeit halber wurden auch die Daten der Kategorie Güter (inkl. Güter – Kfz) in Abb. 7-3 dargestellt. Hier konnten auf Grund der geringen Anzahl jedoch nur die Mittelwerte berücksichtigt werden. Bei der Interpretation der Daten gilt es zu beachten, dass die Pegeldifferenzen zwischen den Minimal- und Maximalwerten, bei den Fahrten welche als „unauffällig“ bewertet wurden, nicht notwendigerweise auf Wettereinflüsse zurückzuführen sind. Durch die Aufteilung der Fahrten in unterschiedlichste Wetterparameter ist die Anzahl der verbleibenden Fahrten nicht mehr sehr hoch. Es wurden zwar nur Bereiche mit einer Mindestanzahl von 10 Fahrten herangezogen, hier können sich aber trotzdem, durch die Streuung der Messwerte, welche auch bei Fahrten auf der geraden Strecke mehrere dB betragen können, Unsicherheiten ergeben.

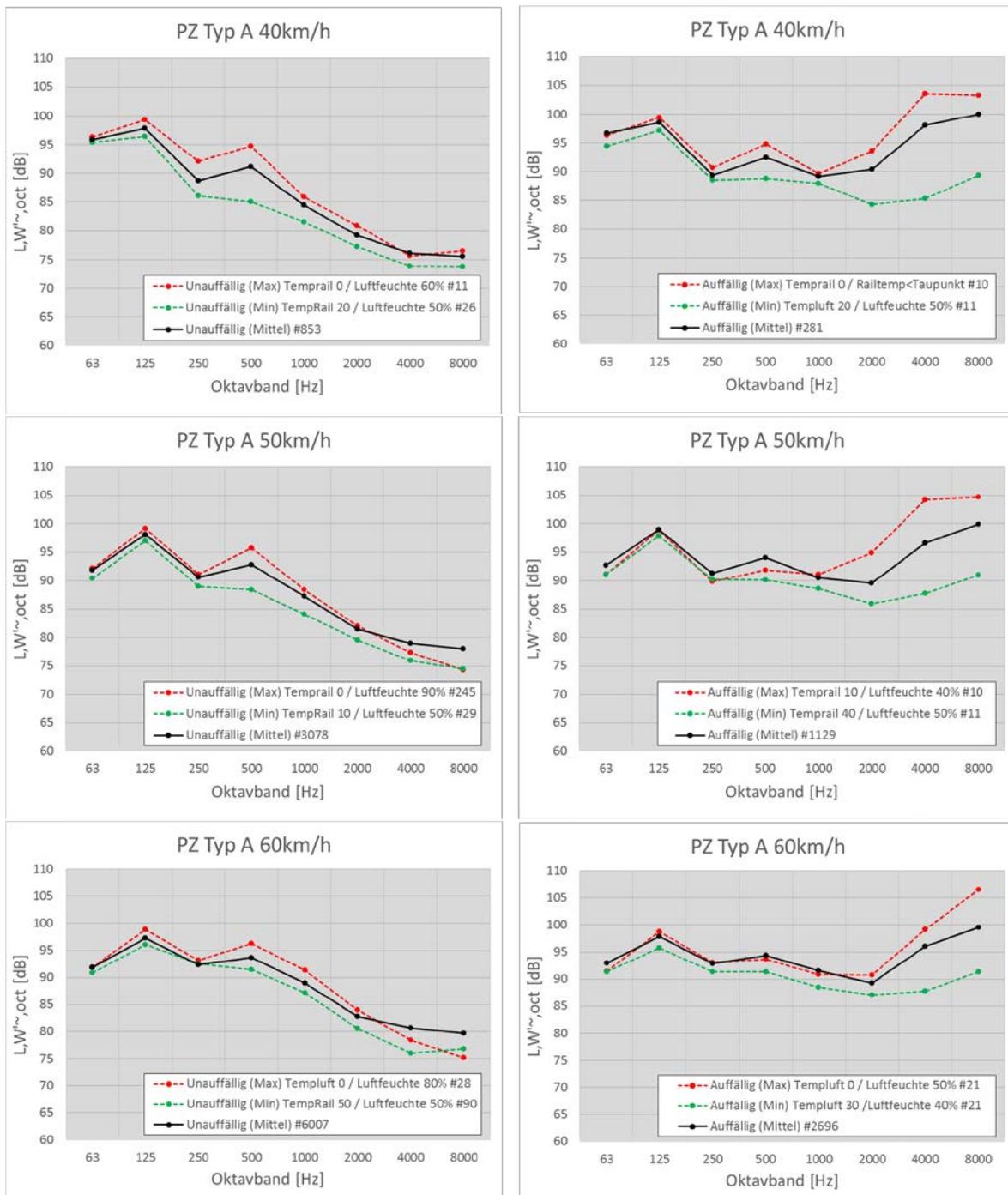


Abb. 7-1: Mittlere energetisch gemittelte abgeschätzte längenbezogene lineare Schalleistungspegel in den Oktavbändern, Kategorie PZ Typ A unauffällig (links) und mit breitbandigen, tonalen und hochfrequent tonalen Auffälligkeiten (rechts); MQ2 gesamter Messzeitraum

In den folgenden Tabellen sind die jeweiligen Korrekturfaktoren in Bezug auf die Werte der ONR 305011 dargestellt. In einem ersten Schritt sind die Differenzen der unauffälligen Fahrten zur ONR für die mittleren, die minimalen und die maximalen Werte dargestellt. In einer weiteren Tabelle werden die Korrekturfaktoren der Fahrten mit breitbandigen,

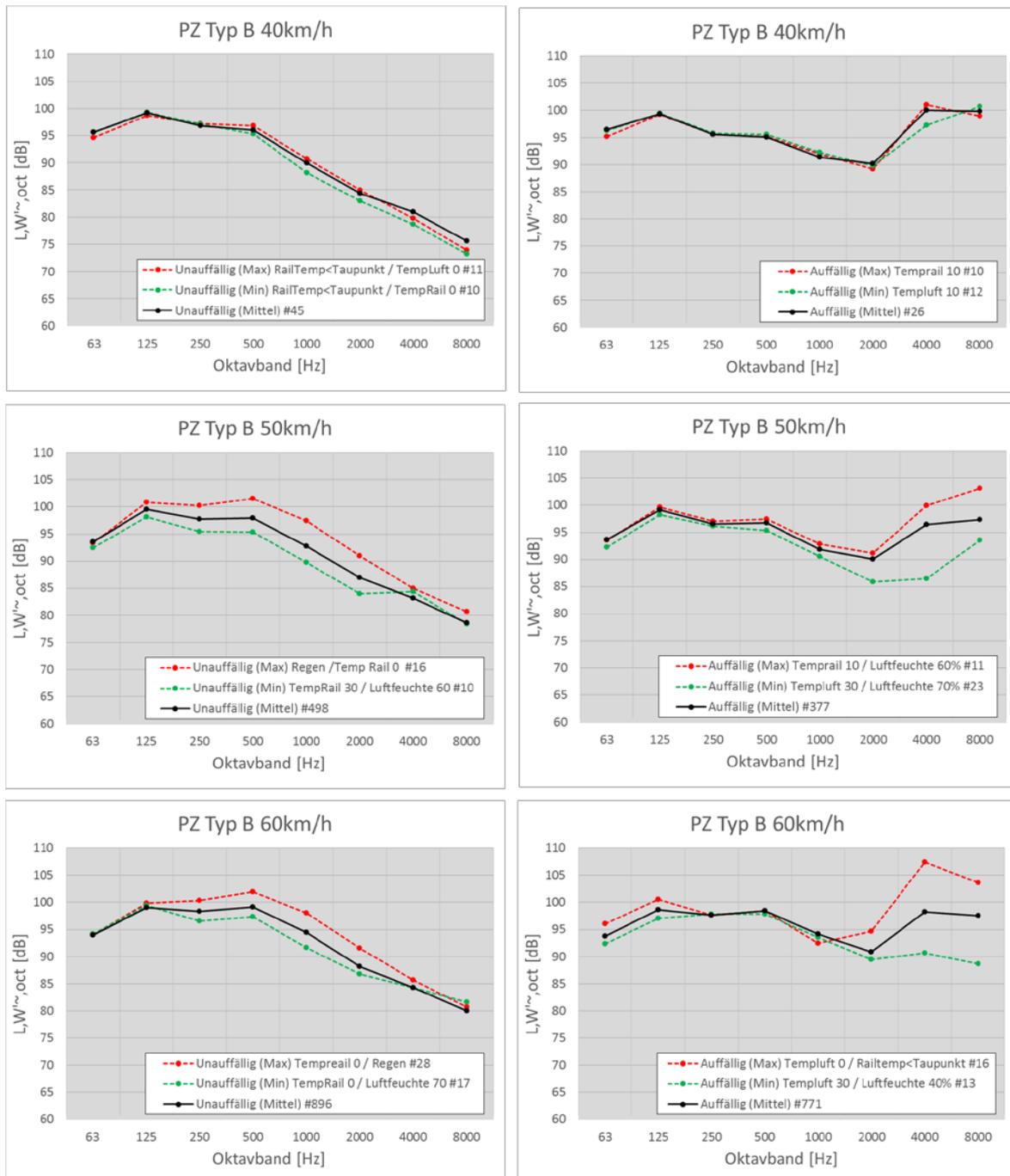


Abb. 7-2: Mittlere energetisch gemittelte abgeschätzte längenbezogene lineare Schalleistungspegel in den Oktavbändern, Kategorie PZ Typ B unauffällig (links) und mit breitbandigen, tonalen und hochfrequent tonalen Auffälligkeiten (rechts); MQ2 gesamter Messzeitraum

tonalen und hochfrequent tonalen Auffälligkeiten zu den unauffälligen Fahrten (Mittelwerte aller Fahrten) wieder für die mittleren, minimalen und maximalen Werte dargestellt.

Tab. 7-2 zeigt die energetisch gemittelten abgeschätzte längenbezogenen Schalleistungspegel aus dem jeweiligen Anteil an unauffälligen und auffälligen Fahrten



Abb. 7-3: Mittlere energetisch gemittelte abgeschätzte längenbezogene lineare Schalleistungspegel in den Oktavbändern, Kategorie Güter (+ G-Kfz) unauffällig (grün) und mit breitbandigen, tonalen und hochfrequent tonalen Auffälligkeiten (rot); MQ2 gesamter Messzeitraum

sowie die Differenzen zu den Werten der ONR 305011 und bildet somit die spezifische Situation an der Messstelle MQ2 ab.

Für die Berücksichtigung der Ergebnisse gemäß der Europäischen Richtlinie 2015/996 [26] (CNOSSOS-EU) sind die Tabellen Tab. 7-1 und Tab. 7-3 im Anhang H neben der Darstellung der Ergebnisse in Form von Oktavspektren, noch einmal als Terzspektrum dargestellt. Dadurch ist es möglich auch für die Werte gem. CNOSSOS-EU welche als Terzspektren berechnet werden, ein entsprechendes Differenzspektrum zu bilden und in weitere Folge einen entsprechenden Korrekturfaktor zu bestimmen. Da bei diesem Berechnungsmodell auch der Gleiszustand berücksichtigt wird, müssen bei den Korrekturwerten auch die erhöhten Rauigkeitswerte (siehe Kapitel 3.3.2) der Bogeninnenschiene mit berücksichtigt werden. In den Korrekturfaktoren der unauffälligen Fahrten sind etwaige erhöhte Schienenrauheiten des Bogenabschnitts bereits enthalten.

| Zug | v [km/h] | Datensatz (unauffällig) | Anzahl | Häufigkeit | Witterungsbedingung | L _W [~] [dB] | | | | | | | | | | |
|----------|----------|-------------------------|--------|------------|--------------------------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--|
| | | | | | | f [Hz] | | | | | | | | A | | |
| | | | | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | [dB] | [dB] | |
| PZ Typ A | 40 | Mittelwert | 853 | 75,2% | | 13,8 | 11,8 | 1,7 | 4,2 | -0,5 | 1,2 | -1,9 | 6,6 | 2,3 | | |
| PZ Typ A | 50 | Mittelwert | 3078 | 73,2% | | 8,3 | 11,1 | 2,6 | 4,7 | 0,3 | 0,9 | -0,5 | 7,0 | 2,5 | | |
| PZ Typ A | 60 | Mittelwert | 6007 | 69,0% | | 6,9 | 9,2 | 3,4 | 4,7 | 0,0 | -0,2 | -0,3 | 6,7 | 2,0 | | |
| PZ Typ B | 40 | Mittelwert | 45 | 63,4% | | 12,0 | 8,5 | 0,1 | -2,0 | 1,2 | -3,0 | -1,0 | 5,2 | -0,9 | | |
| PZ Typ B | 50 | Mittelwert | 498 | 56,9% | | 8,3 | 8,2 | 0,4 | -1,1 | 1,5 | -2,7 | -0,8 | 5,9 | -0,4 | | |
| PZ Typ B | 60 | Mittelwert | 896 | 53,7% | | 7,0 | 7,0 | 0,4 | -0,8 | 0,5 | -3,8 | -1,7 | 5,0 | -0,7 | | |
| Güter | 40 | Mittelwert | 13 | 27,1% | | 10,4 | 3,0 | 0,4 | 5,9 | 5,6 | 1,6 | 0,0 | 2,7 | 3,9 | | |
| Güter | 50 | Mittelwert | 5 | 13,2% | | 7,6 | 1,7 | 2,1 | 5,9 | 5,5 | 1,1 | -0,9 | 1,7 | 4,4 | | |
| Güter | 60 | Mittelwert | | | | | | | | | | | | | | |
| Minimum | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 40 | Minimum | 26 | 2,3% | TempRail 20 / Luftfeuchte 50% | 13,3 | 10,4 | -0,9 | -1,9 | -3,4 | -0,8 | -4,1 | 4,8 | -1,4 | | |
| PZ Typ A | 50 | Minimum | 29 | 0,7% | TempRail 10 / Luftfeuchte 50% | 6,9 | 10,0 | 1,0 | 0,4 | -2,8 | -1,0 | -3,5 | 3,5 | -0,6 | | |
| PZ Typ A | 60 | Minimum | 90 | 1,0% | TempRail 50 / Luftfeuchte 50% | 5,9 | 8,0 | 3,6 | 2,5 | -1,8 | -2,4 | -5,0 | 3,8 | 0,1 | | |
| PZ Typ B | 40 | Minimum | 10 | 14,1% | RailTemp<Taupunkt / TempRail 0 | 11,9 | 8,6 | 0,4 | -2,7 | -0,5 | -4,4 | -3,4 | 2,9 | -1,8 | | |
| PZ Typ B | 50 | Minimum | 10 | 1,1% | TempRail 30 / Luftfeuchte 60 | 7,1 | 6,9 | -1,9 | -3,7 | -1,6 | -5,6 | 0,3 | 5,7 | -2,8 | | |
| PZ Typ B | 60 | Minimum | 17 | 1,0% | TempRail 0 / Luftfeuchte 70 | 7,1 | 7,5 | -1,4 | -2,6 | -2,3 | -5,3 | -1,7 | 6,6 | -2,5 | | |
| Güter | 40 | Minimum | | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 50 | Minimum | | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 60 | Minimum | | | | | | | | | | | | | | |
| Maximum | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 40 | Maximum | 11 | 1,0% | TempRail 0 / Luftfeuchte 60% | 14,3 | 13,4 | 5,1 | 7,7 | 0,9 | 2,9 | -2,4 | 7,4 | 4,9 | | |
| PZ Typ A | 50 | Maximum | 245 | 5,8% | TempRail 0 / Luftfeuchte 90% | 8,6 | 12,2 | 3,1 | 7,7 | 1,4 | 1,5 | -2,1 | 3,3 | 4,3 | | |
| PZ Typ A | 60 | Maximum | 28 | 0,3% | TempLuft 0 / Luftfeuchte 80% | 6,8 | 10,8 | 4,1 | 7,3 | 2,4 | 1,0 | -2,6 | 2,2 | 4,0 | | |
| PZ Typ B | 40 | Maximum | 11 | 15,5% | RailTemp<Taupunkt / TempLuft 0 | 11,0 | 8,0 | 0,5 | -1,2 | 2,1 | -2,4 | -2,3 | 3,6 | -0,4 | | |
| PZ Typ B | 50 | Maximum | 16 | 1,8% | Regen / Temp Rail 0 | 8,0 | 9,5 | 2,9 | 2,5 | 6,1 | 1,3 | 1,0 | 8,1 | 3,3 | | |
| PZ Typ B | 60 | Maximum | 28 | 1,7% | TempRail 0 / Regen | 7,1 | 7,9 | 2,4 | 2,0 | 4,1 | -0,4 | -0,3 | 5,7 | 2,3 | | |
| Güter | 40 | Maximum | | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 50 | Maximum | | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 60 | Maximum | | | | | | | | | | | | | | |

Tab. 7-1: Korrekturfaktoren für unauffällige Vorbeifahrten im Vergleich zu den Werten der ONR 305011

| Zug | v [km/h] | Anzahl (oA+m A) | Häufigkeit (mA) | L _W [~] [dB] MQ2 (pmA+pmoA) | | | | | | | | | L _W [~] [dB] KorrfA Δ ONR | | | | | | | | |
|----------|----------|-----------------|-----------------|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | | | f [Hz] | | | | | | | | A | f [Hz] | | | | | | | | A |
| | | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | [dB] | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | [dB] |
| PZ Typ A | 40 | 1134 | 24,8% | 96,1 | 98,0 | 88,9 | 91,5 | 86,2 | 85,2 | 92,2 | 94,0 | 97,6 | 14,1 | 12,0 | 1,9 | 4,5 | 1,2 | 7,2 | 14,2 | 25,0 | 8,6 |
| PZ Typ A | 50 | 4207 | 26,8% | 92,1 | 98,3 | 90,8 | 93,1 | 88,4 | 85,4 | 91,1 | 94,3 | 97,9 | 8,6 | 11,3 | 2,8 | 5,1 | 1,4 | 4,9 | 11,6 | 23,3 | 7,2 |
| PZ Typ A | 60 | 8703 | 31,0% | 92,3 | 97,4 | 92,5 | 93,9 | 90,0 | 85,9 | 91,2 | 94,5 | 98,4 | 7,3 | 9,4 | 3,5 | 4,9 | 1,0 | 2,9 | 10,2 | 21,5 | 6,0 |
| PZ Typ B | 40 | 71 | 36,6% | 96,0 | 99,3 | 96,4 | 95,7 | 90,5 | 87,4 | 95,8 | 95,5 | 100,8 | 12,3 | 8,6 | -0,3 | -2,3 | 1,8 | 0,1 | 13,8 | 25,1 | 3,5 |
| PZ Typ B | 50 | 875 | 43,1% | 93,6 | 99,4 | 97,2 | 97,4 | 92,4 | 88,6 | 93,0 | 93,8 | 100,3 | 8,3 | 8,1 | -0,1 | -1,6 | 1,1 | -1,1 | 9,0 | 21,1 | 1,5 |
| PZ Typ B | 60 | 1667 | 46,3% | 93,9 | 98,8 | 98,0 | 98,9 | 94,4 | 89,6 | 95,1 | 94,3 | 101,7 | 6,9 | 6,8 | 0,0 | -1,1 | 0,4 | -2,4 | 9,1 | 19,3 | 1,4 |
| Güter | 40 | 48 | 72,9% | 103,9 | 99,7 | 100,6 | 101,4 | 99,0 | 101,9 | 108,6 | 96,5 | 111,2 | 10,2 | 2,4 | -3,4 | 2,1 | 7,7 | 10,2 | 21,6 | 20,5 | 10,5 |
| Güter | 50 | 38 | 86,8% | 103,1 | 99,5 | 100,8 | 102,5 | 100,4 | 105,1 | 110,5 | 99,5 | 113,3 | 8,1 | 1,5 | -3,2 | 1,5 | 6,4 | 11,1 | 21,5 | 21,5 | 11,3 |

Tab. 7-2: Energetisch gemittelte abgeschätzte längenbezogene Schalleistungspegel aus dem jeweiligen Anteil an unauffälligen und auffälligen Fahrten sowie die Differenz zur ONR 305011 für MQ2

7.2. Schienenkopfkonditionierung

Um die Wirkung der Schienenkopfkonditionierung auch in zukünftigen Rechenmodellen berücksichtigen zu können, soll nachfolgend die Wirkung in Form von Korrekturfaktoren im Vergleich zu einem unbehandelten Gleisbogen bestimmt werden.

In einem ersten Schritt werden die Korrekturfaktoren analog zu Kapitel 7.1 bestimmt. Anschließend werden die Differenzen zwischen den zwei Messquerschnitten dargestellt.

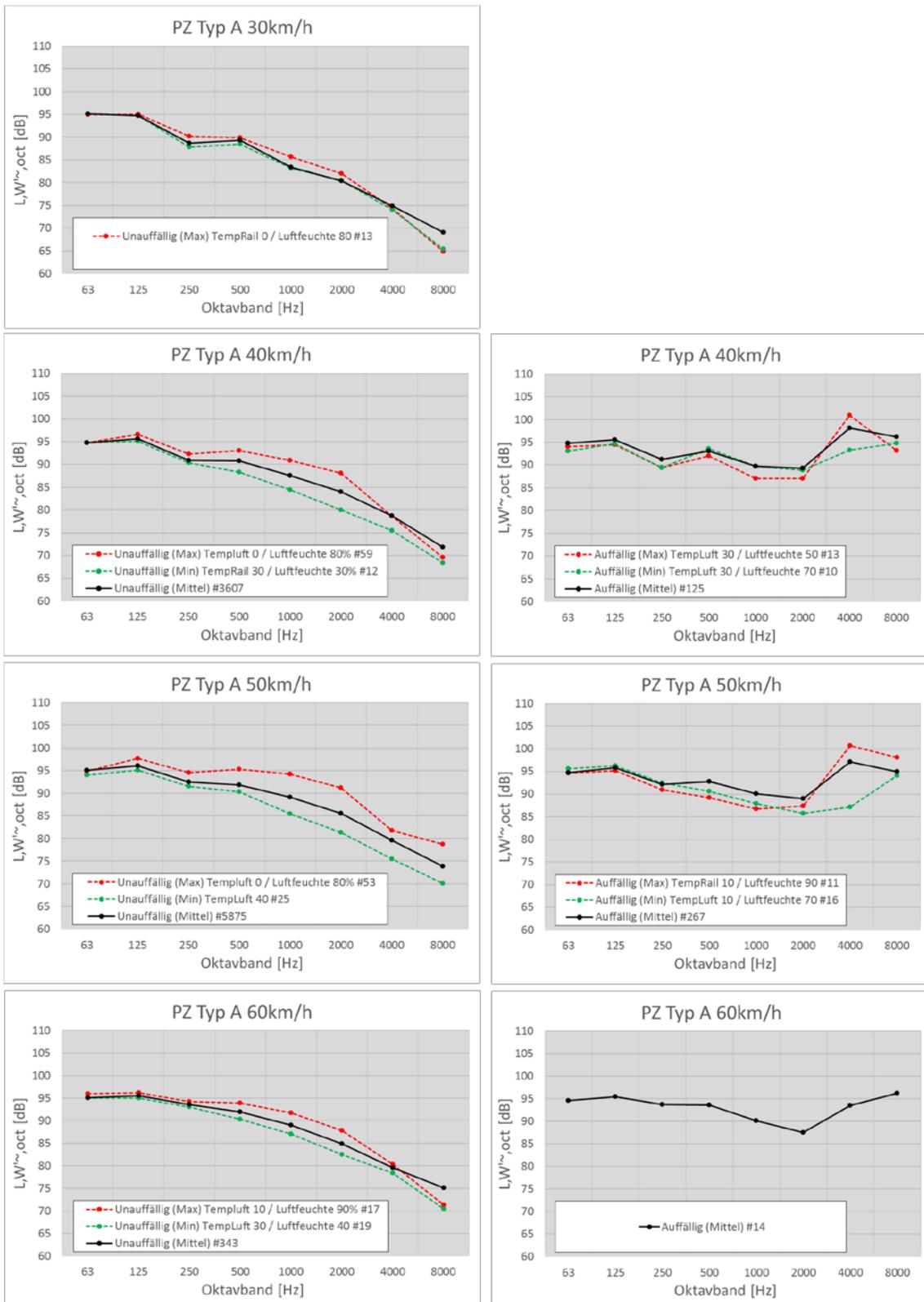
| Zug | v [km/h] | Datensatz (auffällig) | Anzahl | Häufigkeit | Witterungsbedingung | $L_W^{f,w}$ [dB] | | | | | | | | | |
|----------|-------------|--------------------------|--------|------------|--------------------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|--|
| | | | | | | f [Hz] | | | | | | | | A [dB] | |
| | | | | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | |
| PZ Typ A | 40 | Mittelwert | 281 | 24,8% | | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 1,3 | 4,6 | 11,2 | 22,0 | 24,4 | 11,5 | |
| PZ Typ A | 50 | Mittelwert | 1129 | 26,8% | | 0,9 | 0,8 | 0,7 | 1,3 | 3,2 | 8,1 | 17,6 | 21,9 | 9,2 | |
| PZ Typ A | 60 | Mittelwert | 2696 | 31,0% | | 1,1 | 0,6 | 0,5 | 0,7 | 2,6 | 6,4 | 15,3 | 19,9 | 7,7 | |
| PZ Typ B | 40 | Mittelwert | 26 | 36,6% | | 0,8 | 0,2 | -1,2 | -0,9 | 1,5 | 5,8 | 19,1 | 24,2 | 7,7 | |
| PZ Typ B | 50 | Mittelwert | 377 | 43,1% | | 0,0 | -0,4 | -1,2 | -0,7 | -0,3 | 3,1 | 13,3 | 18,7 | 3,6 | |
| PZ Typ B | 60 | Mittelwert | 771 | 46,3% | | -0,2 | -0,4 | -0,7 | -0,7 | -0,3 | 2,7 | 14,0 | 17,6 | 3,7 | |
| Güter | 40 | Mittelwert | 35 | 72,9% | | -0,2 | -0,8 | -7,0 | -7,1 | 2,7 | 9,9 | 23,0 | 19,2 | 7,7 | |
| Güter | 50 | Mittelwert | 33 | 86,8% | | 0,6 | -0,2 | -7,2 | -5,8 | 1,0 | 10,6 | 23,0 | 20,4 | 7,4 | |
| Güter | 60 | Mittelwert | 2 | 100,0% | | | | | | | | | | | |
| Minimum | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 40 | Minimum | 11 | 1,0% | Templuft 20 / Luftfeuchte 50% | -1,4 | -0,6 | -0,2 | -2,4 | 3,4 | 5,1 | 9,2 | 13,8 | 2,9 | |
| PZ Typ A | 50 | Minimum | 11 | 0,3% | Temprail 40 / Luftfeuchte 50% | -0,7 | -0,3 | -0,4 | -2,6 | 1,3 | 4,5 | 8,7 | 13,0 | 2,5 | |
| PZ Typ A | 60 | Minimum | 21 | 0,2% | Templuft 30 / Luftfeuchte 40% | -0,5 | -1,5 | -1,0 | -2,3 | -0,6 | 4,3 | 7,0 | 11,7 | 1,8 | |
| PZ Typ B | 40 | Minimum | 12 | 16,9% | Templuft 10 | 0,6 | 0,3 | -1,1 | -0,4 | 2,4 | 5,5 | 16,3 | 25,2 | 6,9 | |
| PZ Typ B | 50 | Minimum | 23 | 2,6% | Templuft 30 / Luftfeuchte 70% | -1,4 | -1,3 | -1,6 | -2,5 | -2,3 | -1,1 | 3,4 | 15,0 | -0,3 | |
| PZ Typ B | 60 | Minimum | 13 | 0,8% | Templuft 30 / Luftfeuchte 40% | -1,6 | -1,9 | -0,5 | -1,3 | -0,9 | 1,4 | 6,4 | 8,7 | 0,1 | |
| Güter | 40 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 50 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 60 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| Maximum | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 40 | Maximum | 10 | 0,9% | Temprail 0 / Railtemp<Taupunkt | 0,5 | 1,6 | 2,0 | 3,6 | 5,2 | 14,4 | 27,4 | 27,7 | 15,7 | |
| PZ Typ A | 50 | Maximum | 10 | 0,2% | Temprail 10 / Luftfeuchte 40% | -0,8 | 0,8 | -0,7 | -0,9 | 3,7 | 13,5 | 25,3 | 26,7 | 14,8 | |
| PZ Typ A | 60 | Maximum | 21 | 0,2% | Templuft 0 / Luftfeuchte 50% | -0,5 | 1,6 | 0,6 | 0,0 | 1,9 | 8,0 | 18,4 | 26,8 | 12,5 | |
| PZ Typ B | 40 | Maximum | 10 | 14,1% | Temprail 10 | -0,4 | 0,1 | -1,3 | -0,9 | 2,0 | 4,9 | 20,0 | 23,4 | 8,0 | |
| PZ Typ B | 50 | Maximum | 11 | 1,3% | Temprail 10 / Luftfeuchte 60% | -0,1 | 0,1 | -0,6 | -0,5 | 0,1 | 4,2 | 16,8 | 24,5 | 7,1 | |
| PZ Typ B | 60 | Maximum | 16 | 1,0% | Templuft 0 / Railtemp<Taupunkt | 2,1 | 1,6 | -0,7 | -0,7 | -2,0 | 6,5 | 23,0 | 23,6 | 10,2 | |
| Güter | 40 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 50 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 60 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |

Tab. 7-3: : Korrekturfaktoren für auffällige Vorbeifahrten im Vergleich zu den Mittelwerten der unauffälligen Vorbeifahrten

Neben der Differenz in den abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegel werden auch noch einmal die mittleren, Best- und Worts-Case Häufigkeiten gegenübergestellt. In Abb. 7-4 sind die linearen Schalleistungspegel im Oktavband für die Kategorie PZ TYP A dargestellt. Abb. 7-5 zeigt die Ergebnisse der Kategorie PZ TYP A.

In den folgenden Tabellen sind die jeweiligen Korrekturfaktoren in Bezug auf die Werte der ONR 305011 dargestellt. In einem ersten Schritt sind die Differenzen der unauffälligen Fahrten zur ONR für die mittleren, die minimalen und die maximalen Werte dargestellt. In einer weiteren Tabelle werden die Korrekturfaktoren der Fahrten mit breitbandigen, tonalen und hochfrequent tonalen Auffälligkeiten zu den unauffälligen Fahrten (Mittelwerte aller Fahrten) wieder für die mittleren, minimalen und maximalen Werte dargestellt.

Tab. 7-6 zeigt die energetisch gemittelten abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegel aus dem jeweiligen Anteil an unauffälligen und auffälligen Fahrten



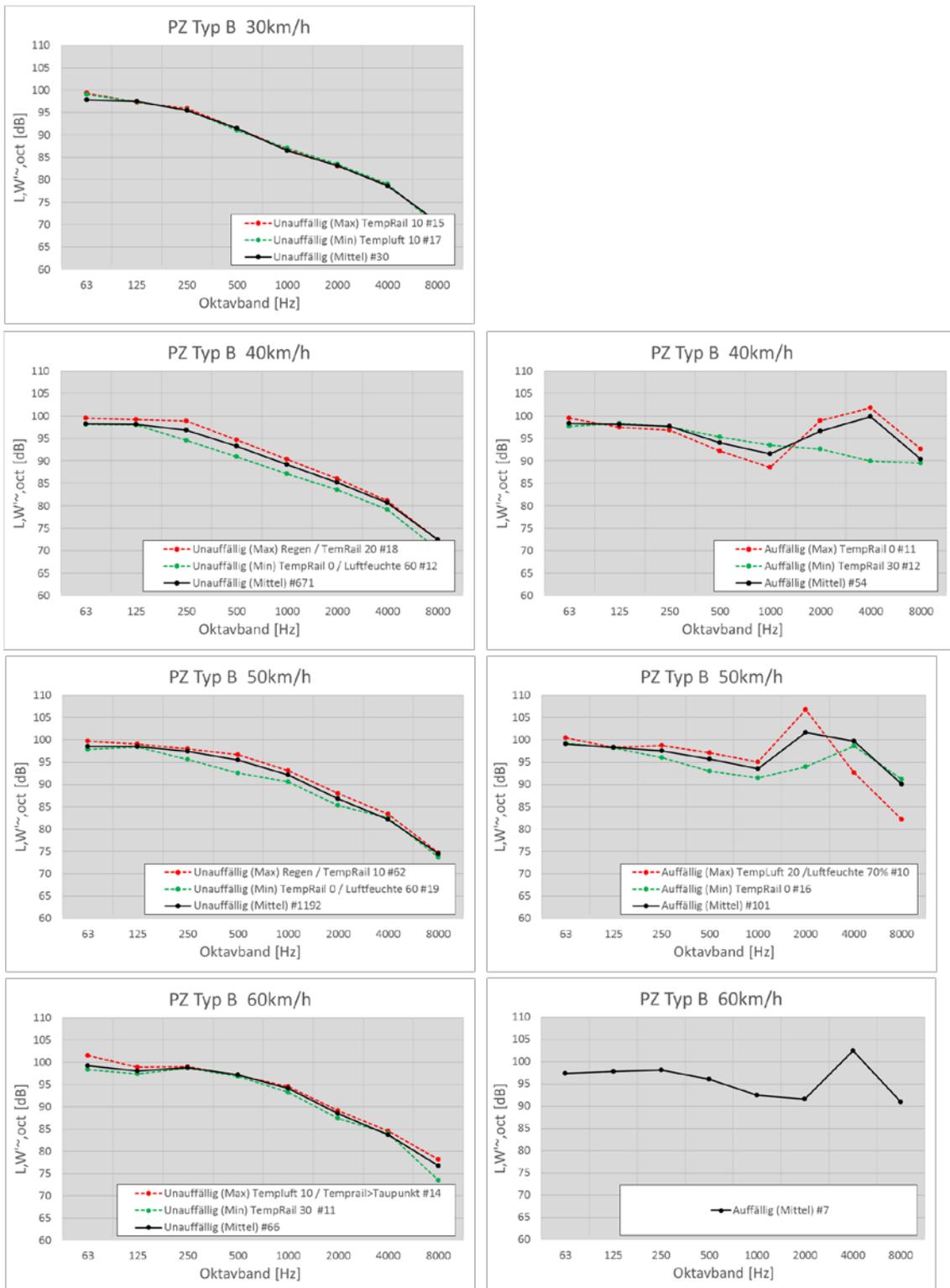


Abb. 7-5: Mittlere energetisch gemittelte abgeschätzte längenbezogene lineare Schalleistungspegel in den Oktavbändern, Kategorie PZ Typ B unauffällig (links) und mit breitbandigen, tonalen und hochfrequent tonalen Auffälligkeiten (rechts); MQ1 (Zeitraum mit Konditionierung)

| Zug | v [km/h] | Datensatz (unauffällig) | Anzahl | Häufigkeit | Witterungsbedingung | LW ^{ra} [dB] | | | | | | | | |
|----------|-------------|----------------------------|--------|------------|-----------------------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| | | | | | | f [Hz] | | | | | | | | A [dB] |
| | | | | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| PZ Typ A | 30 | Mittelwert | 158 | 100,0% | | 14,6 | 9,7 | 2,6 | 3,3 | 0,4 | 4,9 | -1,6 | 2,1 | 2,5 |
| PZ Typ A | 40 | Mittelwert | 3607 | 96,7% | | 12,8 | 9,7 | 4,0 | 3,8 | 2,5 | 6,0 | 0,7 | 2,8 | 3,6 |
| PZ Typ A | 50 | Mittelwert | 5875 | 95,7% | | 11,6 | 9,0 | 4,5 | 3,9 | 2,2 | 5,1 | 0,1 | 2,9 | 3,3 |
| PZ Typ A | 60 | Mittelwert | 343 | 96,1% | | 10,1 | 7,5 | 4,6 | 3,0 | 0,0 | 1,9 | -1,4 | 2,1 | 1,6 |
| PZ Typ B | 30 | Mittelwert | 30 | 100,0% | | 15,8 | 7,5 | -0,5 | -5,5 | 0,6 | -1,8 | -1,3 | 2,5 | -2,6 |
| PZ Typ B | 40 | Mittelwert | 671 | 92,6% | | 14,6 | 7,5 | 0,2 | -4,7 | 0,5 | -2,1 | -1,3 | 2,1 | -2,1 |
| PZ Typ B | 50 | Mittelwert | 1192 | 92,2% | | 13,2 | 7,2 | 0,1 | -3,4 | 0,8 | -2,8 | -1,8 | 1,8 | -1,6 |
| PZ Typ B | 60 | Mittelwert | 66 | 90,4% | | 12,2 | 6,0 | 0,8 | -2,8 | 0,1 | -3,6 | -2,3 | 1,7 | -1,5 |
| Güter | 40 | Mittelwert | 6 | 50,0% | | 10,2 | 2,8 | -2,4 | 2,2 | 3,5 | 0,3 | -0,7 | 0,4 | 1,0 |
| Güter | 50 | Mittelwert | 11 | 52,4% | | 10,1 | 1,9 | -1,2 | 2,1 | 2,3 | -1,1 | 0,9 | -1,0 | 1,2 |
| Güter | 60 | Mittelwert | 7 | 41,2% | | 10,4 | 2,5 | 0,9 | 1,4 | 2,9 | -0,1 | -0,4 | 0,2 | 1,3 |
| Minimum | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 30 | Minimum | 25 | 15,8% | TempRail 10 / TempRail > Taupunkt | 14,6 | 9,6 | 1,8 | 2,4 | 0,2 | 4,9 | -2,5 | -1,6 | 2,0 |
| PZ Typ A | 40 | Minimum | 12 | 0,3% | TempRail 30 / Luftfeuchte 30% | 12,8 | 9,1 | 3,4 | 1,3 | -0,6 | 2,1 | -2,5 | -0,6 | 1,0 |
| PZ Typ A | 50 | Minimum | 25 | 0,4% | TempLuft 40 | 10,5 | 8,1 | 3,5 | 2,3 | -1,6 | 0,9 | -4,0 | -0,9 | 0,7 |
| PZ Typ A | 60 | Minimum | 19 | 5,3% | TempLuft 30 / Luftfeuchte 40 | 9,9 | 7,0 | 4,0 | 1,4 | -1,9 | -0,5 | -2,7 | -2,6 | -0,1 |
| PZ Typ B | 30 | Minimum | 17 | 56,7% | TempLuft 10 | 17,1 | 7,4 | -0,5 | -6,0 | 1,0 | -1,5 | -0,9 | 1,7 | -2,6 |
| PZ Typ B | 40 | Minimum | 12 | 1,7% | TempRail 0 / Luftfeuchte 60 | 14,4 | 7,3 | -2,1 | -7,1 | -1,6 | -3,8 | -2,9 | 0,0 | -4,1 |
| PZ Typ B | 50 | Minimum | 19 | 1,5% | TempRail 0 / Luftfeuchte 60 | 12,5 | 7,1 | -1,8 | -6,4 | -0,7 | -4,3 | -1,5 | 1,1 | -3,4 |
| PZ Typ B | 60 | Minimum | 11 | 15,1% | TempRail 30 | 11,4 | 5,4 | 0,7 | -3,2 | -0,8 | -4,6 | -2,0 | -1,6 | -2,1 |
| Güter | 40 | Minimum | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 50 | Minimum | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 60 | Minimum | | | | | | | | | | | | |
| Maximum | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 30 | Maximum | 13 | 8,2% | TempRail 0 / Luftfeuchte 80 | 14,4 | 10,0 | 4,1 | 3,8 | 2,7 | 6,5 | -2,2 | -2,1 | 3,6 |
| PZ Typ A | 40 | Maximum | 59 | 1,6% | TempLuft 0 / Luftfeuchte 80% | 12,8 | 10,6 | 5,3 | 6,1 | 5,9 | 10,1 | 0,6 | 0,6 | 6,4 |
| PZ Typ A | 50 | Maximum | 53 | 0,9% | TempLuft 0 / Luftfeuchte 80% | 11,4 | 10,7 | 6,6 | 7,3 | 7,2 | 10,6 | 2,3 | 7,7 | 7,6 |
| PZ Typ A | 60 | Maximum | 17 | 4,8% | TempLuft 10 / Luftfeuchte 90% | 10,9 | 8,1 | 5,2 | 4,9 | 2,8 | 4,8 | -0,6 | -1,8 | 3,7 |
| PZ Typ B | 30 | Maximum | 15 | 50,0% | TempRail 10 | 17,4 | 7,3 | -0,1 | -5,5 | 0,8 | -2,0 | -1,0 | 1,9 | -2,5 |
| PZ Typ B | 40 | Maximum | 18 | 2,5% | Regen / TempRail 20 | 15,8 | 8,5 | 2,2 | -3,3 | 1,7 | -1,2 | -0,9 | 2,2 | -0,7 |
| PZ Typ B | 50 | Maximum | 62 | 4,8% | Regen / TempRail 10 | 14,4 | 7,7 | 0,6 | -2,3 | 1,8 | -1,7 | -0,7 | 2,0 | -0,6 |
| PZ Typ B | 60 | Maximum | 14 | 19,2% | TempLuft 10 / TempRail > Taupunkt | 14,5 | 6,9 | 1,0 | -2,9 | 0,5 | -2,9 | -1,4 | 3,1 | -1,2 |
| Güter | 40 | Maximum | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 50 | Maximum | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 60 | Maximum | | | | | | | | | | | | |

Tab. 7-4: Korrekturfaktoren für unauffällige Vorbeifahrten im Vergleich zu den Werten der ONR 305011

sowie die Differenzen zu den Werten der ONR 305011 und bildet somit die spezifische Situation an der Messstelle MQ1 ab.

Die Ergebnisse aus Tab. 7-4 und Tab. 7-5 sind im Anhang H noch einmal als absolute Pegelwerte in Form von Oktav- und Terzspektren dargestellt.

Für die Bestimmung der Wirkung der Schienenkopfkonditionieranlage wurden die Ergebnisse von MQ1 (aktivierte Konditionieranlage) und MQ2 (unbehandeltes Gleis) einander gegenübergestellt. Tab. 7-7 und Tab. 7-8 zeigen die Differenzen zwischen den zwei Abschnitten, wieder für die mittleren Werte, sowie für jene Witterungsbedingung mit den geringsten und die höchsten Schalleistungspegel. Anhand der Ergebnisse erkennt man, dass besonders im niedrigen Frequenzbereich die Ergebnisse im konditionierten

| Zug | v [km/h] | Datensatz (auffällig) | Anzahl | Häufigkeit | Witterungsbedingung | LW [~] [dB] | | | | | | | | | |
|----------|-------------|--------------------------|--------|------------|-------------------------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|--|
| | | | | | | f [Hz] | | | | | | | | A [dB] | |
| | | | | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | |
| PZ Typ A | 40 | Mittelwert | 125 | 3,3% | | 0,0 | -0,1 | 0,3 | 2,2 | 2,2 | 5,3 | 19,5 | 24,4 | 9,0 | |
| PZ Typ A | 50 | Mittelwert | 267 | 4,3% | | -0,3 | -0,2 | -0,4 | 0,9 | 0,9 | 3,5 | 17,5 | 21,1 | 6,8 | |
| PZ Typ A | 60 | Mittelwert | 14 | 3,9% | | -0,6 | -0,1 | 0,1 | 1,5 | 1,1 | 2,6 | 13,9 | 21,0 | 5,7 | |
| PZ Typ B | 40 | Mittelwert | 54 | 7,4% | | 0,1 | -0,1 | 0,9 | 0,8 | 2,4 | 11,4 | 19,1 | 18,0 | 8,4 | |
| PZ Typ B | 50 | Mittelwert | 101 | 7,8% | | 0,6 | -0,2 | 0,2 | 0,2 | 1,4 | 14,8 | 17,6 | 15,6 | 8,6 | |
| PZ Typ B | 60 | Mittelwert | 7 | 9,6% | | -1,9 | -0,2 | -0,7 | -1,1 | -1,7 | 3,2 | 18,8 | 14,3 | 6,0 | |
| Güter | 40 | Mittelwert | 6 | 50,0% | | -0,1 | -0,5 | 3,0 | -0,6 | 1,6 | 15,6 | 18,3 | 10,6 | 9,4 | |
| Güter | 50 | Mittelwert | 10 | 47,6% | | 0,0 | -0,1 | 2,3 | 0,3 | 3,7 | 8,6 | 15,6 | 9,3 | 6,3 | |
| Güter | 60 | Mittelwert | 10 | 58,8% | | 0,0 | -1,0 | -2,4 | 0,0 | 0,4 | 9,7 | 18,3 | 5,6 | 7,2 | |
| Minimum | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 40 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 50 | Minimum | 10 | 0,2% | TempLuft 30 / Luftfeuchte 70 | -2,0 | -1,4 | -3,2 | 1,7 | 0,6 | 3,3 | 13,7 | 20,9 | 5,2 | |
| PZ Typ A | 60 | Minimum | 16 | 4,5% | TempLuft 10 / Luftfeuchte 70 | 0,5 | 0,8 | -1,1 | -1,3 | -1,1 | 0,9 | 7,5 | 19,0 | 2,7 | |
| PZ Typ B | 40 | Minimum | 12 | 1,7% | TempRail 30 | -0,6 | 0,1 | 0,7 | 2,0 | 4,4 | 7,4 | 9,2 | 17,0 | 4,5 | |
| PZ Typ B | 50 | Minimum | 16 | 1,2% | TempRail 0 | 0,8 | -0,3 | -1,4 | -2,6 | -0,6 | 7,1 | 16,4 | 16,7 | 5,0 | |
| PZ Typ B | 60 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 40 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 50 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 60 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| Maximum | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 40 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 50 | Maximum | 13 | 0,21% | TempLuft 30 / Luftfeuchte 50 | -1,1 | -1,6 | -3,1 | 0,2 | -2,1 | 1,5 | 21,4 | 19,3 | 8,9 | |
| PZ Typ A | 60 | Maximum | 11 | 3,08% | TempRail 10 / Luftfeuchte 90 | -0,5 | -0,3 | -2,6 | -2,8 | -2,3 | 2,5 | 21,1 | 23,0 | 9,4 | |
| PZ Typ B | 40 | Maximum | 11 | 1,52% | TempRail 0 | 1,3 | -0,7 | 0,0 | -1,1 | -0,6 | 13,8 | 21,1 | 20,2 | 10,0 | |
| PZ Typ B | 50 | Maximum | 10 | 0,77% | TempLuft 20 / Luftfeuchte 70% | 1,9 | -0,2 | 1,4 | 1,6 | 3,0 | 19,9 | 10,6 | 7,7 | 11,5 | |
| PZ Typ B | 60 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 40 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 50 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 60 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |

Tab. 7-5: Korrekturfaktoren für auffällige Vorbeifahrten im Vergleich zu den Mittelwerten der unauffälligen Vorbeifahrten

| Zug | v [km/h] | Anzahl (oA+mA) | Häufigkeit (mA) | LW [~] [dB] MQ1 (pMA+pmoA) | | | | | | | | LW [~] [dB] KorrfA Δ ONR | | | | | | | | | |
|----------|-------------|-------------------|--------------------|-------------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|-----------------------------------|--------|-----|------|------|------|------|------|------|-----------|
| | | | | f [Hz] | | | | | | | | A [dB] | f [Hz] | | | | | | | | A [dB] |
| | | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| PZ Typ A | 30 | 158 | 0,0% | 95,1 | 94,7 | 88,6 | 89,3 | 83,4 | 80,4 | 74,9 | 69,1 | 90,0 | 14,6 | 9,7 | 2,6 | 3,3 | 0,4 | 4,9 | -1,6 | 2,1 | 2,5 |
| PZ Typ A | 40 | 3732 | 3,3% | 94,8 | 95,7 | 91,0 | 90,9 | 87,6 | 84,4 | 84,6 | 81,9 | 93,6 | 12,8 | 9,7 | 4,0 | 3,9 | 2,6 | 6,4 | 6,6 | 12,9 | 4,5 |
| PZ Typ A | 50 | 6142 | 4,3% | 95,1 | 96,0 | 92,5 | 91,9 | 89,2 | 85,8 | 84,9 | 82,0 | 94,7 | 11,6 | 9,0 | 4,5 | 3,9 | 2,2 | 5,3 | 5,4 | 11,0 | 4,0 |
| PZ Typ A | 60 | 357 | 3,9% | 95,1 | 95,5 | 93,6 | 92,1 | 89,1 | 85,1 | 82,4 | 82,8 | 94,4 | 10,1 | 7,5 | 4,6 | 3,1 | 0,1 | 2,1 | 1,4 | 9,8 | 2,0 |
| PZ Typ B | 30 | 30 | 0,0% | 97,8 | 97,5 | 95,5 | 91,5 | 86,6 | 83,2 | 78,7 | 70,5 | 93,3 | 15,8 | 7,5 | -0,5 | -5,5 | 0,6 | -1,8 | -1,3 | 2,5 | -2,6 |
| PZ Typ B | 40 | 725 | 7,4% | 98,2 | 98,2 | 96,9 | 93,4 | 89,4 | 88,1 | 89,2 | 79,9 | 96,8 | 14,6 | 7,5 | 0,2 | -4,6 | 0,7 | 0,8 | 7,2 | 9,6 | -0,5 |
| PZ Typ B | 50 | 1293 | 7,8% | 98,6 | 98,5 | 97,4 | 95,6 | 92,3 | 92,1 | 89,5 | 80,2 | 98,9 | 13,2 | 7,2 | 0,1 | -3,4 | 0,9 | 2,4 | 5,5 | 7,6 | 0,1 |
| PZ Typ B | 60 | 73 | 9,6% | 99,1 | 98,0 | 98,7 | 97,1 | 94,0 | 88,9 | 92,8 | 82,1 | 99,9 | 12,1 | 6,0 | 0,7 | -2,9 | 0,0 | -3,1 | 6,8 | 7,1 | -0,4 |
| Güter | 40 | 12 | 50,0% | 103,9 | 99,9 | 103,3 | 101,3 | 95,7 | 104,7 | 101,7 | 84,4 | 108,5 | 10,2 | 2,5 | -0,7 | 1,9 | 4,3 | 13,1 | 14,7 | 8,4 | 7,9 |
| Güter | 50 | 21 | 47,6% | 105,1 | 99,8 | 104,0 | 103,2 | 98,4 | 98,9 | 102,4 | 83,6 | 107,3 | 10,1 | 1,8 | 0,0 | 2,2 | 4,4 | 4,9 | 13,4 | 5,6 | 5,3 |
| Güter | 60 | 17 | 58,8% | 106,7 | 100,7 | 103,6 | 104,1 | 99,8 | 103,9 | 106,6 | 84,3 | 110,6 | 10,4 | 2,0 | -0,4 | 1,4 | 3,2 | 7,6 | 15,6 | 4,3 | 6,7 |

Tab. 7-6: Energetisch gemittelte abgeschätzte längenbezogene Schallleistungspegel aus dem jeweiligen Anteil an unauffälligen und auffälligen Fahrten sowie die Differenz zur ONR 305011 für den Messquerschnitt für MQ1

Abschnitt über jenen im unkonditionierten Bogen von MQ2 liegen. Die Differenz in diesem Bereich ist vermutlich maßgeblich durch den auf MQ1 identifizierten Schienenfehler zurückzuführen. Gerade bei der Betrachtung der Ergebnisse für jene Fahrten mit

| Zug | v [km/h] | Datensatz (unauffällig) | Anzahl (oA) MQ1 | Anzahl (oA) MQ2 | Häufigkeit (oA) MQ1 | Häufigkeit (oA) MQ2 | LW ^{sim} [dB] | | | | | | | | A [dB] |
|----------|-------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| | | | | | | | f [Hz] | | | | | | | | |
| | | | | | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| PZ Typ A | 30 | Mittelwert | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 40 | Mittelwert | 3607 | 853 | 96,7% | 75,2% | -1,1 | -2,1 | 2,2 | -0,4 | 3,0 | 4,9 | 2,6 | -3,7 | 1,3 |
| PZ Typ A | 50 | Mittelwert | 5875 | 3078 | 95,7% | 73,2% | 3,3 | -2,1 | 2,0 | -0,9 | 1,9 | 4,2 | 0,6 | -4,2 | 0,8 |
| PZ Typ A | 60 | Mittelwert | 343 | 6007 | 96,1% | 69,0% | 3,2 | -1,7 | 1,2 | -1,7 | 0,0 | 2,1 | -1,1 | -4,6 | -0,4 |
| PZ Typ B | 30 | Mittelwert | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ B | 40 | Mittelwert | 671 | 45 | 92,6% | 63,4% | 2,6 | -1,0 | 0,0 | -2,7 | -0,7 | 0,9 | -0,3 | -3,1 | -1,2 |
| PZ Typ B | 50 | Mittelwert | 1192 | 498 | 92,2% | 56,9% | 4,9 | -1,1 | -0,3 | -2,4 | -0,7 | -0,1 | -1,0 | -4,1 | -1,2 |
| PZ Typ B | 60 | Mittelwert | 66 | 896 | 90,4% | 53,7% | 5,3 | -1,0 | 0,4 | -2,0 | -0,4 | 0,3 | -0,6 | -3,3 | -0,8 |
| Güter | 40 | Mittelwert | 6 | 13 | 50,0% | 27,1% | -0,1 | -0,2 | -2,8 | -3,7 | -2,1 | -1,2 | -0,6 | -2,2 | -2,8 |
| Güter | 50 | Mittelwert | 11 | 5 | 52,4% | 13,2% | 2,4 | 0,2 | -3,3 | -3,9 | -3,3 | -2,2 | 1,8 | -2,8 | -3,2 |
| Güter | 60 | Mittelwert | | | | | | | | | | | | | |
| Minimum | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 30 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 40 | Minimum | 12 | 26 | 0,3% | 2,3% | -0,5 | -1,4 | 4,3 | 3,2 | 2,8 | 2,8 | 1,6 | -5,3 | 2,4 |
| PZ Typ A | 50 | Minimum | 25 | 29 | 0,4% | 0,7% | 3,5 | -1,9 | 2,6 | 1,9 | 1,3 | 1,8 | -0,5 | -4,5 | 1,3 |
| PZ Typ A | 60 | Minimum | 19 | 90 | 5,3% | 1,0% | 4,1 | -1,0 | 0,4 | -1,1 | -0,1 | 1,9 | 2,3 | -6,3 | -0,2 |
| PZ Typ B | 30 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ B | 40 | Minimum | 12 | 10 | 1,7% | 14,1% | 2,5 | -1,3 | -2,5 | -4,4 | -1,1 | 0,6 | 0,5 | -2,9 | -2,4 |
| PZ Typ B | 50 | Minimum | 19 | 10 | 1,5% | 1,1% | 5,4 | 0,2 | 0,1 | -2,7 | 0,8 | 1,3 | -1,8 | -4,7 | -0,7 |
| PZ Typ B | 60 | Minimum | 11 | 17 | 15,1% | 1,0% | 4,3 | -2,1 | 2,1 | -0,6 | 1,5 | 0,7 | -0,3 | -8,2 | 0,4 |
| Güter | 40 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 50 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 60 | Minimum | | | | | | | | | | | | | |
| Maximum | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 30 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 40 | Maximum | 59 | 11 | 1,6% | 1,0% | -1,5 | -2,7 | 0,1 | -1,7 | 5,0 | 7,3 | 3,0 | -6,8 | 1,5 |
| PZ Typ A | 50 | Maximum | 53 | 245 | 0,9% | 5,8% | 2,8 | -1,5 | 3,5 | -0,4 | 5,8 | 9,1 | 4,4 | 4,5 | 3,3 |
| PZ Typ A | 60 | Maximum | 17 | 28 | 4,8% | 0,3% | 4,1 | -2,7 | 1,1 | -2,4 | 0,4 | 3,8 | 1,9 | -3,9 | -0,2 |
| PZ Typ B | 30 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ B | 40 | Maximum | 18 | 11 | 2,5% | 15,5% | 4,9 | 0,5 | 1,7 | -2,0 | -0,4 | 1,1 | 1,3 | -1,4 | -0,4 |
| PZ Typ B | 50 | Maximum | 62 | 16 | 4,8% | 1,8% | 6,3 | -1,8 | -2,3 | -4,8 | -4,3 | -3,0 | -1,7 | -6,1 | -4,0 |
| PZ Typ B | 60 | Maximum | 14 | 28 | 19,2% | 1,7% | 7,4 | -1,0 | -1,3 | -4,9 | -3,6 | -2,5 | -1,2 | -2,6 | -3,5 |
| Güter | 40 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 50 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 60 | Maximum | | | | | | | | | | | | | |

Tab. 7-7: Differenz zwischen MQ2 (unbehandeltes Gleis) und MQ1 (aktive SKK) für unauffällige Vorbeifahrten, je Geschwindigkeit und Zugtyp, jeweils für die mittleren Schalleistungspegel über alle Witterungsbedingungen, sowie über jene Wetterausprägung mit den geringsten bzw. höchsten mittleren Schalleistungspegel

Auffälligkeiten muss berücksichtigt werden, dass hier maßgeblich die Häufigkeit gesenkt wurde, jene Auffälligkeiten die dennoch Auftreten sind nicht notwendigerweise in ihrer Pegelhöhe verringert bzw. können auf Grund des Fehlens von weniger starken Auffälligkeiten den Mittelwert auch erhöhen.

Für die Beurteilung der Wirkung ist jedoch vor allem der jeweilige Anteil der auffälligen Fahrten relevant. Für die jeweiligen Geschwindigkeiten und Zugtypen werden in Tab. 7-9 und Abb. 7-6 die Differenzen zwischen den energetisch gemittelten linearen

| Zug | v [km/h] | Datensatz (auffällig) | Anzahl (mA) MQ1 | Anzahl (mA) MQ2 | Häufigkeit (mA) MQ1 | Häufigkeit (mA) MQ2 | LW ^{sim} [dB] | | | | | | | | | | |
|----------|-------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|--|-----------|
| | | | | | | | f [Hz] | | | | | | | | | | A [dB] |
| | | | | | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | | |
| PZ Typ A | 40 | Mittelwert | 125 | 281 | 3,3% | 24,8% | -2,0 | -3,0 | 1,8 | 0,5 | 0,6 | -1,0 | 0,0 | -3,8 | -1,2 | | |
| PZ Typ A | 50 | Mittelwert | 267 | 1129 | 4,3% | 26,8% | 2,1 | -3,1 | 0,9 | -1,3 | -0,5 | -0,5 | 0,5 | -5,0 | -1,5 | | |
| PZ Typ A | 60 | Mittelwert | 14 | 2696 | 3,9% | 31,0% | 1,5 | -2,4 | 0,9 | -0,9 | -1,5 | -1,7 | -2,5 | -3,4 | -2,5 | | |
| PZ Typ B | 40 | Mittelwert | 54 | 26 | 7,4% | 36,6% | 1,9 | -1,3 | 2,1 | -1,0 | 0,2 | 6,5 | -0,2 | -9,4 | -0,5 | | |
| PZ Typ B | 50 | Mittelwert | 101 | 377 | 7,8% | 43,1% | 5,5 | -0,9 | 1,0 | -1,0 | 1,6 | 11,7 | 3,3 | -7,3 | 3,7 | | |
| PZ Typ B | 60 | Mittelwert | 7 | 771 | 9,6% | 46,3% | 3,6 | -0,8 | 0,5 | -2,4 | -1,8 | 0,7 | 4,2 | -6,6 | 1,4 | | |
| Güter | 40 | Mittelwert | 6 | 35 | 50,0% | 72,9% | 0,0 | 0,2 | 7,2 | 2,8 | -3,2 | 4,5 | -5,3 | -10,9 | -1,2 | | |
| Güter | 50 | Mittelwert | 10 | 33 | 47,6% | 86,8% | 1,9 | 0,3 | 6,2 | 2,2 | -0,5 | -4,2 | -5,6 | -13,8 | -4,3 | | |
| Güter | 60 | Mittelwert | 10 | 2 | 58,8% | 100,0% | 3,5 | -1,3 | -0,2 | 3,2 | 0,0 | 8,0 | 0,7 | -8,4 | 1,9 | | |
| Minimum | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 40 | Minimum | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 50 | Minimum | 10 | 11 | 0,2% | 0,3% | 2,0 | -3,2 | -0,8 | 3,4 | 1,2 | 2,9 | 5,6 | 3,8 | 3,4 | | |
| PZ Typ A | 60 | Minimum | 16 | 21 | 4,5% | 0,2% | 4,3 | 0,6 | 1,2 | -0,7 | -0,5 | -1,3 | -0,6 | 2,7 | 0,6 | | |
| PZ Typ B | 40 | Minimum | 12 | 12 | 1,7% | 16,9% | 1,3 | -1,1 | 1,8 | -0,3 | 1,3 | 2,8 | -7,3 | -11,3 | -3,6 | | |
| PZ Typ B | 50 | Minimum | 16 | 23 | 1,2% | 2,6% | 7,1 | 0,0 | -0,1 | -2,4 | 0,9 | 8,1 | 12,1 | -2,4 | 4,1 | | |
| PZ Typ B | 60 | Minimum | | | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 40 | Minimum | | | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 50 | Minimum | | | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 60 | Minimum | | | | | | | | | | | | | | | |
| Maximum | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 40 | Maximum | | | | | | | | | | | | | | | |
| PZ Typ A | 50 | Maximum | 13 | 10 | 0,2% | 0,2% | 2,9 | -4,5 | -0,4 | 0,2 | -4,0 | -7,9 | -3,3 | -11,5 | -5,1 | | |
| PZ Typ A | 60 | Maximum | 11 | 21 | 3,1% | 0,2% | 3,2 | -3,6 | -2,0 | -4,5 | -4,1 | -3,3 | 1,6 | -8,4 | -3,6 | | |
| PZ Typ B | 40 | Maximum | 11 | 10 | 1,5% | 14,1% | 4,4 | -1,9 | 1,3 | -2,9 | -3,3 | 9,8 | 0,8 | -6,3 | 0,9 | | |
| PZ Typ B | 50 | Maximum | 10 | 11 | 0,8% | 1,3% | 6,9 | -1,4 | 1,7 | -0,2 | 2,2 | 15,6 | -7,2 | -21,0 | 3,1 | | |
| PZ Typ B | 60 | Maximum | | | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 40 | Maximum | | | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 50 | Maximum | | | | | | | | | | | | | | | |
| Güter | 60 | Maximum | | | | | | | | | | | | | | | |

Tab. 7-8: Differenz zwischen MQ2 (unbehandeltes Gleis) und MQ1 (aktive SKK) für auffällige Vorbeifahrten, je Geschwindigkeit und Zugtyp, jeweils für die mittleren Schalleistungspegel über alle Witterungsbedingungen, sowie über jene Wetterausprägung mit den geringsten bzw. höchsten mittleren Schalleistungspegel

Oktavspektren sowie den A-bewerteten Schalleistungspegel auf Basis der entsprechenden Anteile an Auffälligen Fahrten dargestellt.

Der Vergleich der zwei Messstellen MQ1 (mit aktivierter SKK) und MQ2 (unbehandeltes Gleis) zeigt für beide Kategorien Differenzen von 2-4 dB für den abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegel. Bei dieser Gegenüberstellung ist jedoch zu beachten, dass es zwischen den zwei Gleisbögen schon eine grundsätzliche Differenz sowohl der Schalleistungspegel der unauffälligen Vorbeifahrten, als auch der Häufigkeit des Auftretens von Auffälligkeiten gibt. Anhand der Messdaten der ersten Projektphase mit deaktivierter SKK auf MQ1 wurden für die zwei Kategorien und jene Geschwindigkeiten für welche genügend Fahrten zur Verfügung standen, die Differenzen im Oktavspektrum der mittleren abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegel

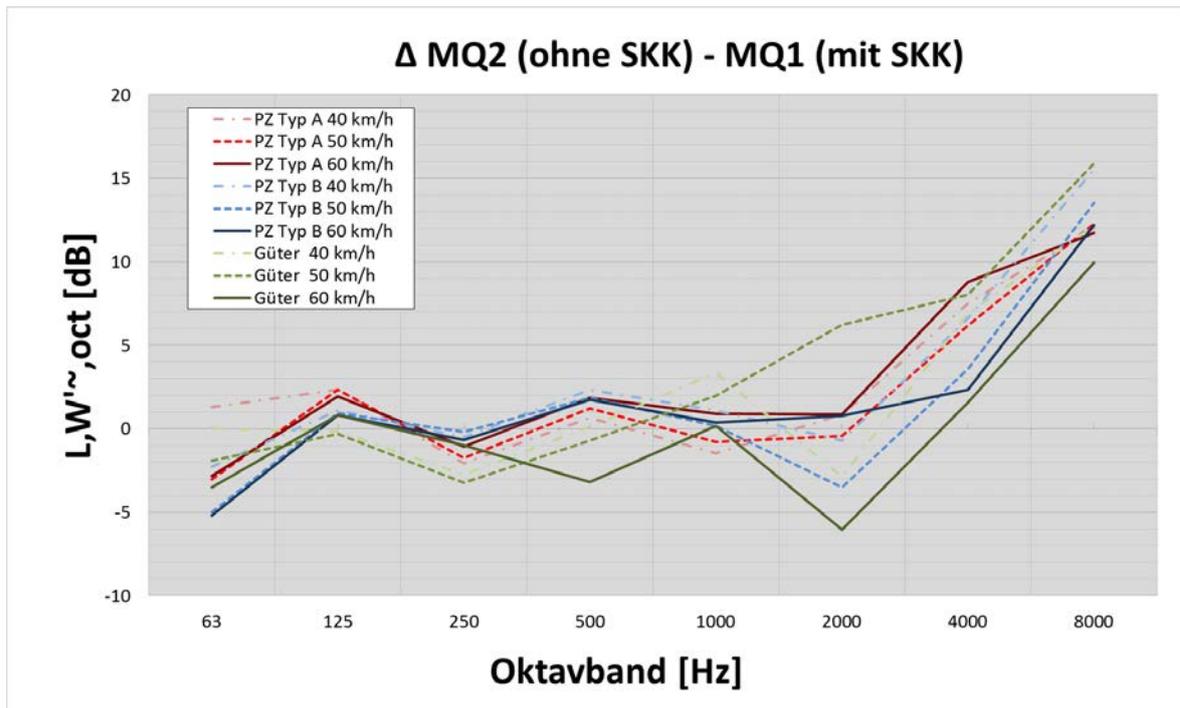


Abb. 7-6: Differenz der energetisch gemittelten abgeschätzten längenbezogenen Schallleistungspegel im Oktavband zwischen MQ2 (unbehandeltes Gleis) und MQ1 (aktivierte SKK)

| Zug | v [km/h] | Anzahl (oA+mA) MQ1 | Anzahl (oA+mA) MQ2 | Häufigkeit t (mA) | ΔLW [~] [dB] MQ2 (ohne SKK) - MQ1 (mit SKK) | | | | | | | | | A [dB] |
|----------|----------|--------------------|--------------------|-------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|
| | | | | | f [Hz] | | | | | | | | A | |
| | | | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | |
| PZ Typ A | 40 km/h | 3732 | 1134 | 21,4% | 1,3 | 2,3 | -2,1 | 0,7 | -1,5 | 0,8 | 7,5 | 12,1 | 4,1 | |
| PZ Typ A | 50 km/h | 6142 | 4207 | 22,5% | -3,0 | 2,3 | -1,7 | 1,2 | -0,8 | -0,4 | 6,2 | 12,3 | 3,2 | |
| PZ Typ A | 60 km/h | 357 | 8703 | 27,1% | -2,8 | 2,0 | -1,1 | 1,8 | 0,9 | 0,9 | 8,8 | 11,7 | 4,0 | |
| PZ Typ B | 40 km/h | 725 | 71 | 29,2% | -2,3 | 1,1 | -0,5 | 2,3 | 1,1 | -0,7 | 6,6 | 15,6 | 4,0 | |
| PZ Typ B | 50 km/h | 1293 | 875 | 35,3% | -5,0 | 0,9 | -0,2 | 1,9 | 0,2 | -3,5 | 3,6 | 13,5 | 1,4 | |
| PZ Typ B | 60 km/h | 73 | 1667 | 36,7% | -5,2 | 0,8 | -0,7 | 1,8 | 0,4 | 0,8 | 2,3 | 12,2 | 1,9 | |
| Güter | 40 km/h | 12 | 48 | 22,9% | 0,0 | -0,2 | -2,7 | 0,1 | 3,3 | -2,9 | 6,9 | 12,2 | 2,6 | |
| Güter | 50 km/h | 21 | 38 | 39,2% | -1,9 | -0,3 | -3,2 | -0,7 | 2,0 | 6,2 | 8,1 | 15,9 | 6,0 | |
| Güter | 60 km/h | 17 | 2 | 41,2% | -3,5 | 0,8 | -1,0 | -3,2 | 0,2 | -6,0 | 1,6 | 10,0 | -0,1 | |

Tab. 7-9: Vergleich der Anteile von Auffälligen Fahrten sowie der Differenz der energetisch gemittelten abgeschätzten längenbezogenen Schallleistungspegel aus dem jeweiligen Anteil an unauffälligen und auffälligen Fahrten zwischen MQ2 (unbehandeltes Gleis) und MQ1 (aktivierte SKK)

| Kategorie | km/h | LW [~] A | Δ MQ2 - MQ1 (deaktiverter SKK) | | | | | | | | | | breitbandig |
|-----------|------|-------------------|---|------|------|-----|------|------|------|------|------------------|----------------------|-------------|
| | | | mittlere abgeschätzte lineare Schallleistungsterzpegelspektren (ohne Auffälligkeiten) | | | | | | | | total (800-6300) | total (8kHz-12,5kHz) | |
| | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | | |
| PZ Typ A | 40 | 3,4 | 3,4 | -0,3 | 0,1 | 5,3 | 2,6 | 3,9 | 4,2 | 4,5 | 3,4% | 4,9% | 17,6% |
| PZ Typ A | 50 | 1,5 | 1,5 | 4,0 | -0,3 | 4,2 | 0,5 | 1,6 | 2,6 | 2,2 | 2,5% | 2,0% | 19,9% |
| PZ Typ A | 60 | 1,4 | 1,4 | 4,2 | -0,2 | 3,9 | 0,8 | 1,2 | 2,5 | 1,7 | 2,1% | 4,1% | 28,4% |
| PZ Typ B | 40 | 0,3 | 0,3 | 1,0 | 0,9 | 1,7 | -1,1 | 0,2 | 0,7 | 2,0 | 10,2% | -7,3% | 7,5% |
| PZ Typ B | 50 | 0,7 | 0,7 | 4,3 | 1,5 | 2,5 | -0,4 | 1,9 | 1,4 | 0,9 | 15,9% | -1,2% | 15,4% |

Tab. 7-10: Differenz der abgeschätzten längenbezogenen Schallleistungspegel sowie der Auftrittshäufigkeiten der Auffälligkeiten zwischen MQ2 und MQ1

sowie der Häufigkeiten der Auffälligkeiten berechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 7-10 dargestellt. Diese Ergebnisse könnten prinzipiell als Anpassungsfaktor verwendet werden und somit die durch die Schienenkonditionieranlage erzielten Minderungen erhöhen. Auf Grund der eingeschränkten Datenlage bzw. der auf Grund des Zeitraums eingeschränkten Spanne an unterschiedlichen Witterungsausprägungen ist eine direkte Übertragung nicht sinnvoll.

Ein weiterer Aspekt der bei der Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden sollte, ist die Änderung des Schmiermittelauftrages der Konditionieranlage am 24.06.2016. Dadurch erhöhte sich die Anzahl der Fahrten nach denen ein erneuter Auftrag des Schmiermittels erfolgte. Eine Gegenüberstellung von Fahrten vor und nach der Umstellung ist in den Abbildungen Abb. 7-7 und Abb. 7-8 dargestellt. Hierbei handelt es sich jeweils um die Extremfälle, also jene Fahrten welche kurz vor der nächsten Schmierung den Messquerschnitt passierten. Bei einer Schientemperatur von 10 °C-20 °C ist keine Differenz wahrnehmbar, erst bei Temperaturen von 20 °C-30 °C ergeben sich erhöhten Mittelwerte im oberen Frequenzbereich.

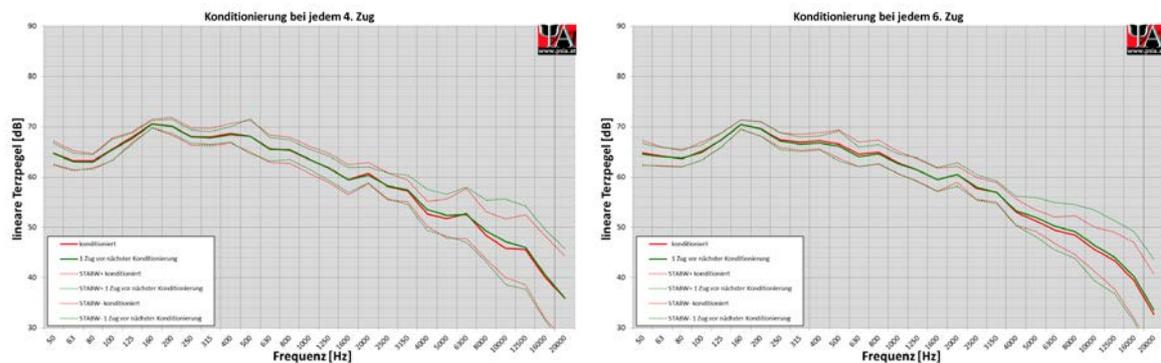


Abb. 7-7: Vergleich der mittleren Terzpegelspektren direkt vor und nach der Konditionierung für die Varianten Konditionierung bei jedem 4. Zug (links) sowie Konditionierung bei jedem 6. Zug (rechts) Kategorie PZ TYP A, Schientemperatur. 10 °C-20 °C, kein Regen, 50 km/h

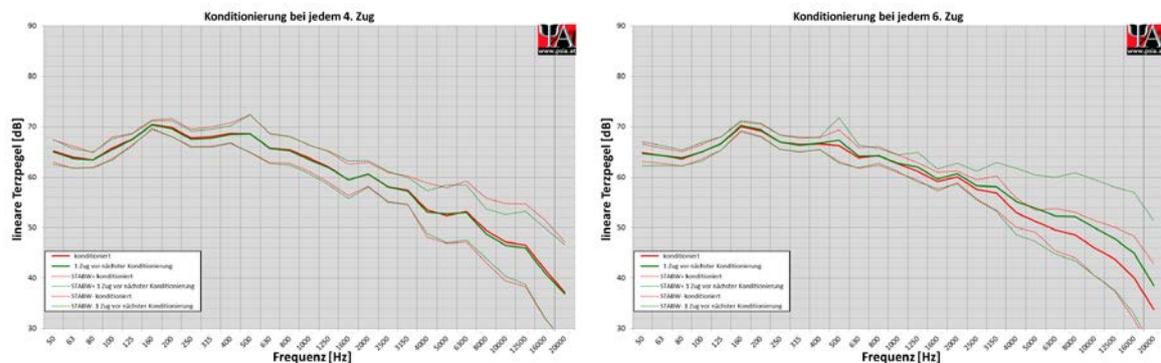


Abb. 7-8: Vergleich der mittleren Terzpegelspektren direkt vor und nach der Konditionierung für die Varianten Konditionierung bei jedem 4. Zug (links) sowie Konditionierung bei jedem 6. Zug (rechts) Kategorie PZ TYP A, Schientemperatur 20°C-30°C, kein Regen, 50km/h

7.3. Jahreswitterungsverlauf

Um den Einfluss von unterschiedlichen Witterungsbedingungen auf das Bogengeräusch im Jahresverlauf und in weiterer Folge für einen rechnerisch ermittelten Emissionspegel für den betroffenen Streckenabschnitt abschätzen zu können, werden nachfolgend unterschiedliche Berechnungsvarianten einander gegenübergestellt. Die errechneten Werte beziehen sich immer auf das idente Zugkollektiv und somit auf dieselbe Anzahl an Fahrten der jeweiligen Kategorien und Geschwindigkeiten. Der Unterschied liegt im Detailgrad der Mittelungswerte. Auf der einen Seite wird der Mittelwert unabhängig von meteorologischen Bedingungen herangezogen, auf der anderen Seite der wirklich für jeden einzelnen Zug gemessene Schalleistungspegel.

Die folgenden Varianten wurden bei der Gegenüberstellung berücksichtigt:

- **Variante 0:** Für die Berechnung wurden die Schalleistungspegel aus der Tabelle 5 der ONR 305011 herangezogen und nur die jeweilige Geschwindigkeit sowie der Zugtyp der tatsächlich gemessenen Vorbeifahrten herangezogen.
- **Variante 1:** Für die Berechnung wurden die im Projekt berechneten Mittelwerte der tatsächlich gemessenen Vorbeifahrten je Geschwindigkeit und Zugtyp herangezogen.
- **Variante 2:** Für die Berechnung wurden die im Projekt berechneten Mittelwerte der tatsächlich gemessenen Vorbeifahrten je Geschwindigkeit, Zugtyp und Witterungsbedingung (Lufttemperatur, Luftfeuchte) sowie der jeweilige Anteil an auffälligen und unauffälligen Vorbeifahrten herangezogen. Bei jenen Kombinationen von Parametern (Geschwindigkeit, Zugtyp, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Auffälligkeit) mit weniger als 10 Fahrten, wurde der Mittelwert aus Variante 1 herangezogen.
- **Variante 3:** Für die Berechnung wurden die im Projekt tatsächlich gemessenen abgeschätzten Schalleistungspegel jedes einzelnen Zuges berücksichtigt.
- **Variante 4:** Die in Variante 2 verwendeten Mittelwerte je Parameterkombination wurden analog dazu für jeden Zugtyp, Geschwindigkeit und Witterungsbedingung (diesmal jedoch auf Basis der Wetterdaten der BOKU für die Berechnung verwendet. Diese Wetterdaten werden von der Universität für Bodenkultur Wien bereitgestellt und sind frei zugänglich. Diese Wetterdaten wurden deshalb berücksichtigt, weil bei der Erstellung vom Lärmkarten im Normalfall keine meteorologischen Daten direkt vom Gleisbogen zur Verfügung stehen, sondern lediglich Mittelungswerte für das gesamte Projektgebiet. Dadurch soll somit der Unterschied zwischen den exakten Witterungsbedingungen und allgemein verfügbaren Wetterdaten abgeschätzt werden. Auch bei dieser Variante wurde für die Wetter- Zugtyp- und

Geschwindigkeitskombinationen mit weniger als 10 Fahrten der Mittelwert aus Variante 1 herangezogen.

- **Variante 5:** Für die Berechnung wurden die in Variante 1 berechneten Mittelwerte der VzG je Fahrzeugkategorie und Häufigkeit herangezogen.
- **Variante 6:** Für die Berechnung wurden die ONR-Werte der VzG je Fahrzeugkategorie und Häufigkeit herangezogen.
- **Variante 7:** Für die Berechnung wurde der längenbezogene Schalleistungspegel in Anlehnung an die neue RVE 04.01.02, welche die Vorgaben der Europäischen Richtlinie 2015/996 (CONOSSOS-EU) umsetzt, herangezogen. Die Fahrzeugtransferfunktion, Kontaktfilter, Radrauheit und Antriebsgeräusche wurden gem. Tabelle 1 der RVE ausgewählt. Als Parameter für den Fahrweg wurden die Werte für ein Holzschwellengleis sowie für eine Schienenrauheit gem. EN ISO 3095 ausgewählt. Die Ergebnisse wurden analog zu den Werten der ONR in ein Oktavspektrum umgewandelt und auf den gefahrenen Verkehr auf diesem Abschnitt umgelegt. Die erhöhte Rauheit, also auch Anpassungsfaktoren bzgl. des Gleisbogens wurden nicht berücksichtigt, somit stellt diese Variante einen Vergleich mit der geraden Strecke dar.
- **Variante 8:** Für die Berechnung wurde für jede Kategorie und Geschwindigkeit jeweils die Witterungsbedingung mit dem niedrigsten Mittelwert herangezogen.
- **Variante 9:** Für die Berechnung wurde für jede Kategorie und Geschwindigkeit jeweils die Witterungsbedingung mit dem höchsten Mittelwert herangezogen.

Die Berechnungen der längenbezogenen äquivalenten Schalleistungspegel der einzelnen Kategorien aller oben genannten Varianten wurden mittels folgender Formel durchgeführt.

$$L_{w',eq,i} = L_{w',i} + 10 * \lg \frac{N_i * a_i}{v_i * T}, \text{ in dB}$$

In einem weiteren Schritt wurden die ermittelten längenbezogenen äquivalenten Schalleistungspegel der einzelnen Kategorien energetisch addiert. Die ermittelten linearen Oktavpegel sowie die A-bewerteten äquivalenten, längenbezogenen Schalleistungspegel $L_{w',eq}$ der einzelnen Varianten sind in den Abbildungen Abb. 7-9 und Abb. 7-10 dargestellt.

$$L_{w',eq} = 10 * \lg \sum 10^{\frac{L_{w',eq,i}}{10}}, \text{ in dB}$$

| | |
|---------------|---|
| $L_{w',eq,i}$ | längenbezogener, äquivalenter Schalleistungspegel einer Kategorie i für einen Zeitabschnitt der Dauer T |
| $L_{w',i}$ | längenbezogener Schalleistungspegel einer Kategorie i, in dB |
| N_i | Anzahl der Züge einer Kategorie i im Zeitabschnitt der Dauer T |
| a_i | Länge der in Kategorie i betrachteten Züge, in m |
| v_i | Geschwindigkeit der in Kategorie i betrachteten Züge, in m/s |
| T | Dauer des Zeitabschnittes |

| Variante | Messquer-schnitt | Anzahl Vorbeifahrten | | | L,W,eq[dB] | | | | | | | | | | A [dB] | Δ ONR |
|--|------------------|----------------------|-------|---|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|-------|
| | | | | | f [Hz] | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | | | |
| 0 - ONR | MQ2 | 10.221 | 2.080 | 0 | 59,1 | 63,0 | 66,5 | 67,7 | 63,9 | 59,9 | 56,1 | 46,9 | 68,9 | 0,0 | | |
| 1 - V,Zugtyp | MQ2 | 10.221 | 2.080 | 0 | 68,0 | 72,6 | 68,4 | 69,6 | 65,5 | 62,3 | 68,3 | 70,1 | 74,5 | 5,6 | | |
| 2 - V,Zugtyp,Temp,Luftfachte | MQ2 | 10.221 | 2.080 | 0 | 67,9 | 72,9 | 68,3 | 69,5 | 65,0 | 61,1 | 66,8 | 69,4 | 73,7 | 4,8 | | |
| 3 - LW ^{max} jedes einzelnen Zugs | MQ2 | 10.221 | 2.080 | 0 | 67,9 | 72,9 | 68,3 | 69,6 | 65,0 | 61,2 | 67,0 | 69,5 | 73,8 | 4,9 | | |
| 4 - BOKU Wetterdaten | MQ2 | 10.221 | 2.080 | 0 | 67,8 | 72,9 | 68,2 | 69,4 | 65,0 | 61,1 | 66,8 | 69,3 | 73,6 | 4,7 | | |
| 5 - VzG, Zugtyp, Mittelwert | MQ2 | 10.221 | 2.080 | 0 | 67,6 | 71,9 | 68,0 | 69,0 | 65,2 | 62,4 | 68,5 | 69,9 | 74,3 | 5,4 | | |
| 6 - VzG, Zugtyp, ONR-Werte | MQ2 | 10.221 | 2.080 | 0 | 59,4 | 63,0 | 66,5 | 67,8 | 64,4 | 60,5 | 56,4 | 47,4 | 69,2 | 0,3 | | |
| 7 - Wetter min | MQ2 | 10.221 | 2.080 | 0 | 66,8 | 71,1 | 67,4 | 67,4 | 62,8 | 57,7 | 56,2 | 57,5 | 68,5 | -0,4 | | |
| 8 - Wetter max | MQ2 | 10.221 | 2.080 | 0 | 67,5 | 74,0 | 68,2 | 69,1 | 65,0 | 65,9 | 73,6 | 79,7 | 80,5 | 11,6 | | |
| 9 - RVE | MQ2 | 10.221 | 2.080 | 0 | 61,8 | 63,0 | 63,8 | 66,4 | 63,0 | 63,4 | 63,0 | 62,0 | 70,5 | 1,5 | | |

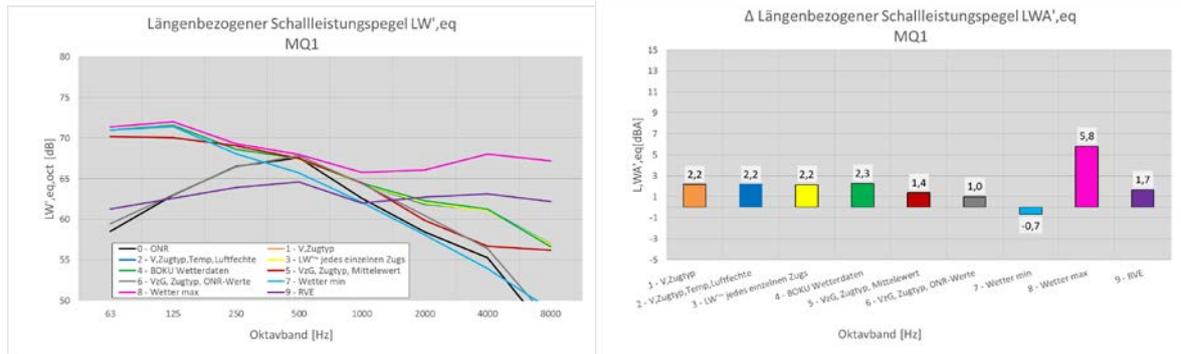


Abb. 7-9: Lineare Oktavpegel sowie die A-bewerteten äquivalenten, längenbezogenen Schallleistungspegel $LW'_{,eq}$ für die Berechnungsvarianten 1-9 MQ1 (aktivierte SKK)

| Variante | Messquer-schnitt | Anzahl Vorbeifahrten | | | L,W,eq[dB] | | | | | | | | | | A [dB] | Δ ONR |
|--|------------------|----------------------|-------|---|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|-------|
| | | | | | f [Hz] | | | | | | | | | | | |
| | | | | | 63 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | | | | |
| 0 - ONR | MQ1 | 10.221 | 2.080 | 0 | 58,5 | 63,0 | 66,5 | 67,6 | 62,6 | 58,5 | 55,3 | 45,8 | 68,2 | 0,0 | | |
| 1 - V,Zugtyp | MQ1 | 10.221 | 2.080 | 0 | 71,0 | 71,6 | 68,6 | 67,5 | 64,4 | 62,0 | 61,1 | 56,9 | 70,4 | 2,2 | | |
| 2 - V,Zugtyp,Temp,Luftfachte | MQ1 | 10.221 | 2.080 | 0 | 71,0 | 71,6 | 68,6 | 67,5 | 64,4 | 61,9 | 61,2 | 57,0 | 70,4 | 2,2 | | |
| 3 - LW ^{max} jedes einzelnen Zugs | MQ1 | 10.221 | 2.080 | 0 | 71,0 | 71,6 | 68,6 | 67,5 | 64,4 | 62,0 | 61,1 | 56,9 | 70,4 | 2,2 | | |
| 4 - BOKU Wetterdaten | MQ1 | 10.221 | 2.080 | 0 | 71,0 | 71,6 | 68,6 | 67,5 | 64,5 | 62,3 | 61,3 | 56,6 | 70,5 | 2,3 | | |
| 5 - VzG, Zugtyp, Mittelwert | MQ1 | 10.221 | 2.080 | 0 | 70,2 | 70,1 | 69,1 | 67,5 | 64,5 | 59,9 | 56,7 | 56,2 | 69,6 | 1,4 | | |
| 6 - VzG, Zugtyp, ONR-Werte | MQ1 | 10.221 | 2.080 | 0 | 59,4 | 63,0 | 66,5 | 67,8 | 64,4 | 60,5 | 56,4 | 47,4 | 69,2 | 1,0 | | |
| 7 - Wetter min | MQ1 | 10.221 | 2.080 | 0 | 71,0 | 71,4 | 68,1 | 65,7 | 62,1 | 58,1 | 54,0 | 48,9 | 67,6 | -0,7 | | |
| 8 - Wetter max | MQ1 | 10.221 | 2.080 | 0 | 71,4 | 72,0 | 69,3 | 68,0 | 65,8 | 66,1 | 68,0 | 67,2 | 74,0 | 5,8 | | |
| 9 - RVE | MQ1 | 10.221 | 2.080 | 0 | 61,3 | 62,6 | 63,9 | 64,6 | 62,0 | 62,7 | 63,1 | 62,2 | 69,9 | 1,7 | | |

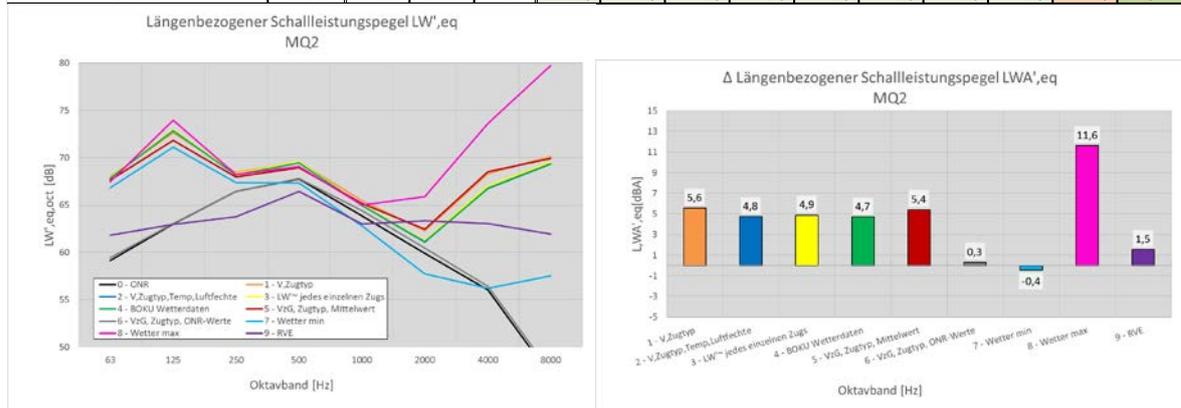


Abb. 7-10: Lineare Oktavpegel sowie die A-bewerteten äquivalenten, längenbezogenen Schallleistungspegel $LW'_{,eq}$ für die Berechnungsvarianten 1-9 MQ2 (ohne SKK)

Der Vergleich der A-bewerteten äquivalenten längenbezogenen Schallleistungspegel zeigt, dass die unterschiedlichen Berechnungsmethoden für den Abschnitt ohne SKK relative ähnliche Werte liefern. Ausgehend von den tatsächlich aufgetretenen summierten Schallleistungspegel (Variante 3) ergeben sich die höchsten Abweichungen mit 0,9 dB für

die Variante 1. Der Vergleich mit den Werten der ONR für die gerade Strecke ergibt eine Differenz von 4,9 dB, im Vergleich zur RVE sind die Werte um 3,5 dB erhöht. Würden alle Vorbeifahrten bei jener Wetterbedingung welche die niedrigsten Pegel und Häufigkeiten an Auffälligkeiten liefert, würden die Ergebnisse sogar leicht unter der ONR liegen, bei der schlechtesten Wetterbedingung würde es zu einer Erhöhung um 11,6 dB kommen.

Für den Abschnitt mit konditioniertem Gleis, sind die Ergebnisse um einige dB niedriger. Für die Varianten 1-4 wurden nahezu idente Differenzen zur ONR ermittelt. Im Vergleich zur RVE liefern die Emissionen im Bogen sogar nur noch um bis zu 0,5 dB erhöhte Werte. Auch die Maximalwerte, also wenn alle Züge bei der akustische gesehen schlechtesten Witterungsbedingung verkehren würden, sind deutlich niedriger als bei MQ2 und liegen bei 5,8 dB.

8. ZUSAMMENFASSUNG

In vorliegendem Projekt wurden die von Schienenfahrzeugen in zwei engen Gleisbögen (Radien von rund 230 m) erzeugten Kurvengeräusche im Hinblick auf den Einfluss verschiedener Witterungsbedingungen und die Minderungspotentiale durch eine fahrgewegseitige Schienenkopfkonditionierung näher untersucht, sowie hinsichtlich etwaiger Abhängigkeiten von Radprofileigenschaften der Fahrzeuge analysiert. Im Detail wurden an der Wiener Vorortelinie S45 durch infrastrukturseitige Messungen in den beiden Gleisbögen bei vergleichbaren Oberbauparametern und bei gleichem Wagenmaterial Schallemissionen erfasst. Zur Beurteilung des Witterungseinflusses über ein ganzes Jahr wurde ein ausgedehnter Messzeitraum von 11 Monaten gewählt, wodurch je Messquerschnitt mehr als 20000 Vorbeifahrten für die Auswertungen zur Verfügung standen. Des Weiteren befand sich an einem der beiden Bögen eine Schienenkopfkonditionieranlage, sodass deren Wirkung unter anderem durch einen direkten Vergleich der Emissionen in beiden Bögen abgeschätzt werden konnte.

Bei den Auswertungen kam der im Projekt BEGEL entwickelte Algorithmus zur Erkennung auffälliger Bogengeräusche zum Einsatz, nachdem dessen Eignung für vorliegende Messungen empirisch verifiziert wurde. Anhand identifizierter, breitbandiger und tonaler Geräuschkomponenten, welche kennzeichnend für Geräusche bei Spurkranzanlauf (Kurvenkreischen) und für Geräusche bei lateralem Stick-Slip Effekt (Kurvenquietschen) sind, wurden die verschiedenen Fragestellungen vorwiegend für die beiden auf der S45 verkehrenden Schnellbahnbaureihen A und B behandelt. Die gewonnenen Erkenntnisse über Einflüsse wurden zudem auf die Prognoserechnung gemäß ONR 305011 umgelegt, indem entsprechende frequenzabhängige Korrekturfaktoren abgeleitet wurden. Durch Anpassung dieser Ergebnisse ist auch die Bildung entsprechender Korrekturfaktoren für das Rechenverfahren gemäß der Europäischen Richtlinie 2015/996 (CNOSSOS-EU) möglich.

Automatisierte Erkennung akustischer Auffälligkeiten

Sowohl die Grenzen des betrachteten Frequenzbereichs zur Erkennung tonaler Auffälligkeiten, wie auch die allgemeine Qualität der Detektion tonal und breitbandig auffälliger Komponenten wurden anhand von Hörproben und manuellen Bewertungen von Terzpegelzeitverläufen und/oder Spektrogrammen empirisch getestet. Durch diese stichprobenhafte Verifizierung konnten die positiven Erfahrungen aus dem Projekt BEGEL hinsichtlich einer hohen Qualität der automatisierten Erkennung grundsätzlich bestätigt werden.

Allerdings wurden auch tonale Komponenten im 1 kHz und zum Teil auch im 800 Hz Terzband (wenngleich mit vergleichsweise geringer Häufigkeit) beobachtet, welche aufgrund der Geräuschcharakteristik zumeist als kennzeichnend für den laterale Stick-Slip Effekt eingestuft wurden. Einzige Ausnahme stellten tonale Komponenten im Bereich der Triebwagen der Schnellbahnbaureihe B im 800 Hz Terzband dar, welche eine Geschwindigkeitsabhängigkeit aufwiesen und infolgedessen den nicht zu detektierenden Traktionsgeräuschen zugeschrieben wurden. Die untere Betrachtungsgrenze für tonale Komponenten wurde aufgrund dieser Erkenntnisse für alle Zugkategorien außer der Schnellbahnbaureihe B vom 1,25 kHz auf das 800 Hz Terzband bzw. für die Schnellbahnbaureihe B auf das 1 kHz Terzband gesenkt. Des Weiteren wurde im Zuge der Verifizierung der Eindruck gewonnen und anschließend durch Auswertung relativer Auftrittshäufigkeiten bestätigt, dass tonale Komponenten im Frequenzbereich von 0,8 kHz bis 6,3 kHz bei der Baureihe A vergleichsweise häufig mit breitbandigen Auffälligkeiten einhergehen. Infolgedessen ist für diese Zugkategorie nicht auszuschließen, dass tonale Auffälligkeiten auch mehrheitlich durch den Spurkranzanlauf hervorgerufen werden (ähnliches Verhalten wurde bereits im Projekt BEGEL beobachtet, Details hierzu finden sich im zugehörigen Ergebnisbericht [1]).

Diese durch die Verifizierung erlangten Erkenntnisse verdeutlichen einen weiteren Aspekt der automatisierten Erkennung. So ist der zugrunde liegende Algorithmus trotz guter Erkennungseigenschaften nicht als statische Auswertevorschrift zu verstehen ist, sondern Spezifika von Gleisbögen, Eigenschaften der darauf verkehrenden Fahrzeuge und/oder vorherrschende Betriebsparameter können einerseits Anpassungen (wie beispielsweise für betrachtete Bögen in Kap. 4 dargestellt) sinnvoll machen. Andererseits wird bei dessen Anwendung empfohlen, stets zumindest stichprobenhafte, empirische Tests vorzunehmen, um Erfahrungen mit den jeweiligen akustischen Eigenschaften der auffälligen und unauffälligen Schallemissionen für eine verbesserte Bewertung der Erkennungsergebnisse sammeln zu können.

Einfluss der Witterung

Der Vergleich der Häufigkeiten von tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten zeigt, dass sowohl bei der Zugkategorie PZ TYP A als auch der Kategorie PZ TYP B, jene Vorbeifahrten bei welchen die Schientemperaturen unter der Taupunkttemperatur lagen, größtenteils deutlich geringere Auftrittshäufigkeiten liefern als jene Vorbeifahrten mit einer Schientemperatur über der Taupunkttemperatur. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich erwartungsgemäß bei Regen. Durch die nasse Oberfläche der Schiene, welche bei

den Fahrten mit einer Schientemperatur kleiner als die Taupunkttemperatur auch durch das kondensierte Wasser entsteht, ändert sich der Reibkoeffizient und somit auch die Häufigkeit des Auftretens von tonalen und breitbandigen Auffälligkeiten. Bei der Geschwindigkeit laut VZG (60 km/h) liegen für die Kategorie PZ TYP A die Häufigkeiten sowohl bei tonalen als auch bei breitbandigen Auffälligkeiten von Fahrten bei Schientemperatur < Taupunkt im Bereich der Ergebnisse mit Regen und zeigen im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Regen sowie bei Schientemperaturen > Taupunkt um bis zu 40 % geringere Auftretshäufigkeiten. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten liegen die Ergebnisse bei einer Schientemperatur < Taupunkt etwa 20 % bis 60 % unter den Werten mit Schientemperatur > Taupunkt. Dadurch können die Häufigkeiten von tonalen Auffälligkeiten auf 5 % und von breitbandigen Auffälligkeiten auf etwa 20 % reduziert werden und liegen damit in einem ähnlichen Bereich wie bei Fahrten mit Regen. Bei der Kategorie PZ TYP B zeigen sich für die tonalen Auffälligkeiten bei Temperaturen <10 °C keine Unterschiede, im Temperaturbereich 10 - 20 °C jedoch Erhöhungen um 40 %. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten liegen die Ergebnisse bei einer Schientemperatur < Taupunkt etwa 7 % bis 35 % unter den Werten mit Schientemperatur > Taupunkt. Im Vergleich zur Kategorie PZ TYP A reduzieren sich die Häufigkeiten dadurch nur auf eine Häufigkeit von etwa 20 % - 50 %. Die Ergebnisse mit Regen liegen hier deutlich unter diesen Werten und zeigen nur maximal 5 % tonale und 20 % breitbandige Auffälligkeiten.

Die Luftfeuchte als Einflussparameter liefert die höchsten Häufigkeiten bei einem Prozentsatz von 60-80 %. Sowohl bei höheren als auch bei geringerer Luftfeuchte zeigt sich eine abnehmende Häufigkeit. Je geringer die Temperaturen desto mehr ändert sich der Kurvenverlauf in Richtung einer abnehmenden Häufigkeit mit steigender Luftfeuchte, auch hier zeigt sich jedoch zumeist ein lokales Maximum bei einem Prozentsatz von 70 % bzw. 80 %. Bei der Kategorie PZ TYP A ergeben sich bei Temperaturen > 10 °C für die Geschwindigkeit laut VZG (60 km/h) tonale Häufigkeiten im Bereich von maximal 10 %, für die breitbandigen Auffälligkeiten von maximal 50 % und können jeweils bei der höchsten und niedrigsten Luftfeuchte auf beinahe 0 % absinken. Bei Temperaturen <10 °C zeigen sich generell höhere Werte, vor allem im niedrigen Luftfeuchtebereich liegen hier die Häufigkeiten zwischen 30 % - 40 % (tonal) und 70 % - 100 % (breitbandig). Bei der Kategorie PZ TYP B zeigt sich dieses unterschiedliche Temperaturverhalten nicht. Die höchsten Werte liegen hier bei etwa 15 % - 20 % für tonale Auffälligkeiten und bei etwa 80 % bei breitbandigen Auffälligkeiten.

Die abgeschätzten A-bewerteten längenbezogenen Schalleistungspegel liefern bei Temperaturen $> 10\text{ °C}$ für die Kategorie PZ TYP A eher einen Anstieg des Pegels mit steigender Luftfeuchte und liegen bei der Geschwindigkeit laut VZG zwischen 92 dB(A) und 94 dB(A) bei unauffälligen Fahrten und zwischen 95 dB(A) und 100 dB(A) bei auffälligen Fahrten. Der Temperaturbereich von 10 °C und niedriger zeigt für die auffälligen Fahrten ein gegenläufiges Bild, hier ergeben sich abgeschätzte L_{W-} von 105 dB(A) bis 100 dB(A). Bei der Kategorie PZ TYP B sind über den gesamten Temperaturverlauf die Absolutwerte relativ konstant und liegen bei der Geschwindigkeit laut VZG bei etwa 99 dB(A) (unauffällige Fahrten) und 101 dB(A) (auffällige Fahrten).

Bei der Betrachtung der Temperatur als Einflussparameter wurde zwischen der Schienen- und der Lufttemperatur unterschieden, da sich diese besonders in Ihren Maximalwerten deutlich unterscheiden können. Wie die Ergebnisse zeigen, ist die Tendenz der Änderungen der Auftrittshäufigkeiten zwar vergleichbar. Jedoch scheinen bei Gesamtbetrachtung der Auswertungen die vier Witterungsparameter Taupunkt, Schientemperatur, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, die zueinander ebenfalls physikalische Abhängigkeiten aufweisen, zumindest in gewissen Wertebereichen in Zusammenhang zu den Auftrittshäufigkeiten zu stehen.

Mit steigender Temperatur zeigt sich für die Kategorie PZ TYP A eine fallende Häufigkeit, bei den breitbandigen Auffälligkeiten gibt es jedoch je nach Geschwindigkeit wieder lokale Maxima bei etwa 20 °C , wobei dieses Phänomen bei der niedrigsten beurteilten Geschwindigkeit von 30 km/h am stärksten auftritt. Bei der Kategorie PZ TYP B sind diese Maximalwerte vor allem bei den breitbandigen Auffälligkeiten wesentlich stärker ausgeprägt, aber auch bei den tonalen Auffälligkeiten sind lokale Maxima bei 20 °C ersichtlich. Die tonalen Häufigkeiten erreichen bei der Geschwindigkeit laut VZG (60 km/h) bei Fahrten ohne Regen ein Maximum von etwa 20 % und reduzieren sich mit steigender Temperatur auf 0 %. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten liegen die Maximalwerte bei 60 % und die geringsten Häufigkeiten bei $<10\%$ (PZ TYP A) bzw. etwa 30 % (PZ TYP B).

Betrachtet man den abgeschätzten längenbezogenen Schalleistungspegel so zeigt sich für beide Kategorien und alle Geschwindigkeiten eine Reduktion des Pegels mit steigenden Temperaturen. Bei einer der Geschwindigkeit laut VZG ergeben sich für die unauffälligen Fahrten der Kategorie PZ TYP A L_{W-} von 95 dB(A) bis 92 dB(A), für auffällige Fahrten liegen die Werte im Bereich von 102 dB(A) bis 97 dB(A). Bei der

Kategorie PZ TYP B liegen die Ergebnisse zwischen 100 dB(A) und 98 dB(A) für unauffällige Fahrten und zwischen 104 dB(A) und 99 dB(A) bei den auffälligen Fahrten.

Minderungswirkung durch Schienenkopfkonditionierung

Um den Effekt der Schienenkonditionieranlage bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen darzustellen wurden drei unterschiedliche Vergleiche aufgestellt. Einerseits der Vergleich der Fahrten auf den zwei unterschiedlichen Messquerschnitten MQ1 und MQ2 für jenen Zeitraum bei welchem die SKK aktiv war. Da hier jedoch auch ein Effekt auf Grund der unterschiedlichen Gleisbögen trotz nahezu identem Bogenradius nicht ausgeschlossen werden kann, wurde der Vergleich auch nur für den MQ1 der Zeitraum mit aktiver jenem mit inaktiver SKK gegenübergestellt. Zu guter Letzt wurden auch für den Zeitraum der inaktiven SKK auf MQ1 ein Vergleich desselben Zeitraums auf MQ2 durchgeführt, um hier einen generellen Unterschied zwischen den zwei Messquerschnitten rein auf Basis der Örtlichkeit darstellen zu können.

Die größte Aussagekraft auf Grund der breitesten Datenbasis liefert der Vergleich der Messquerschnitte MQ1 und MQ2 während des Zeitraums mit aktivierter SKK auf MQ1.

Betrachtet man die Kategorie PZ TYP B so zeigt sich die höchste Wirkung für breitbandige Auffälligkeiten im Bereich von 60 % - 70 % Luffeuchte mit jeweils sinkender Wirkung für die Bereiche unter und über diesem Prozentbereich. Dieselbe Tendenz lässt sich auch bei den tonalen Auffälligkeiten erkennen, für die tonalen Auffälligkeiten zeigen jedoch die Werte ab einer Schienentemperatur von > 10 °C eher einen umgekehrten Verlauf, also ein Minimum bei 70 % sowie der Bereich vor und danach mit ansteigender Wirkung. Für die Geschwindigkeit mit den meisten Vorbeifahrten (50 km/h), reichen die Ergebnisse von einer Reduktion der Häufigkeiten bis zu einem Maximum von 28 % Punkten, bis zu einer Erhöhung der Häufigkeiten um bis zu 10 % Punkte bei tonalen Auffälligkeiten. Bei breitbandigen Auffälligkeiten liegt das Maximum der Reduktion bei 76 % Punkten und die minimal erreichte Reduktion bei 10 % Punkten. Für die Kategorie PZ TYP A liegen die Ergebnisse grundsätzlich in einem ähnlichen Bereich, bei dieser Kategorie ist jedoch deutlich zu erkennen, dass für jene Temperaturbereiche welche über 20 °C liegen die Wirkung der SKK bei tonalen Auffälligkeiten nur noch geringfügig vorhanden ist. Für die Geschwindigkeit laut VZG ergeben sich bis zu 10 % Punkte an Pegelreduktion für tonale Auffälligkeiten und Reduktionen von zumindest 8 % -Punkten und bis zu einem Maximum von 45 % Punkten bei breitbandigen Auffälligkeiten.

Bei der Betrachtung der Wirkung in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt sich eine klare Abnahme mit steigender Schienentemperatur für die Kategorie PZ TYP A, wobei sich

diese Tendenz mit der generellen Häufigkeit bei diesen Witterungsbedingungen deckt. Bei den tonalen Auffälligkeiten zeigt sich bei Temperaturen $> 20\text{ °C}$ nur noch eine geringfügige Wirkung. Diese Tendenz ist auch für die Kategorie PZ TYP B ersichtlich hier gibt es jedoch im Bereich von $10\text{ °C} - 20\text{ °C}$ ein Maximum. Die höchste erreichte Reduktion von Auffälligkeiten liegt für die Fahrten beider Kategorien bei der Geschwindigkeit laut VZG bei 15 % Punkten (tonal) bzw. 68 % Punkten (breitbandig). Generell erkennt man deutlich die höhere Wirkung für Schienentemperaturen welche über dem Taupunkt liegen sowie jene Fahrten ohne Regen. Die Wirkung bei der Einteilung der Fahrten gem. der gemessenen Lufttemperatur zeigt ein ähnliches Bild.

Betrachtet man nur die Daten von MQ1 mit aktivierter und deaktivierter SKK so zeigt sich bei der Kategorie PZ TYP B eine steigende Wirkung mit steigenden Temperaturen für breitbandige Auffälligkeiten (Maximum liegt bei 70 % Punkten), bei tonalen Auffälligkeiten (Maximum liegt bei 25 % Punkten) geht die Wirkung zurück. Für Temperaturen $> 10\text{ °C}$ ist auf Grund der sehr geringen Häufigkeiten von Auffälligkeiten nur noch eine geringfügige Wirkung sichtbar. Eine Tendenz in Richtung abnehmender Wirkung bei höheren Temperaturen ist dennoch erkennbar. Der Einfluss der Luftfeuchte ist auf Grund der geringen Datenmenge nicht eindeutig, jedoch gibt es wieder Anzeichen für ein Wirkungsmaximum (Reduktion von 30 %-Punkten für tonale und 70 %-Punkten bei breitbandigen Auffälligkeiten) bei 70 %.

Bei der Kategorie PZ TYP A zeigt sich die größte Wirkung zwischen 0 °C und 10 °C (bei der Geschwindigkeit laut VZG liegt die Reduktion bei bis zu 20 % Punkten), bei höheren Temperaturen ist wieder auf Grund der geringen generellen Häufigkeiten eine Beurteilung der Wirkung nicht möglich. Bei breitbandigen Auffälligkeiten gibt es ebenfalls einen Abfall bei höheren Temperaturen, die höchsten Reduktionen wurden im Bereich von $0-10\text{ °C}$ ermittelt und liegen bei einem Maximum von 50 %-Punkten. Der Einfluss der Luftfeuchte zeigt wieder ein Maximum bei 70 %.

Der Vergleich der beiden Messquerschnitte MQ1 und MQ2 für den Zeitraum mit auf MQ1 deaktivierter SKK zeigt, dass die Häufigkeiten in MQ1 grundsätzlich über jenen von MQ2 liegen.

Bei der Kategorie PZ TYP A liegen die Häufigkeiten der tonalen Auffälligkeiten auf einem relativ ähnlichem Niveau, etwas häufiger kommen diese auf MQ1 vor, die Unterschiede bei tiefen Temperaturen $< 0\text{ °C}$ fallen hier ebenfalls etwas höher aus und liegen bei etwa 20 %-Punkte (Luftfeuchte) bzw. 10 %-Punkten (Temperatur) über den Häufigkeiten bei MQ2. Bei den breitbandigen Auffälligkeiten ist der Unterschied stärker, wobei im

Temperaturbereich 10 °C – 20 °C bzw. bei 70 % Luftfeuchte wieder ein Maximum von 40 % Punkte (Luftfeuchte) bzw. 20 %-Punkte (Temperatur) sichtbar ist. Vor allem bei den breitbandigen Auffälligkeiten ist die höhere Häufigkeit bei MQ1 mit steigender Feuchtigkeit sinkend. Bei der Kategorie PZ TYP B zeigt sich zwar ein ähnliches Bild, die Ergebnisse liefern hier jedoch auch bei den tonalen Auffälligkeiten höhere Häufigkeiten von etwa 20 % Punkten in MQ1. Betrachtet man die Pegeldifferenzen der abgeschätzten A-bewerteten längenbezogenen Schalleistungspegel, so ergeben sich für die Kategorie PZ TYP A für unauffällige Fahrten auf MQ1 um etwa 2 dB höher Pegel als auf MQ2, während die Ergebnisse für auffällige Fahrten nahezu ident sind. Für die Kategorie PZ TYP B liegen sowohl die tonalen als auch die breitbandigen Pegel auf MQ1 um 2 dB über den Ergebnissen von MQ2.

Abhängigkeiten von Rad- bzw. Achsparameter

Mit Fokus auf die 11 Garnituren der an der S45 am Häufigsten verkehrenden Schnellbahnbaureihe A und auf dem Messquerschnitt 2 im unkonditionierten Messbogen wurde das Vorhandensein möglicher Abhängigkeiten der Auftrittshäufigkeiten akustischer Auffälligkeiten zunächst anhand achsbezogener Auswertungen und anhand eines manuellen Vergleiches von Zeitverläufen der akustischen Auffälligkeiten und von erhobenen Rad- bzw. Achsparametern eingeschätzt. Ergänzt wurden die Betrachtungen durch 22 an der S45 verstärkend eingesetzten Garnituren der Schnellbahnbaureihe B. Bei der Baureihe A traten breitbandige Auffälligkeiten vorwiegend – das bedeutet meist 50 % bis 70 % der breitbandig auffälligen Fahrten – im Bereich der mittleren, nicht angetriebenen Jakobsdrehgestelle (und hier vor allem bei dem letzten dieser mittleren Drehgestelle) auf, während bei der Baureihe B vor allem der Bereich des Triebwagens als Quelle deutlich höherer, breitbandiger Auftrittshäufigkeiten (rund 75 % bis 95 % der breitbandig auffälligen Fahrten) identifiziert werden konnte. Tonale Emissionskomponenten wurden gegenüber den breitbandigen Auffälligkeiten generell deutlich seltener detektiert (beispielsweise wurden in MQ2 breitbandige Auffälligkeiten rund viermal so oft wie tonale Auffälligkeiten beobachtet). Bei der Baureihe A waren diese mehrheitlich (meist mehr als 80 % der tonal auffälligen Fahrten) im Bereich des 5 kHz und des 6,3 kHz Terzbandes angesiedelt und atypisch für tonale Auffälligkeiten zum Teil auf die jeweils vorlaufende Achse eines der mittleren drei Jakobsdrehgestelle begrenzt. Bei der Baureihe B zeigten sich hingegen zum Teil Häufungen im Bereich des Übergangs vom Zwischen- zum Steuerwagen. Allerdings sind diese Häufungspunkte nur durch wenige der 22 Garnituren begründet, während bei dem überwiegenden Teil der

Garnituren große Schwankungen in der Verteilung im Zugverband und/oder der Frequenzen tonaler Auffälligkeiten vorhanden waren.

Die Analyse der Zeitverläufe akustischer Auffälligkeiten verdeutlichte bei der Baureihe A, dass insbesondere die breitbandigen Auffälligkeiten ein variierendes Verhalten aufweisen, wann bzw. wie rasch Auftrittshäufigkeiten über die Zeit ansteigen oder wieder abfallen können. Detailanalysen lassen hier vor allem in der kalten Jahreszeit einen Einfluss der Witterung vermuten. Befinden sich die Schienentemperaturen im Bereich oder unterhalb des Taupunkts, sind anhand von Histogrammen verminderte Auftrittshäufigkeiten akustischer Auffälligkeiten zu beobachten (grobe Abschätzung der Zahlen der Histogrammklassen rund um die Differenz von 0 K ergeben einen Abfall des Anteils der auffälligen Fahrten von etwa 65 % auf rund 20 % bis 25 %), weshalb eine kondensationsbedingten Reibwertminderungen im Rad-Schiene nahe liegt.

Zum Teil wurde aber auch der Eindruck eines Zusammenhangs zu den Zeitpunkten von Werkstättenaufenthalten gewonnen, bei welchen die Räder reprofiliert wurden, da in einigen Fällen nach diesen Aufenthalten höhere Auftrittshäufigkeiten akustischer Auffälligkeiten bestanden als vorher. Die Zeitverläufe der Baureihe B verdeutlichen die in der Regel zeitlich konzentrierten Einsätze der einzelnen Garnituren auf der S45. Zum einen sind dadurch vergleichsweise wenige Messungen je Garnitur vorhanden. Zum anderen fehlen zeitlich kontinuierliche Daten zur Interpretation des Verhaltens akustischer Auffälligkeiten in Bezug auf Werkstättenaufenthalte oder erkennbare Trends über längere Zeiträume.

Bei Gegenüberstellungen von Zeitreihen der akustischen Auffälligkeiten und der Rad- bzw. Achsparameter insbesondere von akustisch auffälligen Garnituren waren keine offenkundigen Zusammenhänge ersichtlich. Jedoch besitzen viele der Rad- bzw. Achsparametern einen zeitlich vergleichbaren Änderungsverlauf (minimaler Wert nach Reprofilierung und danach gleichsinniger Anstieg), wodurch differenzierte statistische Betrachtungen der verschiedenen Parameter stark eingeschränkt werden.

Zur Untersuchung etwaiger Abhängigkeiten akustischer Auffälligkeiten wurden statistische Analysen mittels logistischer Regressionsanalyse vorgenommen, bei welcher als abhängige Variable die binäre Größe „Vorhandensein einer akustischen Auffälligkeit“ dient. Der Abstand des Messmikrofons von 7,5 m zur Gleisachse und die damit einhergehende Überlagerung der Emissionen mehrerer, benachbarter Achsen verhinderten eine zuverlässige Zuordnung der akustischen Auffälligkeiten zu einzelnen Achsen. Aufgrund dessen wurden die Regressionen auf Basis ganzer Garnituren

durchgeführt, indem als unabhängige Variablen Minimal-, Mittel- und Maximalwerte der Rad- und Achsparameter aller Räder bzw. Achsen einer Garnitur herangezogen wurden (aufgrund geringer Unterschiede wurden in der Regel mittlere Parameterwerte verwendet). Um Beeinflussung durch die Witterung gering zu halten, wurde anhand einer Detailanalyse verschiedener Witterungsparameter der betrachtete Zeitbereich auf die Messmonate 2 bis 7 (10. März bis 9. Sept. 2016) eingeschränkt. Darüber hinaus wurden zur Sicherstellung trockener Schienenoberflächen Vorbeifahrten ausgeschlossen, bei denen Regen detektiert wurde oder die Differenz zwischen Schienentemperatur und Taupunkt $\Delta T_{\text{Schiene-Taupunkt}}$ Werte unter 5 K annimmt.

Für die folgenden Ergebnisdarstellungen der Regressionen sei darauf hingewiesen, dass auf eine quantitative Darstellung der Anpassungsgüte bewusst verzichtet wird, da bei logistischen Regressionen nicht wie bei linearen Regressionen zur Bewertung das Bestimmtheitsmaß R^2 existiert, welches das Verhältnis von erklärter Varianz zur Gesamtvarianz beschreibt, sondern lediglich Pseudo-Bestimmtheitsmaße mit unterschiedlichen, schwerer zu interpretierenden Bedeutungen bestehen.

Die Modellgüten der Regressionsergebnisse befinden sich auf einem (wegen des erforderlichen Ansatzes einer garniturbasierten Betrachtung erwartbaren) niedrigen Niveau. Vergleiche der logistischen Ergebnisfunktionen und von Pseudo-Bestimmtheitsmaßen deuten bei der Schnellbahnbaureihe A insbesondere bei den vier radprofilbeschreibenden Parametern Spurkranzhöhe, Spurkranzdicke, Spurkranzflankenmaß und Spurmaß, sowie Messkreisdurchmesserdifferenzen auf geringe Abhängigkeiten der akustischen Auffälligkeiten hin, wobei einige Indizien dafür sprechen, dass die Abhängigkeit der Auffälligkeiten von Durchmesserdifferenzen durch deren Zusammenhang zu den vier Radprofilparametern zu erklären ist. Isolierte Betrachtungen der Regressionen bei verschiedenen, mittleren Zugsgeschwindigkeiten und Luftfeuchtigkeiten lassen auf keine wesentliche Beeinflussung dieser Abhängigkeiten durch diese Parameter schließen. Bei einer differenzierten Betrachtung der beiden verschiedenen akustischen Auffälligkeiten waren zudem keine Abhängigkeiten der deutlich seltener auftretenden, tonalen Komponenten von den Radparametern erkennbar, sodass die Abhängigkeiten vor allem dem Spurkranzanlauf, welcher gemäß Literatur breitbandiges Kurvenkreischen hervorruft, zuzuschreiben sind.

Die verschleißbedingten Änderungen der vier Radprofilparameter, welche gemäß der Regressionsergebnisse die Auftrittshäufigkeiten akustischer Auffälligkeiten vermindern, können als Verschiebung des Spurkranzberührungspunktes hin zur Radaußenseite

interpretiert werden. Neue oder reprofilierte Räder weisen demnach das höchste Spurspiel auf, wodurch höhere Anlaufwinkel von Achsen und in weiterer Folge Spurkranzanläufe grundsätzlich begünstigt werden, sowie die Beobachtungen häufigerer Detektionen von Kurvenkreischen plausibel würden. Aufgrund fehlender Möglichkeiten vertiefender Auswertung im Hinblick auf Raddurchmesserunterschieden ist jedoch nicht auszuschließen, dass auch diese (entgegen der erwähnten Indizien) einen stärkeren, ursächlichen Zusammenhang zu akustischen Auffälligkeiten aufweisen.

Die Regressionsergebnisse der Schnellbahnbaureihe B zeigen für die vier radprofilbeschreibenden Parameter bei differenzierter Auswertung für unterschiedliche Triebwagenanordnungen im Zugverband ein heterogenes Bild. Während bei nachlaufendem Triebwagen die Regressionen vergleichbare Ergebnisse wie bei der Baureihe A liefern, kehrt sich der Trend verringerter Häufigkeiten von akustischen Auffälligkeiten bei zunehmendem Profilverschleiß bei vorlaufenden Triebwagen um. Allerdings wird diesen Ergebnissen gegenüber den Ergebnissen der Baureihe A wegen den geringen Zugzahlen (Schnellbahnen der Baureihe A passierten rund sechs bis sieben Mal so häufig die Messstelle wie Schnellbahnen der Baureihe B) und wegen der nur sporadischen Einsätze unterschiedlicher Garnituren eine niedrigere Aussagekraft zugeschrieben.

Insbesondere wegen dieser, nicht einheitlichen Trends und der zum Teil aufgeworfenen Fragen wären zur Steigerung der Aussagekraft tiefergreifende Analysen erforderlich. Beispielsweise könnte durch eine Zuordnung akustischer Auffälligkeiten zu einzelnen Achsen eine entscheidende Voraussetzung für erweiterte Untersuchungen (beispielsweise zur Klärung der Bedeutung von Raddurchmesserunterschieden) geschaffen werden. Unabhängig davon ist jedoch auch zu erwähnen, dass die den Untersuchungen zugrunde liegenden Messdaten unter bestimmten Rahmenbedingungen erhoben wurden, weshalb etwaige Verallgemeinerungen der vorliegenden Ergebnisse einer entsprechenden Prüfung der Zulässigkeit erfordern.

Korrekturfaktoren

Für die Berücksichtigung von Bogengeräuschen bei der Erstellung von Lärmkarten ist es notwendig einen Korrekturfaktor zur geraden Strecke zu bestimmen. Als Basis dient der längenbezogene Schalleistungspegel L_w' gem. ÖNORM S5026. Auf Grund des aufwendigen Messsetups wurde bereits im Vorgängerprojekt BEGEL ein Umrechnungsverfahren entwickelt, mit dem aus einem Standardmesspunkt in 1,2 m Höhe über SOK und in einer Entfernung von 7,5 m zur Gleisachse der Schalleistungspegel

näherungsweise bestimmt werden kann. Dieses Verfahren wurde auch in diesem Projekt eingesetzt.

Die so ermittelten Schalleistungspegel wurden anschließend für unterschiedliche Wetterausprägungen gemittelt. Neben der Einteilung der gesamten Fahrten in diese Wetterkategorien, wurde diese Mittelung auch jeweils für als unauffällig klassifizierte Vorbeifahrten sowie für jene Fahrten welche entweder eine tonale, eine tonal hochfrequente Auffälligkeit oder eine breitbandige Auffälligkeit aufwiesen durchgeführt. Zusätzlich zu den mittleren Absolutwerten wurden auch die relativen Anteile an unauffälligen und auffälligen Fahrten bestimmt. Anhand dieser Prozentzahl ist es somit möglich eine summierte Gesamtschalleistung je Wetterausprägung zu berechnen.

Um eine einfachere Berücksichtigung dieser Ergebnisse in zukünftigen Normen und Regelwerken zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse als mittlere Zuschläge für die ONR 305011 sowie als Minimal- und Maximalwerte der jeweils akustisch betrachtet „schlechtesten“ bzw. „besten“ Wetterbedingung dargestellt.

Vergleicht man die Ergebnisse mit jenen der ONR305011 so zeigt sich, dass für die Vorbeifahrten ohne Auffälligkeiten die Werte zum Teil sogar unter der ONR305011 liegen. Für die Kategorie PZ TYP B liegen die Werte je nach Geschwindigkeit zwischen -0,7 dB bis -0,9 dB unter den Werten der ONR, während die Kategorie PZ TYP A um 2 dB bis 2,5 dB höhere Werte liefert. Werden nur die auffälligen Fahrten betrachtet ergeben zusätzlich zu den zuvor beschriebenen Korrekturfaktoren, Erhöhungen von 3,6 dB bis 7,7 dB für die Kategorie PZ TYP B und 7,7 dB bis 11,5 dB für die Kategorie PZ TYP A. Für den spezifischen Bogen im Untersuchungsabschnitt (jeweiliger Prozentanteil an Auffälligkeiten) ergeben sich dadurch je nach Geschwindigkeitsbereich Erhöhungen von 1,4 dB bis 3,5 dB für die Kategorie PZ TYP B und 6 dB bis 8,6 dB für die Kategorie PZ TYP A. Bei der Interpretation der Daten gilt es zu beachten, dass die Pegeldifferenzen zwischen den Minimal- und Maximalwerten, bei den Fahrten welche als „unauffällig“ bewertet wurden, nicht eindeutig auf Wettereinflüsse zurückgeführt werden können.

Durch den Einsatz der Schienenkonditionieranlage zeigen die Abschätzungen eine Reduktion der Schalleistungspegel durch Verringerung der Auftrittshäufigkeiten akustischer Auffälligkeiten. Im Vergleich zur ONR305011 traten für die Kategorie PZ TYP B idente Schalleistungspegel auf und für die Kategorie PZ TYP A verblieben Erhöhungen von nur mehr 2 dB bis 4,5 dB. Damit beträgt die schallmindernde Wirkung der Schienenkopfkonditionieranlage je nach Geschwindigkeitsbereich 1,4 dB bis 4 dB für die Kategorie PZ TYP B und 3,2 dB bis 4,1 dB für die Kategorie PZ TYP A.

Um einen Überblick zu bekommen wie stark die Berücksichtigung von unterschiedlichen Wetterbedingungen auf die Gesamtbelastung in den untersuchten Gleisbögen Einfluss nimmt und somit in weiterer Folge die Sinnhaftigkeit einer Implementierung in zukünftige Berechnungsvorschriften abschätzen zu können, wurde für den tatsächlich dort erfassten Verkehr unterschiedlich genaue Berechnungsvarianten gem. ONR 305011 durchgeführt.

Berücksichtigungsansätze für die Prognoserechnung

Im Zuge dieses Forschungsprojektes wurden zahlreiche unterschiedliche Parameter im Hinblick auf deren Einfluss auf das Bogengeräusch untersucht und bewertet. Für die Einbeziehung von Wetterdaten bei der Erstellung von Lärmkarten ist es jedoch notwendig, zukünftig einen praxistauglichen Ansatz zu entwickeln.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Thomas Maly et al.: "Bewertung des akustischen Einflusses von Gleisbögen für die Erstellung von Lärmkarten - BEGEL", Ergebnisbericht zu dem im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung 2012 finanzierten Forschungsprojekts (FFG-Nr. 840495), 2012.
- [2] David Thompson: *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*, 1. Auflage, Oxford, United Kingdom, Elsevier Ltd., 2009, ISBN 978-0-08-045147-3.
- [3] Ivan Zenzerovic: "Engineering model for curve squeal formulated in the time domain", Division of Applied Acoustics, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden, Lizentiatsarbeit, 2014, ISSN 1652-9146.
- [4] P.J. Remington: "Wheel/rail squeal and impact noise: What do we know? What we don't know? Where do we go from here?", in *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 116, Nr. 2, 1985, S. 339-353.
- [5] D.J. Thompson, G. Squicciarini und B. Ding: "A state-of-the-art review of curve squeal noise: phenomena, mechanisms, modelling and mitigation", in *Conference Proceedings of 12th International Workshop on Railway Noise (IWRN12)*, Terrigal, Australien, September 2016, 27 Seiten.
- [6] Jiandong Jiang und Richard Dwight: "Field verification of curving noise mechanisms", CRC for Rail Innovation, Brisbane, Australien, Bericht A2 des Projekts "Improved Noise Management" (R1-105), März 2011.
- [7] Xiaogang Liu und Paul A. Meehan: "Investigation of the effect of relative humidity on lateral force in rolling contact and curve squeal", in *Wear*, Vol. 310, Nr. 1-2, Februar 2014, S. 12-19, ISSN: 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.045>.
- [8] Paul A. Meehan, P. A. Bellette, Charles J. V. Jones und Dane Fitzgerald Anderson: "Probabilistic Prediction of Wheel Squeal under Field Humidity Variation", in *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010*, Sydney, Australien, Aug. 2010.
- [9] Y. Zhu, Y. Lyu und U. Olofsson: "Mapping the friction between railway wheels and rails focusing on environmental conditions", in *Wear*, Vol. 324-325, Februar 2015, S. 122-128, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.12.028>.

- [10] B. Stallaert und P. Vanhonacker: "Rolling noise and corrugation in curves: modelling and solutions", in *Conference Proceedings of 12th International Workshop on Railway Noise (IWRN12)*, Terrigal, Australien, September 2016, 8 Seiten.
- [11] David J. Thompson und Paul J. Remington: "The effects of transverse profile on the excitation of wheel/rail noise", in *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 231, Nr. 3, 2000, S. 537-548, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2543>.
- [12] Donald T. Eadie, Marco Santoro und Joe Kalousek: "Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions in curves", in *Wear*, Vol. 258, Nr. 7-8, März 2015, S. 1148-1155, ISSN 0043-1648, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.061>.
- [13] Europäische Kommission (2014) 1302: "Verordnung der Komisison über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems "Fahrzeuge — Lokomotiven und Personenwagen" des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union", Amtsblatt L 356 der Europäischen Union, 12. Dez. 2014.
- [14] Donald T. Eadie und Marco Santoro: "Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction", in *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 293, Nr. 3-5, Juni 2006, S. 747-757, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.12.007>.
- [15] Donald T. Eadie, Marco Santoro und Ward Powell: "Local Control of Noise and Vibration with KELTRACK(TM) friction modifier and Protector® trackside application: an integrated solution", in *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 267, Nr. 3, Oktober 2003, S. 761-772, ISSN 0022-460X, [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00739-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00739-9).
- [16] Kelvin Chiddick: "Solid lubricants and friction modifiers for heavy loads and rail applications", Patent US 6136757, Oktober 2000.
- [17] EN ISO 3095: "Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen", Deutsche Fassung EN ISO 3095:2013.
- [18] Xiaogang Liu und Paul A. Meehan: "Investigation of squeal noise under positive friction characteristics condition provided by friction modifiers", in *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 371, Juni 2016, S. 393-405, ISSN 0022-460X, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2016.02.028>.
- [19] Martin Jaksch und Patrick Suppin: "Projekt WORMS Sound: Messung und Beurteilung der akustischen Wirkung von Konditionierungsmittel - Bogenmessstelle Breitenstein", Wien, Mai 2013, Untersuchungsbericht, DN 2012-502-011.

- [20] Internationale Eisenbahnverband UIC: "Railway Noise Technical Measures Catalogue", Bericht UIC003-01-04fe (Final 1.0), Mai 2013.
- [21] DIN EN 61672-1: "Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen", DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, Juli 2014.
- [22] Thomas Benesch: *Schlüsselkonzepte zur Statistik*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2013, ISBN 978-3-8274-2771-7, ISBN 978-3-8274-2772-4 (eBook), DOI 10.1007/978-3-8274-2772-4.
- [23] Christof Wolf und Henning Best: *Handbuch der Sozialwissenschaftlichen Datenanalyse*, Christof Wolf und Henning Best (Hrsg.), Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, ISBN 978-3-531-16339-0, DOI 10.1007/978-3-531-92038-2.
- [24] Jiandong Jiang, David Hanson und Bruce Dowell: "Wheel Squeal: Insights from Wayside Condition Monitoring", in *Proceedings of the 12th International Workshop on Railway Noise (IWRN12) - digitale Version*, Terrigal, Australien, Sept. 2016.
- [25] Fachnormenausschuss 138 Akustik: "ONR 305011 - Berechnung der Schallimmission durch Schienenverkehr - Zugverkehr, Verschub- und Umschlagbetrieb", 2004.
- [26] "Richtlinie(EU) 2015/996 der Kommission zur Festlegung gemeinsamer Lärmbewertungsmethoden gemäß der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates", 19. Mai 2015.
- [27] Fachnormenausschuss 138 Akustik: "ÖNORM S5026 - Messung der Schallemission von Schienenfahrzeugen - Längenbezogener Schalleistungspegel", 1996.