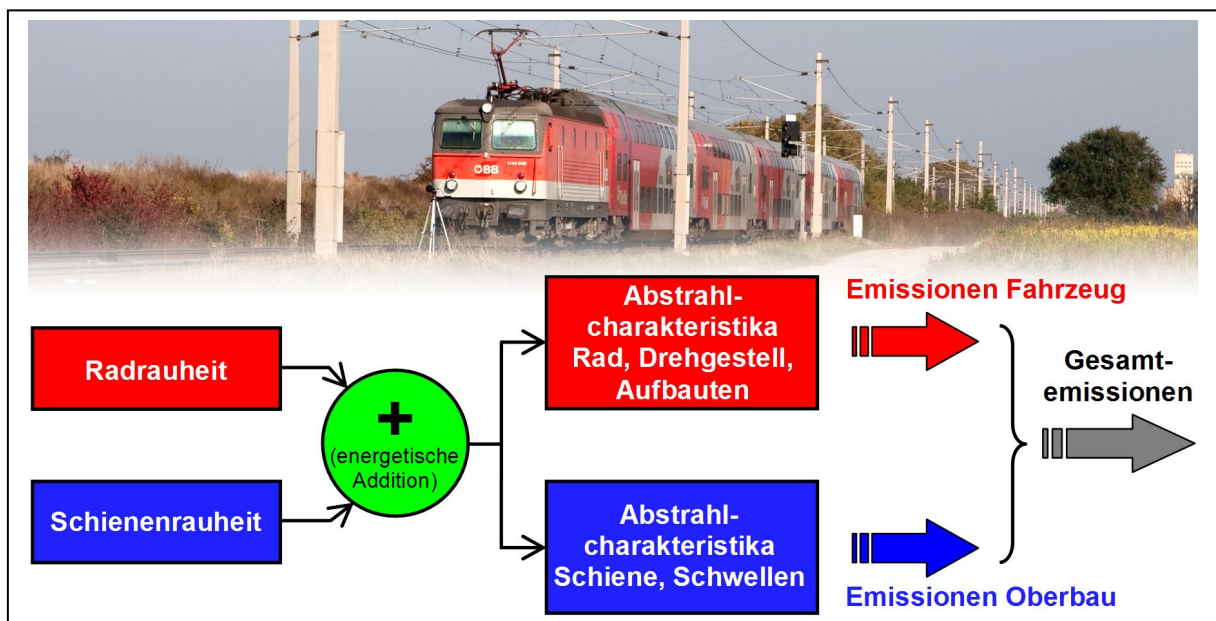


Ermittlung von längenbezogenen Schalleistungspegeln und Eingangsparameter für CNOSSOS-EU ELSEC

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2015
(VIF2015)

November 2019



Impressum:

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

 Bundesministerium
Verkehr, Innovation
und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Nordbahnstraße 50
A – 1020 Wien

 **ÖBB**
INFRA

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

 **ASFiNAG**

Für den Inhalt verantwortlich:
Technische Universität Wien
Institut für Verkehrswissenschaften
Karlsplatz 13/230-2
A-1040 Wien

 **IEW**

Ziviltechnikerbüro Dr. Christian Kirisits
Kolpinggasse 10
7423 Pinkafeld

  **ZT KIRISITS**

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

 **PSIA**
www.psia.at

Programmmanagement:
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien

 **FFG**
Forschung wirkt.

Ermittlung von längenbezogenen Schalleistungspegeln und Eingangsparameter für CNOSSOS-EU ELSEC

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2015)

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas MALY
ao.Univ.Prof. Dr. Christian KIRISITS

Dipl.-Ing. Michael OSTERMANN

Dipl.-Ing. Martin JAKSCH

Florian BIEBL, BSc

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

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. VORGEHENSWEISE.....	10
1.3. UMSETZUNG	12
2. ERHEBUNG VON FAHRZEUGEIGENSCHAFTEN	13
2.1. AUSWAHL DER ZU BETRACHTENDEN FAHRZEUGTYPEN.....	13
2.2. FESTLEGUNG RELEVANTER FAHRZEUGEIGENSCHAFTEN.....	15
2.3. EIGENSCHAFTSKATALOG.....	17
3. MESSUNGEN.....	18
3.1. MESSKONZEPTION.....	18
3.2. PARALLELE MESSUNGEN NACH ÖNORM S 5026 UND ÖNORM EN ISO 3095.....	24
3.3. HISTORISCHE MESSDATEN.....	34
4. MESSDATENAUFBEREITUNG UND -VORANALYSE	35
4.1. ÜBERSICHT ALLER MESSDATENSÄTZE	35
4.2. (NEU-)BERECHNUNG DER TERZSPEKTREN SCHALLDRUCKPEGELN.....	37
4.3. DISKUSSION MÖGLICHER MESSUNSICHERHEITEN	39
5. ZUSAMMENHANG ÖNORM S 5026 UND ÖNORM EN ISO 3095	50
5.1. AUSWAHL DER VORBEIFAHRTEN.....	50
5.2. BERECHNUNG DER SCHALLLEISTUNGSPEGEL	53
5.3. VERGLEICH MIT SCHALLLEISTUNGSPEGELN NACH ONR 305011.....	54
5.4. VERGLEICH MIT SCHALLDRUCKPEGELN NACH ONR 305011.....	55
5.5. VERGLEICH MIT SCHALLDRUCKPEGELN ADAPTIERT NACH ÖNORM S 5026 MESSUNGEN	56
5.6. VERGLEICH MIT SCHALLDRUCKPEGELN NACH RVE 04.01.02	58
6. EINFLUSSFAKTOREN FÜR DEN VERGLEICH VON BERECHNETEN MIT GEMESSENEN WERTEN	60
6.1. VARIATIONSBREITE ERFASSTER EMISSIONEN	60
6.2. MESSTECHNISCH ERFASSTE, AKUSTISCHE SCHIENENRAUHEIT.....	66
6.3. TRANSFORMATION WELLENLÄNGE ZU FREQUENZ.....	74
6.4. GLEISABKLINGRATE	85
6.5. TRANSMISSION UND DEREN EINFLUSSGRÖßEN	92

7. DISKUSSION DER PARAMETERBESTIMMUNG	98
7.1. METHODIK	98
7.2. AUSWERTUNG FÜR GÜTERZÜGE.....	100
7.3. AUSWERTUNG FÜR FERNREISEZÜGE TYP RAILJET	124
8. SCHLUSSBETRACHTUNGEN	140
8.1. GEGENSTAND DER BESTIMMUNG.....	140
8.2. BESTIMMUNGSANSATZ	142
8.3. RELEVANTE THEMEN FÜR BESTIMMUNG VON EINGANGSPARAMETER	144
8.4. LESSONS LEARNED.....	153
9. LITERATURVERZEICHNIS	156
ANHANG A AKUSTISCHE OBERBAUPARAMETER	159
ANHANG B SPEKTRALE UNTERSCHIEDE ZWISCHEN MESSPUNKTEN A1 UND A2	171

0. EXECUTIVE SUMMARY

0.1. Deutsch

Längenbezogene Schalleistungspegel sind die Basis gängiger Verfahren zur Berechnung von Schienenlärmimmissionen. In Österreich wurden diese Pegel bislang anhand der ÖNORM S 5026 mit mehreren Messpositionen ermittelt. Um den messtechnischen Aufwand zu reduzieren, wurden Möglichkeiten untersucht, den Schalleistungspegel direkt anhand des europäischen Standardmesspunkt der ÖNORM EN ISO 3095 in 7,5 m Entfernung abzuschätzen. Durch Gegenüberstellungen von erfassten und berechneten Schalldruck- und -leistungspegel konnte gezeigt werden, dass das zugrunde gelegte Schallausbreitungsverfahren der ÖNORM S 5026 und der ONR 305011 respektive der Schallausbreitung nach ÖNORM ISO 9613-2 nicht miteinander kompatibel sind. Zur Sicherstellung korrekter Schalleistungen für definierte Ersatzschallquellen sollte daher die Rückrechnung mit einem Schallausbreitungsberechnungsverfahren erfolgen, mit dem auch Immissionswerte prognostiziert werden.

Bei dem in Österreich zur strategischen Lärmkartierung ab 2022 einzusetzenden Verfahren nach der europäischen Richtlinie 2015/996/EU werden die Schallemissionen nach RVE 04.01.02 prognostiziert. Zwar liegen Vorschläge für Eingangsparameter für dieses Berechnungsmodell vor, jedoch fehlt ein direkter messtechnischer Zugang. Im Rahmen von ELSEC wurden die Grundlagen geschaffen, um die Parameter zukünftig mit Hilfe eines iterativen Ansatzes, welcher die Forderung eines zur Prognoserechnung identen Ausbreitungsmodells erfüllt, zu verifizieren und für neue Fahrzeuge festzulegen. Dabei wurden relevante Einflussfaktoren, welche es bei einem Vergleich von Mess- und Prognosewerten zu beachten gilt, ausführlich analysiert. Beispielsweise wurden die Wirkung der Schienenrauheit und der Gleisabklingrate und die Bedeutung der Verwendung von tatsächlich im Messabschnitt vorliegenden Werten für die Parameterbestimmung eingehend untersucht und diskutiert. Aber auch verschiedene Auslegungen von Teilen der Richtlinie, wie diese beispielsweise in den während der Projektlaufzeit erschienen deutschen und niederländischen Arbeiten zur Richtlinienumsetzung wiederzufinden sind, wurden hinsichtlich ihres Einflusses betrachtet. Die Untersuchungsergebnisse wurden zudem anhand von zahlreichen exemplarischen Gegenüberstellungen von Prognose- und Messwerten illustriert.

Neben diesen theoretischen Untersuchungen erlaubte die Einbeziehung verschiedener Messserien aus vorangegangenen Projekten auch Erkenntnisse für die messtechnische

Umsetzung der Parameterbestimmung zu gewinnen. Beispielsweise sind erheblichen Streuungen mittlerer Emissionen von gleichen Zugtypen bei unterschiedlichen Messquerschnitten trotz vergleichbarer Betriebsparameter und akustischer Oberbaueigenschaften aufgetreten. Als Folge werden für eine zuverlässige Parameterschätzung Messungen bei verschiedenen/unterschiedlichen Messstellen empfohlen.

Alle Erkenntnisse aus den Untersuchungen mündeten einerseits in konkreten Empfehlungen für die nationalen Durchführungen. Andererseits wurden auch jene Bereiche klar aufgezeigt, in welchen zukünftig jedenfalls Abstimmungen in internationaler Normenarbeit erforderlich ist oder weiterer Forschungsbedarf erforderlich wäre.

0.2. Englisch

Directional sound power per meter levels are the basis for most methods for calculation of railway traffic noise emissions. In Austria up to now these levels were determined according to the regulation ÖNORM S 5026 by using several microphone positions. In order to reduce the measurement effort it was investigated to use only the European standardized measurement point with a distance of 7.5 m according to the ÖNORM EN ISO 3095. A comparison of measured and calculated values of sound power levels and sound pressure levels demonstrate the incompatibility between the sound propagation models used in the ÖNORM S 5026 and in the ONR 305011, respectively the sound propagation model according to the ÖNORM ISO 9613-2. To ensure correct sound power levels for defined equivalent source lines the propagation models for both, for the calculation of sound pressure as well as for the calculation of source strength, has to be the same in both directions.

From 2022 Austria has to use the computational model according to the European directive 2015/996/EU for strategic noise mapping, whereby the source strengths are predicted according to the national implementation RVE 04.01.02. The RVE provides default input parameters, but there is no commonly agreed metrological approach for parameter determination. Within ELSEC a basis was established to verify these parameters or to determine input parameters for newly developed vehicles in future by an iterative approach, which uses the same propagation model as the prediction of noise immissions. In detail, relevant influencing factors were investigated when comparing calculated and measured values. For instance, the effects of rail roughness and track decay rate as well as the importance of using those measured values for a specific track section were discussed in detail. But also different interpretations of parts of the European

directive in other countries like Germany or the Netherlands were demonstrated by presenting the resulting effects. In addition, all these investigation results were illustrated by exemplary comparisons of measured values and calculated prediction values.

Beside this theoretical research, the inclusion of various measurement data collected in past projects provided invaluable insights regarding the realisation of measurements for input parameter determination. For example, substantial spread of the mean sound emissions between different measurement campaigns was observed although train types, operation conditions and acoustical properties of the superstructure were comparable. To achieve a reliable estimation of input parameters measurements at various/diverse measurement sites are recommended.

All findings of the investigations lead to specific recommendations for a national implementation. But also subjects were clearly addressed, where reconciliation within the frame of international standardisation processes will be necessary or where a need for further research was identified.

1. EINLEITUNG

1.1. Problemstellung

Die Beurteilung von Belästigung, Schlafstörung und Gesundheitsgefährdung basiert nach dem Stand der Wissenschaft und der Technik auf Lärmindizes [1] [2]. Diese werden mittels Berechnung für eine gegebene reproduzierbare Schallausbreitungssituation und einen kennzeichnenden durchschnittlichen Betriebszustand ermittelt. Längenbezogene Schalleistungspegel sind die Basis gängiger Verfahren zur Berechnung von Schienenlärmimmissionen. In Österreich wurden diese Pegel bislang anhand der ÖNORM S 5026 [3] ermittelt, welche unter Annahme eines Schallausbreitungsmodells nach ÖAL 28 von messtechnisch erfassten Schalldruckpegeln auf Schalleistungspegeln einer Ersatzschallquelle rückschließt. Zur Analyse von Vorbeifahrtgeräuschen werden jedoch häufig Messung nach ÖNORM EN ISO 3095 [4] durchgeführt, welche im Gegensatz zur ÖNORM S 5026 einen einfacheren Messaufbau erfordert (nur ein Standardmesspunkt in 7,5 m Entfernung zur Gleisachse als Minimalanforderung). Daher sollen in vorliegendem Projekt zunächst die Möglichkeiten ausgelötet werden, inwieweit von Messungen auf die Quellstärken der Emissionen in Form von Schalleistungspegeln sinnvoll rückgeschlossen werden kann. Zu diesem Zweck sollen an zwei zu definierenden Messquerschnitten die Emissionen des Regelverkehrs zeitgleich in Mikrofonpositionen gemäß ÖNORM S 5026 wie auch im Standardmesspunkt gemäß ÖNORM EN ISO 3095 erhoben werden. Im Anschluss sollen mittels Gegenüberstellung von Messung und Berechnungen – sowohl der Quellstärken, als auch der Schalldrücke in den Messpositionen – abgeklärt werden, inwiefern zweckmäßige Wege für eine Umrechnung mit nachvollziehbaren und beherrschbaren Unsicherheiten bestehen und diese gegebenenfalls erarbeitet werden.

Das in Österreich zur strategischen Lärmkartierung ab 2022 verpflichtend einzusetzende Verfahren entsprechend der Europäischen Richtlinie 2015/996/EU zur Festlegung gemeinsamer Lärmbewertungsmethoden [5] (oftmals nach dem Arbeitstitel des Entwicklungsprojektes als CNOSSOS-EU bezeichnet) verwendet ebenfalls längenbezogene Schalleistungspegel, diese sind aber für verschiedene Geräuscharten wie Roll- oder Antriebsgeräusche getrennt definiert. Ein Vergleich oder gar eine direkte Überführung von Schalleistungspegeln gemäß ONR 305011 [6] nach CNOSSOS-EU ist damit nicht mehr möglich. Zwar liegen Vorschläge für Eingangsparameter für das Berechnungsmodell CNOSSOS-EU durch die Europäische Kommission, sowie durch

Expertenkommissionen vor, jedoch fehlt eine direkte messtechnische Verifikation für das österreichische Schienennetz und deren Fahrzeugkategorien.

Aus diesem Grund sollen in vorliegendem Projekt für ausgewählte, häufig in Österreich verkehrende Fahrzeugkategorien diese Eingangsparameter beispielhaft messtechnisch geprüft und potentiell verantwortliche Einflüsse näher analysiert werden. Im Detail sind die Effekte der wesentlichen Eingangsparameter des Berechnungsmodells CNOSSOS-EU auf die Prognoseergebnisse durch isolierte Variationen vertiefend zu untersuchen und – unter anderem hinsichtlich der physikalischen Plausibilität, der Interpretierbarkeit und der Verwendung zur Erklärung etwaiger Abweichung zwischen Prognose und Messung – zu diskutieren. Mittels des gewonnenen, gesteigerten Verständnisses sind die Möglichkeiten für ein iteratives Näherungsverfahren zur Bestimmung der Eingangsparameter anhand des Vergleichs der Schalldruckpegel in 7,5 m Abstand, bei welchem durch logisch nachvollziehbare Veränderungen eine Übereinstimmung der Pegel am Messpunkt gesucht wird, auszuarbeiten. Weiterführende Fragestellungen, welche für die konkrete Abschätzung von Eingangsparametern von Relevanz sind, im Rahmen des gegenständlichen Projektes jedoch nicht beantwortet werden können, sind aufzuzeigen und potentielle Wege für deren Klärung zu skizzieren.

Um die Erkenntnisse potentiellen Anwendern (Infrastrukturbetreiber, Fahrzeughersteller, Ziviltechniker, technische Büros, Gutachter) verfügbar zu machen, ist die Aufbereitung in Form eines strukturierten, für Österreich angepassten Handbuchs vorgesehen. Darin sollen insbesondere die iterative Vorgehensweise zur Ermittlung der Eingangsparameter des Berechnungsmodells CNOSSOS-EU in kompakter Form sowie deren mathematische und physikalische Bedeutung der einzelnen Parameter beschrieben werden. Dieses Handbuch soll damit eine Entscheidungshilfe bilden, um eine fundierte und begründbare Wahl konkreter Eingangsparameter für aktuell und zukünftig verkehrende Schienenfahrzeuge zu treffen.

1.2. Vorgehensweise

Als eine wesentliche Datengrundlage werden zunächst relevante Fahrzeugeigenschaften – das bedeutet Eigenschaften, welche merklichen Einfluss auf Schallemissionen im Regelbetrieb bzw. Auswirkung auf Eingangsdaten von CNOSSOS EU aufweisen können – systematisch erhoben und strukturiert in einer einheitlichen Tabellenform abgelegt (siehe Kap. 2). Sowohl bei der Prognoserechnung für ausgewählte Zugskategorien, als auch bei zukünftigen Betrachtungen stehen die jeweiligen, relevanten Fahrzeugeigenschaften ohne weiteren Rechercheaufwand zur Verfügung.

Für die Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen der Schalleistungsbestimmung mit drei auf einem Kreisbogen mit einem Radius von 15 m befindlichen Mikrofonmesspunkten gemäß ÖNORM S 5026 und mit einem einzigen Emissionsmesspunkt in 7,5 m Entfernung zur Gleisachse und in 1,2 m Höhe über der Schienenoberkante (SOK) gemäß ÖNORM EN ISO 3095 wurden zwei, jeweils mehrtägige Messserien durchgeführt, bei welchen die Mikrofone gemäß beider Regelwerke angeordnet waren (siehe Kap. 3). Für die weiterführenden Untersuchungen, welche vor allem auf Emissionsmessungen nach ÖNORM EN ISO 3095 fußen, werden – da die aufgezeichneten Emissionen letztendlich nicht frei von Störeinflüssen waren, welche bei der Bewertung absoluter Schallpegel bzw. -leistungen nachteilig sind und um durch eine größere Anzahl an Vorbeifahrten die statistische Aussagekraft zu erhöhen – zudem geeignete, historische Messdaten hinzugezogen (siehe Kap. 3.3). Um sicherzustellen, dass für die nachfolgenden Auswertungen die gleichen, korrekten Emissionsgrößen zu Grunde liegen, wird auf die Verwendung vorhandener Bewertungsgrößen verzichtet und für alle Vorbeifahrten aus den Zeitverläufen der erfassten Schalldrücke die erforderlichen Beschreibungsgrößen einheitlich berechnet. Darüber hinaus werden die Messdaten auch hinsichtlich deren Unsicherheiten bzw. Schwankungsbreiten näher untersucht (siehe Kap. 4).

Der Zusammenhang zwischen der Schalleistungsbestimmung durch Emissionsmessungen nach ÖNORM S 5026 und nach ÖNORM EN ISO 3095 wird anhand der bei beiden Messserien häufig erfassten Zugskategorien Güterzüge und Railjets in Kap. 5 betrachtet. Durch Vergleiche der Quellstärken und der Schalldrücke in den Messpositionen und durch Interpretation der Abweichungen wird die prinzipielle Problematik der Umrechnung, welche letztendlich die Entwicklung eines Umrechnungsverfahrens verhindert, aufgezeigt.

Für die Interpretation von Emissionsmessdaten im Hinblick auf Quellstärken von Schienenfahrzeugen spielen das Verständnis über real auftretende und damit inhärent miterfasste, beeinflussende Größen, aber auch über Effekte verursacht durch verschiedene, zulässige Rechenwegen seitens des Prognosemodells CNOSSOS-EU eine wesentliche Rolle. Dementsprechend wird in Kap. 6 auf derartige, identifizierte Einflussfaktoren hingewiesen und soweit möglich deren Effekte bei Veränderung veranschaulicht. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse wird die Methodik der iterativen Parameterbestimmung entwickelt und anhand der beiden Zugskategorien Güterzüge und Railjets eingehend erläutert (siehe Kap. 7). Dabei werden unter anderem

die Möglichkeiten Eingangparameter zu adaptieren dargestellt und diskutiert. Insbesondere die Erkenntnisse in Bezug auf die Parameterbestimmung, aber auch über die Einflussfaktoren werden zudem in einem kompakten Handbuch anschaulich zusammengestellt.

1.3. Umsetzung

Die Arbeiten innerhalb des Projekts wurden zum Teil in Abweichung der im Projektantrag verankerten Aufgabenteilung oder/und über die vorgesehenen Aufgaben hinausgehend von den beteiligten Projektpartnern wie folgt umgesetzt:

- Erhebung von Fahrzeugeigenschaften (Kap. 2): TU-Wien (IEW)
- Messungen und Bereitstellung historischer Messdaten (Kap. 3): psiacoustic
- Messdatenaufbereitung und -voranalyse (Kap. 4): TU-Wien (IEW)
- Zusammenhang ÖNORM S 5026 und ÖNORM EN ISO 3095 (Kap. 5): Ziviltechnikerbüro Kirisits
- Einflussfaktoren für den Vergleich von berechneten mit gemessenen Werten (Kap. 6): Ziviltechnikerbüro Kirisits, TU-Wien (IEW)
- Diskussion der Parameterbestimmung (Kap. 7): Ziviltechnikerbüro Kirisits
- Schlussbetrachtungen (Kap. 8): Ziviltechnikerbüro Kirisits, TU-Wien (IEW)

2. ERHEBUNG VON FAHRZEUGEIGENSCHAFTEN

Die Kenntnis von emissionsrelevanten Fahrzeugeigenschaften kann direkt für eine begründete Wahl passender Eingangsparameter der Prognoserechnung, aber in vorliegender Forschungsarbeit auch indirekt für die Interpretation von Messwerten von Nutzen sein. Die Recherche konzentriert sich vorwiegend auf Triebfahrzeuge und Personenwagen. Eine detaillierte Erhebung der Eigenschaften konkreter Güterwagen ist hingegen aufgrund der Vielzahl an verschiedenen, verkehrenden Wagentypen und wegen der bei den Emissionsmessungen fehlenden Wagentypenkennung nicht zielführend, sondern es bietet sich vielmehr die Verwendung von Durchschnittswerten für die Schallprognoserechnung an.

Innerhalb der Triebfahrzeuge und der Personenwagen werden zunächst die Verkehrsleistungen der verschiedenen Fahrzeugtypen grob abgeschätzt. Anhand dessen werden die Fahrzeugtypen ausgewählt und die zu erhebenden Fahrzeugeigenschaften allgemein festgelegt. Durch eingehende Studie einschlägiger, elektronischer und gedruckter Quellen und durch ergänzende Experteninterviews werden diese Eigenschaften im Anschluss für alle Fahrzeuge systematisch zusammengetragen und strukturiert in Tabellenform abgelegt.

2.1. Auswahl der zu betrachtenden Fahrzeugtypen

Die in Österreich verkehrenden Triebfahrzeuge können hinsichtlich ihrer Antriebsart und ihres Einsatzes in die Kategorien Elektrolokomotiven, Diesellokomotiven, Elektrotriebwagen und Dieseltriebwagen unterteilt werden. Innerhalb dieser Kategorien, sowie der Personenwagen wurden durch vorhandenes Expertenwissen des Konsortiums und durch Recherchen Listen jener Fahrzeugtypen erstellt, die in Österreich in merklichem Ausmaß verkehren.

Zur Festlegung, für welche der verschiedenen Fahrzeugtypen die Erhebung der Fahrzeugeigenschaften durchzuführen sind, wurde als vereinfachter Ansatz eine Reihung anhand der zurückgelegten Kilometer von Zugfahrten auf ÖBB betriebenen Strecken, welche durch den Auftraggeber ÖBB für das Jahr 2016 zur Verfügung gestellt wurden, vorgenommen. Bei dieser Statistik der Laufleistungen wurde im Wesentlichen zwischen Railjets (RJ), Intercity-Express (ICE), sonstige Fernverkehrszügen (EC/EIC/EN/D/Reiseveranstalter), Regionalexpress (REX), City-Airport Trains (CAT), Regionalzügen, Schnellbahnen, Güterzügen und Dienstzügen unterschieden. Während die verschiedenen Personenzüge in Summe ca. 68 % der gesamten Zugkilometer

zurücklegten, wiesen die Güterzüge einen Anteil von ca. 28 % auf. Die Kenntnis über das in den jeweiligen Zugskategorien verwendete Rollmaterial erlaubte eine grobe Schätzung der Laufleistungen der verschiedenen Fahrzeugtypen. Anhand der Reihung gemäß der

Kategorie	Baureihe	Bezeichnung / Anmerkung	Priorität
E-Lokomotive	1x16	Taurus	1
E-Lokomotive	1142	-	1
E-Lokomotive	1044	-	1
E-Lokomotive	1144	-	1
D-Lokomotive	2016	Hercules	1
E-Triebwagen	4023	Talent 3-teilig	1
E-Triebwagen	4x24	Talent 4-teilig	1
E-Triebwagen	4744	Desiro ML (4 Türen)	1
E-Triebwagen	4746	Desiro ML (6 Türen)	1
D-Triebwagen	5022	Desiro	1
Reisezugwagen	2633	Doppelstockwagen	1
Reisezugwagen	8033	Doppelstocksteuerwagen	1
Reisezugwagen	2173	Wendezug, 1-stöckig	1
Reisezugwagen	8073	Wendezugsteuerwagen, 1-stöckig	1
E-Lokomotive	1293	Vectron	1
E-Triebwagen	4020	-	1
E-Triebwagen	KISS	Westbahn	1
E-Triebwagen	KISS 2	Westbahn	1
Reisezugwagen	-	Railjet-Mittelwagen	1
Reisezugwagen	-	Railjet-Steuerwagen	1
Reisezugwagen	-	Großraumwagen (UIC)	1
Reisezugwagen	-	Abteilwagen (UIC)	1
E-Lokomotive	1063	Verschublokomotive	2
E-Lokomotive	1163	Verschublokomotive	2
E-Lokomotive	1064	Verschublokomotive	2
D-Lokomotive	2043	-	2
D-Lokomotive	2143	-	2
D-Lokomotive	2067	Verschublokomotive	2
D-Lokomotive	2068	Verschublokomotive	2
D-Lokomotive	2070	Verschublokomotive	2
E-Triebwagen	4011	ICE-T	2
D-Triebwagen	5047	-	2
D-Triebwagen	5147	-	2
Reisezugwagen	-	City Night Line	2
Reisezugwagen	WLABmz/WLBmz 6181	-	2
Reisezugwagen	-	Schlafwagen	2
Reisezugwagen	Bcmz 7381	Liegewagen	2
Reisezugwagen	DDm 5181	Autotransportwagen	2

Tab. 2-1: Prioritätenreihung der Fahrzeugtypen anhand abgeschätzter Zugskilometer für die Erhebung von Fahrzeugeigenschaften

jeweiligen Laufleistung und durch Expertenwissen, beispielsweise über mögliche zukünftige Änderungen im Rollmaterial oder dessen Einsatz, wurde den Fahrzeugtypen jeweils eine der zwei folgenden Prioritäten für die Recherche zugeschrieben:

- Priorität 1: Rollmaterial, dessen Eigenschaften entsprechend der nachfolgend beschriebenen, möglichen Relevanz für Schallemissionen erhoben werden sollen
- Priorität 2: Rollmaterial, dessen Eigenschaften derzeit nicht erhoben werden, sondern im Bedarfsfall zukünftig zu ergänzen sind

Das Ergebnis der Prioritätenreihung ist in Tab. 2-1 zusammengefasst. Dabei wurden folgende Fahrzeuge mit Priorität 2 versehen:

- Verschublokomotiven: haben eine vergleichsweise geringe Laufleistung und sind meist örtlich begrenzt tätig
- Diesellokomotiven der Baureihe 2043 und 2143: werden zunehmend durch die Baureihe 2016 ersetzt und nur für wenige Streckenrelationen regelmäßig eingesetzt
- Triebwagen der Baureihe 4011: der Anteil an den zurückgelegten Kilometer ist im österreichischen Schienennetz sehr gering
- Triebwagen der Baureihen 5047 und 5147: sind auf untergeordneten Strecken unterwegs und werden zunehmend mit der Baureihe 5022 ersetzt

Wagen der Nachtzüge im Personenverkehr: weisen nur einen sehr geringen Anteil der zurückgelegten Kilometer auf

2.2. Festlegung relevanter Fahrzeugeigenschaften

Unter Berücksichtigung der bereits 2012 im Referenzbericht „Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)“ der Europäischen Kommission [7] genannten, fahrzeugseitigen Eigenschaften, welche Quelle relevanter Schallemissionen sein können, wurden zunächst mit höherer Granularität alle Fahrzeugeigenschaften gelistet, welche im Hinblick auf die Lärmprognoserechnung einen erkennbaren Einfluss auf die Schallemissionen zeigen oder im weiteren Sinn für die Lärmprognose von Bedeutung sein können. Diese Zusammenstellung wurde anschließend in fahrzeugbezogene und achs- bzw. drehgestellbezogene Eigenschaften, sowie Eigenschaften der Federung/Dämpfung, der Antriebsart und des Bremssystems unterteilt. Ähnlich wie bei der Auswahl der betrachteten Fahrzeugtypen wurde auch hier eine Reihung vorgenommen. Im Detail wurde eine Abstufung der Relevanz im Hinblick auf die Prognoserechnung durch Experten eingeschätzt und der Stellenwert für die Recherche abgeleitet:

Bezug	Eigenschaft	Relevanz
Fahrzeug	Fahrzeugart (E-Lok, E-Triebwagen, ...)	hoch
Fahrzeug	Anzahl der Achsen	hoch
Fahrzeug	Anzahl der angetriebenen Achsen	hoch
Fahrzeug	Achsfolge	hoch
Fahrzeug	Gesamtachsstand (Abstand zw. erster u. letzter Achse)	hoch
Fahrzeug	Fahrzeuglänge (über Puffer)	hoch
Fahrzeug	Personenkapazität	hoch
Fahrzeug	Gesamtgewicht (Dienstmasse)	hoch
Fahrzeug	Gesamtgewicht leer	hoch
Fahrzeug	Gesamtgewicht beladen	hoch
Fahrzeug	durchschnittliche Achslast leer	hoch
Fahrzeug	durchschnittliche Achslast beladen	hoch
Fahrzeug	zugelassene Höchstgeschwindigkeit	hoch
Drehgestell/Achse	Drehgestelltyp	hoch
Drehgestell/Achse	Achse angetrieben (ja/nein)	hoch
Drehgestell/Achse	Achsstand (Abstand zur vorigen Achse)	hoch
Drehgestell/Achse	Drehzapfenabstand (Abstand zum vorigen Drehzapfen)	hoch
Drehgestell/Achse	Raddurchmesser eines neuen Rades	hoch
Drehgestell/Achse	Raddurchmesser bei maximal zulässige Radabnutzung	hoch
Drehgestell/Achse	höchst zulässige Achslast	hoch
Drehgestell/Achse	Schallminderungsmaßnahmen an Rad und/oder Achse	hoch
Federung/Dämpfung	Art der Primärfederung (Drehgestellrahmen-Radsatz)	hoch
Federung/Dämpfung	Art der Primärdämpfung (Drehgestellrahmen-Radsatz)	hoch
Federung/Dämpfung	Art der Sekundärfederung (Wagenkasten-Drehgestell)	hoch
Federung/Dämpfung	Art der Sekundärdämpfung (Wagenkasten-Drehgestell)	hoch
Bremssystem	Art des Bremssystems	hoch
Fahrzeug	maximale Fahrzeugbreite	mittel
Fahrzeug	Dauerleistung	mittel
Fahrzeug	Stundenleistung	mittel
Drehgestell/Achse	Antriebsleistung	mittel
Antrieb	Motorenart	mittel
Antrieb	Motorlagerung	mittel
Antrieb	Kraftübertragung auf Radsatz	mittel
Antrieb	Motorenanzahl	mittel
Bremssystem	Bremskrafterzeugung	mittel
Fahrzeug	Anfahrzugkraft	niedrig
Fahrzeug	Anzahl an verfügbaren Fahrzeugen bei ÖBB	niedrig
Fahrzeug	Stromabnehmertyp	niedrig
Fahrzeug	Stromabnehmeranzahl	niedrig
Fahrzeug	nutzbare Stromsysteme	niedrig
Fahrzeug	Kompressoren (inkl. Positionen)	niedrig
Fahrzeug	Lüfter	niedrig
Fahrzeug	Lufteinlässe (inkl. Positionen)	niedrig
Fahrzeug	Luftauslässe (inkl. Positionen)	niedrig
Fahrzeug	Abgasanlage (inkl. Positionen)	niedrig
Fahrzeug	Klimatisierung Fahrgastraum (inkl. Position)	niedrig

Tab. 2-2: Überblick der betrachteten Fahrzeugeigenschaften inkl. der erwarteten Relevanz im Hinblick auf die Prognoserechnung

- hohe Relevanz: es wird davon ausgegangen, dass die Fahrzeugeigenschaften signifikante Auswirkungen auf die Quellstärke zeigen kann und/oder in der Prognoserechnung direkt oder indirekt abbildbar sind, weshalb diese Eigenschaften zu erheben sind
- mittlere Relevanz: die Fahrzeugeigenschaften können entsprechend physikalischer Überlegungen die Schallemissionen grundsätzlich beeinflussen, jedoch wird ein deutlich geringeres Ausmaß der Beeinflussung attestiert bzw. ist eine Berücksichtigung der Fahrzeugeigenschaften in der Prognoserechnung nicht vorgesehen, weshalb die Eigenschaften in Abhängigkeit des erforderlichen Aufwands erhoben werden
- niedrige Relevanz: die Fahrzeugeigenschaften können zwar prinzipiell die Schallemissionen beeinflussen, jedoch werden deren Auswirkungen als geringfügig bis vernachlässigbar eingestuft, sodass sich die Informationserhebung auf eine Informationssammlung aus vorliegenden Literaturquellen beschränkt

Tab. 2-2 gibt einen Überblick über die für die Recherche definierten Eigenschaften inklusive der Relevanzeinstufung.

2.3. Eigenschaftskatalog

Für die Fahrzeugtypen mit Priorität 1 (siehe Tab. 2-1) wurden sämtliche Fahrzeugeigenschaften mit hoher und zum Teil mit mittlerer und niedriger Relevanz (siehe Tab. 2-2) systematisch recherchiert. Die Informationen wurden dabei der Fachliteratur oder Onlinequellen wie beispielsweise Datenblätter der Fahrzeughersteller oder facheinschlägigen Internetseiten entnommen. Fehlende Informationen wurden durch Mitarbeiter der ÖBB in internen Unterlagen recherchiert und zur Vervollständigung zur Verfügung gestellt. Für jeden Fahrzeugtyp wurden dessen Eigenschaften einheitlich strukturiert und mit Angabe der Quelle in jeweils einer Tabelle abgelegt, um diese zukünftig auch maschinell weiterverarbeiten zu können. Bei Bezug der Eigenschaften zu Drehgestellen oder Achsen werden die Eigenschaften je Drehgestell oder Achse angeführt.

Der Eigenschaftskatalog dient im weiteren Projektverlauf als Datengrundlage bei den weiteren Betrachtungen von Eingangsparametern für die Prognoserechnung und als Nachschlagewerk bei der Analyse von Messdaten. Aufgrund der zum Teil enthaltenen, ÖBB-internen Informationen, aber auch wegen des Umfangs der einzelnen Tabellenblätter, wird von einer Darstellung des Eigenschaftskatalogs in vorliegendem Bericht abgesehen.

3. MESSUNGEN

Im Rahmen des vorliegenden Projekts wurden zu Vergleichszwecken der Schalleistungsbestimmung anhand Messungen gemäß ÖNORM S 5026 [3] und ÖNORM EN ISO 3095 [4] in zwei Querschnitten parallel mit beiden Messkonfigurationen die Emissionen von Vorbeifahrten über mehrere Tage erfasst. Die Konzeption dieser Messungen und die Messdurchführung werden in den beiden nachfolgenden Unterkapiteln 3.1 und 3.2 beschrieben. Für die Untersuchungen in Bezug auf Eingangsparmeter des Berechnungsmodells CNOSSOS-EU auf die Prognoseergebnisse war es aufgrund des partiellen Vorhandenseins wahrnehmbarer Störgeräuschen und zur Erhöhung der statistischen Aussagekraft erforderlich, weitere geeignete Emissionsmessungen gemäß ÖNORM EN ISO 3095 aus vorangegangenen Untersuchungen heranzuziehen (Überblick über die verwendeten, historischen Messungen befindet sich im Unterkapitel 3.3).

3.1. Messkonzeption

Neben der Erfassung der Schallemissionen an verschiedenen Messpunkten wurden zusätzlich die für eine Beurteilung der akustischen Quellstärke essentiellen, akustische Oberbauparameter, die Schienenabklingrate (TDR) und die akustische Schienenrauheit erhoben. Nachfolgend werden die den Messungen zugrunde liegenden Messnormen, sowie die zum Einsatz gekommen Messkonfiguration dargestellt.

3.1.1. Relevante Messnormen

ÖNORM S 5026

Für die Ermittlung von längenbezogenen Schalleistungspegel von Schienenfahrzeugen wird/wurde in Österreich auf die ÖNORM S 5026 [3] zurückgegriffen. Die gegenständliche, jedoch mittlerweile zurückgezogene ÖNORM stammt aus dem Jahr 1996. Neben Festlegungen bezüglich der meteorologischen Bedingungen während der Messungen, bezüglich der Messgeräte, der akustischen Umgebungsbedingungen und der kategorieabhängigen Fahrgeschwindigkeiten, beschreibt die ÖNORM S 5026 die Messung/Ermittlung von Schalleistungspegel. In der ÖNORM S 5026 werden drei Mikrofonposition in einem Halbkreis ($r = 15 \text{ m}$) mit dem Mittelpunkt in der Gleisachse auf Höhe der Schienenoberkante und einem Winkel von 30° , 45° und 60° zwischen Messpunkt und der Horizontalen festgelegt (Messpunkte 1, 2 und 3, siehe auch Abb. 3-1). Die in diesen Positionen ermittelten Schallpegel werden für die Berechnung des längenbezogenen Schalleistungspegels herangezogen. Die während der Zugvorbeifahrten in

Oktavbändern gemessenen äquivalenten Dauerschallpegel werden gemittelt und mit dem Bodendämpfungsmaß korrigiert. Zuletzt wird aus den korrigierten Oktavband-Schalldruckpegel, der Zuglänge, dem Radius des Kreisbogens und den horizontalen Mikrofonabständen der längenbezogene Schalleistungspegel in Oktavbändern berechnet. Ein weiterer Messpunkt wird in 7,5 m Entfernung zur Gleisachse und in 1,5 m Höhe über der Schienenoberkante (SOK) festgelegt, welcher als Referenzpunkt dient (MP4). Dieser Messpunkt liegt um 0,3 m höher als jener, welcher in der ÖNORM EN ISO 3095 [4] definiert ist.

Die gemäß ÖNORM S5026 ermittelten längenbezogenen Schalleistungspegel fanden in der ON-Regel 305011 [6] in einer Emissionsdatenbank Einzug (A-bewertete Gesamtschalleistungspegel sowie Pegelwerte des entsprechenden Oktavspektrums), welche in den letzten Jahren ständig um neue Zugkategorien erweitert wurde. Das Rechenverfahren wurde in der Vergangenheit an die Anforderungen der Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG [2] angepasst und die Ausbreitungsberechnung auf das Berechnungsverfahren nach ÖNORM ISO 9613-2 [8] umgestellt.

ÖNORM EN ISO 3095

Die ÖNORM EN ISO 3095 [4] beschreibt ein Messverfahren und die Messbedingungen, welche reproduzier- und vergleichbare Außengeräuschpegel und Pegelspektren spurgebundener Fahrzeuge liefern und findet für die Typenprüfung von Schienenfahrzeugen gemäß der Technische Spezifikationen für die Interoperabilität, Teilsystem Fahrzeuge – Lärm (TSI-Lärm, [9]) Anwendung. In gegenständlicher Norm ist die prinzipielle Durchführung von Außengeräuschmessungen (mit Anforderungen an die Umgebungsbedingungen während der Messung, Gleis- und Fahrzeugzustand, Messpunkte, Messgrößen, Messverfahren und Datenverarbeitung) festgelegt. Es wird das Messprozedere für Fahrzeuge im Stillstand, bei der beschleunigten Anfahrt, bei Bremsen und bei konstanter Fahrt beschrieben, Geräusche von Kompressoren und Signalhörner werden ebenso behandelt. Als Messgrößen schreibt die EN ISO 3095 die beiden Größen $L_{pAeq,T}$ und L_{pAFmax} vor. Die äquivalenten Dauerschallpegel $L_{pAeq,T}$ betreffen die Vorbeifahrtmessungen und die Messungen bei Stillstand, der Maximalpegel L_{pAFmax} wird bei Messungen der beschleunigten Anfahrt und bei Bremsen vorgeschrieben. Des Weiteren sind Grenzwerte für die akustische Schienenrauheit und TDR angegeben.

Die ÖNORM EN ISO 3095 definiert für Vorbeifahrtmessungen von Fahrzeugen mit Geschwindigkeiten < 200 km/h einen Messpunkt in 7,5 m Entfernung von der Gleisachse und in 1,2 m Höhe über SOK (MPA, Rollgeräusch) bzw. in 3,5 m Höhe über SOK (MPB, höher

gelegene Schallquellen im oberen Wagenbereich). Bei Fahrzeugen mit Geschwindigkeiten > 200 km/h kommt ein zusätzlicher Messpunkt in 25 m Entfernung zur Gleisachse und in 3,5 m Höhe über SOK zur Anwendung. Im Zuge gegenständlicher Untersuchung blieb dieser Messpunkt allerdings unberücksichtigt.

ÖNORM EN 15610

Die ÖNORM EN ISO 3095 [4] verweist bezüglich der akustischen Schienenrauheit auf den Entwurf der ÖNORM EN 15610 [10]. Diese beschreibt ein direktes Verfahren zur Charakterisierung der Rauheit der Schienenoberfläche (Rad-Schiene Kontaktzone) in Hinblick auf das Rollgeräusch, dargestellt in Form eines Terzspektrums. Neben Angaben zur Auswahl der Messpositionen, Angaben zur Messwerterfassung sowie zur Verarbeitung der Messwerte beinhaltet gegenständliche Norm auch die Anforderungen an das Messsystem sowie die Darstellung der Ergebnisse im Vergleich zu der Grenzkurve.

ÖNORM EN 15461

Gegenständliche Norm beschreibt die dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtgeräuschmessungen. Bezüglich der Gleisabklingrate (TDR) wird in der ÖNORM EN ISO 3095 [4] auf die ÖNORM EN 15461 [11] verwiesen. Neben dem Messverfahren selbst (Impulshammermethode) beschreibt diese Norm die Weiterverarbeitung der Messdaten zur Abschätzung der Abklingraten in Gleisrichtung sowie die Darstellung für eine Bewertung der Ergebnisse im Vergleich mit Grenzkurven der TDR.

Schienenfahrzeug-Lärmzulässigkeitsverordnung (SchLV)

In Österreich wurden im Jahr 1993 verbindliche Schallemissionsgrenzwerte für in Österreich immatrikulierte Schienenfahrzeuge verbindlich vorgeschrieben. Damit war Österreich das erste Land in Europa, welches Grenzwerte für den Eisenbahnlärm einführt. In der Schienenfahrzeug-Lärmzulässigkeitsverordnung (SchLV, [12]), welche bis heute Gültigkeit besitzt, wird neben der Festlegung von Grenzwerten auch auf die Unterscheidung von unterschiedlichen Fahrzeugkategorien, auf die Messart, das Messverfahren, die Messeinrichtungen, das Umgebungsgeräusch, die Bedingungen für das Fahrzeug und auf grundsätzliche Versuche (Standversuch und Fahrversuch) eingegangen. Die SchLV gilt für Schienenfahrzeuge von Haupt-, Neben-, Straßen- und Anschlussbahnen gem. §§ 4, 5 und 7 des Eisenbahngesetzes 1957. Das in der SchLV angeführte Messverfahren beinhaltet ausschließlich die in ÖNORM EN ISO 3095 [4] definierten Messpunkte A und B (siehe Abb. 3-1).

3.1.2. Messkonfiguration

Abb. 3-1 zeigt das zum Einsatz kommende Messsetup gemäß ÖNORM S 5026 und ÖNORM EN ISO 3095 mit den einzelnen Mikrofonpositionen sowie den Entfernungen zu der Gleisachse und die Höhen über SOK. Messpunkt C wurde in gegenständlicher Untersuchung nicht ausgeführt.

In Tab. 3-1 sind die für die jeweilige Messkampagne eingesetzten Messsensoren, deren Kanalbelegung am acramos® System sowie die entsprechenden Messpositionen zusammengefasst. Während bei der ersten Messkampagne in Deutsch-Wagram das acramos® System der Dauermessstelle um entsprechende temporäre Mikrofone (gemäß ÖNORM S 5026 und um den Messpunkt B gemäß ÖNORM EN ISO 3095 erweitert wurde, kam für die zweite Messkampagne in Dürnkrot ein acramos® mobil System zur Anwendung. Bei beiden Messkampagnen erfolgte der Messaufbau ausschließlich für das Gleis 2 (Regelverkehr Richtung Gänserndorf).

An dem Messgleis wurden jeweils zwei induktive Radsensoren angebracht. Ein Radsensor wurde im Messquerschnitt installiert und ermöglicht die genaue zeitliche Zuordnung der jeweiligen Achse zum gemessenen Schallsignal. Der zweite Radsensor liegt in Regelrichtung vor dem Messquerschnitt. Er definiert den Zeitbereich der Datenablage. Da die Aufzeichnung der Messsignale permanent erfolgt, ist gewährleistet, dass die Speicherung die gesamte Zugvorbeifahrt (Puffer bis Puffer) beinhaltet.

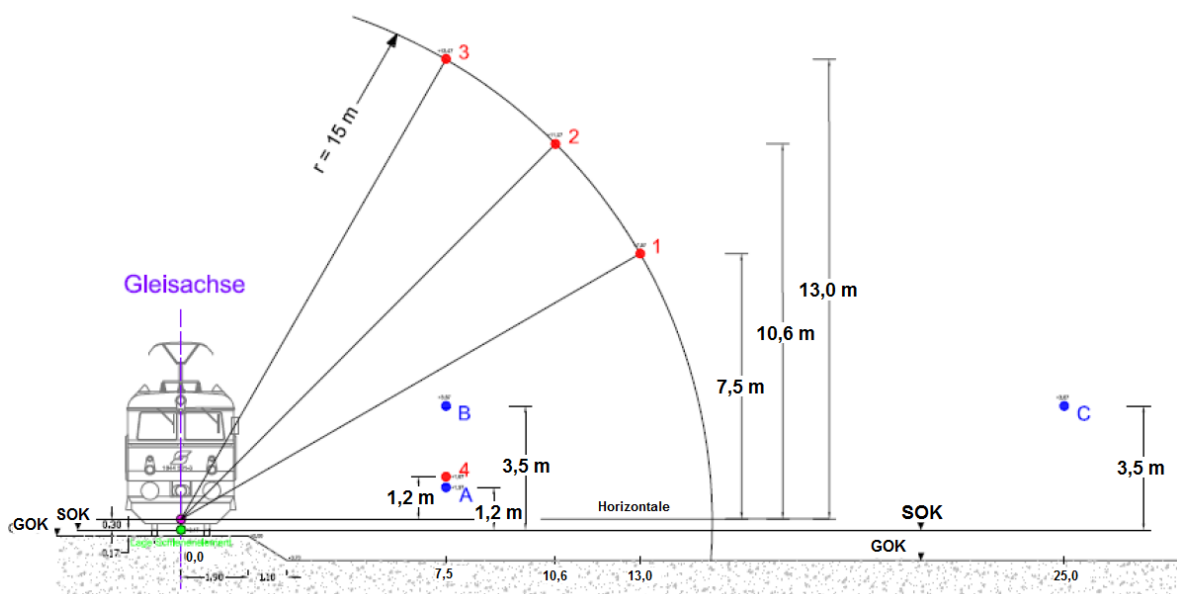


Abb. 3-1: schematische Darstellung der Messpunkte gemäß ÖNORM S 5026 (Messpunkte 1, 2, 3 und 4, rote Farbcodierung) sowie gemäß ÖNORM EN ISO 3095 (Messpunkte A, B und C, blaue Farbcodierung), der grüne Punkt markiert das Niveau der SOK

Kanal	Typ	Position	Messpunkt gem. Abb.3-1	Messposition gemäß	Gleis
1	Mikrofon (57452)	7,5/1,2m ü. SOK	A	SchLV, ÖNORM EN ISO 3095	Gleis 2
4	Mikrofon (71602)	13/7,8m ü. SOK	1	ÖNORM S 5026	Gleis 2
8	Mikrofon (58530)	10,6/10,9m ü. SOK	2	ÖNORM S 5026	Gleis 2
9	Mikrofon (195314)	7,5/13,3m ü. SOK	3	ÖNORM S 5026	Gleis 2
10	Mikrofon (58531)	7,5/1,5m ü. SOK	4	ÖNORM S 5026	Gleis 2
11	Mikrofon (195316)	7,5/3,5m ü. SOK	B	SchLV, ÖNORM EN ISO 3095	Gleis 2
14	Rad-Sensor	Radsensor Gl.2 (Auslöser)		Frauscher (3,6m vor dem MQ)	Gleis 2
15	Rad-Sensor	Radsensor Gl.2		Frauscher (im MQ)	Gleis 2
Messsetup Dürnrut					
Kanal	Typ	Position	Messpunkt gem. Abb.3-1	Messposition gemäß	Gleis
1	Mikrofon (71609)	7,5/13,3m ü. SOK	3	ÖNORM S 5026	Gleis 2
2	Mikrofon (71602)	10,6/10,9m ü. SOK	2	ÖNORM S 5026	Gleis 2
3	Mikrofon (58531)	13/7,8m ü. SOK	1	ÖNORM S 5026	Gleis 2
4	Mikrofon (195316)	7,5/3,5m ü. SOK	B	SchLV, ÖNORM EN ISO 3095	Gleis 2
5	Mikrofon (58530)	7,5/1,5m ü. SOK	4	ÖNORM S 5026	Gleis 2
6	Mikrofon (195314)	7,5/1,2m ü. SOK	A	SchLV, ÖNORM EN ISO 3095	Gleis 2
7	Rad-Sensor	Radsensor Gl.2 (Auslöser)		Frauscher (3,6m vor dem MQ)	Gleis 2
8	Rad-Sensor	Radsensor Gl.2		Frauscher (im MQ)	Gleis 2

Tab. 3-1: Sensortabelle, Messpositionen und Kanalbelegung des acramos® Systems an den Messstellen Deutsch-Wagram und Dürnrut

Zu Beginn der Messungen wurde die gesamte Messkette mit einer geeichten Prüfschallquelle kalibriert und im Zuge des Messstellenabbaus mittels Kalibrator überprüft.

Während einer Zugvorbeifahrt wurden die im Messquerschnitt erzeugten Schallemissionen in den einzelnen Mikrofonpositionen gemessen und parallel dazu die Achssignale der induktiven Radsensoren aufgezeichnet. Mit Hilfe des Achssignals des im Messquerschnitt installierten Radsensors (=Achspannung) erfolgte eine Zuordnung der gemessenen Emissionen zu den jeweiligen Positionen des einzelnen Rades bzw. des Drehgestells. Das gemessene Achsmuster wurde mit einer internen Zugdatenbank verglichen und daraus die Zugkategorie (z.B. Güterzug, Railjet, etc.) bestimmt. Weiteres wurden mit einer integrierten Vaisala WXT 500 Wetterstation meteorologische Daten (Windgeschwindigkeit, Regen) aufgenommen.

Nachstehende Parameter und Messgrößen wurden erfasst und analysiert:

- Zugkategorie (Güter, RailJet, CityJet, etc.)
- Zuglänge in m
- Achszahl

IDZug	ZugTyp	Datum/Uhrzeit	Regelrichtung	Gleis	Zugkreuzung	Zuglänge [m]	Achszahl	Zugmittel	Zugvmin	Zugvmax	Delta T	Kanal	MP	LpAeq,Tp	LpAeq,1h	Kanal	MP	LpAeq,Tp	LpAeq,1h
20211	Güter	06.10.2017 12:38:41	WAHR	G2	0	569,8451953	103	83,5150119	81,7572511	85,49155	24,56375992	1	A	93,3	71,63	4	1	89,50	67,84
20228	Güter	06.10.2017 13:49:26	WAHR	G2	0	369,7022307	112	86,729529	86,017973	87,4797985	15,34573111	1	A	94,9	71,24	4	1	91,02	67,32
20242	Güter	06.10.2017 15:05:01	WAHR	G2	0	295,4447063	68	73,1875409	72,505165	73,8737393	14,53254106	1	A	92,2	68,30	4	1	89,08	65,14
20256	Güter	06.10.2017 16:30:48	WAHR	G2	0	351,6297504	112	89,7135106	89,1483752	90,2613605	14,11010553	1	A	92,2	68,18	4	1	88,36	64,29
20270	Güter	06.10.2017 17:50:40	WAHR	G2	0	389,8804095	112	71,4476673	70,9405871	71,9416497	19,64472078	1	A	84,8	62,13	4	1	81,50	58,87
20273	Güter	06.10.2017 18:05:44	WAHR	G2	1	498,7605326	100	67,5593072	62,8935475	72,2995202	26,57721033	1	A	81,9	60,59	4	1	79,76	58,44
20286	Güter	06.10.2017 18:53:35	WAHR	G2	0	628,9991355	112	91,9839312	90,5299913	93,355526	24,61730933	1	A	89,9	68,21	4	1	86,22	64,57
20296	Güter	06.10.2017 19:50:51	WAHR	G2	0	629,3020733	114	98,0667519	96,8146077	99,2988542	23,10148363	1	A	92,7	70,74	4	1	88,93	67,00
20298	Güter	06.10.2017 20:12:44	WAHR	G2	0	317,167792	84	87,3547226	81,8747161	92,716956	13,07089093	1	A	97,9	73,54	4	1	94,59	70,19
20302	Güter	06.10.2017 20:33:14	WAHR	G2	0	295,9437033	72	82,5604634	82,102846	83,0231799	12,90444951	1	A	90,6	66,12	4	1	87,09	62,63
20323	Güter	06.10.2017 22:54:09	WAHR	G2	0	548,4191319	104	96,5014909	93,7154048	99,3205636	20,45884325	1	A	90,2	67,77	4	1	87,34	64,88
20328	Güter	06.10.2017 23:20:18	WAHR	G2	0	676,1336471	170	63,890598	53,9439073	74,2614715	38,09764202	1	A	90,2	70,41	4	1	87,22	67,46
20329	Güter	06.10.2017 23:25:47	WAHR	G2	0	627,1874079	100	70,0430966	63,4548159	76,7766508	32,23550612	1	A	82,5	62,02	4	1	79,30	58,82
20331	Güter	06.10.2017 23:31:59	WAHR	G2	0	398,4571913	80	70,3020903	69,1634535	71,4495391	20,40402899	1	A	91,1	68,68	4	1	87,49	65,02
20342	Güter	07.10.2017 01:25:07	WAHR	G2	0	425,8794111	124	86,0005502	83,851774	88,0383168	17,82773252	1	A	93,7	70,64	4	1	90,26	67,21
20343	Güter	07.10.2017 01:35:15	WAHR	G2	0	634,8509742	90	79,7708073	77,3333998	82,2737926	28,65037453	1	A	90,9	69,86	4	1	87,15	66,16
20345	Güter	07.10.2017 02:01:48	WAHR	G2	0	555,8802363	120	77,9022235	71,6803856	84,100692	25,68821222	1	A	85,6	64,15	4	1	82,05	60,59
20350	Güter	07.10.2017 02:40:12	WAHR	G2	0	613,2094829	140	85,6380463	81,6399574	90,1340152	25,77772654	1	A	93,9	72,50	4	1	90,48	69,03
20356	Güter	07.10.2017 04:15:19	WAHR	G2	0	321,8589626	84	86,411026	84,7343136	88,0574065	13,4090789	1	A	97,3	73,02	4	1	94,38	69,93
20362	Güter	07.10.2017 05:30:58	WAHR	G2	0	619,4504759	96	76,7225441	73,5052784	80,2917978	29,06605536	1	A	91,4	70,46	4	1	88,18	67,25
20366	Güter	07.10.2017 06:08:33	WAHR	G2	0	683,7339885	180	85,7216095	82,6973972	88,9323285	28,71437403	1	A	89,3	68,30	4	1	85,68	64,69
20405	Güter	07.10.2017 10:40:49	WAHR	G2	0	732,5120167	160	56,7585549	43,3935865	71,1353283	46,46071886	1	A	89,4	70,49	4	1	86,22	67,33
20408	Güter	07.10.2017 10:53:57	WAHR	G2	0	374,6213984	104	80,9945958	77,9813151	83,9845021	16,65090886	1	A	94,5	71,14	4	1	90,87	67,52
20433	Güter	07.10.2017 13:53:20	WAHR	G2	0	486,4024776	66	95,9846586	92,0838421	99,9590341	18,24300825	1	A	92,7	69,76	4	1	88,81	65,85
20450	Güter	07.10.2017 16:19:29	WAHR	G2	0	334,2405107	96	87,8120677	86,5743785	89,0183602	13,70273893	1	A	91,6	67,36	4	1	88,33	64,13
20455	Güter	07.10.2017 16:51:38	WAHR	G2	0	395,7857406	108	97,2888326	95,777778	98,7381529	14,64534653	1	A	96,2	72,27	4	1	92,63	68,73
20457	Güter	07.10.2017 17:10:51	WAHR	G2	0	382,8745626	108	88,2992325	85,742405	90,7369126	15,60997062	1	A	84,8	61,19	4	1	81,25	57,62
20462	Güter	07.10.2017 17:32:10	WAHR	G2	0	566,8555177	114	79,1556358	78,025796	80,2993294	25,780601	1	A	91,9	70,48	4	1	88,30	66,85
20475	Güter	07.10.2017 18:55:24	WAHR	G2	0	548,3169221	104	94,1834514	91,3417359	97,0626884	20,95846872	1	A	91,9	69,59	4	1	89,25	66,90
20490	Güter	07.10.2017 20:35:40	WAHR	G2	0	456,9036833	64	62,4734635	61,7777733	63,190049	26,32883097	1	A	87,8	66,40	4	1	84,67	63,31
20500	Güter	07.10.2017 21:56:47	WAHR	G2	0	671,7210169	160	75,505053	72,6768033	78,0929928	32,02693812	1	A	92,8	72,33	4	1	89,48	68,98
20527	Güter	08.10.2017 05:09:13	WAHR	G2	0	478,8832682	132	86,308213	83,6409767	88,7933575	19,96945864	1	A	90,9	68,31	4	1	87,63	65,07
20560	Güter	08.10.2017 09:39:07	WAHR	G2	0	563,9216591	81	84,1904493	80,6769022	87,8344048	24,11339992	1	A	91,6	69,85	4	1	88,10	66,36
20617	Güter	08.10.2017 16:28:05	WAHR	G2	0	243,324538	76	86,308221	85,9921421	86,6595026	10,14930359	1	A	91,8	66,31	4	1	87,85	62,36
20622	Güter	08.10.2017 16:49:00	WAHR	G2	0	500,2715723	100	93,7736643	92,9586142	94,5936865	19,20558052	1	A	82,9	60,15	4	1	79,27	56,54
20714	Güter	09.10.2017 06:38:18	WAHR	G2	0	457,7902043	112	77,5794829	76,2685203	78,83288	21,24330653	1	A	88,9	66,64	4	1	85,91	63,62
20756	Güter	09.10.2017 10:35:43	WAHR	G2	0	575,1794963	152	74,8216664	72,2386413	77,1970803	27,67441955	1	A	93,7	72,53	4	1	90,38	69,24
20817	Güter	09.10.2017 16:53:04	WAHR	G2	0	349,8287708	112	89,4648905	89,2629467	89,6734978	14,07684699	1	A	92,1	67,98	4	1	88,30	64,22
20825	Güter	09.10.2017 17:41:50	WAHR	G2	0	317,4828302	92	56,127444	53,0938709	59,120962	20,36326808	1	A	83,7	63,23	4	1	80,75	58,28

Tab. 3-2: Auszug aus der acramos® Datenbank (Messstelle Deutsch-Wagram, Parameter und Messgrößen)

- Achsgeschwindigkeiten $v_{\text{mittel}} / v_{\text{max}} / v_{\text{min}}$ in km/h, somit kann überprüft werden, ob der betrachtete Zug eine konstante Geschwindigkeit aufweist, bzw. beschleunigt oder abbremst.
- Vorbeifahrtzeit in s
- A-bewertete Vorbeifahrtpegel in allen Mikrofonpositionen ($L_{pAeq,Tp}$) in dB(A)
- A-bewertete Vorbeifahrtpegel in allen Mikrofonpositionen bezogen auf 1 Stunde ($L_{pAeq,1h}$) in dB(A)
- Unbewertete Terzpegelspektren der einzelnen Zugvorbeifahrten in allen Mikrofonpositionen in dB

A-bewerteter Vorbeifahrtpegel $L_{pAeq,Tp}$

Aus den Einzelmesswerten je Zugvorbeifahrt wurden für alle Mikrofonpositionen mittlere geschwindigkeitsabhängige A-bewertete Vorbeifahrtpegel $L_{pAeq,Tp}$ ermittelt.

$$L_{pAeq,Tp} = 10 \lg \left(\frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right)$$

$L_{pAeq,Tp}$ A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel über die Dauer der Zugvorbeifahrt in dB(A)

T_p Messdauer der Zugvorbeifahrt (von Puffer zu Puffer) in s

$p_A(t)$ A-bewertete momentane Schalldruck in Pa

p_0 Bezugsschalldruck, $p_0 = 10 \mu\text{Pa}$

3.2. Parallele Messungen nach ÖNORM S 5026 und ÖNORM EN ISO 3095

3.2.1. Messkampagne 1

Schallmessungen

Für die erste Messkampagne wurde auf die bestehende Dauermessstelle an der Nordbahn nahe Deutsch-Wagram bei km 14,6 zurückgegriffen. Die Strecke ist im Bereich des Messquerschnittes zweigleisig ausgebaut. Die Erweiterung der vor Ort installierten acramos® Messstelle sowie der Einbau der hierfür notwendigen Sensorik erfolgte in der Nacht vom 05.10.2017 auf den 06.10.2017, der Abbau wurde in der Nacht vom 12.10.2017 auf den 13.10.2017 durchgeführt. Aufgrund eines Sturms in der Nacht des Einbaus lieferte das Messsystem erst vom 06.10.2017 (12:00 Uhr) bis 12.10.2017 (24:00 Uhr) anwendbare Ergebnisse. Als Messgleis wurde das Gleis 2 ausgewählt (Fahrtrichtung Gänserndorf). Abb. 3-2 zeigt den Messquerschnitt und die gemäß ÖNORM EN ISO 3095 sowie gemäß ÖNORM S 5026 angeordneten Mikrofonpositionen. Die Oberbauelemente im untersuchten Streckenabschnitt sind in Tab. 3-3 zusammengefasst.



Abb. 3-2: Übersicht Messquerschnitt Kampagne 1, Deutsch-Wagram, Nordbahn, km 14,6

Streckenkilometer	14,6
Schienentyp	UIC 60
Oberbau	Schotter
Schwellen	MABA L2

Tab. 3-3: Oberbau von Gleis 2, Messkampagne 1, Deutsch-Wagram, Nordbahn

Kategorie	Geschwindigkeitsbereiche [km/h]											Summe
	0-35	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95	95-105	105-115	115-125	125-140	
80-33			1	1			2	8	71	33		116
CityJet		1			3	5	9	19	43	10		90
G-Kfz				3	2	7	10	3				25
Güter	2		1	12	20	35	33	16	4			123
1042							1	1				2
1044								2		1		3
1116							3	2	1	1		7
2016				1				3	1	9		14
2143								1	1			2
5047								1	3	3		7
RailJet						4	9	7	10	16		46
RZ-mx							1	2	6	11		20
4020		1			2	15	31	56	52	10		167
4024							2		1	2		5
Vectron							2	1	1	4		8
diverse Lokfahrten								1	2	1		4
Summe: 16	2	2	2	17	27	66	103	123	196	101	0	639

Tab. 3-4: Anzahl der Vorbeifahrten je Zugkategorie und Geschwindigkeitsbereiche für Messkampagne 1, acramos® Dauermessstelle Deutsch-Wagram, Nordbahn, km 14,6

Das an der Dauermessstelle eingerichtete ÖNORM EN ISO 3095 Setup (MPA, 7,5 m / 1,2 m) wurde um MPB sowie für die Berechnung der längenbezogenen Schalleistungspegel um die zusätzlichen Messpositionen MP1, MP2, MP3 (gemäß ÖNORM S 5026) erweitert. Des Weiteren wurde der Referenzmesspunkt MP4 (gemäß ÖNORM S 5026) installiert.

Insgesamt wurden während des Messzeitraumes rund 600 Züge erfasst. Die Anzahl der einzelnen Zugkategorien sowie deren Geschwindigkeitsverteilungen sind der Tab. 3-4 zu entnehmen.

Akustische Schienenrauheit

Am 11.10.2017 wurde die akustische Schienenrauheit auf Gleis 2 gemessen. Die ÖNORM EN 15610 [13] schreibt vor, die akustische Schienenrauheit an zumindest 5 Positionen über eine Referenzlänge von 15 m je Schiene zu erheben. Dabei muss die Messlänge an jeder Position mindestens 1 m betragen. Im vorliegenden Fall wurden die akustischen Rauheiten an den 6 mittleren der in Abb. 3-3 dargestellten Messabschnitte,

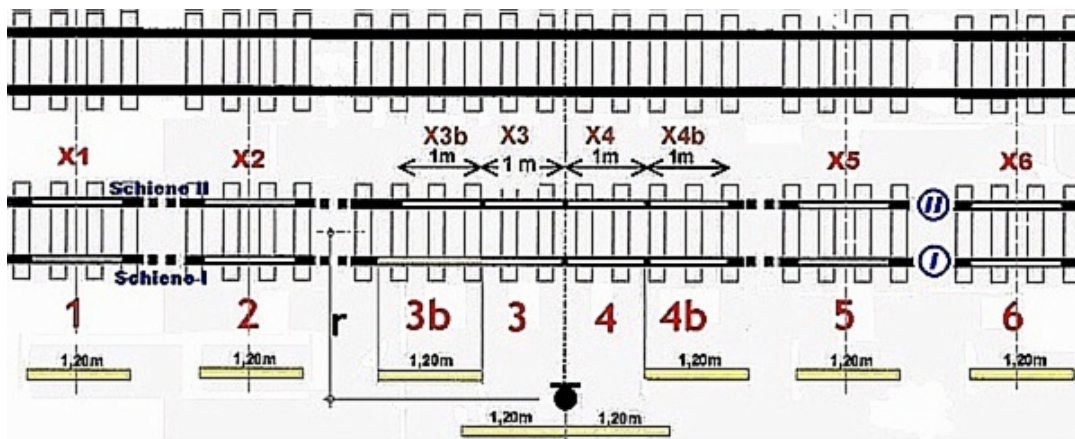


Abb. 3-3: Messsetup (Lage und Bezeichnung der Messabschnitte)

Messbereich	Auflösung	Krümmungsradius der Aufnehmer	Wellenlängenbereich	Software
$\pm 500 \mu\text{m}$	$0,06 \mu\text{m}$	1,5 mm	315 mm - 2,5 mm	ROUGH RDP01 Version 4.6

Tab. 3-5: Gerätespezifikation lt. Datenblatt

pro Schiene erhoben. Die äußeren Messabschnitte mit der internen Bezeichnung 1, x1, 6 und x6 blieben unberücksichtigt.

Für die Messung der akustischen Schienenaufnahme kam ein stationäres Rauheitsmessgerät vom Typ TRM 05 der Fa. Ødegaard & Danneskoild-Samsøe zum Einsatz (Spezifikationen siehe Tab. 3-5). Das Messgerät tastet auf einer Messlänge von 1200 mm mechanisch die Schienenoberfläche auf bis zu 3 Spuren gleichzeitig ab und bildet so ein Längsprofil der Oberfläche. Die seitliche Justierung der Messspuren erfolgt einerseits über Bohrungen mit jeweils 5 mm Abstand im Messschlitten sowie über Justierwinkel, die bei jeder Einzelmessung die Aufstellung des Gerätes im selben Abstand von der Schienenaußenkante sicherstellen.

Die Verarbeitung der Profildaten geschieht sodann in folgenden Schritten:

1. Korrektur der Daten auf horizontaler Ebene: damit wird die Neigung zwischen Anfangs- und Endpunkt der Messung eliminiert.
2. Unterdrückung der Spitzenwerte: Aus den Daten werden gemäß ÖNORM EN 15610 schmale Spitzen entfernt, da davon ausgegangen wird, dass sie von winzigen Verunreinigungen auf der Fahrfläche herrühren und keine Auswirkung auf die akustische Schienenaufnahme besitzen.
3. Anpassung an den Krümmungsradius eines Rades: Da das gemessene Rauheitsprofil vom Krümmungsradius des Aufnehmers abhängt, werden die Daten gemäß

ÖNORM EN 15610 einem weiteren Verarbeitungsschritt unterzogen, um die Auswirkung des kleinen Radius der Tastspitze im Verhältnis zum Krümmungsradius eines Rades zu berücksichtigen.

4. Bildung des Terzspektrums.

Das Gerät wird alle drei Monate mit einem Präzisionskalibrationsstein überprüft.

Die Breite und die seitliche Lage der Referenzfläche sind abhängig vom Bereich der Rad-Schiene-Kontaktpunkte der betrachteten Fahrzeuge. Aus diesem Grund wurde die Methode angewandt, die für Rauheitsmessung zum Zwecke der Typprüfung von Fahrzeugen gedacht ist. Dabei wurden mit einem wasserfesten Marker quer über den Schienenkopf Markierungsstriche gezogen. Nach der Überfahrt eines bzw. mehrerer Züge war ein Teil des Markerstriches verblasst und zeigte so den Bereich des Rad-Schiene-Kontaktes jener Züge an, welche den Messquerschnitt im Zuge der Markierungsphase passierten.

Die Rauheitspegelspektren, bezogen auf 1 µm, sind für Wellenlängen von 0,25 cm bis 25 cm in Abb. 3-4 zusammengefasst, welche die Rauheitsspektren beider Schienen für jeweils alle drei Aufnehmer zeigt. Die Rauheit beider Schienen liegt im gesamten Wellenlängenbereich deutlich unter der Grenzkurve gemäß ÖNORM EN ISO 3095 und kann als sehr glatt eingestuft werden.

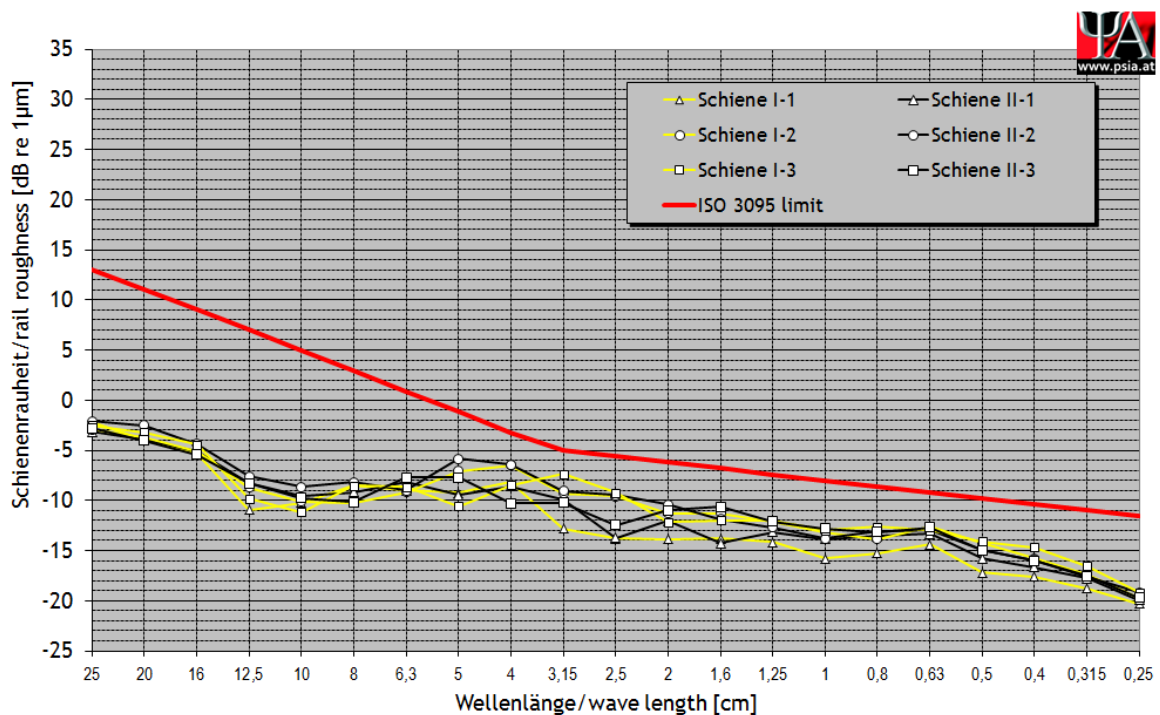


Abb. 3-4: akustische Schienenrauheit, Messkampagne 1, Deutsch-Wagram, Gleis 2, Nordbahn, km 14,6 (Messdurchführung am 11.10.2017)

Gleisabklingrate (TDR)

Zusätzlich zu der akustischen Schienenrauheit wurde am selben Tag das Abklingverhalten des Gleises im Messquerschnitt untersucht. Die Abklingrate des Gleises (Track Decay Rate, TDR) beschreibt die Abnahme der Schienenschwingungen pro Laufmeter Schiene (in dB/m) in den einzelnen Terzbändern. Das bedeutet, je höher dieser Pegel wird, desto weniger lang schwingt die Schiene nach - das heißt sie strahlt weniger Schall ab und ist leiser. Die TDR gibt somit (neben der akustischen Schienenrauheit) Aufschluss über die akustische Beschaffenheit des Gleises.

Der Beschleunigungsaufnehmer wurde jeweils auf Schiene 1 und 2 im Messquerschnitt angebracht, während die Positionen zur Anregung der Schiene mittels Impulshammer, wie in Abb. 3-5 dargestellt, variiert wurden. Diese Positionen beziehen sich auf die

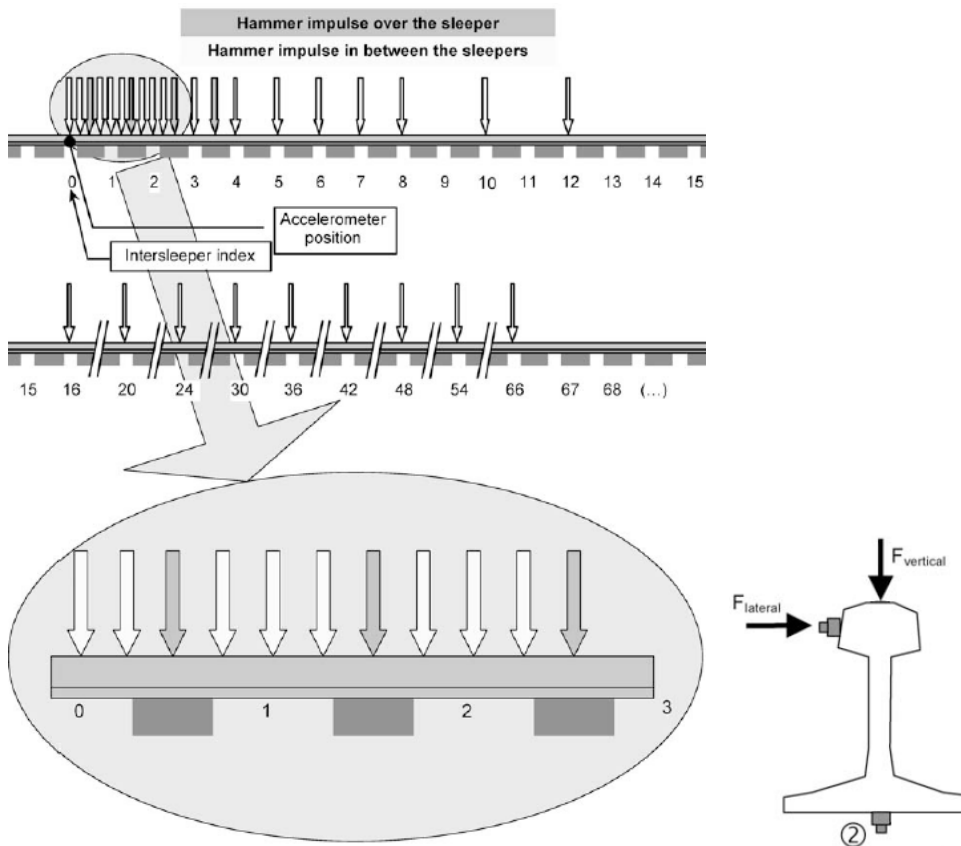


Abb. 3-5: Messpositionen Impulshammer gemäß ÖNORM EN 15461

Impulshammer	PCB, Type 086D05, Medium Impact Cap (Metal)
Beschleunigungsaufnehmer	1 IMI, 6582 (vertikal und lateral)
Schwingungskalibrator	MF VC10
Messsystem	MEDA, Fa. Wölfel Messsysteme Software GmbH&Co.KG

Tab. 3-6: Sensortabelle und Messsystem (TDR Messungen)

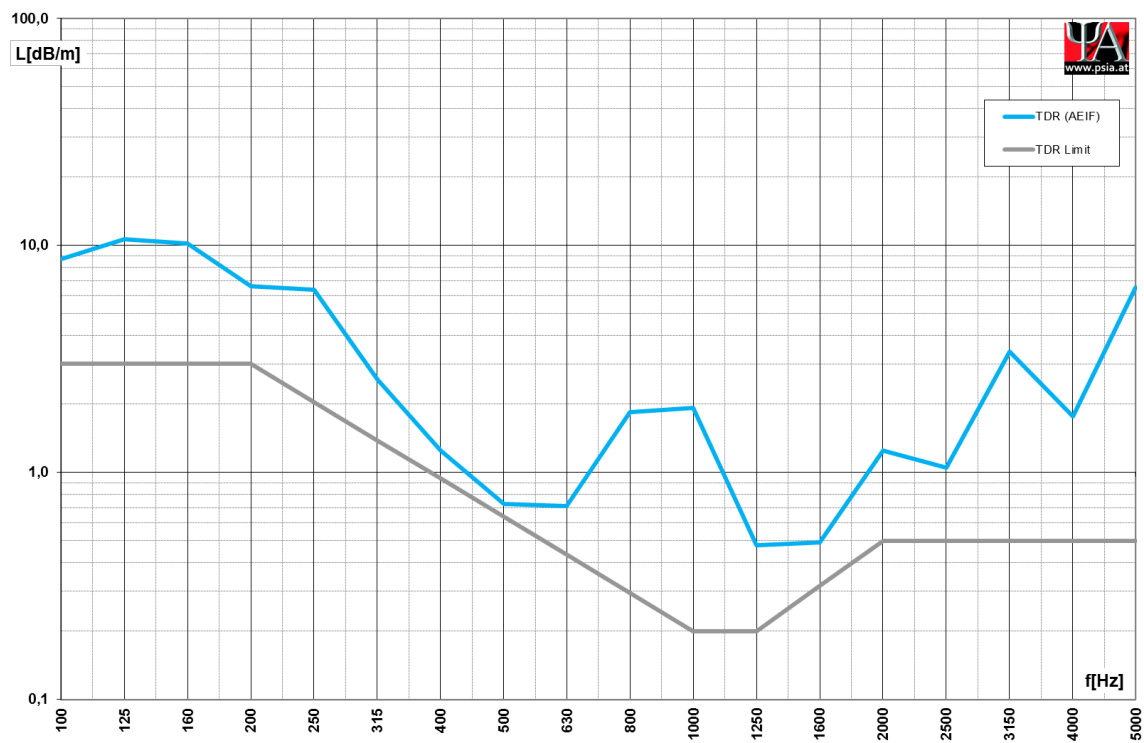


Abb. 3-6: laterale TDR, Messkampagne 1, Deutsch-Wagram, Gleis 2, Nordbahn, km 14,6

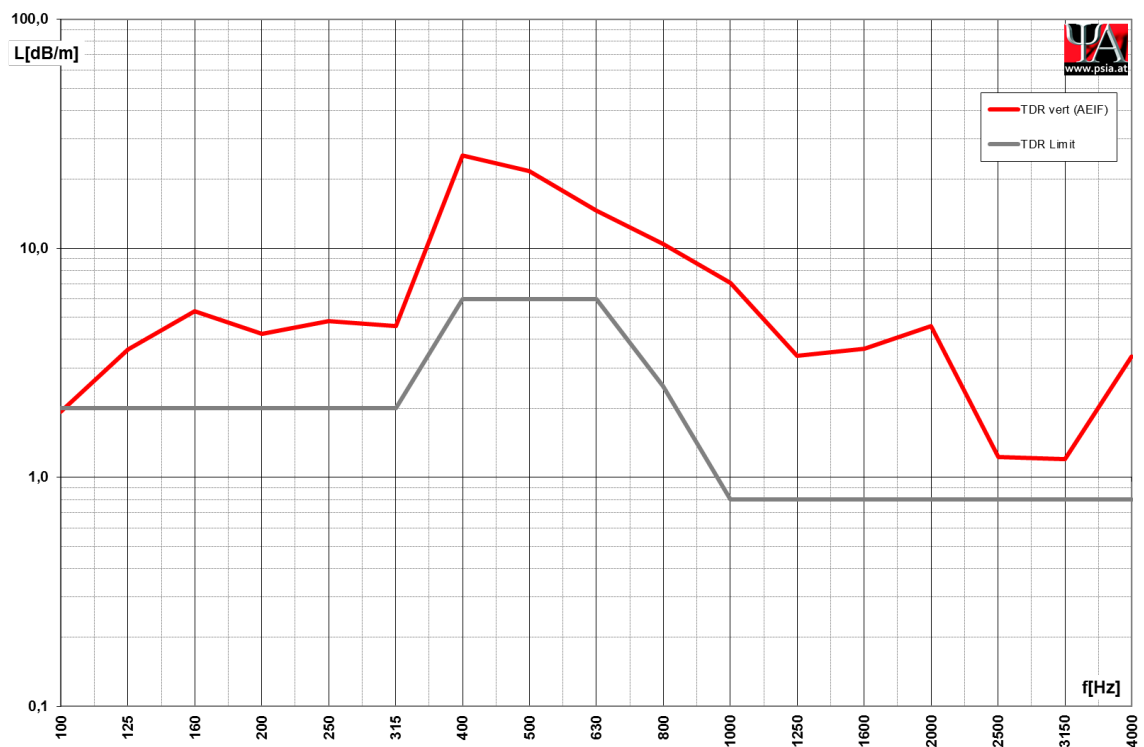


Abb. 3-7: vertikale TDR, Messkampagne 1, Deutsch-Wagram, Gleis 2, Nordbahn, km 14,6 (Messdurchführung am 11.10.2017)

ÖNORM EN 15461 [11]. Der Beschleunigungsaufnehmer zur Bestimmung der vertikalen Schienenabklingrate (Vertical Track Decay Rate) wurde vertikal, jener zur Bestimmung der horizontalen Schienenabklingrate (Lateral Track Decay Rate) horizontal am Schienenkopf befestigt.

Die Signale des Impulshammers und des Beschleunigungsaufnehmers wurden mit einem 8-Kanal Analysesystem MEDA der Fa. Wölfel aufgezeichnet und gespeichert. Die Auswertung der erfassten Daten erfolgte im Labor. Eine Auflistung der zum Einsatz gekommenen Sensoren sowie des Messsystems zeigt Tab. 3-6.

Die Ergebnisse sind in Abb. 3-6 (horizontale TDR) und Abb. 3-7 (vertikale TDR) dargestellt. Sowohl die horizontale sowie die vertikale Gleisabklingrate liegen im gesamten Frequenzbereich über der Grenzkurve gem. ÖNORM EN ISO 3095.

3.2.2. Messkampagne 2

Schallmessungen

Für die zweite Messkampagne wurde ein Messquerschnitt an der Nordbahn nahe Dürnkrot bei km 51,2 ausgewählt. Der Grund hierfür war einerseits jener, dass, analog zum Messquerschnitt bei Deutsch-Wagram, eine UIC 60 Schiene verbaut ist und andererseits eine für die Messungen relevante freie Schallausbreitung und ausreichende Platzverhältnisse für den Aufbau gemäß ÖNORM S 5026 gegeben sind. Zusätzlich konnte an diesem Messquerschnitt ein permanenter Stromanschluss gewährleistet werden. Am 27.04.2018 fand gemeinsam mit dem Auftraggeber ein Ortsaugenschein der Messstelle statt, im Zuge dessen festgestellt wurde, dass der gesamte, betrachtete Streckenabschnitt von km 51,05 bis km 51,5 im Nahbereich von Weichen liegt. Bei durchgeführten Hörproben wurde aber abgeschätzt, dass keine signifikante akustische Beeinflussung durch die Weichen gegeben war und die Züge mit konstanter Geschwindigkeit den Messquerschnitt passierten. Des Weiteren waren Geräusche zufolge von Schienenstößen nicht wahrnehmbar.

Der Einbau der Sensorik erfolgte in der Nacht vom 06.07.2018 auf den 07.07.2018, der Abbau am 19.07.2018. Die Strecke ist im Bereich des Messquerschnittes zweigleisig ausgebaut, als Messgleis wurde wieder Gleis 2 definiert.

Abb. 3-8 zeigt den Messquerschnitt und die gemäß ÖNORM EN ISO 3095 sowie gemäß ÖNORM S 5026 angeordneten Mikrofonpositionen (analog zu Messkampagne 1). Die Oberbauelemente am untersuchten Streckenabschnitt sind in Tab. 3-7 dargestellt.

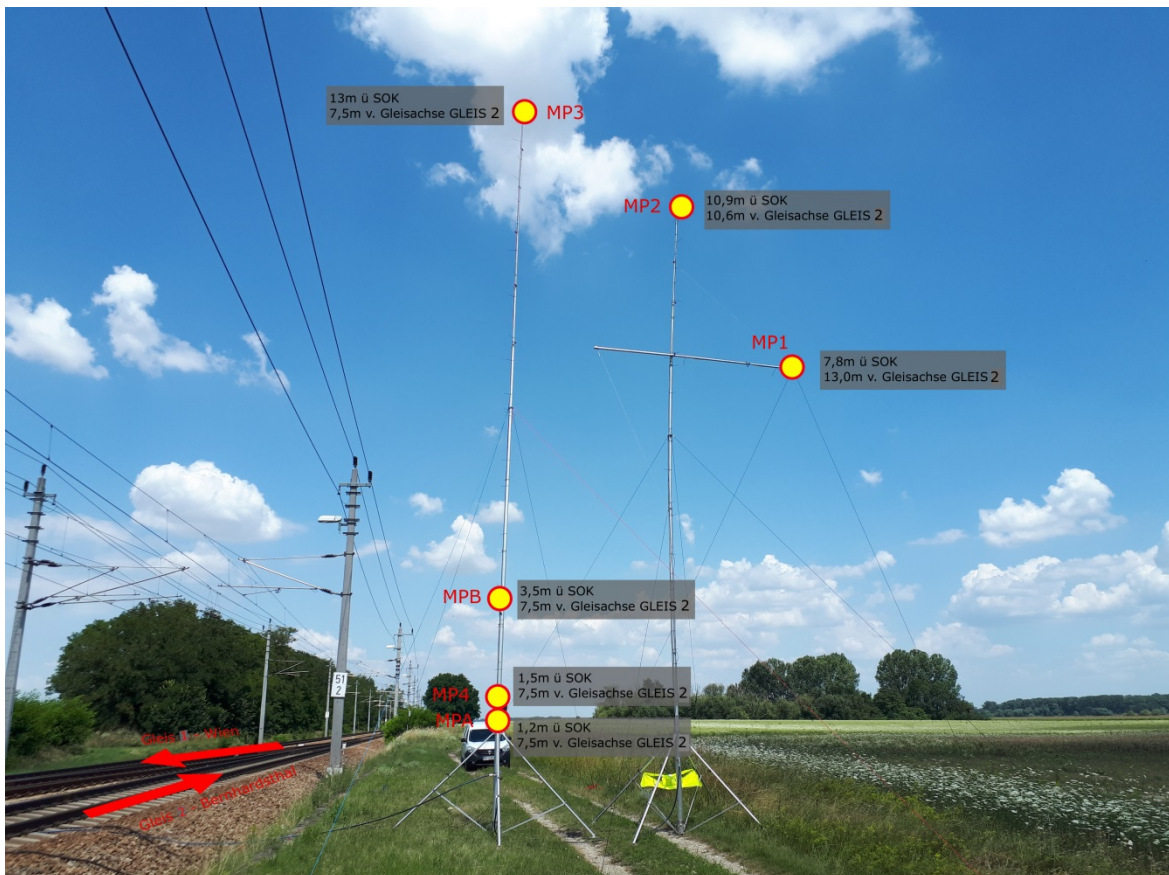


Abb. 3-8: Übersicht Messquerschnitt Messkampagne 2, Dürnkrot, Nordbahn, km 51,2

Streckenkilometer	51,2
Schienentyp	UIC 60
Oberbau	Schotter
Schwellen	MABA O6

Tab. 3-7: Oberbau von Gleis 2, Messkampagne 2, Dürnkrot, Nordbahn

Kategorie	Geschwindigkeitsbereiche [km/h]											Summe
	0-35	35-45	45-55	55-65	65-75	75-85	85-95	95-105	105-115	115-125	125-140	
80-33						1		1	2	1		5
1116	1	1			1		1	3		7		14
2070	1						1		1			3
4020							1	1		1		3
1144		1				1						2
CityJet		1		1	1	6	14	49	50	48	1	171
G-KFZ					2	1	2	8				13
Güter	2	1	5	5	5	11	27	60				116
RailJet						1	1	3	3	69		77
RZ-mix				2			1	9	14	24	1	51
Vectron					2			2		2		6
diverse Lokfahrten	1						1	2		2		6
Summe: 12	5	4	5	8	11	21	49	138	70	154	2	467

Tab. 3-8: Anzahl der Vorbeifahrten je Zugkategorie und Geschwindigkeitsbereich für die Messkampagne 2, Dürnkrot, Nordbahn, km 51,2

Da in diesem Messquerschnitt keine ÖBB-Dauermessstelle eingerichtet ist, erfolgten die Schallmessungen mit einem temporär installierten acramos® mobil Messsystem.

Insgesamt wurden während des Messzeitraumes knapp 500 Züge erfasst. Die Anzahl der gemessenen Zugkategorien sowie deren Geschwindigkeitsverteilungen sind Tab. 3-8 zu entnehmen.

Akustische Oberbauparameter (akustische Schienenrauheit und TDR)

Analog zur Messkampagne 1 wurden auch in gegenständlichem Messquerschnitt bei Dürnkrot die akustischen Oberbauparameter erhoben. Die Messungen der akustischen Schienenrauheit sowie der TDR fanden am 12.09.2018 auf Gleis 2 statt.

Abb. 3-9 zeigt die Ergebnisse der drei Aufnehmer für beide Schienen. Die Grenzkurve gemäß ÖNORM EN ISO 3095 wird in allen Wellenlängenbereichen deutlich unterschritten, der Oberflächenzustand der Schienen kann in seiner Größenordnung jenem in Deutsch-Wagram gleichgesetzt werden, beide Schienen weisen eine sehr glatte Fahrspiegelfläche auf.

Anders verhält es sich bei den Abklingraten. Die Ergebnisse sind in Abb. 3-10 (horizontale TDR) und Abb. 3-11 (vertikale TDR) dargestellt. Bei der horizontalen Abklingrate kommt es im Bereich ≤ 630 Hz bei beiden Schienen zu Unterschreitungen der Grenzwerte gemäß ÖNORM EN ISO 3095. Im Frequenzbereich > 630 Hz werden die Grenzwerte

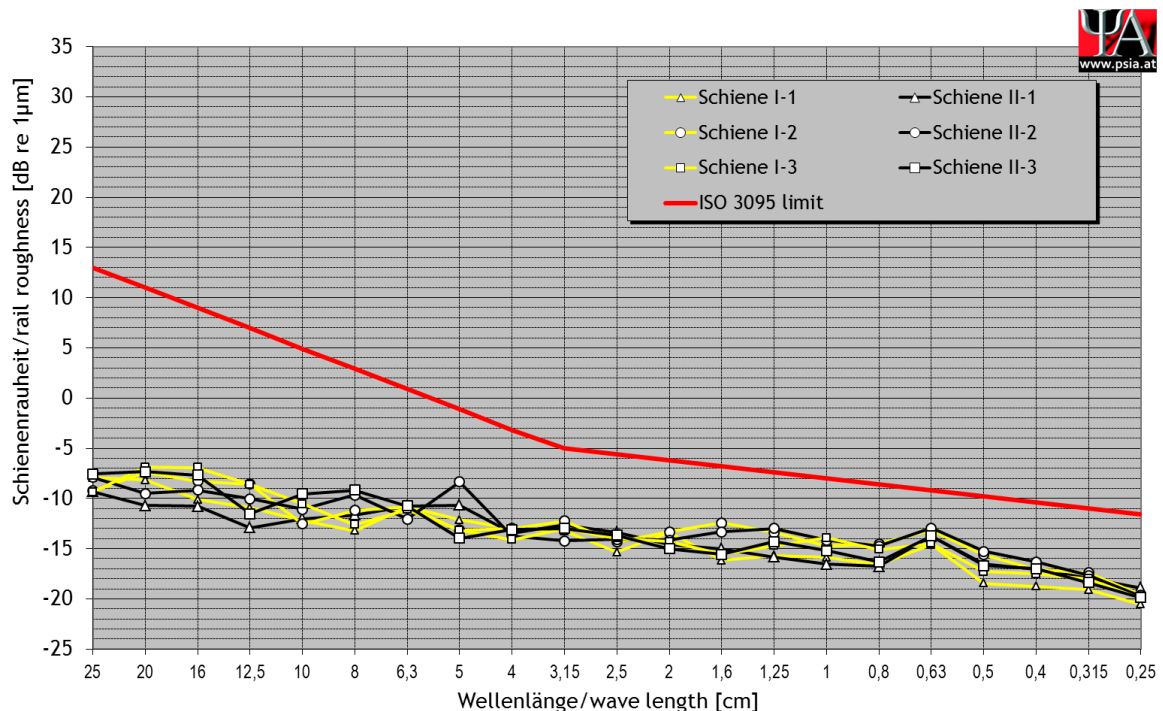


Abb. 3-9: akustische Schienenrauheit, Messkampagne 2, Dürnkrot, Gleis 2, Nordbahn, km 51,2 (Messdurchführung am 12.09.2018)

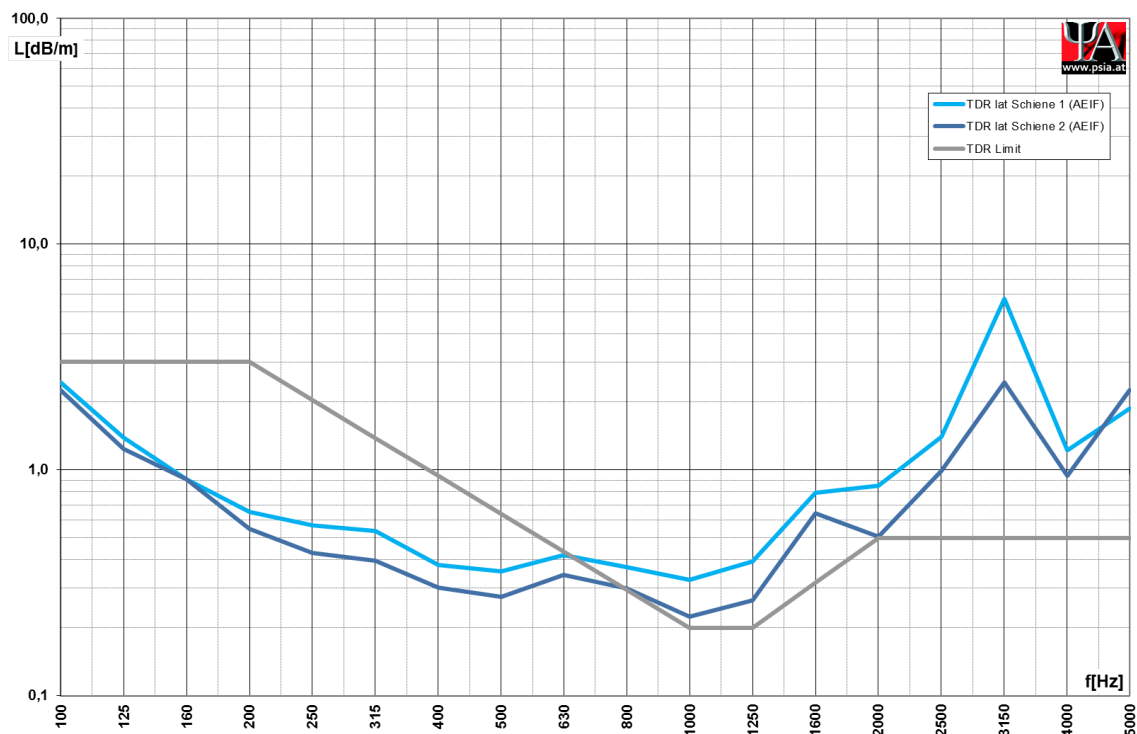


Abb. 3-10: laterale TDR, Messkampagne 2, Dürnkrut Gleis 2, Nordbahn, km 51,2 (Messdurchführung am 12.09.2018)

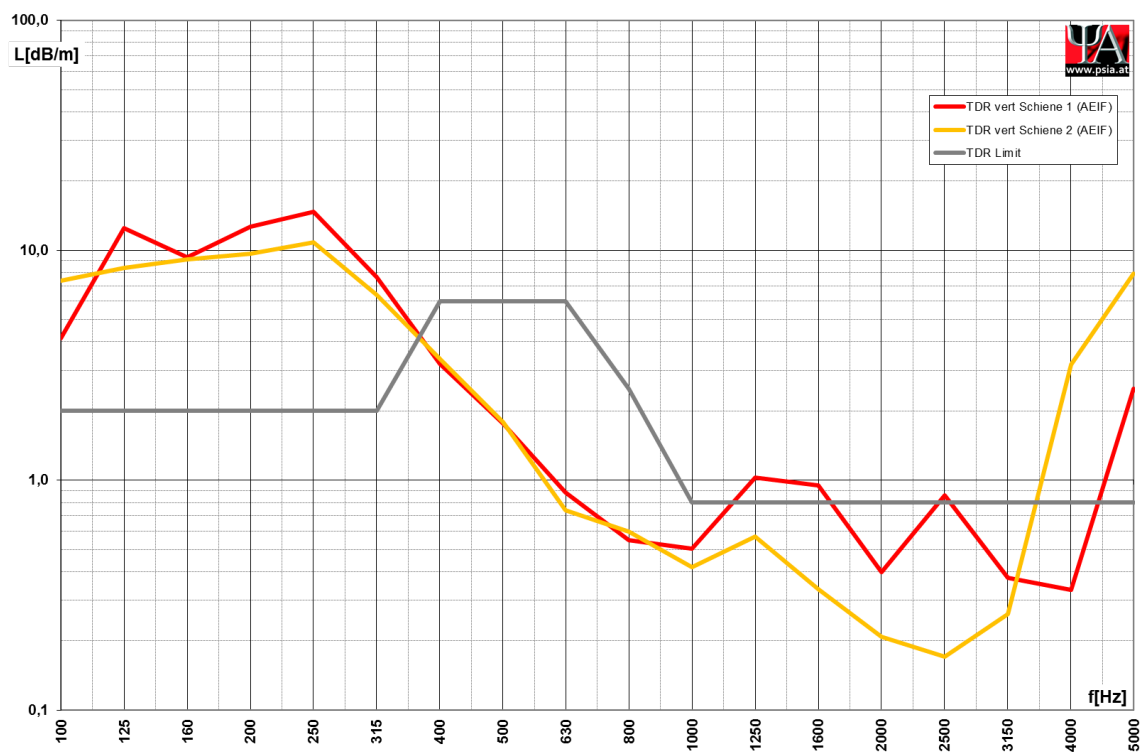


Abb. 3-11: vertikale TDR, Messkampagne 2, Dürnkrut Gleis 2, Nordbahn, km 51,2 (Messdurchführung am 12.09.2018)

eingehalten. Die vertikale Gleisabklingrate beider Schienen liegt im Frequenzbereich zwischen 400 Hz und 4000 Hz unterhalb der Grenzkurve. Im restlichen Frequenzbereich wird das Limit eingehalten.

3.3. Historische Messdaten

Aus den eingangs in Kapitel 3 erwähnten Gründen (Störgeräuschproblematik und Steigerung der statistischen Aussagekraft von Analyseergebnissen), wurde zusätzlich zu den Ergebnissen der beiden Messkampagnen auf historische Messdaten vergangener Projekte zurückgegriffen. In Summe konnten 10 Messkampagnen identifiziert werden, für welche einerseits sowohl zeitnahe Daten über die akustischen Eigenschaften des Oberbaus (akustische Schienenrauheit und TDR), wie auch zugehörigen Rohdaten in Form erfasster Schalldruckzeitverläufe vorhanden waren:

- Nordbahn ÖBB-Dauermessstelle Deutsch-Wagram, km 14,6, Gleis 2 (26.05.2015 bis 31.07.2015), Messsetup gem. ÖNORM EN ISO 3095
- Nordbahn ÖBB-Dauermessstelle Deutsch-Wagram, km 14,6, Gleis 2, (07.05.2013 bis 21.05.2013), Messsetup gem. ÖNORM EN ISO 3095
- Nordbahn acramos[®] mobil Messstelle Deutsch-Wagram, km 14,4, Gleis 2, (06.05.2013 bis 08.06.2013), Messsetup gem. ÖNORM EN ISO 3095
- acramos[®] mobil Messstelle MQ22 NBS Tullnerfeld, km 28,13, Gleis 7 und Gleis 8, (13.08.2012 bis 06.09.2012), Messsetup gem. ÖNORM EN ISO 3095 und ÖNORM S 5026, Hochgeschwindigkeitsstrecke
- Nordbahn ÖBB-Dauermessstelle Deutsch-Wagram, MQ0 km 14,6, Gleis 1 (21.10.2018 bis 07.11.2018), Messsetup gem. ÖNORM EN ISO 3095
- Nordbahn acramos[®] mobil Messstelle Deutsch-Wagram, MQ1 km 14,75, Gleis 1 (21.10.2018 bis 26.10.2018), Messsetup gem. ÖNORM EN ISO 3095
- Nordbahn acramos[®] mobil Messstelle Deutsch-Wagram, MQ2 km 14,92, Gleis 1 (21.10.2018 bis 26.10.2018), Messsetup gem. ÖNORM EN ISO 3095
- Nordbahn acramos[®] mobil Messstelle Deutsch-Wagram, MQ3 km 15,15, Gleis 1 (26.10.2018 bis 07.11.2018), Messsetup gem. ÖNORM EN ISO 3095
- Nordbahn acramos[®] mobil Messstelle Deutsch-Wagram, MQ4 km 15,35, Gleis 1 (26.10.2018 bis 07.11.2018), Messsetup gem. ÖNORM EN ISO 3095
- Nordbahn ÖBB-Dauermessstelle Deutsch-Wagram, km 14,6, Gleis 2, (07.07.2018 bis 19.07.2018), Messsetup gem. ÖNORM EN ISO 3095

4. MESSDATENAUFBEREITUNG UND -VORANALYSE

Bereits erste, manuelle Vergleiche von Zügen gleicher Kategorie mit vergleichbaren Geschwindigkeiten, die jedoch bei verschiedenen Messserien erfasst wurden, ließen zum Teil Unterschiede in den ermittelten Schallemissionen erkennen, die eine Detailanalyse von Einflussgrößen erforderlich machte. Um dabei Unsicherheiten zufolge des jeweils eingesetzten Messsystems möglichst gering zu halten, um eine Nachvollziehbarkeit für nachfolgende Emissionsdatenberechnungen gewährleisten zu können und letztendlich um bei nachfolgenden Auswertungen nicht durch die durch acarmos[®] bereitgestellten Parameter limitiert zu sein, wurden Emissionsgrößen basierend auf erfassten Schalldruckverläufen neu berechnet. Nach einem Überblick über die Datensätze der verschiedenen Messserien in Kap. 4.1 wird im Detail auf die (Neu-)Berechnung in Kap. 4.2 eingegangen. Abschließend werden in Kap. 4.3 die Unsicherheiten der Messungen diskutiert.

4.1. Übersicht aller Messdatensätze

Gemeinsam mit den Messungen der zwei Messkampagnen, die im Rahmen des vorliegenden Projekts durchgeführt wurden, bilden die Messungen der 10 weiteren Kampagnen die Datengrundlage für weitere Analysen. In Tab. 4-1 wird ein Überblick über die Eckdaten aller Messserien gegeben. Die in der ersten Spalte angeführten Kurzbezeichnungen, welche sich jeweils aus einer Abkürzung des Messortes, dem auf ganze Monate gerundeten Messbeginn und im Falle mehrerer identer Kurzbezeichnungen einem zusätzlichen, fortlaufenden Kleinbuchstaben zusammensetzen, werden bei den nachfolgenden Analysen und grafischen Darstellungen stets als Kennung der jeweiligen Messserie bzw. des jeweiligen Messdatensatzes herangezogen. Die Bezeichnungen der Messpunkte (MPs) beziehen sich auf die in Abb. 3-1 eingetragenen Messpunkte. Da für den Messpunkt A zur Prüfung der Qualität der Messdaten zum Teil zwei entlang der Gleisachse um wenige Meter verschobene Mikrofone installiert waren, wurden in deren Bezeichnungen die Zahlen 1 und 2 zur Unterscheidung hinzugefügt. Die Messkonfiguration bei DW1710 umfasst als einzige sowohl zwei Messpunkte A1 und A2, wie auch weitere Messpunkte (MPB, MP1, MP2, MP3 und MP4). Letztere sind in DW1710 in der Querschnittsebene des Messpunkts A1 angeordnet. Bei den Messungen im Tullner Feld (TF1208) waren zwar neben den beiden Messpunkten A und B nach ÖNORM EN ISO 3095 drei der vier Messpunkte für die Messkonfiguration nach ÖNORM S 5026 installiert, jedoch weisen diese eine um 0,3 m zu geringe Höhe gegenüber der

Kurzbezeichnung	Ort	Strecke	Streckenkilometer	Gleis / Anzahl der Streckengleise	Historische Daten	Messpunkte (MPs)	Messstart	Dauer in Tagen	Erfasste Züge
DW1305	Deutsch-Wagram	Nordbahn	14,6	2/2	ja	A1, A2	7. Mai 2013	14,6	498
DW1305a	Deutsch-Wagram	Nordbahn	14,4	2/2	ja	A1	7. Mai 2013	14,6	498
DW1505	Deutsch-Wagram	Nordbahn	14,6	2/2	ja	A1	26. Mai 2015	67,0	4421
DW1710	Deutsch-Wagram	Nordbahn	14,6	2/2	nein	A1, A2, B, 1, 2, 3, 4	6. Okt. 2017	6,5	639
DW1807	Deutsch-Wagram	Nordbahn	14,6	2/2	ja	A1, A2	19. Juli 2018	12,5	1028
DK1807	Dürnkrot	Nordbahn	51,2	2/2	nein	A1, B, 1, 2, 3, 4	7. Juli 2018	12,2	467
TF1208	Tullner Feld	Westbahn	28,13	7/2	ja	A1, B, 1 ^{*)} , 2 ^{*)} , 3 ^{*)}	13. Aug. 2012	24,4	73
DW1811a	Deutsch-Wagram	Nordbahn	14,6	1/2	ja	A1, A2	21. Okt. 2018	17,3	553
DW1811b	Deutsch-Wagram	Nordbahn	14,75	1/2	ja	A1, A2	21. Okt. 2018	4,8	299
DW1811c	Deutsch-Wagram	Nordbahn	14,92	1/2	ja	A1, A2	21. Okt. 2018	4,8	299
DW1811d	Deutsch-Wagram	Nordbahn	15,15	1/2	ja	A1, A2	26. Okt. 2018	12,0	254
DW1811e	Deutsch-Wagram	Nordbahn	15,35	1/2	ja	A1, A2	26. Okt. 2018	12,0	254

^{*)} Messpunkt befindet sich um 0,3 m unterhalb der normgerechten Position gemäß ÖNORM S 5026

Tab. 4-1: Überblick aller, im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts zur Verfügung stehenden Messdaten

Schienenoberkante auf, weshalb die Messpunktbezeichnungen mit einem Stern gekennzeichnet sind. Zur Einschätzung des Umfangs der vorhandenen Messungen werden in Tab. 4-1 zudem die Anzahl der Messtage wie auch der erfassten Züge (exkl. Zugsbegegnungen) ausgewiesen.

Die akustischen Oberbauparameter (akustische Schienenrauheiten und Gleisabklingraten) sind bei alle Messserien möglichst zeitnahe erfasst worden und in Anhang A grafisch für jede Messserie separat dargestellt. In den Legenden der Diagramme sind, sofern konkrete Angaben über das Messdatum vorliegen, die Differenzen zum zeitlichen Mittelpunkt der jeweiligen Messserie ausgewiesen (positive Werte bedeuten, dass die Messung des jeweiligen Oberbauparameter zeitlich nach den akustischen Messungen stattfand). Aufgrund der bei den Messserien DW1305, DW1305a und DK1807 auftretenden Abstände von 2 bis 3 Monaten zu den

Schienenrauheitsmessungen sind geringfügige Abweichungen dieser akustischen Oberbauparameter zum Zeitpunkt der Emissionsmessungen nicht gänzlich auszuschließen, während bei allen anderen Messungen die geringen Abstände von ≤ 1 Monat jedenfalls vernachlässigbare Abweichungen vermuten lassen.

4.2. (Neu-)Berechnung der Terzspektren Schalldruckpegeln

Für die Neuberechnung der die Emissionen von Zügen beschreibenden äquivalenten Schalldruckpegel und deren Terzspektren wurden die von Mikrofonen des Messsystems acramos® mit einer Abtastfrequenz von 32 kHz erfassten Schalldruckzeitverläufe, sowie die Zeitpunkte, in welchen die Achsen den Messquerschnitt des jeweiligen Mikrofons passierten, verwendet. Bei diesen Daten wird trotz der Zeitspanne von 6 Jahren, in welche die verschiedenen Messdatensätze erhoben wurden, davon ausgegangen, dass die Erfassung einheitlich durchgeführt wurde und die Daten damit vergleichbar sind. Die Neuberechnung bietet zudem den Vorteil bereits etwaige Zwischenergebnisse der Berechnungen analysieren zu können, die Berechnung oder einzelne Berechnungsschritte rasch variieren und deren Auswirkung besser beurteilen zu können, sowie von den bereitgestellten Parametern abweichende Pegelgrößen bestimmen zu können.

Im Detail wurden verschiedene Emissionsgrößen im Wesentlichen durch Variation folgender Berechnungsdetails bestimmt:

- Frequenzbewertung (unbewertet und A-bewertet)
- der energetischen Mittelung zugrunde liegende Zeitbereich
- mathematische Berechnung der Terzspektren

Zur Bestimmung des Mittelungszeitbereichs wurden drei verschiedene Ansätze gewählt (nachfolgend durch entsprechende Indizes in den Pegelbezeichnungen unterschieden):

- Zeit zwischen erster und letzter Achse (Index ax)
- einfache Nachbildung von Pufferüberhängen durch zugstypunabhängigen Überhang von 2,5 m vor der ersten bzw. nach der letzten Achse (Index buf)
- Ausdehnung des Zeitbereichs, bis der (über 50 ms kurzzeitgemittelte) Zeitverlauf des A-bewerteten Schalldruckpegels um 10 dB gegenüber den Pufferpositionen abfällt (Index $-10dB$)

Jedoch bestehen Einschränkungen bei den letzten beiden Ansätzen. So starteten die akustischen Aufzeichnungen bei den drei Messserien DW1305, DW1305a und TF1208

häufig nicht früh genug, um eine vollständige Betrachtung der Pufferüberhänge zu erlauben: ein überwiegender Teil der Vorbeifahrten dieser Messserien weist am Beginn der Messungen Fehlzeiten im Bereich von etwa 1 bis 4 % der Zeitspanne zwischen erster und letzter Achse auf. Da davon ausgegangen wird, dass im Bereich der Pufferüberhänge der Schalldruckpegel keine abrupten Pegelabnahmen aufweisen wird, sind nur geringe Fehler < 0,1 dB zu erwarten (zum Vergleich beträgt die Differenz bei einer Pegelsenkung um 3 dB bei 4 % der Vorbeifahrtszeit rund 0,09 dB). Bei Betrachtung der erweiterten Zeitbereiche bis zu einem Abfall von 10 dB gegenüber den A-bewerteten Pegelwerten bei den nachgebildeten Pufferpositionen sind ebenfalls hauptsächlich die drei erwähnten Messserien (DW1305, DW1305a und TF1208) von Auswirkungen durch späte Einschaltzeitpunkte der Messwerterfassung betroffen, während bei den anderen Messserien nur bei einem sehr geringen Anteil der Vorbeifahrten (< 3 %) die Aufzeichnungen nicht ausreichen um die Pegeldifferenzen von -10 dB zu erreichen. Die erwarteten Effekte bei den drei Messserien können nur sehr grob abgeschätzt werden: am Zugende zeigt sich, dass sich bei einem großen Teil der Vorbeifahrten (betrachtet über alle Messserien meist zwischen 60 % und 80 %) die Zeitdifferenzen zwischen Puffer und dem Erreichen der Pegeldifferenz von -10 dB unterhalb von 15 % der Zeitdifferenzen zwischen den Pufferpositionen bewegen. Wird auch am Beginn von einer ähnlichen Zeitdauer bis zum Erreichen einer Pegeldifferenz von -10 dB ausgegangen und wird weiters eine vereinfachte Berechnung durchgeführt, bei welcher das Fehlen eines 15 %-igen Zeitbereichs einer Vorbeifahrt und eine lineare Pegelabnahme innerhalb dieses Zeitbereichs angenommen wird, so ergibt sich als grobe Orientierung eine Überschätzung des äquivalenten Dauerschallpegels von ca. 0,4 dB. Aufgrund derartiger Größenordnungen werden die drei Messserien bei Interpretation von Pegeln mit Mittelungsdauer bis zu den -10 dB Pegelabfällen entweder nicht einbezogen oder entsprechend hingewiesen. Als Folge des erwähnt geringen Anteils an Fahrten in den verbleibenden Messserien, bei welchen innerhalb der Aufzeichnungen Pegelabsenkungen von 10 dB am Zuganfang und/oder –ende nicht erreicht werden, wird der Effekt bei nachfolgenden Analysen, welche ihrerseits stets das mittlere Verhalten von mehreren Zügen (in der Regel ≥ 10) beurteilen, hingegen als vernachlässigbar eingestuft.

Sämtliche Berechnungen wurden mit MATLAB R2018b (9.5.0.1033004 Update 2) durchgeführt, während die grafischen Ausgaben zum Teil auch mit der Version R2019a (9.6.0.1072779) erstellt wurden. Zur Bildung der Terzspektren wurden dabei 2 verschiedene Berechnungsansätze verfolgt. Zum einen wurde der MATLAB-Befehl

poctave genutzt, welcher laut Auskunft von Mathworks Filterbänke verwendet, welche die mittlere Energie in Oktav- oder Terzbändern gemäß ANSI S1.11 über die Spezifikation von analogen und digitalen Filtern für Oktaven oder Bruchteilen von Oktaven aus dem Jahr 2004 [14] berechnet. Alternativ wurden Schätzungen des Leistungsdichtespektrums nach der Welch-Methode vorgenommen und anschließend Terzbandpegel durch energetische Summation gebildet. Die Bandpegel wiesen eine geringe, jedoch merkbare Abhängigkeit der Ergebnisse von der konkreten Wahl der Berechnungsparameter (beispielsweise für die Fensterung) auf und zeigte in der Regel Differenzen im Bereich von mehreren Zehntel Dezibel zu der filterbankbasierten Spektrenbildung. Aufgrund dessen wurde für die weiteren Analysen der Spektrenberechnung mittels Filterbänken der Vorzug gegeben, wenngleich für den ANSI-Standard S1.11 seit dem Jahr 2014 eine neuere Version verfügbar ist.

4.3. Diskussion möglicher Messunsicherheiten

Eine nachträgliche Abschätzung von Messabweichungen ist ohne Vorliegen von Referenzmessungen grundsätzlich nicht möglich, sodass letztendlich nur auf die Genauigkeitsangaben der jeweils verwendeten Messgeräte bzw. Messkomponenten vertraut werden kann/muss. Allerdings sind durch Genauigkeitsangaben von Messgeräten zufällige oder systematische Messabweichungen oftmals nicht abgedeckt, welche durch gänzlich unbekannte Einflüsse oder auch Unzulänglichkeiten bei der Messdurchführung begründet sind. Infolgedessen werden im Folgenden vorhandene Messergebnisse im Rahmen der verfügbaren Möglichkeiten durch Vergleich zweier Messpunkte, sowie durch Hörproben hinsichtlich möglicher Messabweichungen und -unsicherheiten als Grundlage für nachfolgende Auswertungen diskutiert.

4.3.1. Vergleich der Messpunkte A1 und A2

Bei 8 der vorliegenden 12 Messserien wurden im Messpunkt A die Schalldrücke mit zwei Mikrofonen erfasst, welche entlang der Gleisachse zueinander einen Abstand von 3,25 m bis 3,7 m aufweisen. Aufgrund dieses geringen Abstandes können Effekte in den Emissionen durch Geschwindigkeitsänderungen des Zuges vernachlässigt werden. Durch den Messabstand zur Gleisachse von 7,5 m gegenüber dem Abstand zwischen den beiden Mikrofonen von max. 3,7 m werden auch etwaige lokale akustische Änderungen im Oberbau entlang der Gleisachse aufgrund der Schallausbreitung in beiden Messpunkten bei den üblichen, geringen horizontalen Richtwirkungen rund um 90° im Allgemeinen nur geringe Effekte zeigen. Zum Vergleich beträgt der relative

Wegunterschied für Quellpunkte auf der Gleisachse zwischen den Messpunkten A1 und A2 max. 11,5 % (außerhalb dieses Bereichs nimmt der relative Wegunterschied zwar noch weiter bis zu ca. 28 % zu, jedoch verlieren Quellen mit zunehmender Entfernung gegenüber Quellen nahe den Querschnitten von A1 und A2 an Bedeutung). Auch können voneinander stark divergierende Bodendämpfungen geringfügige Unterschiede in den verschiedenen Messpunkten bewirken. Jedoch wird davon ausgegangen, dass bei der Messkonfiguration und -durchführung zum Zweck der Vergleichbarkeit der Ergebnisse auch auf messtechnisch ausreichend ähnliche Rahmenbedingungen geachtet wurde. Unter diesen Bedingungen sind jene Bedingungen zu verstehen, die Auswirkungen auf die Schallentstehung haben (beispielsweise Gleisabklingrate oder akustische Schienenrauheit in der unmittelbaren Umgebung der Messquerschnitte), die die Schallausbreitung bis zur Mikrofonskapsel beeinflussen (beispielsweise Mikrofonhalterung, Windschutz oder Bodendämpfungseigenschaften), wie auch Einflüsse auf das Messgerät selbst (wie Temperatur oder EMV). Infolge der geringen erwarteten Unterschiede der Schallsituationen in beiden Messpunkten erscheint eine direkte Gegenüberstellung von Emissionsspektren als Basis für die nachfolgende Diskussion der Messunsicherheiten legitim.

Konkret werden zum Vergleich die Terzspektren des äquivalenten Dauerschallpegels $L_{eq,buf}$ herangezogen. Als Mittelungsdauer wurde jeweils die Vorbeifahrtszeit von Puffer zu Puffer des Zuges (bei vereinfachter Nachbildung der Pufferpositionen) gewählt, um wegen der in Kap. 4.2 beschriebenen Problematik von Einschaltzeitpunkten mit geringer Vorlaufzeit Beeinflussungen (wenngleich bei vergleichsweise wenigen Fahrten bei den betrachteten Messserien) zu vermeiden. In Abb. 4-1 sind exemplarisch jeweils die Differenzterzspektren aller Vorbeifahrten der Messserien von DW1305, DW1710 und DW1811a, sowie die Mediane und Interquartilabstände in den einzelnen Terzbändern dargestellt. Die spektralen Unterschiede aller Messserien mit zwei Messpunkten A1 und A2 sind in Anhang B angeführt.

Anhand der Diagramme können folgende Aspekte wie folgt interpretiert werden:

- Mediane der spektralen Unterschiede lassen unter der Annahme gleicher messtechnischer Rahmenbedingungen und vernachlässigbarer Differenzen in den Schallsituationen bei den beiden Messpunkten den Schluss zu, dass Werte der Mediane ungleich Null nur in Unterschieden der beiden Aufzeichnungspfade (jeweils bestehend aus allen Komponenten, die an der Erfassung und der Messergebnisbildung beteiligt sind) begründet sein können. Dabei ist hervorzuheben,

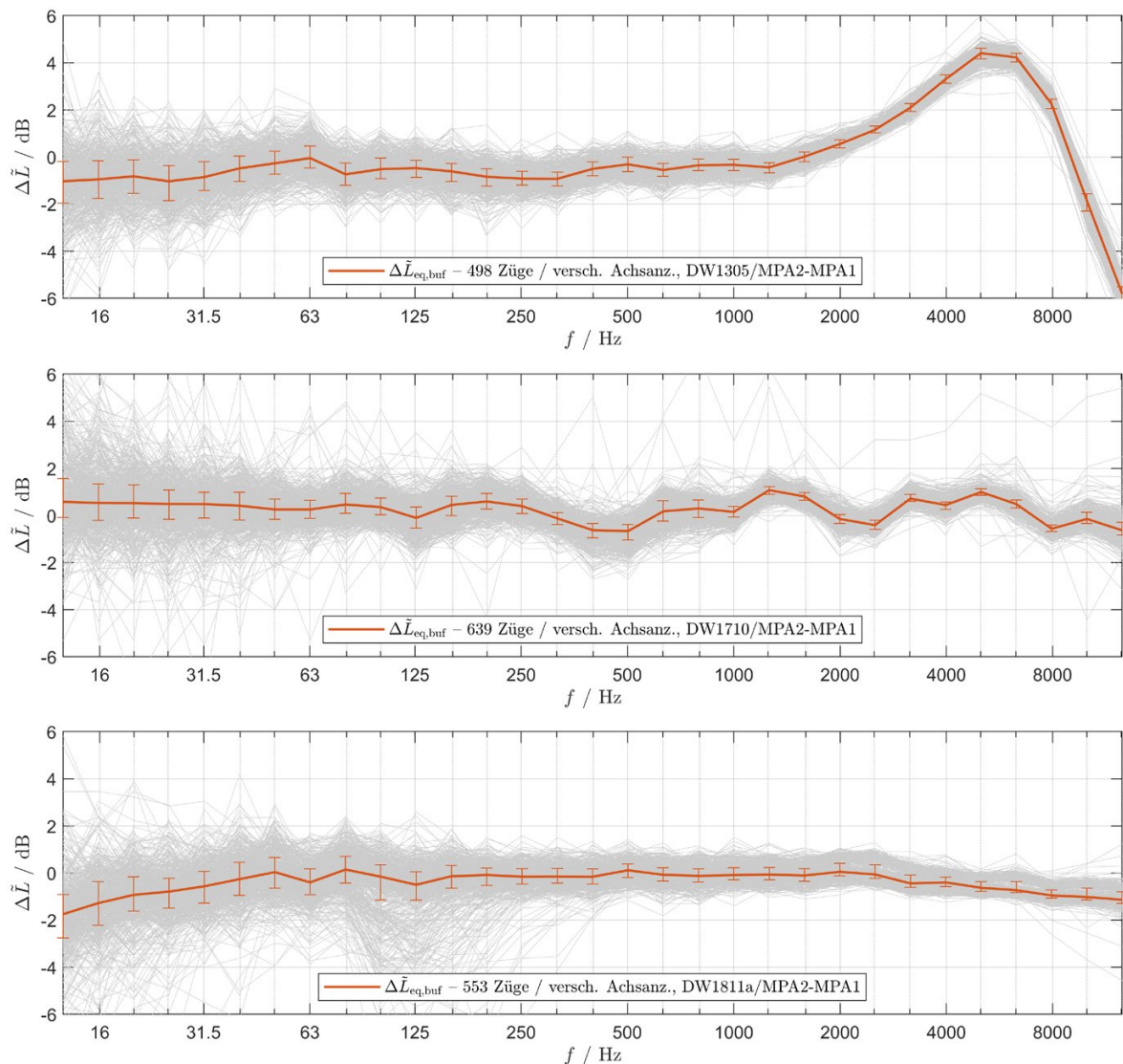


Abb. 4-1: spektrale Unterschiede zwischen den von Puffer zu Puffer der passierenden Züge energetisch gemittelten Dauerschallpegeln $L_{eq,buf}$, welche in den Messpunkten A1 und A2 der Messserien DW1305 (oben), DW1710 (Mitte) und DW1811a (unten) erfasst wurden, inklusive Darstellung der Medianwerte $\bar{L}_{eq,buf}$ und der Interquartilabstände in den Terzbändern

dass die Mediane keine Rückschlüsse auf die absolute Genauigkeit der Messergebnisse erlauben, sondern nur vorhandene Unterschiede zwischen den beiden Aufzeichnungspfaden widerspiegeln. So bilden sich etwa gleichgerichtete Abweichungen bei den Messungen beider Punkte in den Medianen nicht ab, sodass letztere lediglich als untere Schranke für die Summenabweichung zu verstehen sind. Im günstigsten Fall werden durch die Aufzeichnungspfade jeweils die halben Pegeldifferenzen mit gegenläufigen Vorzeichen verursacht, während für den Fall, dass zumindest durch einen Pfad die Schallsituation mit deutlich höherer Genauigkeit

als durch den anderen erfasst wird, einem Kanal annähernd die gesamten Pegeldifferenzen zuzurechnen ist. Welcher der beiden Pfade welche Anteile tatsächlich aufweist, kann anhand der Pegeldifferenzen jedoch nicht rückgeschlossen werden, weshalb entweder den Messergebnissen beider Kanäle entsprechend hohe Messunsicherheiten (in der Größenordnung mittlerer Bandpegeldifferenzen) zugeschrieben, oder bei zu großen Bandpegelunterschieden die Messung beider Aufzeichnungspfade verworfen werden sollten.

Wie Abb. 4-1 und Anhang B zu entnehmen ist, sind bei einigen Messserien (DW1305, DW1811b, DW1811d) gerade bei höherfrequenten Terzbändern mit Mittenfrequenzen von einigen Kilohertz hohe Unterschiede zwischen 2 und 5 dB vorhanden. Aber auch bei anderen Messserien und/oder Frequenzbereichen treten zum Teile Mediane in den Bandpegeldifferenzen im Bereich von bis zu ± 1 dB auf, wobei sich nahezu keine Systematik erkennen lässt. Lediglich Differenzspektren bei den jeweils zeitlich knapp aufeinanderfolgenden, jedoch an unterschiedlichen Messquerschnitten durchgeführten Messserien DW1811b und DW1811d, sowie DW1811c und DW1811e ähneln einander stark. Dies kann als Indiz gewertet werden, dass die gleiche Messkonfiguration bzw. -hardware verwendet wurde und diese die Unterschiede verursacht.

Wäre die Annahme einer ausreichenden Ähnlichkeit der messtechnischen Rahmenbedingungen bei beiden Messpunkten nicht gerechtfertigt, so könnten beobachtete Unterschiede auch in den Terzbandpegeln bzw. zumindest Anteile der Unterschiede durch etwaige unterschiedliche Bedingungen wie der Bodendämpfung (systematisch) hervorgerufen werden. Inwieweit ein solcher Einfluss tatsächlich vorhanden war, kann zwar anhand der zur Verfügung stehenden Daten nicht abgeschätzt werden, die erwähnten Ähnlichkeiten der Bandpegeldifferenzen bei den Messserien DW1811b bis DW1811e lassen einen signifikanten Einfluss durch geänderte, das Messsystem betreffende Rahmenbedingungen, insbesondere bei größeren Bandpegeldifferenzen jedoch unwahrscheinlich erscheinen.

- Die Variationen in den Pegeldifferenzen sind (erneut unter der Annahme vergleichbarer Rahmenbedingungen in beiden Messpunkten) grundsätzlich den die Messunsicherheiten des Messsystems mitbestimmenden, zufälligen Messabweichungen zuzuschreiben (eine Ausnahme bilden beispielsweise grobe Messfehler). Verantwortlich für diese Art der Messabweichungen sind im Allgemeinen nicht kontrollier- und erfassbare Einflussfaktoren wie beispielsweise nicht

beherrschbare Einflüsse der Messgeräte oder nicht beherrschbare Änderungen der Einflussgrößen.

Die in jedem Terzband dargestellten Interquartilabstände, welche 50 % der Werte umfassen und robust gegenüber Ausreißern sind, kennzeichnen diese Schwankungsbreiten der Bandpegeldifferenzen. Alternativ können auch empirische Standardabweichungen herangezogen werden, welche bei vorliegenden Spektren die absoluten Differenzen zwischen Medianen und unteren bzw. oberen Quartilen in der Regel deutlich überschreiten (phasenweise um mehr als 100 %). Da sich die Standardabweichungen jedoch aus den Schwankungen zweier Messgrößen zusammensetzt und daher im Sinne der messtechnischen Standardunsicherheit nicht direkt auf die einzelnen Messgrößen übertragbar sind (vgl. Diskussion der Zuordenbarkeit zu Aufzeichnungspfaden im vorigen Punkt), wurde der Darstellung der Interquartilabstände der Vorzug gegeben.

Bei allen Messserien ist eine Abnahme der Schwankungsbreiten anhand der Interquartilabstände, aber auch anhand der jeweils dargestellten Schar an Differenzspektren mit zunehmender Frequenz (bis zum 10 kHz oder 12,5 kHz Terzband) zu erkennen, wenngleich auch frequenzunabhängige Unterschiede im Ausmaß der Streuung zwischen den Messserien zu beobachten sind (vgl. Schwankungsbreiten der in Anhang B dargestellten Messserien DW1807 und DW1811b). Während im unteren Frequenzbereich die Interquartilabstände häufig Werte > 1 dB annehmen, betragen sie in den oberen Terzbändern oft nur wenige Zehntel Dezibel. Diese systematisch erscheinende Tendenz kann durch verschiedenste Effekte begründet sein – angefangen von den allgemeinen frequenzabhängigen Ausbreitungseigenschaften von Schall über mögliche frequenzabhängige Unterschiede der Genauigkeiten innerhalb der zulässigen Messunsicherheiten des Messgeräts bis hin zu frequenzabhängigen Effekten bei der Berechnung von Bandmittelungspegeln bei zeitlich begrenzten Signalen –, weshalb auf eine Detailanalyse im Rahmen des vorliegenden Projektes verzichtet wird.

Im Hinblick auf die nachfolgenden Datenauswertungen, welche sich auf die Terzbänder von 50 Hz bis 10 kHz beschränken, kann jedoch als Erkenntnis festgehalten werden, dass die zufälligen Messabweichungen mit Zunahme der Frequenz abnehmen und dass Unterschiede zwischen den Messserien bestehen. Eine Interpretation hinsichtlich der Schwankungen in den einzelnen Aufzeichnungspfaden ist, wie schon bei den Medianen aufgrund der Unkenntnis über

die konkrete Aufteilung der Summenabweichungen auf die Messungen, in den beiden Punkten nicht sinnvoll möglich. Zumindest deuten die gegenüber den Schwankungsbreiten der Kurvenscharen deutlich geringen Interquartilabstände darauf hin, dass meist eine Konzentration um die Mediane besteht. Demzufolge kann – wie bei zufälligen Messabweichungen üblich – durch eine entsprechend große Anzahl an erfassten Vorbeifahrten und Betrachtung von Mittelungsgrößen Streuungen entgegengewirkt werden.

- Bei einigen Messserien können anhand der Kurvenscharen auffällige Spektren identifiziert werden, welche im Frequenzbereich von 50 Hz bis 10 kHz deutlich von den Medianwerten und den üblichen Streuungen abweichen, Hervorzuheben sind dabei
 - die Messserie DW1710 in den Terzbänder ≥ 400 Hz (lediglich 1-2 Spektren),
 - die Messserie DW1807 in den Terzbändern ≥ 8 kHz,
 - die Messserie DW1811d in den Terzbänder ≥ 250 Hz (lediglich ein Spektrum mit massiv erhöhten Pegeldifferenzen) und
 - die Messserie DW1811a in den Terzbändern von 80 Hz bis 250 Hz (in etwas verminderter Form scheinen ähnlich auffällige Spektren in geringerer Anzahl auch bei den Messserien DW1811b bis DW1811e aufzutreten, auf die aber nicht gesondert eingegangen wird).

Mithilfe einer manuellen Analyse der Spektrogramme sowie durch Hörproben der betroffenen Vorbeifahrtsgeräusche konnten bei den ersten drei Messserien als Gründe für die Auffälligkeiten durch den Zug abgegebene Pfeifsignale (DW1710), Zirpgeräusche von Grillen aus der Umgebung der Mikrofone (DW1807) und – da zwei stark differierende Vorbeifahrtsgeräusche abgespeichert worden sind – ein offensichtlicher Fehler in der Signalaufzeichnung (DW1811d) ermittelt werden. Für die zahlreichen auffälligen Differenzspektren in der letztgenannten Messserie DW1811a ist durchwegs ein phasenweise auftretendes Störgeräusch verantwortlich, welches von der Klangcharakteristik am ehesten als tonhaltiges Windgeräusch mit geringfügig variierender Frequenz zu beschreiben ist. Eine exemplarische Gegenüberstellung zweier Spektrogramme von den in den Messpunkten A1 und A2 erfassten Vorbeifahrtsgeräuschen einer Zugsvorbeifahrt verdeutlicht das Störgeräusch und dessen sich ständig verändernde Frequenz (siehe Abb. 4-2). Zudem lässt sich erkennen, dass das Geräusch nach Ende der Zugsfahrt nicht abnimmt und daher der Zug als Schallquelle ausgeschlossen werden kann. Da diese

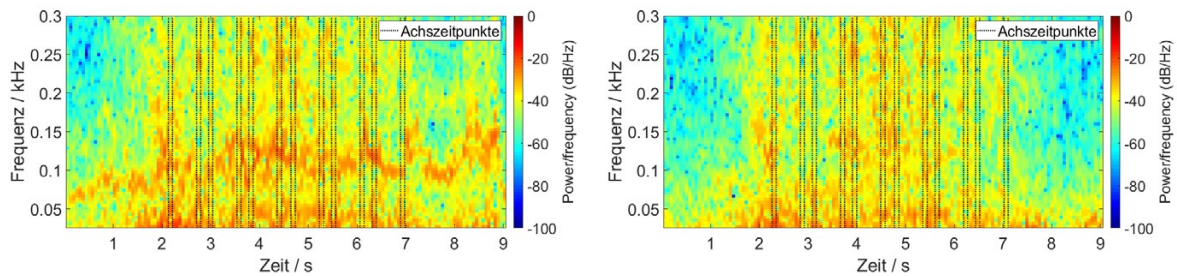


Abb. 4-2: Exemplarische Gegenüberstellung der Spektrogramme der Vorbeifahrtsgeräusche einer Zugsvorbeifahrt (Schnellbahn der Baureihe 4020 mit einer Geschwindigkeit von 100,2 km/h), welche in den Messpunkten A1 (links) und A2 (rechts) erfasst wurden – während bei A2 kein Störgeräusch vorhanden war, tritt bei A1 während der gesamten Messzeit ein tonhaltiges Störgeräusch mit variierender Frequenz im Bereich zwischen 60 Hz und 170 Hz auf

Geräusche bei den stichprobenhaften Hörproben in der Regel nur bei einem der beiden Messmikrofone auftrat, da die auffälligen Spektren bei den betroffenen Messserien fast ausschließlich einseitig abweichen und da davon ausgegangen werden muss, dass bei beiden Mikrofone aufgrund der geringen Distanz und dem Fehlen an beeinflussenden Objekten in der unmittelbaren Umgebung der Messpunkte vergleichbaren Luftströmungen vorhanden waren, liegt die Vermutung nahe, dass eine Komponente in der Messkette für die Entstehung dieses Störsignals verantwortlich ist.

4.3.2. Hörproben

Neben dem Vergleich der beiden Messpunkte wurden bei den Messserien stichprobenhafte Hörproben der Vorbeifahrten durchgeführt, bei welchen im Wesentlichen zwei verschiedene Arten von identifizierten Störgeräuschen aufgrund ihrer Auftretshäufigkeit in einzelnen Messserien bzw. Messpunkten zu erwähnen sind.

Stoßgeräusche

Abgesehen von erwartbaren, sporadisch auftretenden Flachstellengeräuschen, konnte bei der Dauermessstelle in Deutsch-Wagram (km 14,6) auf Gleis 2 beginnend mit der Messserie im Jahr 2015 (DW1505) zum Teil leise, bei den späteren Messserien in den Jahren 2017 (DW1710) und 2018 (DW1807) bereits deutlich lautere Störgeräusche insbesondere bei leisen (Personen)Zügen wahrgenommen werden, deren Klangcharakter einen Schienenstoß als Ursache vermuten lässt. Zwar ist das Gleis bei der Messstelle lückenlos verschweißt, jedoch dürfte eine nahegelegene Schweißstelle (in aufsteigender Kilometrierung) nach dem Messquerschnitt infolge Verschleißes Schlaggeräusche bei Überfahrt erzeugen. Während bei der Messserie DW1505 diese Geräusche lediglich bei Personenzügen mit geringeren Geschwindigkeiten (< 100 km/h) mit schwacher Intensität in

den Aufzeichnungen im einzig vorhandenen Messpunkt A1 identifiziert werden konnte, sind bei den beiden späteren Messserien – vermutlich als Folge eines fortschreitenden Verschleißes – die Stoßgeräusche wesentlich klarer und bei annähernd allen Personenzügen auch mit höheren Geschwindigkeiten (beispielsweise bei Railjet-Hochgeschwindigkeitszügen mit 120 km/h) in den Aufnahmen von zumindest jeweils einem der beiden Messpunkte A1 und A2 zu vernehmen. Bei Zügen mit höherem Grundrollgeräusch, wie beispielsweise bei noch nicht umgerüsteten Güterzügen, konnten hingegen in keinem der beiden Messpunkte Stoßgeräusche erkannt werden.

In der Messserie DW1710 waren vor allem in Messpunkt A1 und bei der Messserie DW1807 vor allem in Messpunkt A2 erfasste Schallemissionen leiser Züge von den Schlaggeräuschen betroffen, wobei es sich bei diesen beiden Punkten physisch um die gleichen Messpunkt handelt und lediglich eine messsysteminterne Konfigurationsänderung zu unterschiedlichen Bezeichnungen führte. Die ungleiche Wahrnehmbarkeit zwischen den beiden Messpunkten ist vermutlich nicht alleinige Folge der (erwähnten) geringen Wegunterschiede, sondern wird möglicherweise durch eine horizontale Richtwirkung der Schallabstrahlung verstärkt.

In der Messserie DW1710 waren zusätzlich die Messpunkte 1, 2 und 3 gemäß ÖNORM S 5026 installiert. Aufgrund der größeren Abstände zur Gleisachse waren in allen drei Messpunkten die Schlaggeräusche bei Zügen mit geringem Grundrollgeräusch dominanter wahrzunehmen, als im Messpunkt A1. Bei Zügen mit hohem Rollgeräusch waren aber auch bei den drei erweiterten Messpunkten keine Stoßgeräusche wahrnehmbar.

Frequenzspektren von sprung- oder impulsartigen Signalen besitzen grundsätzlich einen breitbandigen Charakter, weshalb auch bei vorliegenden Stoßgeräuschen von einer solchen spektralen Verteilung auszugehen ist. Eine allgemeine qualitative Abschätzung der Effekte von Stoßgeräuschen auf Vorbeifahrtsspektren gestaltet sich wegen der Abhängigkeit von der Höhe und der spektralen Verteilung des Grundrollgeräusches und wegen der zeitlichen Verflechtung mit den Stoßgeräuschen äußerst komplex, weshalb im Rahmen des vorliegenden Projekts davon abgesehen wird. Im Hinblick auf die nachfolgenden Auswertungen werden für die beiden Messserien DW1710 und DW1807 bei Betrachtung des Messpunkts A stets jene Messpunkte verwendet, welche laut den Hörproben in geringerem Maß von den Stoßgeräuschen betroffen sind. Hinsichtlich des nach ÖNORM S 5026 erweiterten Messsetups der Messserie DW1710 sind zumindest bei etwaigen Interpretationen absoluter Pegelwerte von leisen Zügen mögliche Überschätzungen der Vorbeifahrtspegel zu beachten.

Windgeräuschähnliche Störgeräusche

Neben den bereits erwähnten windgeräuschähnlichen Störgeräuschen bei Aufzeichnungen im Messpunkt A1 der Messserie DW1811a, konnten durch Hörproben derartige, phasenweise auftretende Störgeräuschgeräusche sowohl bei der Messserie DW1710 (ausschließlich in Messpunkt 3), als auch bei der Messserie DK1810 (ausschließlich in Messpunkt 2) identifiziert werden. Während bei erster Messserie die Störgeräusche mit höheren Intensitäten als bei DW1811a zu verzeichnen und damit auch bei lauten Güterzügen (zum Teil auch deutlich) wahrzunehmen waren, lagen die Intensitäten der Störgeräusche bei der Messserie DW1810 subjektiv im Mittel nur geringfügig über jenen von DW1811a, sodass diese in einigen Fällen auch bei Güterzügen erkennbar waren.

Im Hinblick auf eine Detailbeschreibung und einer Diskussion zur Eingrenzung der Ursachen wird auf die Ausführungen zu DW1811a in Kap. 4.3.2 verwiesen. Für eine

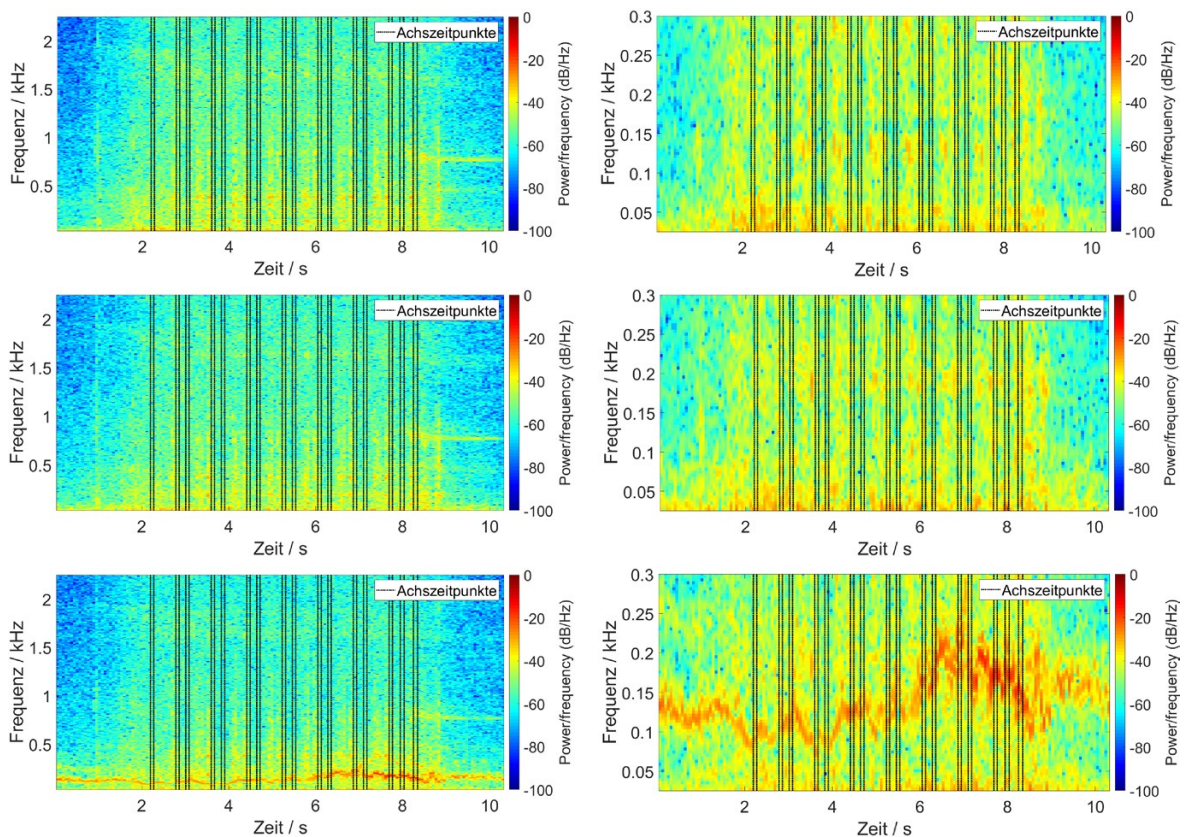


Abb. 4-3: Exemplarische Gegenüberstellung der Spektrogramme der Vorbeifahrtsgeräusche einer Zugvorbeifahrt (Railjet mit einer Geschwindigkeit von 118,2 km/h) der Messserie DW1710, welche in den Messpunkten 1 (oben), 2 (Mitte) und 3 (unten) gemäß ÖNORM S 5026 erfasst wurden (Übersichtsdarstellung bis 2,25 kHz in linker Spalte und Detaildarstellung bis 300 Hz in rechter Spalte) – lediglich bei Messpunkt 3 trat während der gesamten Messzeit ein deutlich wahrnehmbares, tonhaltiges Störgeräusch mit variierender Frequenz im Bereich zwischen 100 Hz und 250 Hz auf

quantitative Einschätzung der Größenordnung der Effekte sind in Abb. 4-4 exemplarisch die Mediane $\tilde{L}_{eq,buf}$ und die Interquartilabstände der Terzbandpegel für Vorbeifahrten von 32-achsigen Railjets mit maximalen Geschwindigkeitsänderungen von 5 km/h zwischen erster und letzter Achse, sowie maximalen Beschleunigungen oder Verzögerungen von $0,1 \text{ m/s}^2$ dargestellt. Zur Vermeidung von Einflüssen durch verschiedene Geschwindigkeiten wurden dabei die Vorbeifahrten separat in die Geschwindigkeitsklassen 100 km/h ($95 \text{ km/h} \leq \overline{v_{\text{Achsen}}} < 105 \text{ km/h}$, oberes Diagramm), 110 km/h ($105 \text{ km/h} \leq \overline{v_{\text{Achsen}}} < 115 \text{ km/h}$, mittleres Diagramm) und 120 km/h ($115 \text{ km/h} \leq \overline{v_{\text{Achsen}}} < 125 \text{ km/h}$, unteres Diagramm) unterteilt. Bei allen drei

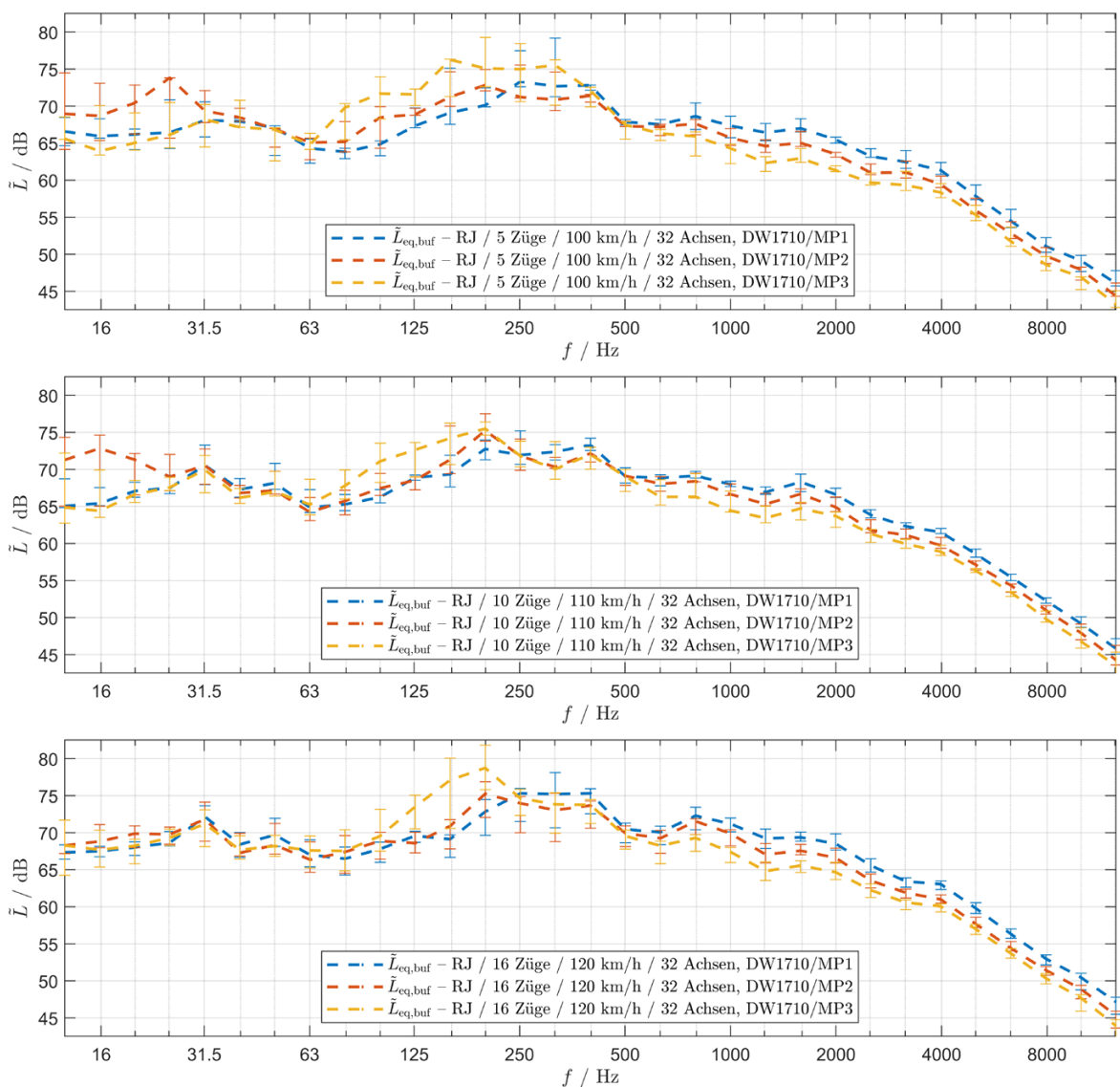


Abb. 4-4: Exemplarische Gegenüberstellung der Mediane $\tilde{L}_{eq,buf}$ und Interquartilabstände von energetisch gemittelten Dauerschallpegeln der Vorbeifahrten von 32-achsigen Railjets mit Geschwindigkeiten von 100 km/h (oben), 110 km/h (Mitte) und 120 km/h (unten), welche in den Messpunkten 1, 2 und 3 der Messserien DW1710 erfasst wurden

Geschwindigkeitsklassen ist im Bereich der Terzbänder von 80 Hz bis ca. 315 Hz bei Messpunkt 3 eine Erhöhung der Mediane um mehrere Dezibel festzustellen.

4.3.3. Zusammenfassung

Entsprechend der obigen Ausführungen ist festhalten, dass durch das Vorhandensein von den zwei Messpunkten A1 und A2 bei 8 der 12 Messserien die Möglichkeit besteht, die erfassten Vorbeifahrtgeräusche spektral zu vergleichen. Dabei konnten Indizien gefunden werden, dass die Messergebnisse zum Teil mit größeren Messunsicherheiten behaftet sein können. Während den zufälligen Anteilen durch entsprechend großen Messumfang begegnet werden kann, können (unbekannte) systematische Abweichungen bei vorliegender Daten- und Kenntnislage nicht korrigiert werden. Darüber hinaus wurden durch Hörproben und mittels der Differenzspektren phasenweise und in Abhängigkeit der Höhe der Grundrollgeräusche wahrnehmbare Störgeräusche erkannt.

Bei den weiteren 4 Messserien sind der Messpunkt A, sowie bei den Messserien mit zusätzlicher Messkonfiguration nach ÖNORM S 5026 die weiteren Messpunkte (1, 2, 3 und 4), nur einfach ausgeführt, wodurch keine Möglichkeit für die beschriebene differenzspektrenbasierte Prüfung besteht. Folge dessen werden für die weiteren Auswertungen bei allen Messserien einheitlich die vorhandenen Messergebnisse herangezogen (im Falle der Messserien mit Messpunkten A1 und A2 ohne weitere Korrekturen). Bei der Interpretation absoluter Pegelwerte, wie dies bei der Untersuchung des Zusammenhangs der ÖNORM S 5026 und der ÖNORM EN ISO 3095 in Kap. 5 und zum Teil auch bei der Parameterbestimmung für die Emissionsprognose in Kap. 7 erforderlich ist, sind die Möglichkeiten erhöhter Messunsicherheiten jedoch zu beachten. Soweit manuelle Selektionen mit vertretbarem Aufwand möglich sind, werden die Vorbeifahrten mit wahrnehmbaren Störgeräuschen von den Analysen ausgeschlossen. Die Auswertungen hinsichtlich der möglicher Einflussfaktoren in Kap. 6 konzentrieren sich hingegen vor allem auf Parametervariationen. Auch wenn die absoluten Werte von erhöhten Messunsicherheiten betroffen wären, so können derartige Betrachtungen von Pegeldifferenzen davon weitgehend ungestört durchgeführt werden.

5. ZUSAMMENHANG ÖNORM S 5026 UND ÖNORM EN ISO 3095

Für nachfolgende Betrachtungen werden vorrangig die Vorbeifahrten während der beiden Messserien DW1710 und DK1807 herangezogen, bei welchen neben der Messkonfiguration nach ÖNORM EN ISO 3095 [4] auch eine Konfiguration nach ÖNORM S 5026 [3] installiert war. Die nachfolgenden Berechnungen und Analysen von Schalleistungs- und Schalldruckpegeln stützen sich ausschließlich auf die beiden, hinsichtlich der Emissionscharakteristiken deutlich zu unterscheidenden Zugskategorien Güterzüge und Railjet-Hochgeschwindigkeitsreisezüge. Aufgrund der in Kap. 4.3.2 erwähnten, phasenweise auftretenden Störgeräusche wurden jedoch - um die dadurch entstehenden Abweichungen in den Pegelwerten möglichst gering zu halten - die Vorbeifahrten auf Basis von Hörproben manuell selektiert.

5.1. Auswahl der Vorbeifahrten

Obgleich der geringen Gesamtanzahl an erfassten Züge bei der Messserie DK1807, wird diese zur Analyse herangezogen, da als Folge der längeren Messdauer eine deutlich höhere Anzahl an Railjets (70 vs. 46 Vorbeifahrten) vorhanden war. Zwar kann den Emissionsmessungen aufgrund des erwarteten, geringeren Störgeräuscheinflusses (siehe Kap. 4.3.2) eine höhere Aussagekraft zugeschrieben werden. Jedoch unterschreitet die im Messquerschnitt vorhandene, vertikale und horizontale Gleisabklingrate die Grenzkurven der ÖNORM EN ISO 3095 abschnittsweise deutlich (vgl. Abb. A-6 in Anhang A), weshalb entsprechend der Ausführungen in Kap. 6.4 von erhöhten Emissionswerten vor allem im Frequenzbereich von einigen Hundert Hertz ausgegangen werden muss. Aus diesem Grund wurden ergänzend auch die Daten der Messserie DW1710 untersucht.

Um den Einfluss von Störgeräuschen zu verringern, wurden die Vorbeifahrten mittels Hörproben auf wahrnehmbare Störgeräusche geprüft und gegebenenfalls - mit Ausnahme der Stoßgeräusche bei Railjets der Messserie DW1710, wovon nahezu alle Züge dieser Kategorie betroffen waren - aussortiert. Neben Emissionen mit erwähnten Stoßgeräuschen und windgeräuschähnlichen Komponenten wurden dabei auch vereinzelt auftretende Fahrten mit anderen Störgeräuschen (wahrnehmbare Flachstellen, Zugsbegegnungen, Züge mit kurzzeitigen Zischgeräuschen und Messungen mit offensichtlich verspätetem Messstart), sowie spektrale Ausreißer verworfen. Um eine beispielhafte Gegenüberstellung der Messergebnisse mit theoretischen Werten entsprechend der ONR 305011 zu ermöglichen (wenngleich mit diskutierten Unsicherheiten), wurden die verbleibenden Züge anhand ihrer mittleren Achsgeschwindigkeit in Klassen unterteilt. Aus jenen Klassen mit nicht stark

asymmetrischer Verteilung der Geschwindigkeiten wurde je Zugskategorie und je Messserie jeweils die Klasse mit der größten Anzahl an Zügen gewählt:

- DK1807 - 11 Güterzüge
Geschwindigkeitsklasse 100 km/h ($-0,3 \text{ km/h} \leq \Delta v_{\text{Achsen}} \leq 1,1 \text{ km/h}$, $|a| = 0,0 \text{ m/s}^2$)
- DK1807 - 11 Railjets
Geschwindigkeitsklasse 120 km/h ($-0,2 \text{ km/h} \leq \Delta v_{\text{Achsen}} \leq 0,1 \text{ km/h}$, $|a| = 0,0 \text{ m/s}^2$)
- DW1710 - 7 Güterzüge
Geschwindigkeitsklasse 80 km/h ($-0,5 \text{ km/h} \leq \Delta v_{\text{Achsen}} \leq 14,2 \text{ km/h}$, $|a| \leq 0,1 \text{ m/s}^2$)
- DW1710 - 3 Railjets
Geschwindigkeitsklasse 110 km/h ($-0,6 \text{ km/h} \leq \Delta v_{\text{Achsen}} \leq 0,3 \text{ km/h}$, $|a| = 0,0 \text{ m/s}^2$)

Die Terzspektren der äquivalenten Dauerschallpegel (mit Schnittzeitpunkten bei Pegelabfällen von -10 dB gegenüber den Pufferpositionen) sind getrennt nach Messserie und Zugkategorie in Abb. 5-1 bis Abb. 5-4 für die Messpunkte A, 1, 2 und 3 dargestellt. Darüber hinaus sind analog zur ÖNORM EN ISO 3095 die arithmetischen Mittelungspegel für die Charakterisierung der typischen Emissionen, sowie die Bereiche der zweifachen, empirischen Standardabweichung zur Veranschaulichung der Bandpegelstreuungen eingetragen.

Ein Vergleich der beiden Messserien zeigt insbesondere bei den Güterzügen deutliche Unterschiede sowohl der mittleren Bandpegel, als auch deren spektraler Verteilung auf, die nicht durch die Geschwindigkeitsdifferenzen allein erklärbar sind. Eine Veränderung der mittleren akustischen Fahrzeugeigenschaften zwischen den beiden Messserien scheint aufgrund des geringen zeitlichen Abstandes von 9 Monaten unwahrscheinlich, weshalb auch - abgesehen von den erwähnten Messunsicherheiten durch das Messsystem bzw. durch Störeinflüsse - andere messstellenabhängige Effekte nahe liegen. Hervorzuheben ist die zuvor erwähnte, teilweise unterhalb der Anforderungen der ÖNORM EN ISO 3095 liegende Gleisabklingrate des Oberbaus in DK1807. Eine ausführliche Diskussion dieses Einflusses, aber auch der akustischen Schienenrauheit und der Transmission ist in Kap. 6 zu finden.

Des Weiteren ist bei Vergleich der Emissionen deutlich zu erkennen, dass Güterzüge aufgrund variabler Fahrzeugtypen naturgemäß stärker streuen als Railjets, welche stets in gleicher Konfiguration an den Messstellen verkehrten. Zudem ist (derzeit) von einem Einsatz unterschiedlicher Bremssysteme bei Güterwagen auszugehen, welche die Rauheit der Radfahrflächen und damit die Schallemissionen in der Regel signifikant

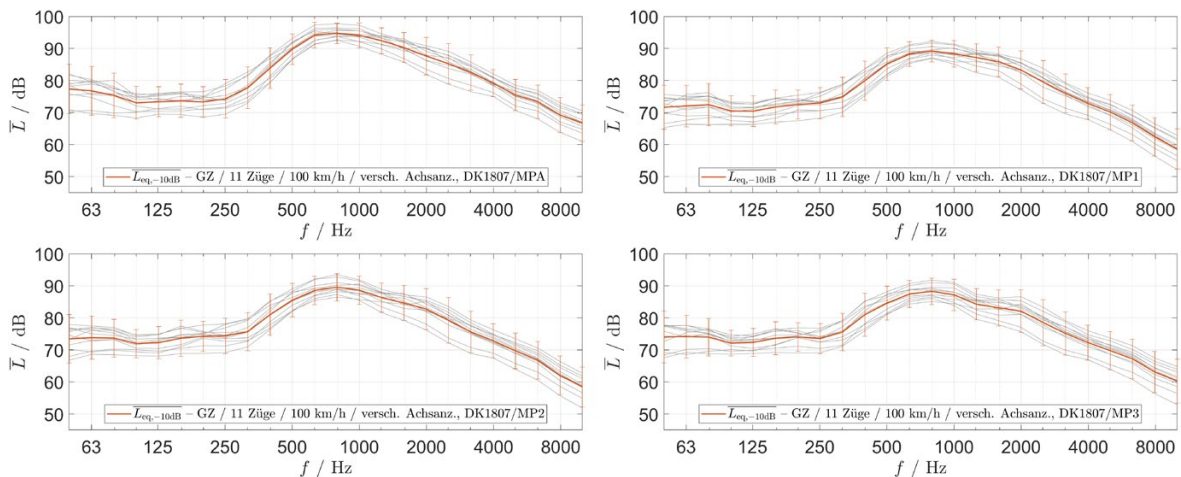


Abb. 5-1: Terzspektren der äquivalenten Dauerschallpegel $L_{eq-10dB}$ von 11 ausgewählten Güterzüge der Geschwindigkeitsklasse 100 km/h (graue Linien) in DK1807 inklusive Darstellung der arithmetischen Mittelwerte $\overline{L_{eq-10dB}}$ (rote Linie) und des Bereichs der zweifachen, empirischen Standardabweichungen $\pm 2s$ (rote Antennen) der Terzbandpegel in den Messpunkten A (oben, links), 1 (oben, rechts), 2 (unten, links) und 3 (unten, rechts)

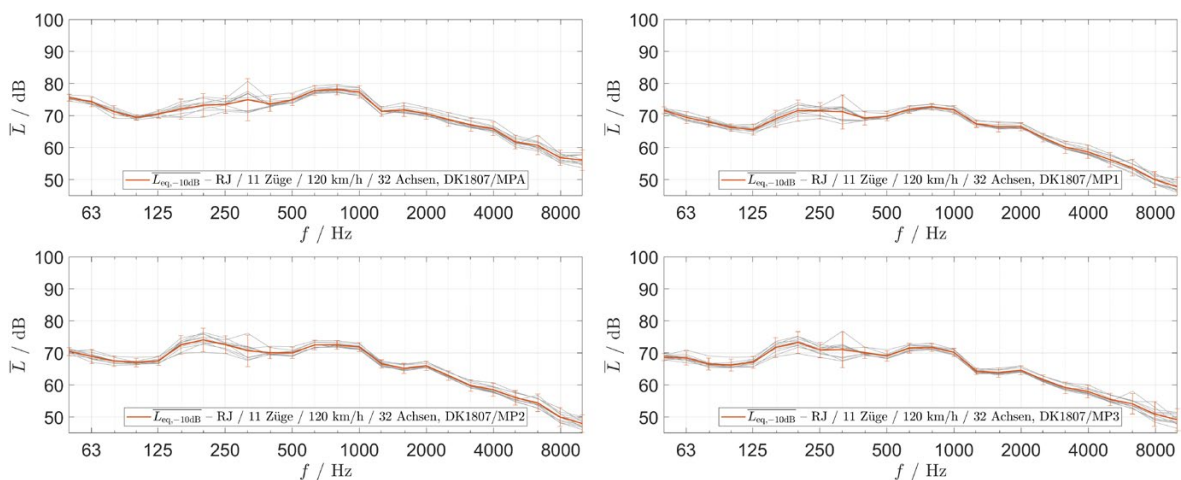


Abb. 5-2: Terzspektren der äquivalenten Dauerschallpegel $L_{eq-10dB}$ von 11 ausgewählten Railjets der Geschwindigkeitsklasse 120 km/h (graue Linien) in DK1807 inklusive Darstellung der arithmetischen Mittelwerte $\overline{L_{eq-10dB}}$ (rote Linie) und des Bereichs der zweifachen, empirischen Standardabweichungen $\pm 2s$ (rote Antennen) der Terzbandpegel in den Messpunkten A (oben, links), 1 (oben, rechts), 2 (unten, links) und 3 (unten, rechts)

beeinflussen. Aber auch bei Railjets sind im Frequenzbereich von einigen Hundert Hertz bei allen Messpunkten höhere Streubreiten zu beobachten. Hörproben lassen als Ursache jedoch nicht windgeräuschähnliche Komponenten, sondern vielmehr Unterschiede in der akustischen Signatur der Triebfahrzeuge vermuten.

Trotz der zum Teil höheren Streubreiten, möglicherweise erhöhter Messunsicherheiten, etwaiger Messabweichungen aufgrund weiterer Einflüsse und der zum Teil sehr geringen Anzahl an verwertbarer Fahrten werden (aus Mangel an Alternativen) die berechneten Mittelwerte für die nachfolgenden Gegenüberstellungen zu Prognosewerten entsprechend

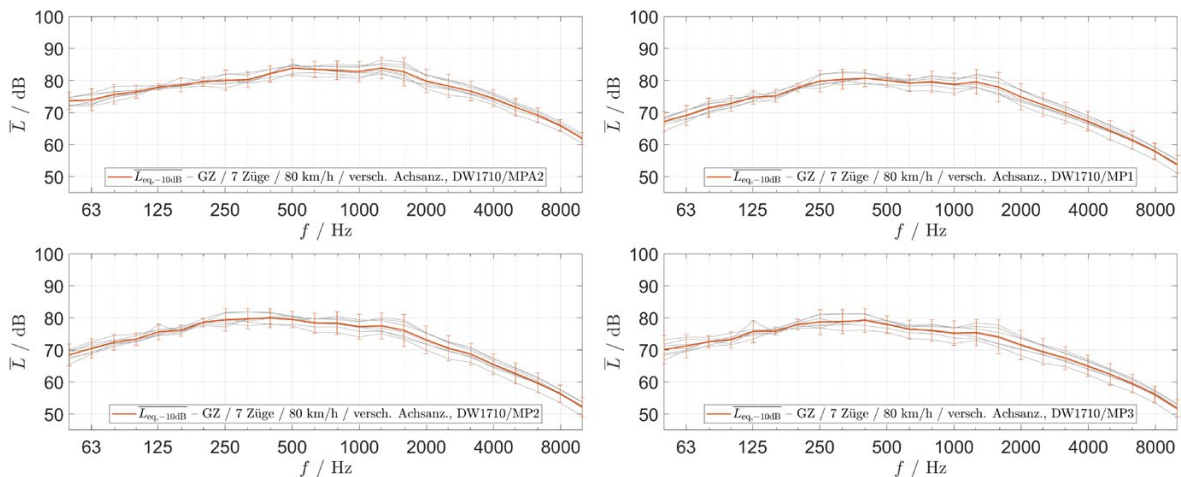


Abb. 5-3: Terzspektren der äquivalenten Dauerschallpegel $L_{eq,10dB}$ von 7 ausgewählten Güterzüge der Geschwindigkeitsklasse 80 km/h (graue Linien) in DW1710 inklusive Darstellung der arithmetischen Mittelwerte $\overline{L_{eq,10dB}}$ (rote Linie) und des Bereichs der zweifachen, empirischen Standardabweichungen $\pm 2s$ (rote Antennen) der Terzbandpegel in den Messpunkten A (oben, links), 1 (oben, rechts), 2 (unten, links) und 3 (unten, rechts)

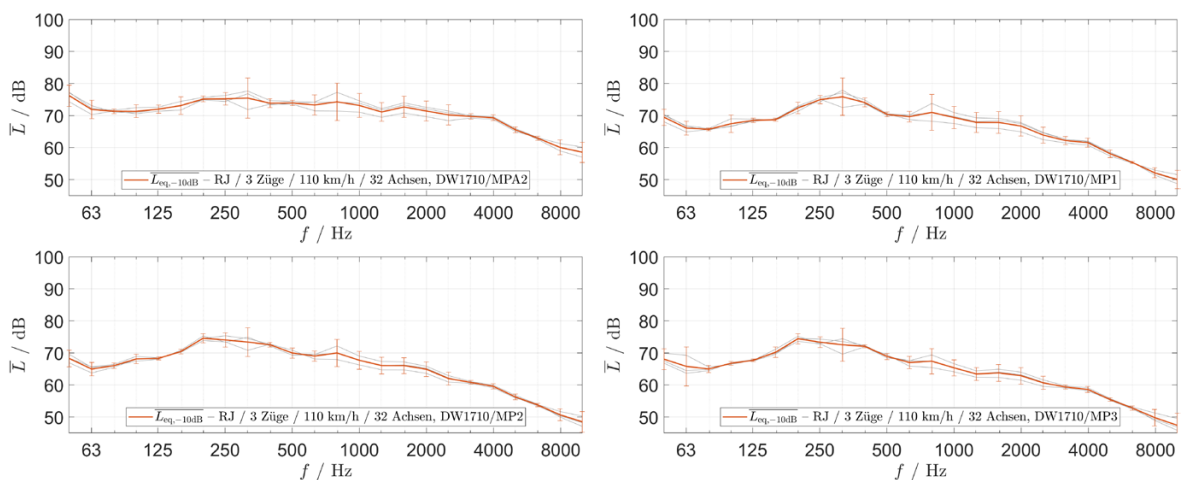


Abb. 5-4: Terzspektren der äquivalenten Dauerschallpegel $L_{eq,10dB}$ von 3 ausgewählten Railjets der Geschwindigkeitsklasse 110 km/h (graue Linien) in DW1710 inklusive Darstellung der arithmetischen Mittelwerte $\overline{L_{eq,10dB}}$ (rote Linie) und des Bereichs der zweifachen, empirischen Standardabweichungen $\pm 2s$ (rote Antennen) der Terzbandpegel in den Messpunkten A (oben, links), 1 (oben, rechts), 2 (unten, links) und 3 (unten, rechts)

der ONR 305011 genutzt. Dies erscheint zulässig, da sich die Fragestellung nicht der korrekten Erhebung von Schalleistungspegeln für konkrete Fahrzeuge, sondern allgemein der Methodik zur Umrechnung von Pegelwerten widmet.

5.2. Berechnung der Schalleistungspegel

Die über die einzelnen Vorbeifahrten gemittelten und zu Oktaven zusammengefassten Bandpegel wurden im ersten Schritt gemäß ihrem Abstand zur Ersatzschallquelle und der Höhe über Boden bezüglich Bodendämpfung korrigiert. Dabei ergibt sich für die Höhe

über Boden einen Wert von mindestens 8 m, da 0,2 m für die SOK über Boden, 0,3 m für die Ersatzschallquelle über SOK und weitere mindestens 7,5 m (für Messpunkt 1) zu summieren sind. Ab diesen Höhen wirken sich Variationen in der Höhe, die sich durch die tatsächlichen Bodenhöhen am Messort ergeben, kaum auf die Korrekturwerte aus. Für die Oktavbänder 63 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz und 8000 Hz geht die Höhe im Falle poröser Bodenverhältnisse ($G = 1$ für Schotter und Boden der zum Bewuchs geeignet ist) überhaupt nicht ein. Bei 125 Hz bedeutet der Unterschied von 8 m versus 9 m Höhe für den Punkt 1 eine Variation von 0,1 dB, für die anderen Punkte und Frequenzbänder liegen sie jedenfalls darunter und sind damit vernachlässigbar.

Die bezüglich Bodendämpfung korrigierten Messwerte werden nach Formel 4 der ÖNORM S 5026 in Schalleistungspegel umgerechnet. Die Oktavband-Schalleistungspegel berechnet nach den Messungen für die 3 Messpunkte werden im Anschluss energetisch gemittelt.

5.3. Vergleich mit Schalleistungspegeln nach ONR 305011

Die durch Messung gewonnenen Oktavband-Schalleistungspegel $L_{W,i}$ weichen von den Normwerten der ONR 305011 ab. Die in Abb. 5-5 links dargestellten Railjet-Vorbeifahrten in Dürnkrot (DK1807) zeigen zwar für 1000 Hz eine gute Übereinstimmung von 0,4 dB, gleichzeitig aber auch Abweichungen von bis zu 10 dB für das 125 Hz und 250 Hz Band. Die Differenz der A-bewerteten Gesamtschalleistung ist davon weniger betroffen und beträgt 1,3 dB. Bei den im selben Messort bestimmten Schalleistungspegeln für exemplarische Güterzugvorbeifahrten ergaben sich umgekehrt vor allem im 1000 Hz Band Abweichungen von bis zu 10 dB (siehe Abb. 5-5 rechts). Dies bedeutet damit auch

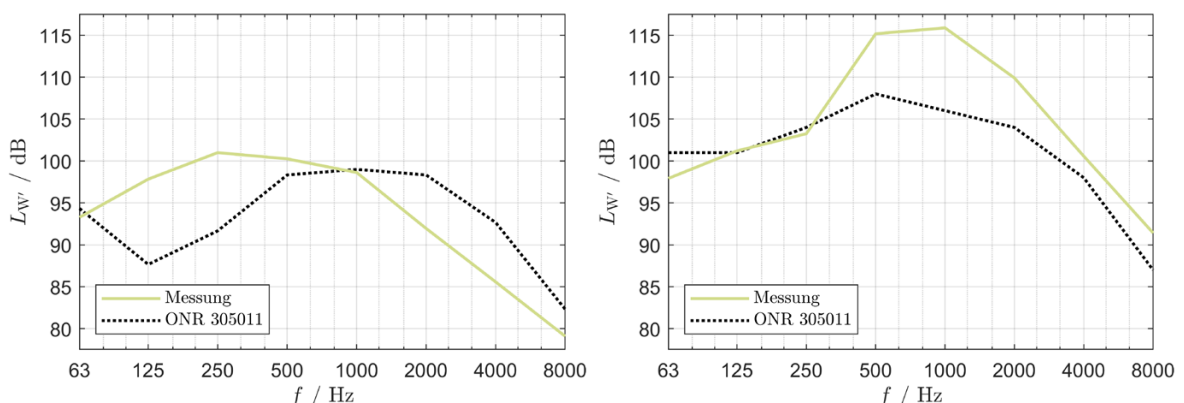


Abb. 5-5: Vergleich der in Dürnkrot (DK1807) nach ÖNORM S 5026 Messung bestimmten mit den nach ONR 305011 normierten längenbezogenen Schalleistungspegel für den Railjet mit 120 km/h (links) und graugussgebremsten Güterzug mit 100 km/h (rechts)

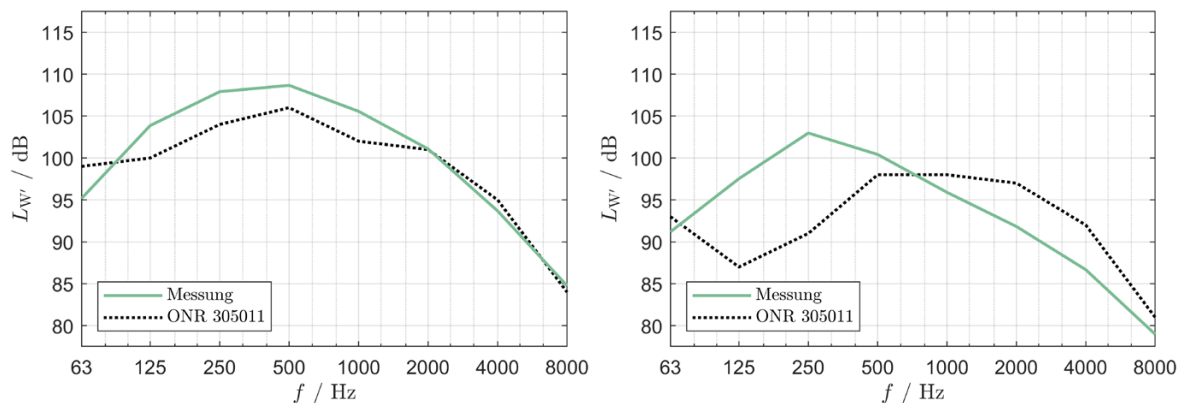


Abb. 5-6: Vergleich der in Deutsch-Wagram (DW1710) nach ÖNORM S 5026 bestimmten mit den nach ONR 305011 normierten längenbezogenen Schalleistungspegel für den graugussgebremsten Güterzug mit 80 km/h (links) und Railjet mit 110 km/h (rechts)

Differenzen des A-bewerteten Gesamtschalleistungspegels mit einem um 7,8 dB höheren Wert für die Messergebnisse.

Messungen von Railjet- und Güterzug-Vorbeifahrten in Deutsch-Wagram (DW1710) zeigen durchgehend beachtliche Abweichungen von bis zu 9 dB (siehe Abb. 5-6). Allerdings zeigen die Differenzen des A-bewerteten Gesamtschalleistungspegels für die Railjetvorbeifahrten nur eine Differenz von 0,9 dB (Normwert höher) und für die Güterzugvorbeifahrten -2,3 dB (Messwert höher).

5.4. Vergleich mit Schalldruckpegeln nach ONR 305011

Um die Vergleiche zwischen den nach ÖNORM S 5026 bestimmten und nach ONR 305011 genormten Werten detaillierter zu analysieren, erfolgen weitere Vergleiche von nach ONR 305011 berechneten versus gemessenen Schalldruckpegelwerten in den einzelnen 3 Messpunkten. Grundsätzlich zeigt sich dabei wie zu erwarten, dass große Abweichungen der Schalleistungspegel in einem Oktavband auch große Abweichungen der Immissionspegel in diesem Frequenzband bedeuten. In Abb. 5-7 sind neben diesen Vergleichen zusätzlich die Mess- und Berechnungswerte für den Punkt A nach ÖNORM EN ISO 3095 zum Vergleich beinhaltet.

Die Abweichungen für Railjet Vorbeifahrten können teilweise auch abseits der in Kap. 5.1 dargelegten Ursachen erklärt werden. Das Verfahren nach ÖNORM S 5026 betrachtet die Vorbeifahrt ganzer Züge. Damit wird unterstellt, dass der gesamte Zug repräsentativ für ein Fahrzeug ist. Bei den Vorbeifahrten wird somit das Triebfahrzeug nicht explizit berücksichtigt. Auch die ONR 305011 sieht vor ab einer Zuglänge von 75 m die Lokomotiven zu vernachlässigen. Vergleicht man eine Berechnung streng nach ONR 305011 mit einer Variante, bei der die 205 m Gesamtzuglänge schiebengebremster

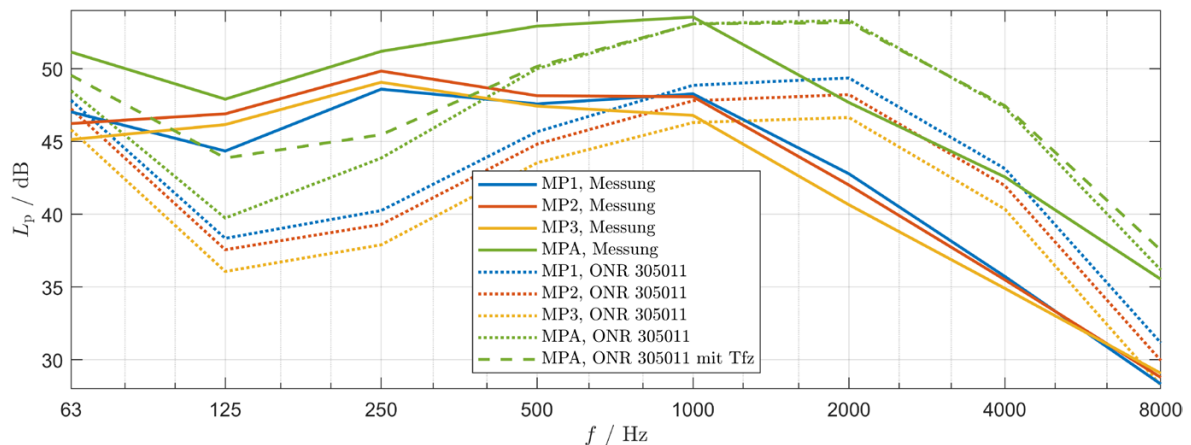


Abb. 5-7: Gemessene und nach ONR 305011 berechnete (punktirt) Schalldruckpegel in den Messpositionen nach ÖNORM S 5026 (MP1, MP2, MP3) und nach ÖNORM EN ISO 3095 (MPA) für die Railjetvorbeifahrten in Dürnrut (DK1807) - die zusätzliche strichlierte Linie für MPA zeigt den Unterschied, wenn entgegen der ONR 305011 das Triebfahrzeug explizit berücksichtigt wird

Reisezugwagen auf 189 m Reisezugwagen mit zusätzlich 16 m BR 1016 Triebfahrzeug korrigiert werden, so ergeben sich unterschiedliche Immissionswerte, welche in Abb. 5-7 als strichlierte Linie exemplarisch für den Punkt A ergänzt sind. In den Oktavbändern 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz und 8000 Hz kommt es zu Erhöhungen von mehr als 1 dB. Im Oktavband 125 Hz sind es 3,7 dB bei 110 km/h und 4,1 dB bei 120 km/h. Die Vernachlässigung der Traktion in den Verfahren nach ONR 305011 und ÖNORM S 5026 erklärt daher zumindest die hohen Abweichungen in diesem Frequenzband.

5.5. Vergleich mit Schalldruckpegeln adaptiert nach ÖNORM S 5026 Messungen

Die Berechnung der Immissionspegel in den einzelnen Messpunkten wird in einem zweiten Schritt wiederholt, wobei anstelle der Standardwerte nach ONR 305011 nun die durch ÖNORM S 5026 bestimmten Schalleistungspegel verwendet werden. Dies führt zwangsläufig zu einer besseren Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Immissionspegeln, allerdings nicht zu identen Werten. Wie in Tab. 5-1 illustriert zeigt der Vergleich gemessener mit berechneten Schalldruckpegeln für Güterzüge in DW1710 erst deutliche Abweichungen mit höheren Messwerten. Legt man der Berechnung nach ONR 305011 nun die Schalleistungspegel nach ÖNORM S 5026 zugrunde, verringern sich die Differenzen bleiben aber doch im Bereich von ~1 dB.

Bei Railjets ist grundsätzlich ein ähnlicher Trend zu beobachten (siehe Tab. 5-2). So weichen Prognosewerte der ONR 305011 gegenüber den Messwerten zum Teil deutlich ab, wobei sich in dem 125 Hz und dem 250 Hz Oktavband im Mittel die höchsten

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	A-bew.
unkorrigiert in dB									
Punkt 1	5,6	-0,9	-4,1	-3,8	-4,7	-0,9	0,6	-3,1	-2,9
Punkt 2	3,9	-2,5	-4,8	-4,0	-4,1	-0,2	0,8	-2,7	-2,7
Punkt 3	1,8	-3,9	-5,5	-3,9	-3,5	0,0	0,1	-4,2	-2,5
korrigiert in dB									
Punkt 1	1,8	3,0	-0,2	-1,2	-1,1	-0,8	-0,8	-2,3	-0,9
Punkt 2	0,1	1,4	-0,9	-1,3	-0,6	-0,1	-0,5	-1,9	-0,7
Punkt 3	-2,0	-0,1	-1,6	-1,3	0,1	0,1	-1,2	-3,4	-0,5

Tab. 5-1: Differenzen der unkorrigierten Berechnung nach ONR 305011 und korrigiert mittels Schallleistungspegel nach ÖNORM S 5026 für Güterzüge der Geschwindigkeitsklasse 80 km/h in DW1710

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz	A-bew.
unkorrigiert in dB									
Punkt 1	0,8	-6,0	-8,3	-1,9	0,6	6,6	7,4	2,8	0,8
Punkt 2	1,0	-9,3	-10,5	-3,3	-0,3	6,2	6,5	1,2	1,0
Punkt 3	0,7	-10,1	-11,2	-3,9	-0,5	6,0	5,4	-0,8	0,7
korrigiert in dB									
Punkt 1	-0,3	4,2	1,0	0,0	0,2	0,2	0,3	-0,4	-0,3
Punkt 2	-0,1	0,8	-1,2	-1,4	-0,6	-0,2	-0,6	-2,1	-0,1
Punkt 3	-0,4	0,1	-1,8	-2,0	-0,9	-0,4	-1,6	-4,1	-0,4

Tab. 5-2: Differenzen der unkorrigierten Berechnung nach ONR 305011 und korrigiert mittels Schallleistungspegel nach ÖNORM S 5026 für Railjets der Geschwindigkeitsklasse 120 km/h in DK1807

Differenzen zeigen. Durch Verwendung des nach ÖNORM S 5026 gemessenen Schallleistungspegel, sinken die Unterschiede auf Werte von meist < 2 dB.

Man könnten erwarten, dass bei einer vollkommenen Kompatibilität der ÖNORM S 5026 mit der ONR 305011 die gemessenen Immissionspegel ident zu den berechneten Pegel sind, da diese wiederum auf den gemessenen Schallleistungspegeln beruhen. Allerdings liegt der Formel 4 der ÖNORM S 5026 kein mit der aktuellen ONR 305011 kompatibles Schallausbreitungsmodell zugrunde. Die ONR 305011 beinhaltet eine Richtcharakteristik sowie die Abstands-, Bodendämpfungs- und Luftabsorptionsterme der ISO 9613-2 [8]. Die Rückrechnung von Schalldruckpegel in Schallleistungspegel mittels ÖNORM S 5026

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Schalleistungspegel $L_{W'}$ nach ONR 305011 in dB								
-	100,0	100,5	104,0	107,0	104,0	102,5	96,5	85,5
daraus berechnete Schalldruckpegel $L_{eq,1h}$ in dB								
Punkt 1	56,3	54,1	55,4	57,3	56,8	56,4	49,9	37,2
Punkt 2	55,7	53,3	54,5	56,4	55,7	55,3	48,7	36,0
Punkt 3	54,3	51,8	53,1	55,1	54,2	53,7	47,1	34,3
Korrektur für L_{eq} in dB								
-	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8
Schalleistungspegel $L_{W'}$ nach ÖNORM S 5026 in dB								
-	99,7	101,7	103,1	105,8	103,5	102,3	95,8	83,0
Differenz der Schalleistungspegel $L_{W'}$ nach ONR 305011 und ÖNORM S 5026 in dB								
-	-0,3	1,2	-0,9	-1,2	-0,5	-0,2	-0,7	-2,5

Tab. 5-3: Beispiel für graugussgebremste Güterzüge von 300 m Länge bei 90 km/h. Aus den Schalleistungspegel nach Norm werden die Immissionen $L_{eq,1h}$ für eine Zugvorbeifahrt pro Stunde berechnet. Nach Korrektur auf den Vorbeifahrtspegel L_{eq} und einsetzen dieser Werte in das Formelwerk nach ÖNORM S 5026 ergeben sich abweichende Schalleistungspegel als die ursprünglichen Ausgangswerte

berücksichtigt zwar Abstand und Bodendämpfung, allerdings mittels unterschiedlicher mathematischer Terme.

Dies kann auch unabhängig von Messungen illustriert werden, indem man mittels definierter Schalleistungspegel die Schalldruckpegel in den Messorten mit ONR 305011 berechnet, die gewonnenen Schalldruckpegel wieder mittels ÖNORM S 5026 in Schalleistungspegel rückrechnet, aber diese nun nicht mehr mit den ursprünglich definierten Werten übereinstimmen, wie im Beispiel der Tab. 5-3 illustriert. Die beiden Rechenverfahren sind miteinander nicht kompatibel. Letztlich ist zu bedenken, dass alle bestimmten Schalleistungspegel immer virtuelle Schalleistungen einer angenommenen Ersatzschallquelle sind, welche für ein bestimmtes Schallausbreitungsmodell gelten. Die Rückrechnung von gemessenen Schalldruckpegeln auf Schalleistungspegel muss infolgedessen mit dem selben Verfahren erfolgen, mit dem Schalldruckpegel basierend auf den Schalleistungspegeln berechnet werden.

5.6. Vergleich mit Schalldruckpegeln nach RVE 04.01.02

Ein weiterer Schritt zeigt einen Vergleich der gemessenen Immissionspegel mit den berechneten Werten der RVE 04.01.02 [15]. Prinzipiell sind auch hier die bereits beim

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Werte nach RVE 04.01.02								
Punkt 1	-5,8	-4,3	-7,5	-3,7	-0,5	-0,1	4,9	6,9
Punkt 2	-5,7	-5,9	-7,6	-3,5	-0,1	0,5	5,2	7,0
Punkt 3	-5,5	-5,2	-6,8	-2,1	3,2	3,9	8,2	10,6
Werte mit adaptierter Richtcharakteristik								
Punkt 1	-5,8	-4,3	-7,5	-3,7	-0,5	-0,1	4,9	6,9
Punkt 2	-5,8	-6,0	-7,7	-3,7	-0,3	0,2	5,0	6,6
Punkt 3	-7,6	-7,4	-9,2	-5,1	-0,6	-0,9	2,4	3,3

Tab. 5-4: Differenzen der Berechnung nach RVE 04.01.02 und nach RVE 04.01.02 mit modifizierter Berücksichtigung der Richtcharakteristik

Vergleich mit den ONR 305011 Werten zeigten Differenzen zu beobachten (siehe Tab. 5-4, oben). Für die Railjet-Vorbeifahrten in DW1710 gibt es wiederum gute Übereinstimmung im 1000 Hz Oktavband in den Punkten 1 und 2. Im Punkt 3, dem höchstgelegenen der 3 Punkte, liegen die höchsten Abweichungen von 3,2 dB vor. Eine ähnliche Tendenz ist für das 2000 Hz Band ersichtlich, während in allen anderen Punkten deutliche Abweichungen vorliegen.

Die korrekte Beschreibung der vertikalen Richtcharakteristik in der Richtlinie 2015/996/EU [5], auf der die RVE 04.01.02 beruht ist derzeit Gegenstand von Diskussionen. Dabei etabliert sich ein neuer Stand der Technik, in dem die Richtcharakteristik modifiziert beschrieben wird, indem die aktuelle Berechnungsvorschrift

$$\Delta L_{W,dir,ver,i} = \left\{ \left| \frac{40}{3} \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot \sin(2\psi) - \sin(\psi) \right] \cdot \lg \left(\frac{f_{c,i} + 600}{200} \right) \right| \right\}$$

wie folgt adaptiert wird

$$\Delta L_{W,dir,ver,i} = \left\{ \frac{40}{3} \cdot \left[\frac{2}{3} \cdot \sin(|2\psi|) - \sin(|\psi|) \right] \cdot \lg \left(\frac{f_{c,i} + 600}{200} \right) \right\}.$$

Mit dieser korrigierten Version verändert sich die Abweichung im 1000 Hz Band von 3,2 dB auf -0,6 dB (vgl. Tab. 5-4, unten). Für dieses Oktavband bewirkt die Verwendung der adaptierten Berechnung zwar tendenziell eine Verringerung der Abweichung (ähnlich auch für 2000 Hz), eine abschließende Aussage zur korrekten vertikalen Richtcharakteristik vorbeifahrender Schienenfahrzeuge kann im Rahmen dieses Projekts aber nicht getätigt werden. So zeigen die Vergleiche in tieferen Frequenzen sogar eine höhere Abweichung vom Messergebnis, wenn die adaptierte vertikale Richtcharakteristik verwendet wird.

6. EINFLUSSFAKTOREN FÜR DEN VERGLEICH VON BERECHNETEN MIT GEMESSENEN WERTEN

Für Verifikationen prognostizierter Schallemissionen, beruhend auf bestehenden Eingangsparametern für das zugrunde liegenden Berechnungsmodell gemäß der Richtlinie 2015/996/EU, mit messtechnisch erfassten Schallemissionen bedarf es verschiedene, über die klassischen Messabweichungen hinausgehende Einflüsse auf Prognose- oder Messwerte und deren Effekte zu kennen oder zu ermitteln, um zuverlässige Ergebnisse aus den Vergleichen ableiten zu können. Um in weiterer Folge auch von den Standardwerten abweichende, für tatsächlich vorhandene Verhältnisse angepasste Eingangsparameter unter Zuhilfenahme von Messwerten (iterativ) entwickeln zu können, ist ebenfalls dieses Verständnis über die Einflüsse für die Ergebnisqualität essentiell.

Ausgehend von einer Diskussion der Variationsbreite erfasster Emissionen gleicher Zugskategorien wird im Folgenden zum einen auf die Effekte durch drei akustisch relevante Aspekte der Messstelle (die akustische Schienenrauheit, die Gleisabklingrate und weiteren Einflussgrößen in Bezug auf die Transmission von der Quelle zum Messpunkt) näher eingegangen. Zum anderen werden Variationsmöglichkeiten der in der Prognoserechnung nach Richtlinie 2015/996/EU verankerten Transformation der effektiven Gesamtrauheit vom Wellenlängen- in den Frequenzbereich, sowie verschiedene Ansätze der Festlegung zeitlicher Grenzen von Vorbeifahrten für die Messwertberechnung und deren Auswirkungen diskutiert.

6.1. Variationsbreite erfasster Emissionen

Die Eingangsparameter von Prognosemodellen definieren jene Rahmenbedingungen, für welche die Rechenergebnisse letztlich gelten sollen. Insbesondere die Standardeingangsparametern beruhen häufig auf Durchschnittswerten (beispielsweise durchschnittliche Schienenrauheiten im Netz eines Infrastrukturbetreibers, mittlere Radrauheiten in Abhängigkeit des Bremssystems, etc.). Jedoch weichen die realen Verhältnisse bei Vorbeifahrtmessungen in der Regel von diesen Rahmenbedingungen ab. Umgekehrt ist bei der Herleitung von Modelleingangsparametern anhand von Messungen sicherzustellen, dass – vorausgesetzt das Berechnungsmodell lässt die Abbildung physikalischer Zustände zu – die Rahmenbedingungen, für die die Parameter letztendlich gelten sollen, während der Messungen entweder vorherrschen oder

abweichende Rahmenbedingungen entsprechend berücksichtigt werden (beispielsweise durch Korrekturansätze für die Messergebnisse).

Allgemeine Strategien, um die Repräsentation von Messwerten im Hinblick auf mittlere Rahmenbedingungen zu erhöhen, sind Mehrfachmessungen von Zügen und/oder Messungen an verschiedenen Messstellen. Des Weiteren können Anforderungen beispielsweise an die (akustischen) Oberbaueigenschaften in unmittelbarer Umgebung zum Messquerschnitt oder an die (Ähnlichkeit der) Betriebszustände der erfassten Züge gestellt werden.

Vor diesem Hintergrund werden zur Veranschaulichung der Streuung der Emissionen und gleichzeitig zur Demonstration der Herausforderungen bei der Bewertung von mittleren Emissionswerten die Mediane und die Interquartilabstände der Terzspektren energetisch gemittelter Dauerschallpegel $\tilde{L}_{eq,-10dB}$ mehrerer Vorbeifahrten von Zügen gleicher Kategorien, welche im Rahmen unterschiedlicher Messserien ermittelt wurden, verglichen. Konkret werden exemplarisch Güterzüge und Railjets in Abb. 6-1, sowie Doppelstockreisezüge der Baureihe 8033 und Schnellbahnen der Baureihe 4020 in Abb. 6-2 dargestellt, wobei bei Güterzügen und Schnellbahnen der Baureihe 4020 nur Vorbeifahrten mit mittleren Achsgeschwindigkeiten der Geschwindigkeitsklasse 100 km/h (Geschwindigkeiten von 95 km/h bis 105 km/h) und bei Railjets und Doppelstockreisezüge der Baureihe 8033 nur Vorbeifahrten mit mittleren Achsgeschwindigkeiten der Geschwindigkeitsklasse 120 km/h (Geschwindigkeiten von 115 km/h bis 125 km/h) betrachtet werden. Zudem werden zur Beschränkung der Beschleunigung der Betrag der maximalen Geschwindigkeitsdifferenz zwischen erster und letzter Achse auf 10 km/h (Güterzüge) bzw. 5 km/h (restliche Zugkategorien), sowie der Betrag der mittleren Beschleunigung mit $0,2 \text{ m/s}^2$ (Güterzüge) bzw. $0,1 \text{ m/s}^2$ (restliche Zugkategorien) begrenzt. Emissionsspektren werden in den Diagrammen nur dargestellt, sofern mindestens 10 Züge einer Messserie die genannten Kriterien erfüllen.

Die drei dargestellten Personenzugkategorien werden bei den betrachteten Messserien in den Prognoserechnungen gemäß Richtlinie 2015/996/EU oder ONR 305011 grundsätzlich mit identen Fahrzeugparameter modelliert. Demgegenüber demonstrieren die mittleren Emissionsspektren in Abb. 6-1 (unten) und in Abb. 6-2 zum Teil sehr hohe, über die erwarteten messtechnisch bedingten Unsicherheiten hinausgehende Streubreiten von oft mehr als 10 dB in den Bandpegeln, wobei für diesen Vergleich etwaige Unterschiede in den Messstelleneigenschaften (bewusst) vernachlässigt wurde. Bei Güterzügen (Abb. 6-1, oben) kann zwar der jeweils betrachtete Fahrzeug- bzw. Zugmix von Messserie zu

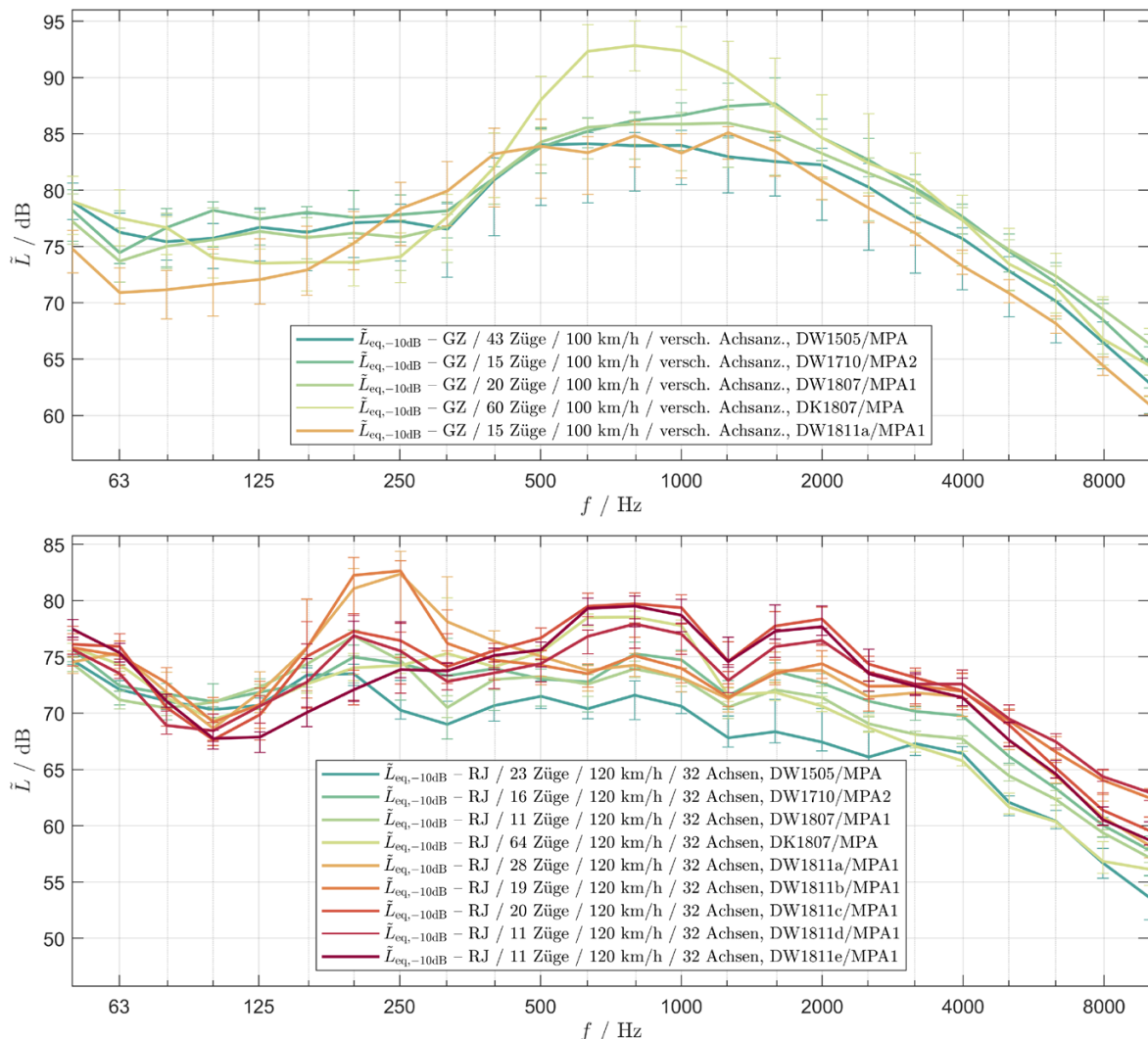


Abb. 6-1: Vergleich der Mediane und der Interquartilabstände der in Messpunkt A erfassten, energetisch gemittelten Dauerschallpegel $\tilde{L}_{eq,-10dB}$ passierender Züge bei verschiedenen Messserien – Güterzüge mit $95 \text{ km/h} \leq v_{\text{mittel}} < 105 \text{ km/h}$, $|\Delta v_{\text{AxEnd-AxBeg}}| \leq 10 \text{ km/h}$ und $|a_{\text{Zug}}| \leq 0,2 \text{ m/s}^2$ (oben) und Railjets mit $115 \text{ km/h} \leq v_{\text{mittel}} < 125 \text{ km/h}$, $|\Delta v_{\text{AxEnd-AxBeg}}| \leq 5 \text{ km/h}$ und $|a_{\text{Zug}}| \leq 0,1 \text{ m/s}^2$ (unten)

Messserie divergieren, jedoch entspricht diese Variabilität letztendlich auch der Herausforderung mittlerer Güterzugeigenschaften in der Prognoserechnung. Trotz dieser potentiellen zusätzlichen Streukomponente, die sich klar in vergleichsweise hohen Interquartilabständen ausdrückt, liegen die Streuungen der Mediane der Messserien (mit Ausnahme von DK1807 im mittleren Frequenzbereich) tendenziell unterhalb der Streuungen von Railjets oder Doppelstockreisezugwagen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass bei Güterzügen als Folge der geringen Anzahl an Vorbeifahrten die mittleren Emissionen bei den Messserien DW1811b bis DW1811e, welche zum Teil stark variierende Gleisabklingraten aufweisen, nicht dargestellt sind. Auch bei Schnellbahnen

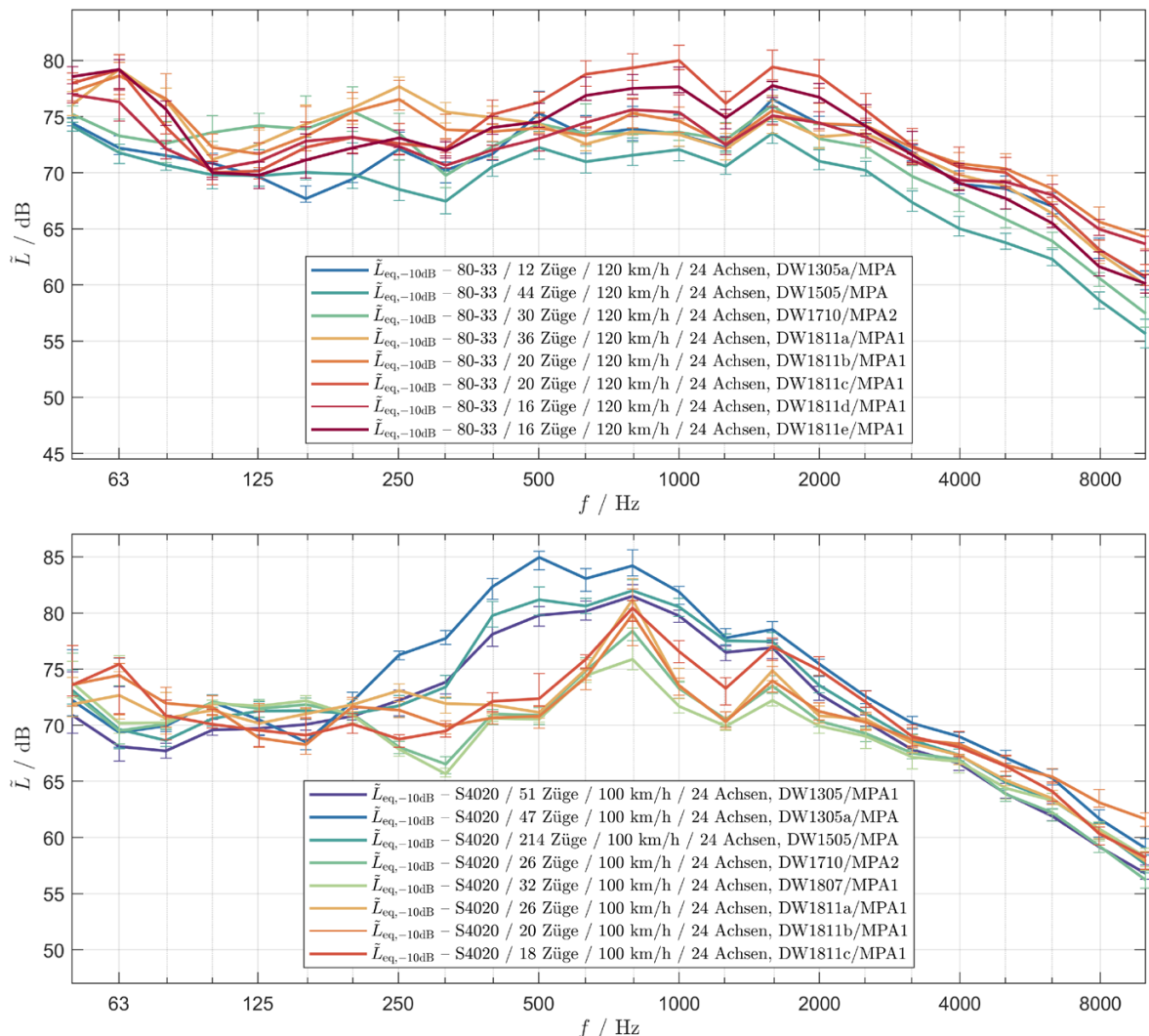


Abb. 6-2: Vergleich der Mediane und der Interquartilabstände der in Messpunkt A erfassten, energetisch gemittelten Dauerschallpegel $\tilde{L}_{eq,10dB}$ passierender Züge bei verschiedenen Messserien – Reisezüge mit Doppelstockwagen der Baureihe 8033 mit $115 \text{ km/h} \leq v_{\text{mittel}} < 125 \text{ km/h}$, $|\Delta v_{\text{AxEnd-AxBeg}}| \leq 5 \text{ km/h}$ und $|a_{\text{Zug}}| \leq 0,1 \text{ m/s}^2$ (oben) und Schnellbahnen der Baureihe 4020 mit $95 \text{ km/h} \leq v_{\text{mittel}} < 105 \text{ km/h}$, $|\Delta v_{\text{AxEnd-AxBeg}}| \leq 5 \text{ km/h}$ und $|a_{\text{Zug}}| \leq 0,1 \text{ m/s}^2$ (unten)

der Baureihe 4020 (siehe Abb. 6-2, unten) sind sehr hohe Differenzen im mittleren Frequenzbereich zu beobachten. Allerdings gehen die Autoren – unter anderem da höhere Bandpegel nur bis zu Messserien des Jahre 2015 auftreten – davon aus, dass fahrzeugseitige Adaptionen für die sich ab 2017 einstellende, reproduzierbare Senkung der Emissionen verantwortlich sind.

Anhand der in Abb. 6-1 und Abb. 6-2 dargestellten Variationsbreiten soll die Bedeutung der Rahmenbedingungen abseits von Fahrzeugkategorien, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen unterstrichen werden. Im Hinblick auf die akustischen

Oberbauparameter ist bemerkenswert, dass bei allen betrachteten Messserien, die zumeist zeitnah im Messquerschnitt erhobenen akustischen Schienenrauheiten die Grenzkurve der ÖNORM EN ISO 3095 unterschreiten (siehe Rauheitsspektren in Anhang A). Werden Emissionsspektren nur von jenen Messserien verglichen, bei welchen die horizontalen und vertikalen Gleisabklingraten die Mindestanforderungen der ÖNORM EN ISO 3095 weitestgehend erfüllen (vergleiche Gleisabklingraten in Anhang A), so ergibt sich zwar eine erkennbare Senkung der Variationsbreite (vgl. Abb. 6-3). Dennoch bleiben zum einen Bereiche auffällig hoher Unterschiede in den Bandpegel bestehen, die bei Verwendung oder Interpretation der Messdaten im Hinblick auf die Prognoserechnung im Detail zu untersuchen wären (beispielsweise deuten die vergleichsweise hohen Interquartilabstände bei Railjets der Messserien DW1811a und DW1811b im Bereich von 160 Hz bis 315 Hz auf unüblich hohe Streubreiten hin, deren Ursache vor einer Interpretation der mittleren Emissionsspektren zu klären wäre). Zum anderen bleiben aber auch bei geringen Interquartilabständen Unterschiede in den Medianen der Terzbandpegel von einigen Dezibel bestehen, die nur zum Teil durch Messabweichungen begründbar sind (wie die bei der Messserie DW1811b in den oberen Frequenzbereichen mit der Frequenz zunehmende Erhöhung von Bandpegeln, die wegen eines vergleichbaren, in Abb. B-2 des Anhang B oben dargestellten Abweichungsverhaltens zwischen den Messpunkten A1 und A2 dem Messsystem zuzuschreiben sind).

Zusammenfassend verdeutlichen die exemplarisch dargestellten, mittleren Emissionsspektren in Abb. 6-3, dass selbst bei (weitgehender) Einhaltung der Anforderungen der ÖNORM EN ISO 3095 an die akustischen Oberbaueigenschaften und bei Betrachtung gleicher Zugskategorien und Betriebszuständen zwischen Messserien zum Teil Unterschiede von mehreren Dezibel bestehen können. Wird nur eine einzelne Messserie für Vergleiche mit Prognosewerten herangezogen, so birgt dies die Gefahr signifikante, unbekannte Abweichungen mit einzubeziehen. Alleinig das Vorliegen von Messdaten verschiedener Messserien erlaubt bereits eine bessere Einschätzung über vorhandene Unsicherheiten. Jedoch bedarf es für die Vergleiche mit Prognosewerten auch die zentralen Gründe für derartige Schwankungen zu erheben, um etwaige Differenzen fundiert interpretieren zu können.

Gleiches gilt auch für die Ableitung oder die Verifizierung von Modelleingangsparametern: durch die exemplarisch gezeigte Schwankungsbreite von zum Teil mehreren Dezibel wird die Bedeutung der Betrachtung verschiedener Messserien bzw. Messstandorte und die Notwendigkeit einer Auseinandersetzung mit den Hintergründen zur Erlangung

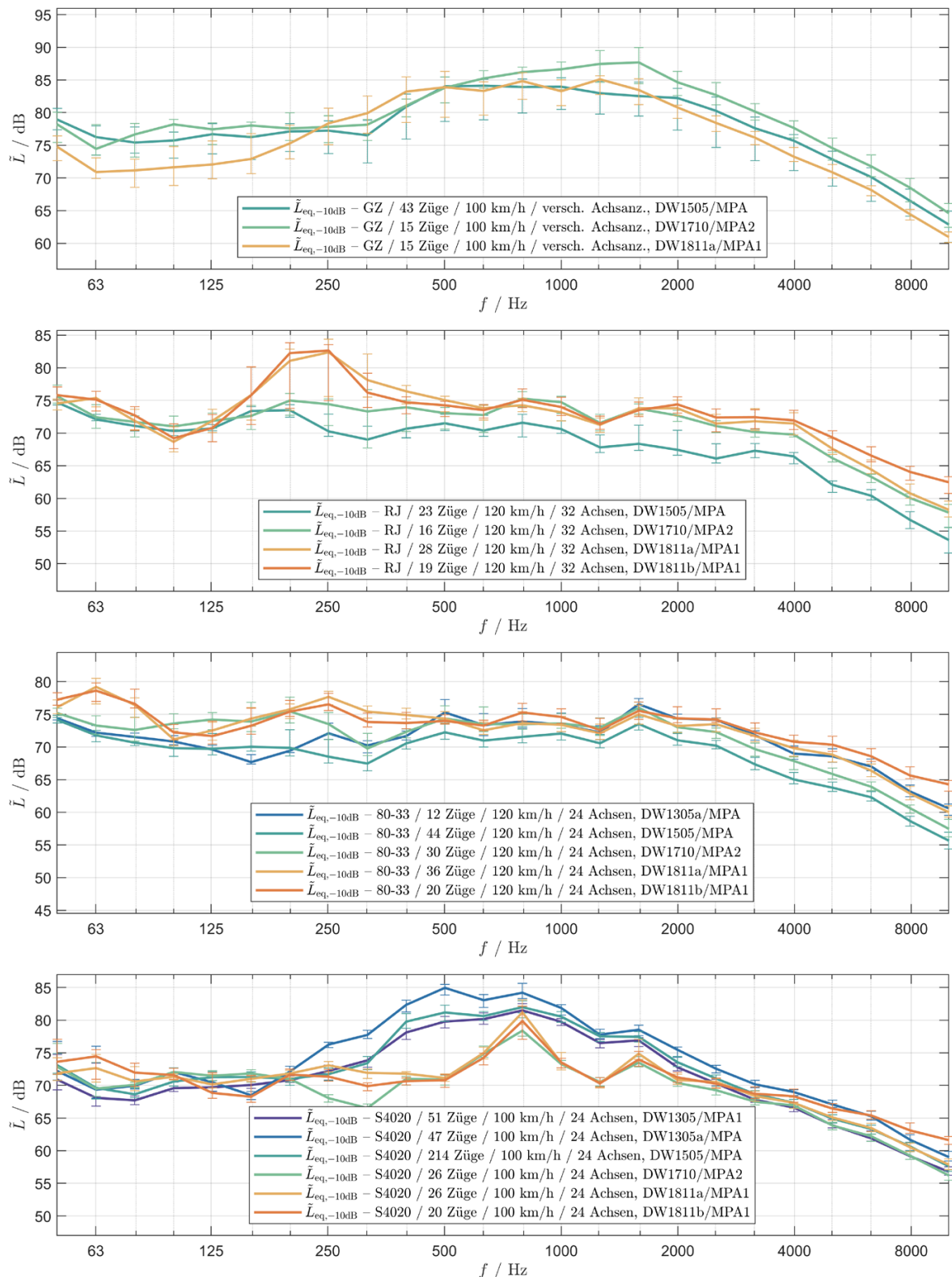


Abb. 6-3: Beschränkung der in Abb. 6-1 und Abb. 6-2 dargestellten Mediane und Interquartilabstände der in Messpunkt A erfassten Dauerschallpegel $\tilde{L}_{eq,-10dB}$ auf jene Messserien, bei welchen akustische Schienenrauheiten zur Gänze und Gleisabklingraten weitestgehend die Anforderungen der ÖNORM EN ISO 3095 erfüllen – Diagramme von oben nach unten: Güterzüge, Railjets, Doppelstockreisezüge 8033 und Schnellbahnen 4020

gesicherter Ergebnisse unterstrichen. Hinsichtlich der Oberbaueigenschaften ist jedoch zu erwähnen, dass entsprechend der nachfolgenden Analysen eine über die Einhaltung von Grenzkurven hinausgehende Berücksichtigung erhobener Absolutwerte teilweise eine gewisse Verringerung der Variationsbreite herbeiführen könnte. Auf eine vertiefende Untersuchung der Unterschiede in den dargestellten Emissionsspektren wird aufgrund der zu untersuchenden Forschungsfrage im vorliegenden Projekt jedoch verzichtet.

6.2. Messtechnisch erfasste, akustische Schienenrauheit

Akustische Schienenrauheiten können anhand der ÖNORM EN 15610 (Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen) aus dem Jahr 2009 [10] messtechnisch bestimmt werden. Im Detail behandelt diese Norm das Messverfahren, die Datenauswertung und die Ergebnisdarstellung. Seit dem Jahr 2017 ist unter der gleichen Normungsnummer der Entwurf ÖNORM EN 15610 (Messung der Schienen- und Radrauheiten im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen) [13] publik, bei welchem gegenüber der Norm aus dem Jahr 2009 die Radrauheitsbestimmung ergänzt und der Bereich der Schienenrauheit überarbeitet wurde.

Beide Normen sehen die Ermittlung der Schienenrauheiten auf beiden Schienen vor. In Abhängigkeit der Breite der Referenzfläche (jener Teil der Oberfläche am Schienenkopf, welcher für die Beurteilung der akustischen Schienenrauheit gewählt wird) sind eine oder drei Messspuren (letztere mit gleichem, seitlichen Abstand zueinander) zu wählen. Entlang dieser Messspuren sind jeweils die Oberflächenverläufe abzutasten und daraus getrennt für jede der Spuren die Rauheitsspektren zu berechnen. Die aktuell gültige Norm aus dem Jahr 2009 sieht daher vor, dass das Berechnungsverfahren je betrachtetem Gleisabschnitt zwei (eines je Schiene) oder sechs (drei je Schiene) Rauheitsspektren liefert. Im Hinblick auf die Akzeptanz einer Teststrecke nach ÖNORM EN ISO 3095 darf keines dieser Rauheitsspektren das vorgegebene, obere Grenzspektrum überschreiten, wodurch die Bedeutung der einzelnen Rauheitsspektren unterstrichen wird. Entsprechend der Erfahrungen der Autoren können sich erfasste Rauheitsspektren zwischen den Schienen, aber auch zwischen den Messspuren deutlich unterscheiden. Als Beispiel sei hier auf die in Abb. 3-4 dargestellten Rauheitsspektren des Messquerschnitts in Deutsch-Wagram verwiesen, bei welchen trotz eines glatten Gleises in einigen Wellenlängenbereichen Unterschieden von bis zu ~5 dB vorhanden sind. Auch im Normenentwurf der ÖNORM EN 15610 wird in einer Anmerkung Ähnliches zur Schienenrauheit erwähnt: *„Die Lauffläche darf breit sein und die Erfahrung zeigt, dass es erhebliche Unterschiede in der akustischen Rauheit im Hinblick auf die Querrichtung*

gibt. ...“ [10]. Darüber hinaus wird angeführt, dass bestimmte Fahrzeuge nur Teile dieser Lauffläche nutzen und deshalb auch nur einen Teil der Lauffläche (entsprechend der jeweiligen Anforderungen eines bestimmten Tests) beurteilt werden kann.

Demgegenüber wird die akustische Schienenrauheit eines Gleisabschnitts in dem Berechnungsmodell gemäß der Richtlinie 2015/996/EU lediglich durch ein einzelnes Rauheitsspektrum charakterisiert. Hinweise, wie aus den mehreren, normgerecht erfassten Rauheitsspektren ein im Sinne der Prognose repräsentatives Gesamtspektrum zu ermitteln ist, wird in der derzeit gültigen ÖNORM EN ISO 3095 nicht gegeben. Lediglich der Normentwurf aus 2017 fordert zusätzlich zur Angabe der einzelnen Rauheitsspektren je Schiene und Messspur, dass auch für alle Spuren und beide Schienen die mittlere Rauheitsspur als ein energetischer Mittelwert (RMS) berechnet werden muss [13]. Aus Sicht der Autoren erscheint eine andere, als eine energetische Mittelung aller ermittelten Rauheitsspektren des betrachteten Abschnitts aus Mangel an praktikablen Alternativen naheliegend, weshalb sie für die weiteren Betrachtungen auch verwendet wird. Jedoch muss insbesondere vor dem Hintergrund der im jüngsten Normenentwurf angeführten Anmerkung über die Möglichkeit, dass Fahrzeuge nur Teile der Fahrfläche nutzen können und diese letztendlich von einem energetischen Mittelwert aller Spuren auch deutlich abweichen können, festgehalten werden, dass die energetische Mittelung für die durchschnittlichen Emissionen bei heterogenem Zugmix vermutlich eine gute Schätzung liefert. Allerdings stellt die Variation der Rauheiten auf der Fahrfläche bei einer Gegenüberstellung von Mess- und Rechenwerten einzelner Fahrzeugtypen oder Zugskategorien einen Unsicherheitsfaktor mit möglicherweise systematischen Abweichungen dar.

In Abb. 6-4 sind die akustischen Schienenrauheiten der in diesem Projekt betrachteten Messserien in Form von energetischen Mittelwerten über die Schienen und zum Teil über mehrere Spuren (aus Mangel an für die Auswertung zur Verfügung gestellten Daten konnte nicht stets über alle Spuren gemittelt werden) einander, sowie dem oberen Grenzspektrum gemäß ÖNORM EN ISO 3095 gegenübergestellt. Zum einen ist zu erkennen, dass keine der Rauheitsspektren die Grenzkurve verletzt, sondern die Spektren im mittleren und kurzen Wellenlängenbereich stets mehrere Dezibel unter der Grenzkurve liegen und sich dieser Abstand mit zunehmender Wellenlänge weiter auf rund 10 dB bis 30 dB erhöht. Zum anderen ist über den gesamten Wellenlängenbereich eine Streuung im Bereich von rund 5 dB zu beobachten, welche hin zu den größeren Wellenlängen etwas zunimmt und auch Variationen > 10 dB auftreten.

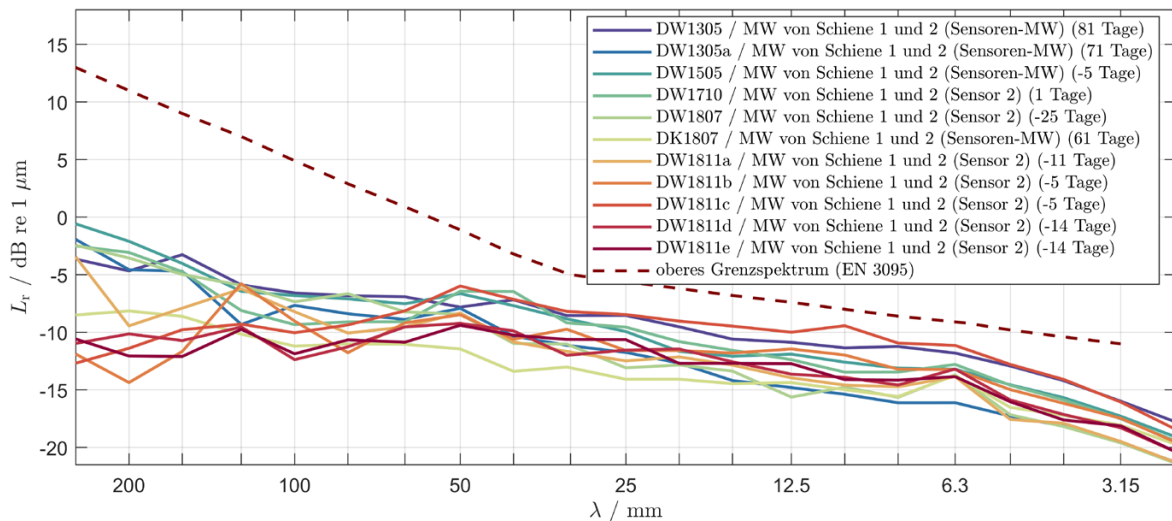


Abb. 6-4: Gegenüberstellung der akustischen Schienenrauheiten (energetische Mittelung der erfassten Rauheitsspektren) aller Messserien, sowie oberes Grenzspektrum nach ÖNORM EN ISO 3095 [4]

Aufgrund der Rauheitsspektren kann bei allen Messserien von einem sehr glatten Gleis ausgegangen werden. Zur Abschätzung des Einflusses der Streuung im Bereich der Grenzkurve und dem darunter liegenden Bereich für sehr glatte Schienen wird im Folgenden die Auswirkungen unterschiedlicher Spektren auf die Rechenwerte gemäß der Richtlinie 2015/996/EU abgeschätzt. Konkret wird das Spektrum der Schienenrauheit $L_{r,TR}$ für ein sehr glattes Gleis und gutem Wartungszustand, welches im Wesentlichen auf der oberen Grenzkurve der ÖNORM EN ISO 3095 beruht und hin zu kürzeren und längeren Wellenlängen erweitert wurde, herangezogen und im Bereich von -25,0 dB bis +2,5 dB in 2,5 dB Schritten variiert (siehe Abb. 6-5).

Das Rechenmodell der Richtlinie 2015/996/EU beruht auf dem Ansatz, dass die effektive Gesamtrauheit $L_{R,TOT}$ jene Größe ist, die für die Schwingungsanregung von Oberbau und Fahrzeug alleinig verantwortlich ist. Eine Veränderung der Gesamtrauheit wirkt sich daher unmittelbar und unabhängig der fahrzeug- und oberbauabhängigen Transferfunktionen auf die prognostizierten Schalleistungen aus. Die Frage der Änderung der Prognosewerte kann daher durch die Frage der Änderung der in den Frequenzbereich transformierten, effektiven Gesamtrauheit $L_{R,TOT}$ ersetzt werden. Für eine weitere Vereinfachung wird auf die erwähnte Transformation an dieser Stelle verzichtet und lediglich die Änderungen der effektiven Gesamtrauheit im Wellenlängenbereich betrachtet. Die berechneten Terzbandpegel im Wellenlängenbereich entsprechen dadurch zwar nicht exakt jenen im Frequenzbereich, die Form der spektralen Verteilung wird durch die Transformation im Allgemeinen nur wenig beeinflusst (es kommt lediglich zu Verschiebungen von Anteilen

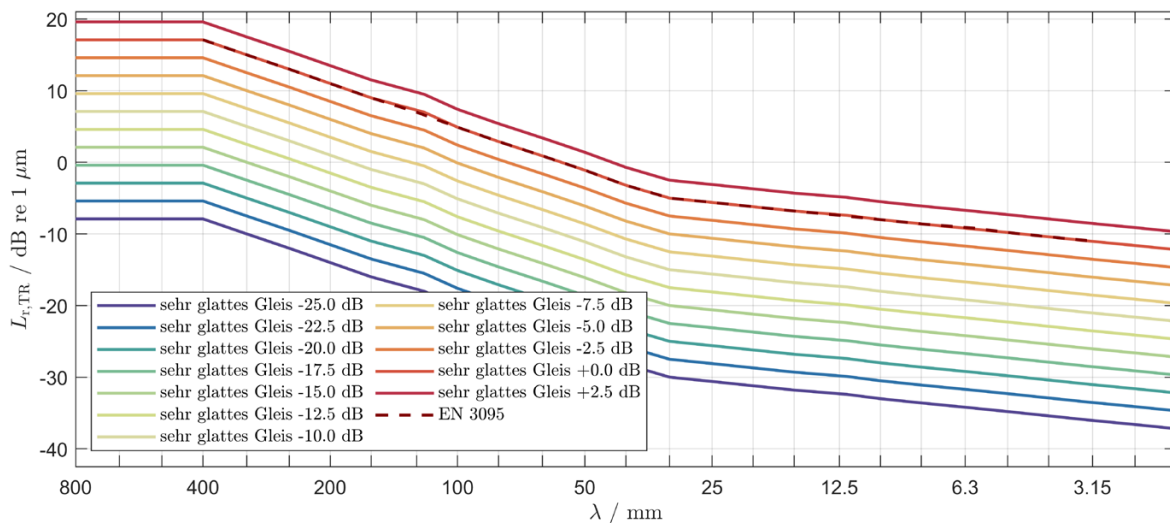


Abb. 6-5: Variation der Schienenrauheit $L_{r,TR}$ der Richtlinie 2015/996/EU für ein sehr glattes Gleis und gutem Wartungszustand, welche auf der ÖNORM EN ISO 3095 basiert, als Eingangsdaten zur Untersuchung der Auswirkung auf prognostizierte Rechenwerte (Variationsbereich von -25,0 dB bis +2,5 dB)

zwischen benachbarten Terzen). Die Änderungen der effektiven Gesamtrauheit werden im Folgenden auf die Gesamtrauheit eines gemäß der Richtlinie 2015/996/EU sehr glatten Gleises bezogen, welches in Abb. 6-5 dem Rauheitsspektrum mit Verschiebung von +0,0 dB entspricht und nachfolgend als Referenzspektrum bezeichnet wird. Durch diese Differenzbildung von effektiven Gesamtrauheiten entsteht zudem eine Unabhängigkeit vom Kontaktfilter, sodass eine Änderung in der Gesamtrauheit ausschließlich durch das jeweilige Verhältnis von Rad- und Schienenrauheit bestimmt wird.

Demzufolge werden die Änderungen der effektiven Gesamtrauheit für die drei in der Richtlinie 2015/996/EU definierten Radrauheiten bei Graugussklotzbremsen (Abb. 6-6, oben), bei Verbundstoffbremsen (Abb. 6-6, Mitte) und bei Scheibenbremsen (Abb. 6-6, unten) getrennt betrachtet. Um eine Einschätzung der jeweils zugehörigen Frequenzbereiche zu erlauben, wurden exemplarisch die Terzbandmittenfrequenzen einer Transformation in den Frequenzbereich für eine Fahrgeschwindigkeit v von 100 km/h in den Diagrammen eingetragen. Ebenso lassen sich damit die Wellenlängenbereiche für andere Geschwindigkeiten grob abschätzen: beispielsweise führt eine Halbierung der Geschwindigkeit auch zu einer Halbierung der Frequenzen.

Anhand der Diagramme in Abb. 6-6 ist gut zu erkennen, dass bis zum dem mittleren Wellenlängenbereich von 50 mm bis 100 mm tendenziell geringere Änderungen der effektiven Gesamtrauheit als im langwelligen Bereich vorhanden sind, wobei bei Graugussklotzbremsen die Änderung vernachlässigbar erscheinen. Verbundstoffbremsen weisen bei äußerst glatten Schienen Änderungen von wenigen Dezibel auf, welche hin zu

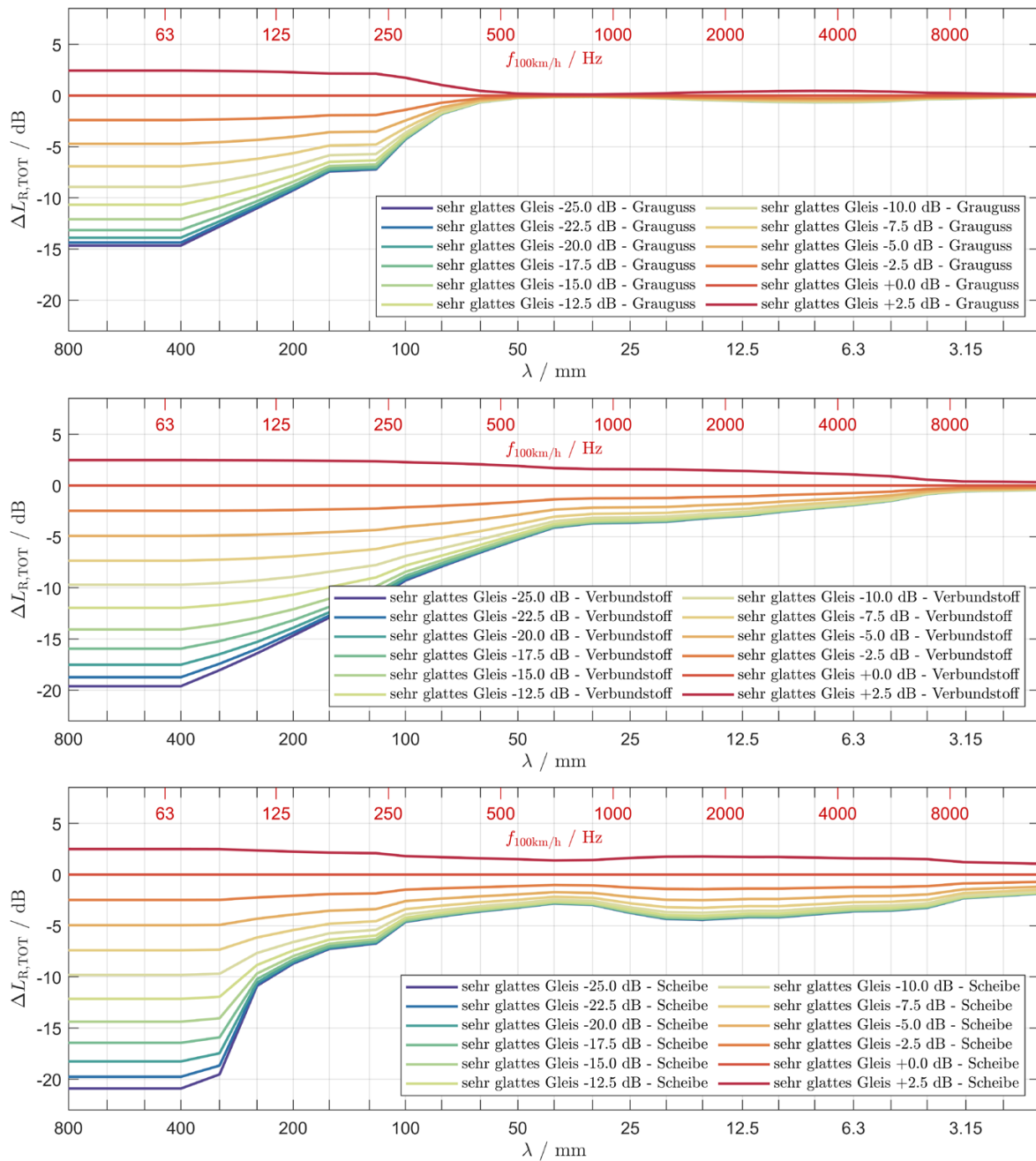


Abb. 6-6: Änderung der effektiven Gesamtrauheit $\Delta L_{R,TOT}$ (im Wellenlängenbereich) in Abhängigkeit der Schienenrauheit gegenüber der Gesamtrauheit bei einem sehr glatten Gleis nach Richtlinie 2015/996/EU für die in der Richtlinie enthaltenen Radrauheiten bei Graugussklotzbremsen (oben), Verbundstoffbremsen (Mitte) und Scheibenbremsen (unten), inkl. exemplarischer Angabe der Terzbandmittenfrequenzen bei einer Transformation in den Frequenzbereich für eine Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h

sehr kurzen Wellenlängen gegen Null streben. Bei Scheibenbremsen bewegen sich die Änderungen im mittleren Wellenlängenbereich in ähnlichen Größenordnungen, der Abfall hin zu kurzen Wellenlängen ist jedoch deutlich weniger ausgeprägt. Allen drei Radrauheiten gemein ist die stark zunehmende Abhängigkeit hin zu großen

Wellenlängen, bei welchen sich mäßige Unterschreitungen des Referenzspektrums direkt in der effektiven Gesamtrauheit abbilden. Erst bei sehr hohen Unterschreitungen und damit äußerst geringen Schienenrauheiten nimmt diese Abhängigkeit ab, sodass sich eine weitere Verringerung der Schienenrauheit in der Gesamtrauheit nur mehr in einem sich verringernden Ausmaß bemerkbar macht (bei Graugussklotzbremsen ist diese Sättigung im Bereich von Rauheitspegeln zu erkennen, die rund 20 dB unterhalb des Referenzspektrums liegen; bei Verbundstoff- und Scheibenbremsen sind noch geringere Schienenrauheiten erforderlich).

Grund für diese zum Teil starke Abhängigkeit liegt in den erwähnten Größenverhältnissen zwischen Schienen- und Radrauheiten: sind die Schienenrauheiten deutlich größer als die Radrauheiten, wird die Gesamtrauheit von ihnen bestimmt und Änderungen der Schienenrauheiten ziehen eine nahezu gleiche Änderung der effektiven Gesamtrauheit nach sich. Erst wenn Schienen- und Radrauheiten in ähnlichen Größenordnungen liegen, nimmt diese Abhängigkeit ab. Und dominieren die Radrauheiten, so sind Änderungen in der Schienenrauheiten in der Regel vernachlässigbar.

Werden nun die Diagramme aus Abb. 6-6 mit den bei den Messserien erfassten Schienenrauheiten aus Abb. 6-5 verglichen, so kann grob abgeschätzt werden, dass sich im Wellenlängenbereich ≤ 40 mm die beobachtete Streubreite von rund 5 dB bei rauen Güterzugrädern kaum eine Auswirkung haben werden. Bei glatten Rädern sind hingegen bis zu sehr kurzen Wellenlängen von rund 5 mm bis 10 mm zumindest Variationsbreiten der Gesamtrauheiten von wenigen Dezibel zu erwarten. Für Wellenlängen > 40 mm nimmt die Differenz die erfassten Rauheitspegel gegenüber dem Referenzspektrum zu, wodurch die beschriebene, steigende Abhängigkeit der effektiven Gesamtrauheit einigermaßen kompensiert wird. Beispielsweise liegen die gemessenen Schienenrauheiten bei einer Wellenlänge von 200 mm rund 13 dB bis 25 dB unterhalb der Referenzkurve. Werden die beiden Differenzspektren der effektiven Gesamtrauheit für Schienenrauheiten, die 12,5 dB und 25,0 dB unterhalb des Referenzspektrums liegen, verglichen, beträgt die Differenz bei einer Wellenlänge von 200 mm bei Graugussklotzbremsen 1,4 dB und bei Scheibenbremsen 1,3 dB, während Verbundstoffbremsen Differenzen 4,0 dB aufweisen. Insofern bewegen sich auch im Bereich höherer Wellenlängen die durch Schienenrauheitsunterschiede der Messstellen hervorgerufenen Streubreiten der effektiven Gesamtrauheiten aufgrund der äußerst geringen Schienenrauheiten auf einem ähnlichem Niveau von wenigen Dezibel wie bei kürzeren Wellenlängen.

Unter der Voraussetzung, dass die zugrunde liegende Modellvorstellung reale Zusammenhänge ausreichend gut beschreibt, verdeutlichen die Auswertungen den Einfluss der Schienenrauheit auf die Emissionsquellstärken. Besteht lediglich als Anforderungen an die Schienenrauheiten von Messstellen das obere Grenzspektrum gemäß der ÖNORM EN ISO 3095 einzuhalten, so sind als Folge unterschiedlicher Schienenrauheiten bei ansonsten gleichen Rahmenbedingungen zwischen Messwerten unterschiedlicher Messstellen, aber auch zwischen Messwerten und Prognosewerten, welche auf den Standardwerten der Richtlinie 2015/996/EU für ein sehr glattes Gleis (hier als Referenzspektrum bezeichnet) beruhen, abhängig von Vorbeifahrtsgeschwindigkeit und betrachtetem Frequenzband signifikante Pegeldifferenzen zu erwarten, insbesondere

- bei Vorhandensein großer Unterschiede der Rauheitsspektren (wie beispielsweise einer Messstelle mit äußerst glattem Gleis, während die zweite Messstelle Rauheiten nahe dem Referenzspektrum aufweist bzw. die Rechenwerte auf dem Referenzspektrum beruhen),
- bei Zügen mit glatten Rädern, wodurch der Einfluss der Schienenrauheit zunimmt und/oder
- im Bereich größerer Wellenlängen, bei welchen die Schienenrauheiten zumeist maßgeblich sind.

Ein weiterer, im Hinblick auf den Einfluss der Schienenrauheiten bisher nicht erwähnter Aspekt liegt in der messtechnischen Erfassung der Schienenrauheiten. Die ÖNORM EN 15610 [10] sieht als Mindestanforderung vor, die Schienenrauheiten für den Wellenlängenbereich von 3,15 mm bis 100 mm (oder gegebenenfalls 250 mm) zu ermitteln. Wie anhand der in Abb. 6-6 exemplarisch für eine Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h eingetragenen Frequenzachse ersichtlich ist, sind zur Abdeckung der Terzbänder von 50 Hz bis 10000 Hz (bzw. der in der Prognoserechnung betrachteten Oktavbänder von 63 Hz bis 8000 kHz) Rauheitsspektren über einen Wellenlängenbereich erforderlich, der über die Mindestanforderung der ÖNORM EN 15610 hinausgeht. Zum Teil stoßen Messgeräte jedoch an Grenzen (beispielsweise in Bezug auf Messprinzip, Genauigkeit oder Praxistauglichkeit), welche eine entsprechende Erweiterung des Wellenlängenbereichs verhindern.

Sofern messtechnisch erfasste Schienenrauheiten nicht den für die betrachteten Fahrgeschwindigkeiten erforderlichen Wellenbereich umfassen, bedarf es einer Extrapolation der Rauheitsspektren. Die in der Richtlinie 2015/996/EU enthaltenen Standardwerte für Schienenrauheiten scheinen aufgrund der sich über die Terzbänder

ändernden Rauheitspegel für den Bereich von 1 mm bis 400 mm bestimmt worden zu sein, während für die jeweils anschließenden Terzbänder die Werte des 1 mm Bandes bzw. des 400 mm Bandes konstant fortgesetzt wurden. Da für diese Extrapolationsstrategie jedoch weder eine physikalische Begründung gegeben wird noch diese ersichtlich ist, werden für die weiteren Betrachtungen auch folgende, alternative Extrapolationen betrachtet:

- Verwendung der Standardwerte der Richtlinie 2015/996/EU für die Schienenrauheiten eines durchschnittlichen Netzes mit glattem Gleis bzw. bei normalem Wartungszustand,
- Verwendung der Standardwerte der Richtlinie 2015/996/EU für die Schienenrauheiten eines Netzes mit sehr glattem Gleis bzw. bei gutem Wartungszustand (EN ISO 3095:2013) oder
- Fortführung des oberen Grenzspektrums gemäß ÖNORM EN ISO 3095, welches entsprechend der Rauheitspegel der Randterzbänder des erfassten Spektrums verschoben wird.

Die unterschiedlichen Extrapolationsstrategien sind in Abb.6-7 am Beispiel der Schienenrauheiten der Messserie in Deutsch-Wagram im Jahr 2015 (DW1505) dargestellt. Unter anderem wird ersichtlich, dass bei Verwendung von Standardwerten in der Regel Sprungstellen an den Übergängen von Mess- zu Extrapolationswerten auftreten. Von Bedeutung ist weiters, dass die in Richtlinie 2015/996/EU vorgeschlagenen Schienenrauheiten für ein durchschnittliches Netz im Wellenlängenbereich > 100 mm und < 2 mm geringere Werte als jene für ein Netz mit sehr glattem Gleis (EN ISO 3095:2013)

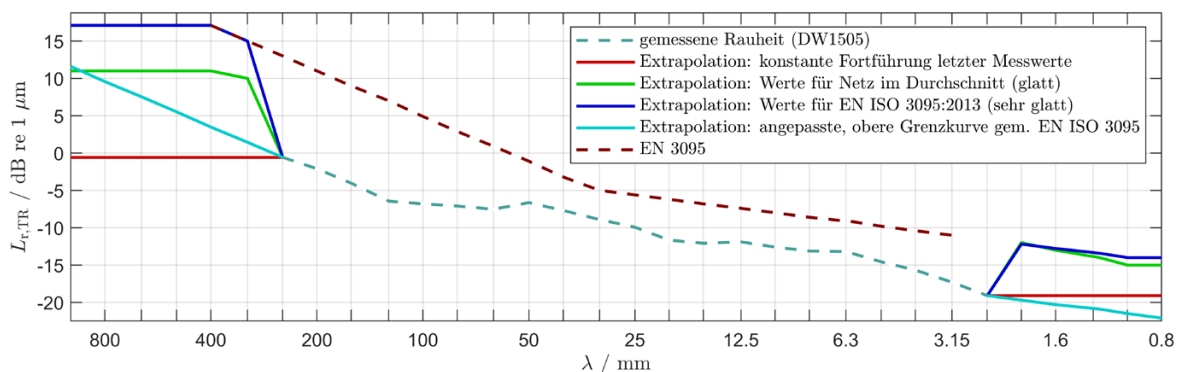


Abb. 6-7: Verschiedene Strategien zur Extrapolation von nach ÖNORM EN 15610 messtechnisch erfassten, akustischen Schienenrauheiten, dargestellt am Beispiel der im Wellenlängenbereich von 2,5 mm bis 250 mm messtechnisch bestimmten, akustischen Schienenrauheit bei der Messserie DW1505 (energetischer Mittelwert über die beiden Schienen), sowie oberes Grenzspektrum nach ÖNORM EN ISO 3095 [4]

aufweisen. Jedoch muss festgehalten werden, dass für die genannten Extrapolationsstrategien keine Beweise für deren Korrektheit existieren und folglich keiner Strategie einen Vorzug gegeben werden kann.

6.3. Transformation Wellenlänge zu Frequenz

Wie bereits erwähnt muss die effektive Gesamtrauheit $L_{R,TOT}$, welche aus der energetischen Summation von Schienen- und Radrauheiten und der Addition des Kontaktfilters gebildet wird, gemäß Richtlinie 2015/996/EU vom Wellenlängen- in den Frequenzbereich in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit v transformiert werden. Da die Rauheitsspektren von Rad und Schiene wie auch der Kontaktfilter im Wellenlängenbereich als Terzbandspektren vorliegen, ist eine genauere Transformation eines feiner aufgelösten Rauheitsspektrums weder möglich noch in der Richtlinie 2015/996/EU vorgesehen. Da nur für isolierte Geschwindigkeiten die Grenzen der Terzbänder im Wellenlängenbereich und im Frequenzbereich übereinstimmen und nur dann Terzbandpegel unverändert übernommen werden können, sind im Allgemeinen Terzbandwerte neu zu bestimmen. Als Hinweis für diese Konvertierung wird in der Richtlinie eine energetische und proportionale Mittelung im Wellenlängenbereich jeweils zweier entsprechender Terzbandpegel erwähnt [5].

Bevor auf die Transformation näher eingegangen wird, werden zunächst Definitionsmöglichkeiten von Terzbändern diskutiert. Für den Frequenzbereich kann hierzu die ÖVE/ÖNORM EN 61260-1 [16], welche in Bezug auf die Elektroakustik die Anforderungen an Bandfilter für Oktaven und Bruchteilen von Oktaven beschreibt, herangezogen werden. Dabei werden die exakten Bandmittenfrequenzen für Terzbänder (im Weiteren und damit abweichend der ÖVE/ÖNORM EN 61260-1 als $f_{m,exakt}$ bezeichnet) durch

$$f_{m,exakt} = f_0 \cdot 10^{\frac{x}{10}} \quad \text{mit der Bezugsfrequenz } f_0 = 1000 \text{ Hz und } x \text{ als ganze Zahl}$$

definiert. Die Grenzfrequenzen der Durchlassbereiche von Terzbandfilter f_1 und f_2 werden jeweils über die Bandmittenfrequenzen durch

$$f_1 = f_{m,exakt} \cdot 10^{-\frac{1}{20}} \quad \text{als untere Grenzfrequenz und}$$

$$f_2 = f_{m,exakt} \cdot 10^{+\frac{1}{20}} \quad \text{als obere Grenzfrequenz}$$

festgelegt. Durch diese Definitionen ergibt sich eine lückenlose Abdeckung der Frequenzskala durch die Terzbänder, da stets die obere Grenzfrequenz eines Terzbandes mit der unteren Grenzfrequenz des frequenzmäßig nächsthöheren Bandes

$f_{m,exakt}$	$f_{m,RL2015}$	F_{rel}	$f_{m,exakt}$	$f_{m,RL2015}$	F_{rel}	$f_{m,exakt}$	$f_{m,RL2015}$	F_{rel}
Hz	Hz	%	Hz	Hz	%	Hz	Hz	%
50,12	50,00	-0,237	316,23	316,00	-0,072	1995,26	2000,00	0,237
63,10	63,00	-0,152	398,11	400,00	0,475	2511,89	2500,00	-0,473
79,43	80,00	0,714	501,19	500,00	-0,237	3162,28	3160,00	-0,072
100,00	100,00	0,000	630,96	630,00	-0,152	3981,07	4000,00	0,475
125,89	125,00	-0,709	794,33	800,00	0,714	5011,87	5000,00	-0,237
158,49	160,00	0,953	1000,00	1000,00	0,000	6309,57	6350,00	0,641
199,53	200,00	0,237	1258,93	1250,00	-0,709	7943,28	8000,00	0,714
251,19	250,00	-0,473	1584,89	1600,00	0,953	10000,0	10000,0	0,000

Tab. 6-1: Vergleich der exakten Bandmittenfrequenzen $f_{m,exakt}$ von Terzbändern gemäß ÖVE/ÖNORM 61260-1 [16] und der Nennwerte $f_{m,RL2015}$ der Richtlinie 2015/996/EU [5] durch Gegenüberstellung und Angabe des relativen Fehlers F_{rel}

ident ist. Da die exakten Werte bis auf ganzzahlige Zehnerpotenzen reelle Zahlen sind (siehe 1. Spalte der Tab. 6-1) und daher für die Darstellung in der Praxis ungünstig erscheinen, werden auch Nennwerte für die Terzbänder im normativen Anhang E der ÖVE/ÖNORM EN 61260-1 angeführt.

Die Richtlinie 2015/996/EU löst sich von diesen beiden Konventionen und beschreibt bei der Definition von Transferfunktionen Nennwerte für die Terzbandmittenfrequenzen, die jedoch zum Teil geringere Differenzen zu den exakten Mittenfrequenzen aufweisen. Diese Nennwerte, die aufgrund der mathematischen Zusammenhänge im Rechenmodell zu der effektiven Gesamttraueit $L_{R,TOT}$ auch für das Zielspektrum der Transformation aus dem Wellenlängenbereich gelten, sowie die relativen Fehlern F_{rel} , welche sich im Bereich von -0,709 % bis +0,953 % bewegen, sind in Tab. 6-1 zusammengestellt.

Auch für Terzbänder im Wellenlängenbereich, welche für die Festlegung von Standardwerten für die Schienenrauheit $L_{r,TR}$, die Radrauheit $L_{r,VEH}$ und für Kontaktfilter A_3 in der Richtlinie 2015/996/EU verwendet werden, besteht eine ähnliche Situation. So können die Terzbandmittenfrequenzen aus der ÖVE/ÖNORM EN 61260-1 auch für Wellenlängen verwendet werden (beispielsweise bezieht sich die Messnorm für Schienenrauheiten, die ÖNORM EN 15610 [10], bei der Definition der Terzfilter zur Bestimmung bei Bandpegel der Schienenrauheit auch auf die ÖVE/ÖNORM EN 61260-1). Bei der Definition der erwähnten Standardwerte in der der Richtlinie 2015/996/EU, werden erneut eigene Nennwerte angeführt. Tab. 6-2 vergleicht analog zur Tab. 6-1 die Bandmittenwerte im Wellenlängenbereich. Dabei ist zu erkennen, dass zwar oftmals gleiche Nennwerte wie bei den Frequenzterzbändern verwendet wurden, vereinzelt

$\lambda_{m,exakt}$	$\lambda_{m,RL2015}$	F_{rel}	$\lambda_{m,exakt}$	$\lambda_{m,RL2015}$	F_{rel}	$\lambda_{m,exakt}$	$\lambda_{m,RL2015}$	F_{rel}
mm	mm	%	mm	mm	%	mm	mm	%
1000,00	1000,00	0,000	79,43	80,00	0,714	6,31	6,30	-0,152
794,33	800,00	0,714	63,10	63,00	-0,152	5,01	5,00	-0,237
630,96	630,00	-0,152	50,12	50,00	-0,237	3,98	4,00	0,475
501,19	500,00	-0,237	39,81	40,00	0,475	3,16	3,20	1,193
398,11	400,00	0,475	31,62	31,50	-0,388	2,51	2,50	-0,473
316,23	315,00	-0,388	25,12	25,00	-0,473	2,00	2,00	0,237
251,19	250,00	-0,473	19,95	20,00	0,237	1,58	1,60	0,953
199,53	200,00	0,237	15,85	16,00	0,953	1,26	1,25	-0,709
158,49	160,00	0,953	12,59	12,00	-4,681	1,00	1,00	0,000
125,89	120,00	-4,681	10,00	10,00	0,000	0,79	0,80	0,714
100,00	100,00	0,000	7,94	8,00	0,714			

Tab. 6-2: Vergleich der exakten, aus der ÖVE/ÖNORM 61260-1 [16] abgeleiteten Bandmittenwerte $\lambda_{m,exakt}$ von Wellenlängenterzbändern und der Nennwerte $\lambda_{m,RL2015}$ der Richtlinie 2015/996/EU [5] durch Gegenüberstellung und Angabe des relativen Fehlers F_{rel}

jedoch davon abgewichen wurde, woraus deutlich höhere relative Fehler resultieren (beispielsweise beträgt der Fehler bei $\lambda_{m,RL2015}$ von 120 mm oder 12 mm -4,681 %). Der Grund für diese unterschiedliche Definition zu Frequenzbändern erschließt sich den Autoren nicht.

Die unterschiedlichen Terzbanddefinitionen in Kombination mit dem vage beschriebenen Rechenweg für die Transformation in der Richtlinie 2015/996/EU bieten Spielraum für verschiedene Implementierungen der Umrechnung von effektiven Gesamtrauheiten in den Frequenzbereich, wobei drei wesentliche Ansätze im Folgenden diskutiert werden.

- Variante A - exakte Bandmittenwerte und Betrachtung von Bandenergien

Aufgrund der in der gültigen ÖNORM EN 15610 [10] enthaltenen, informativen Referenzimplementierung zur Terzspektrenbestimmung mittels Fourieranalyse (Verfahren A) und aufgrund der Anforderungen für den alternativen Weg einer Digitalfilterung (Verfahren B), sind Filter entsprechend der EN 61260 zu verwenden. In weiterer Folge kann davon ausgegangen werden, dass normgerecht erfasste Schienenrauheiten auf exakten Bandmittenwerten und Bandgrenzen beruhen. Für die Erfassung von Radrauheiten besteht hingegen derzeit keine gültige Norm und der entsprechende Normentwurf aus dem Jahr 2017 [13] liefert für die Frage exakter Bandmittenwerte und -grenzen keine Hinweise. Ebenso ist unklar, ob die in der Richtlinie 2015/996/EU enthaltenen Standardwerte für Schienen- und Radrauheiten,

sowie für Kontaktfilter auf Basis exakter Bandmittenwerte und –grenzen oder auf Basis von Nennwerten ermittelt wurden.

Jedoch sind Nennwerte in der Regel gerundete Werte für eine einfachere Bezeichnung und demzufolge klar von Rechenwerte zu differenzieren. Unter diesem Gesichtspunkt verwendet Berechnungsansatz A exakte Bandmittenwerte und -grenzen für die Terzbänder im Wellenlängen- und im Frequenzbereich. Zur Berechnung der Bandpegel im Frequenzbereich werden bei dieser Variante die Bandfrequenzen zunächst über die Fahrgeschwindigkeit in Wellenlängen umgerechnet (Definition der Zielterzbänder). Im Anschluss werden aus den Terzbandpegel der effektiven Gesamtrauheit (Eingangsterzbänder) die Rauheitspegel der Zielterzbänder berechnet, welche für den Frequenzbereich direkt übertragbar sind. Im Detail werden zur Bestimmung des Rauheitspegel eines Zielterzbands jene Eingangsterzbänder herangezogen, die von dem jeweiligen Zielterzband überlappt werden. Da in der Regel die Bandgrenzen der Zielbänder nicht mit jenen Eingangsbänder übereinstimmen – in diesem Fall wäre der Rauheitspegel direkt zu übernehmen –, sind jeweils die Energieanteile der von dem Zielband überlappten Bereiche der Eingangsbänder energetisch zu addieren. Dazu gleichwertig (und in der Regel einfacher in der Implementierung) können die Rauheitspegel in den Zielbändern auch durch lineare Interpolation der Bandenergien der Eingangsbänder (bezogen auf die jeweiligen Bandmittenfrequenzen) auf die Bandmittenfrequenzen der Zielbänder berechnet werden.

- Variante B – Bandmittenwerte (im Frequenz- und Wellenlängenbereich) entsprechend der Richtlinie 2015/996/EU und Betrachtung von Bandenergien

Der Berechnungsansatz B unterscheidet sich von der Variante A lediglich dadurch, dass als Bandmittenwerte im Frequenz- und Wellenlängenbereich die in der Richtlinie 2015/996/EU genannten Nennwerte verwendet werden. In weiterer Konsequenz können jedoch die Bandgrenzen nicht mehr bestimmt werden, weshalb die Rauheitspegel in den Zielbändern mit der erwähnten, linearen Interpolation der Bandenergiewerte zu berechnen sind.

- Variante C - Bandmittenwerte (im Frequenz- und Wellenlängenbereich) entsprechend der Richtlinie 2015/996/EU und Betrachtung von Bandpegeln

Als Hilfestellung wird von der Europäischen Kommission ein kostenloses Testtool in Form von DLLs (dynamic link library) inklusive Quellcode online bereitgestellt (siehe [17]), welches zum Vergleich der Ergebnisse eigener Implementierungen genutzt

werden kann. Obwohl die Hinweise in der Richtlinie 2015/996/EU durch den Hinweis einer energetischen Betrachtung gegen eine anteilmäßige Addition der Bandpegel spricht, deuten die im Rahmen von ELSEC durchgeführten Analysen darauf hin, dass das Testtool eine derartige Berechnung nutzt. Aus diesem Grund wird als Ansatz C eine Berechnung eingeführt, die wie Variante B die Nennwerte der Richtlinie 2015/996/EU zur Terzbandfestlegung verwendet, bei welcher jedoch die Rauheitspegel der Zielbänder mittels linearer Interpolation der Rauheitspegel der Eingangsbänder bestimmt werden. Zwar hat Variante C damit im Hinblick auf den Berechnungsaufwand einen Vorteil gegenüber den anderen beiden Varianten, jedoch sei darauf hingewiesen, dass die Summe der Bandenergien durch die Transformation nicht erhalten bleibt.

Der Frage, ob und inwieweit sich die Ergebnisse der drei dargestellten Berechnungsansätze unterscheiden, wird anhand von Simulationsrechnungen nachgegangen. Dazu wird zunächst ein stark vereinfachtes Rauheitsspektrum im Wellenlängenbereich (Eingangsterzbänder) angenommen, deren Bandpegel losgelöst von realen Rauheitsverhältnissen grundsätzlich Werte von 0 dB aufweisen. Da sich Unterschiede zwischen den Berechnungsvarianten nur bei Pegeländerungen von benachbarten Terzbändern manifestieren, wird zur Nachbildung einer solchen Änderung in einem Terzband der Bandpegel erhöht. Zur Nachbildung starker und gemäßiger Anstiege bzw. Abfälle der effektiven Gesamtrauheit wird die Simulationsrechnung jeweils getrennt für zwei unterschiedliche Pegelerhöhungen von +5 dB und +2 dB durchgeführt. Im Anschluss wird das Eingangsspektrum für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten transformiert, um die Lage zwischen erhöhtem Eingangsterzband und ausgewählten Zielterzbändern zu variieren.

Abb. 6-8 zeigt exemplarische Ergebnisse der Simulationsrechnungen für drei verschiedene, erhöhte Eingangsterzbänder mit Nennwerten für die Bandmittenwellenlängen von 10,0 mm, 12,0 mm und 16,0 mm, wobei als Zielterzband stets jenes mit einer Nennfrequenz von 1250 Hz betrachtet wird. In den Diagrammen der linken Spalte der Abb. 6-8 sind jeweils die sich in Abhängigkeit der Geschwindigkeit einstellenden Zielterzbandpegel $L_{R,TOT,f}$ für die drei Berechnungsvarianten A, B und C einander gegenübergestellt, während in der rechten Spalte die Pegeldifferenzen der beiden Varianten B und C zur Variante A mit exakten Bandmittenwerten dargestellt sind. Anhand der Pegelverläufe über der Geschwindigkeit in Abb. 6-8 (linke Spalte) ist gut zu erkennen, wie sich Änderungen der Bandmittenwerte auswirken. So kommt es zu

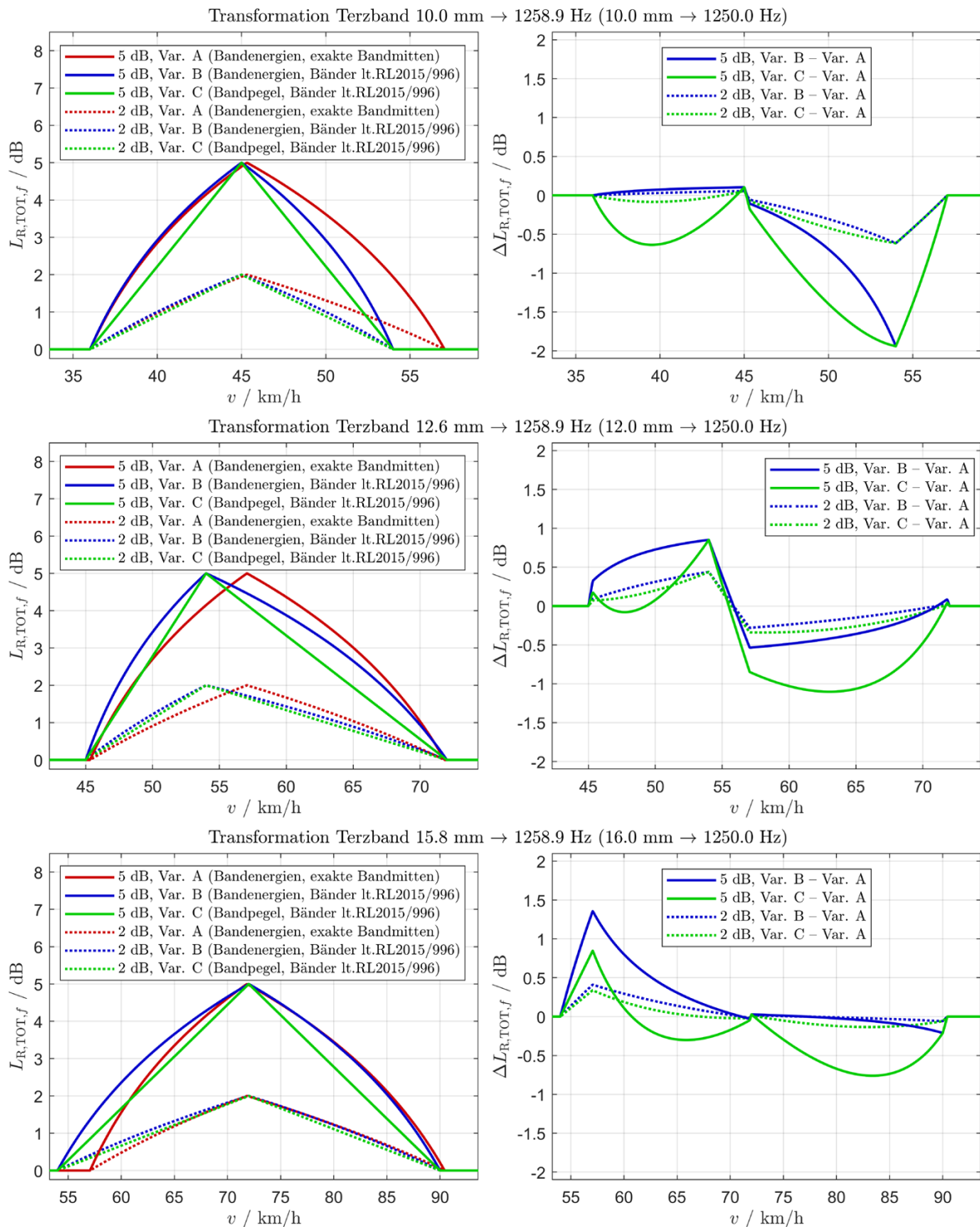


Abb. 6-8: Beispiele von in den Frequenzbereich transformierten Terzbandpegeln eines Testspektrums mit Bandpegeln von 0 dB und einem einzelnen um 2 dB bzw. 5 dB erhöhten Bandpegel bei einer Wellenlänge von 10,0 mm (oben), 12,6 mm (Mitte) oder 15,8 mm (unten) für die drei Berechnungsvarianten A, B und C – Darstellung der absoluten Pegelwerte (Diagramme der linken Spalte) und Pegeldifferenzen zur Berechnungsvariante A mit exakten Bandmittenwerten

Verschiebungen bzw. Veränderungen in der Breite der Geschwindigkeitsbereiche, in welchen sich Eingangsterzbänder auf das Zelterzband abbilden. Da gerade bei dem betrachteten Terzband mit dem Nennwert von 12,0 mm eine große relative Abweichung gegenüber der exakten Mittenwellenlänge von 12,59 mm besteht, sind der Effekt eines verschobenen Spitzenwertes in Abb. 6-8 (mittlere Zeile, linkes Diagramm), ebenso wie die Effekte verschobener Enden der Wirkungsbereiche der benachbarten Eingangsterzbänder auf das Zelterzband (obere und untere Zeile, jeweils linkes Diagramm) klar ersichtlich. Auch die Eigenschaft der linearen Interpolation von Bandenergien, bei welcher höhere Bandpegel stärker als bei einer arithmetischer Summation hervortreten, kommt zumindest bei allen drei Simulationen mit einem 5 dB erhöhten Einzelpegeln deutlich zum Vorschein (gekrümmter Anstieg bzw. Abfall über der Geschwindigkeit). Bei Einzelpegelerhöhungen von 2 dB ist dieses Verhalten ebenso beobachtbar, jedoch verhindern der in Abb. 6-8 gewählte Wertebereich der Ordinate die Erkennbarkeit.

Die in Abb. 6-8 gezeigten Differenzen zur Variante A (Diagramme der rechte Spalte) verdeutlichen den bei mehreren Berechnungen mit stichprobenartig ausgewählten Eingangs-Zelterzbandkombinationen gewonnen Eindruck, dass insbesondere durch die Verwendung von Terzbandnennwerten der Richtlinie 2015/996/EU bei höheren (aber nicht unüblichen) Pegeldifferenzen zwischen benachbarten Terzen der effektiven Gesamtraumheit bei einigen Geschwindigkeiten Unterschiede $> 1,5$ dB in den transformierten Terzbandpegeln auftreten können, meist jedoch Werte von 1 dB nicht überschritten werden. Bei mäßigeren Änderungen zwischen den Eingangsterzpegeln reduzieren sich diese Unterschiede überwiegend auf Werte $< 0,5$ dB. Zudem sei erwähnt, dass die weitere Berechnung der Schallausbreitung und damit die Ergebnisse der Prognoserechnungen in Oktavbandspektren ausgedrückt werden. Bei der erforderlichen Zusammenfassung von jeweils drei benachbarten Terzbändern ist zu erwarten, dass vereinzelte, hohe Abweichungen vermindert werden.

Des Weiteren ist anhand der Diagramme der rechten Spalte in Abb. 6-8 gut zu erkennen, dass sich bei geringen Unterschieden zwischen Nennwerten und exakten Werten der Bandmitten bei Berechnungsvariante B infolge des gleichen Interpolationsansatzes wie bei Variante A deutlich geringere Abweichungen gegenüber der Transformationen mit exakten Mittenwerten ergeben als bei Berechnungsvariante C (siehe Pegeldifferenzen $\Delta L_{R,TOT,f}$ in den Geschwindigkeitsbereiche 35 km/h bis 45 km/h des oberen und 72 km/h bis 90 km/h des unteren Diagramms). Sofern größere Abweichungen zwischen

Nennwerten und exakten Werten der Bandmitten bestehen, können sich bei Variante B aber auch höhere Differenzen zu Variante A einstellen (siehe Pegeldifferenzen $\Delta L_{R,TOT,f}$ in den Geschwindigkeitsbereiche 45 km/h bis 54 km/h des mittleren und 55 km/h bis 72 km/h des unteren Diagramms). Den Eindruck aus den stichprobenhaften Untersuchungen zufolge, aber auch aufgrund der in Tab.6-1 und Tab.6-2 ausgewiesenen, meist geringen Differenzen < 1 % erscheint Variante B im Durchschnitt geringere Abweichungen gegenüber Variante A aufzuweisen als Variante C.

Im Unterschied zu den drei dargestellten Varianten werden in der deutschen Umsetzung der Richtlinie 2015/996/EU, der Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe) (BUB-D) [18] die Wellenlängenterzbänder 120 mm, 12 mm, 3,2 mm und 1,2 mm der Richtlinie mit 125 mm, 12,5 mm, 3,15 mm und 1,25 mm angegeben. Bei den Terzbandmittenfrequenzen werden anstelle von 316 Hz, 3160 Hz und 6350 Hz die Werte 315 Hz, 3150 Hz und 6300 Hz verwendet. Die Umrechnung erfolgt laut der deutschen Berechnungsmethode [18] in Analogie zu Gleichung (12) der DIN CEN/TR 16891, über Messverfahren für kombinierte Rauheit, Gleisabklingraten und Übertragungsfunktionen [19]. Diese Gleichung beschreibt ein Verfahren zur Umrechnung der Rauheit aus dem Frequenz- in den Wellenlängenbereich, welche in der deutschen Berechnungsmethode [18] wie folgt für die Transformation vom Wellenlängen- in den Frequenzbereich umgelegt wird:

$$L_{r,tot,f} = 10 \cdot \lg \left(\frac{f_{c+} - f_m}{f_{c+} - f_{c-}} \cdot 10^{\frac{L_{r,tot}(f_{c-})}{10}} + \frac{f_m - f_{c-}}{f_{c+} - f_{c-}} \cdot 10^{\frac{L_{r,tot}(f_{c+})}{10}} \right)$$

Bei dieser Umrechnung werden wie bei Variante B bei der Interpolation Bandenergien betrachtet, allerdings erfolgt dies entgegen der Anforderung der Richtlinie 2015/996/EU im Frequenz- und nicht im Wellenlängenbereich. Nach Ansicht der Autoren wurde sowohl bei der Richtlinie 2015/996/EU, wie auch bei den Messnormen DIN CEN/TR 16891 und der ÖNORM EN 15610 einheitlich der Grundsatz verfolgt, dass physikalisch erfassbare Rauheitsspektren die Ausgangsbasis darstellen und in weiterer Konsequenz Zuordnungen zu verschobenen Terzbändern daher (physikalisch begründbar) im Wellenlängenbereich umzusetzen sind. Die deutsche Interpretation von Gleichung (12) verlässt diesen Gedankengang und wechselt mit der Transformation (ohne weitere Angabe von Gründen und aus Sicht der Autoren physikalisch nicht nachvollziehbar) in den Frequenzbereich. Durch die Kehrwertbildung bei der Berechnung von Frequenzen aus Wellenlängen werden jedoch Verhältnisse der Überlappungsbereiche der Ziel- und Quellterzbänder verändert, weshalb das deutsche Berechnungsverfahren im Allgemeinen

andere Bandpegel liefert als eine Transformation im Wellenlängenbereich. Da die Summe der Bandenergien aber auch bei einer Transformation im Frequenzbereich erhalten bleibt, sind geringe Unterschiede, insbesondere bei Oktavbandbetrachtungen zu erwarten.

Ebenfalls in Abweichung zur Richtlinie 2015/996/EU werden auch im niederländischen Bericht RIVM Letter report 2019-0023 [20] die Wellenlängen entsprechend der deutschen Vorgangsweise auf 125 mm, 12,5 mm, 3,15 mm und 1,25 mm abgeändert, die Terzbandmittenfrequenzen hingegen entsprechend der europäischen Richtlinie belassen. Auf die Fragestellung der Umrechnung vom Wellenlängen- ins Frequenzspektrum geht der niederländische Bericht nicht ein, weshalb eine Transformation mittels linearer Interpolation von Bandenergien (analog zu Variante B) im Folgenden angenommen wird.

In Abb. 6-9 sind die Transformation aus Abb. 6-8 exemplarisch für die beschriebenen, deutschen und niederländischen Umsetzungen der Richtlinie 2015/996/EU dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass durch die Korrektur der nominellen Bandmittenwellenlänge von 12 mm auf 12,5 mm und damit durch die deutliche Annäherung an den exakten Bandmittenwert die Abweichungen $L_{R,TOT,f}$ gegenüber der exakten Berechnungsmethode A deutlich geringer ausfallen. Zudem scheinen die Diagramme auch einen bei mehreren, exemplarisch durchgeführten Transformationen beobachteten Trend zu bestätigen, dass die Transformation im Frequenzbereich, welche in der deutschen Richtlinienumsetzung vorgesehen ist, häufiger etwas höhere Abweichungen hervorruft als eine Transformation im Wellenlängenbereich.

Im Jahr 2019 wurden auch Überlegungen anderer Arbeitsgruppen zur gegenständlichen Thematik publik. Der Normentwurf ISO/PDTR 17534-4 der ISO/TC 43/SC 1/WG 56 Arbeitsgruppe [21] beschäftigt sich mit der Qualitätssicherung der Ausbreitungsrechnung, und damit nicht direkt mit der Fragestellung der Emission. Allerdings wurde darin festgelegt, dass aufgrund der missverständlichen formulierten aber rechtsverbindlichen Richtlinie 2015/996/EU die Ausbreitungsrechnung auf Basis der nominellen Oktavbandmittenfrequenzen zu erfolgen hat. Umgekehrt ist für die atmosphärische Absorption nach ISO 9613-1 [22] jedoch die exakte Oktavbandmittenfrequenz zu verwenden. Dies zeigt, dass im Sinne einer reproduzierbaren, einheitlichen und rechtskonformen Umsetzung der europäischen Richtlinie auch von einer fachlich möglicherweise korrekteren Umsetzung unterschieden werden muss. Wesentlich ist aber, dass sich die Unterschiede im Sinne einer Berechnung von Lärmindizes L_{den} und L_{night} weit unter 1 dB auswirken.

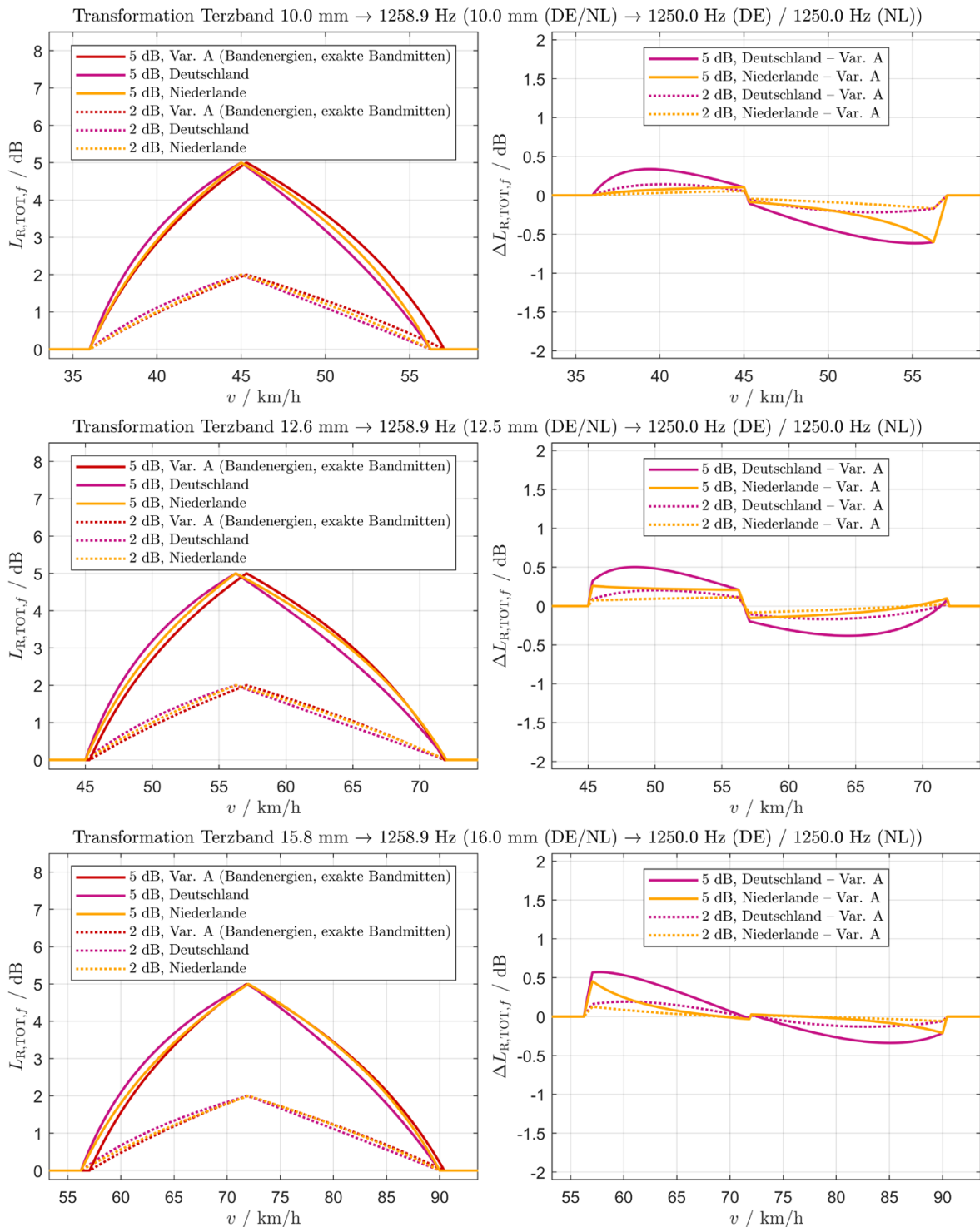


Abb. 6-9 Beispiele von in den Frequenzbereich transformierten Terzbandpegeln eines Testspektrums mit Bandpegeln von 0 dB und einem einzelnen um 2 dB bzw. 5 dB erhöhten Terzband bei einer Wellenlänge 10,0 mm (oben), 12,6 mm (Mitte) und 15,8 mm (unten) für die Berechnungsvariante A und Berechnung entsprechend deutscher und niederländischer Vorgaben – Darstellung der absoluten Pegelwerte (Diagramme der linken Spalte) und Pegeldifferenzen zur Berechnungsvariante A mit exakten Bandmittenwerten

Konkret geprüft wurde dies (als Vorgriff auf Kap. 7.2.1 und 7.3.1) anhand von Eingangsdaten für einen Railjet und einen Güterzug mit Graugussbremsen für das Netz im Durchschnitt nach Richtlinie 2015/996/EU. Um die zuvor gezeigten, größeren Abweichungen durch die nominellen Bandmittenwellenlängen der Richtlinie zu verringern, wurden dabei die Werte 120 mm, 12 mm, 3,2 mm und 1,2 mm analog zur deutschen Vorgehensweise durch die Werte 125 mm, 12,5 mm, 3,15 mm und 1,25 mm ersetzt. Gekennzeichnet werden diese Änderungen bei den Varianten B und C durch einen Stern (Varianten B* und C*). In Tab. 6-3 sind exemplarisch die Abweichungen für die A-bewerteten Vorbeifahrtspegel im Punkt A (7,5 m Abstand zur Achse) als auch die maximalen Abweichungen der einzelnen Terz- bzw. Oktavbänder für die Schalleistung der Quelle A dargestellt. Zusätzlich ist mit einer Variante das deutsche Verfahren (Variante DE) mit Berechnung der Pegel im Frequenzbereich ergänzt.

Variante A und B* unterschieden sich demnach nur marginal, da sowohl die A-bewerteten Vorbeifahrtspegel als auch die für die Ausbreitungsrechnung maßgeblichen Oktavbänder < 0,1 dB abweichen. Die deutsche Variante DE liefert für die gezeigten Beispiele überwiegend höhere Pegel als Variante A, wobei auch hier der A-bewertete Pegel < 0,2 dB abweicht. Variante C* zeigt dafür eine maximale Abweichung von -0,29 dB im Vergleich zu Variante A.

Auch wenn diese exemplarischen Ergebnisse die Größenordnungen, in welchen sich die Abweichungen bewegen, von Standardeingangsdaten veranschaulichen, sei darauf hingewiesen, dass die Abweichungen direkt von den Unterschieden zwischen den Bandpegeln abhängen. Gerade im Hinblick auf die in Kap. 6.2 diskutierten Strategien der erforderlichen Extrapolation von Rauheitsspektren können beispielsweise sehr hohe Pegeldifferenzen über 10 dB entstehen (vgl. Abb. 6-7), wodurch auch die Abweichungen zwischen den dargestellten Transformationsvarianten deutlich höher ausfallen werden.

	Abweichung im A-bewerteten Gesamtschalldruckpegel in 7,5 m			maximale Differenz in einem Terzschalleistungsband für die Quelle A			maximale Differenz in einem Oktavschalleistungsband für die Quelle A		
	B*	C*	DE	B*	C*	DE	B*	C*	DE
Railjet 50 km/h	-0,01	-0,15	0,10	-0,19	-0,49	0,25	-0,05	-0,26	0,17
Railjet 110 km/h	-0,01	-0,10	0,05	-0,16	-0,37	0,22	-0,05	-0,12	0,09
Railjet 180 km/h	0,00	-0,01	0,00	-0,09	-0,11	-0,07	-0,06	-0,08	-0,04
Güterzug 50 km/h	-0,02	-0,16	0,08	-0,27	-0,81	0,36	-0,09	-0,38	0,23
Güterzug 100 km/h	-0,01	-0,29	0,14	-0,32	-0,86	0,46	-0,09	-0,41	0,25

Tab. 6-3: Abweichungen der Varianten B*, C* und DE gegenüber Variante A jeweils in dB

Aufgrund der diskutierten, fehlenden Informationen über die Hintergründe der Standardeingangswerte für Schienen- und Radrauheiten, sowie für Kontaktfiler kann trotz der offensichtlichen Vorteile die Variante A nicht uneingeschränkt empfohlen werden. Gerade wenn die Kompatibilität und internationale Vergleichbarkeit im Vordergrund stehen, ist angesichts der mäßig hohen Unterschiede zur Berechnung mit exakten Banddefinitionen auch Variante B* trotz des Verlustes der Vergleichbarkeit zu dem Testprogramm die sinnvollere Wahl. Eben aus diesen Überlegungen wird bei den weiteren Betrachtungen vorwiegend Variante B* genutzt.

6.4. Gleisabklingrate

Durch die Rauheiten von Radlaufflächen und Schienenfahrspiegeln werden nicht nur Räder bzw. Fahrzeugkomponenten, sondern auch die Schiene und der Oberbau zum Schwingen angeregt. Die Schiene wirkt als Wellenleiter, sodass sich die Schwingungen in den Schienen zwar fortpflanzen können, jedoch im Wesentlichen durch die Absorption der Schwingungsenergie in den Komponenten der Schienenbefestigung und durch die Transmission der Energie in den Oberbau Dämpfung erfahren. Zur Beschreibung dieses Dämpfungsverhaltens dient die Gleisabklingrate, welche die Abnahme des Körperschalls üblicherweise entsprechend der messtechnischen Erfassung getrennt für die vertikale und horizontale Richtung in dB/m ausdrückt. Die Gleisabklingraten stellen damit eine wesentliche Einflussgröße für den Schallemissionsanteil des Oberbaus dar, weshalb beispielsweise in der ÖNORM EN ISO 3095 [4] für die Akzeptanz eines Teststreckenabschnitts Mindestanforderungen an die Gleisabklingraten in Form von unteren Grenzspektren gestellt werden. Im Prognosemodell der Richtlinie 2015/996/EU ist hingegen keine direkte Abbildung der Gleisabklingraten vorgesehen, sondern sie fließen nur indirekt durch die Wahl der Schienentransferfunktion $L_{H,TR}$ ein, welche den Übergang von der Schwingungsanregung durch die in den Frequenzbereich transformierte, effektive Gesamtrauheit auf die Schalleistung (je Achse) beschreibt.

Die horizontalen und vertikalen Gleisabklingraten der in diesem Projekt betrachteten Messserien, sowie die unteren Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 sind in Abb. 6-10 einander gegenübergestellt. Zwar sind die Abklingraten der Messserien DW1811b bis DW1811e aufgrund eines geänderten Oberbaus nicht repräsentativ für eine Standardmesssituation. Jedoch weisen auch die Abklingraten der übrigen Messserien zum Teil beträchtliche Unterschiede (Verhältnisse ≥ 2) sowohl zueinander, aber auch im Falle eines gemäß ÖNORM EN ISO 3095 konformen Referenzgleises gegenüber den unteren Grenzspektren auf.

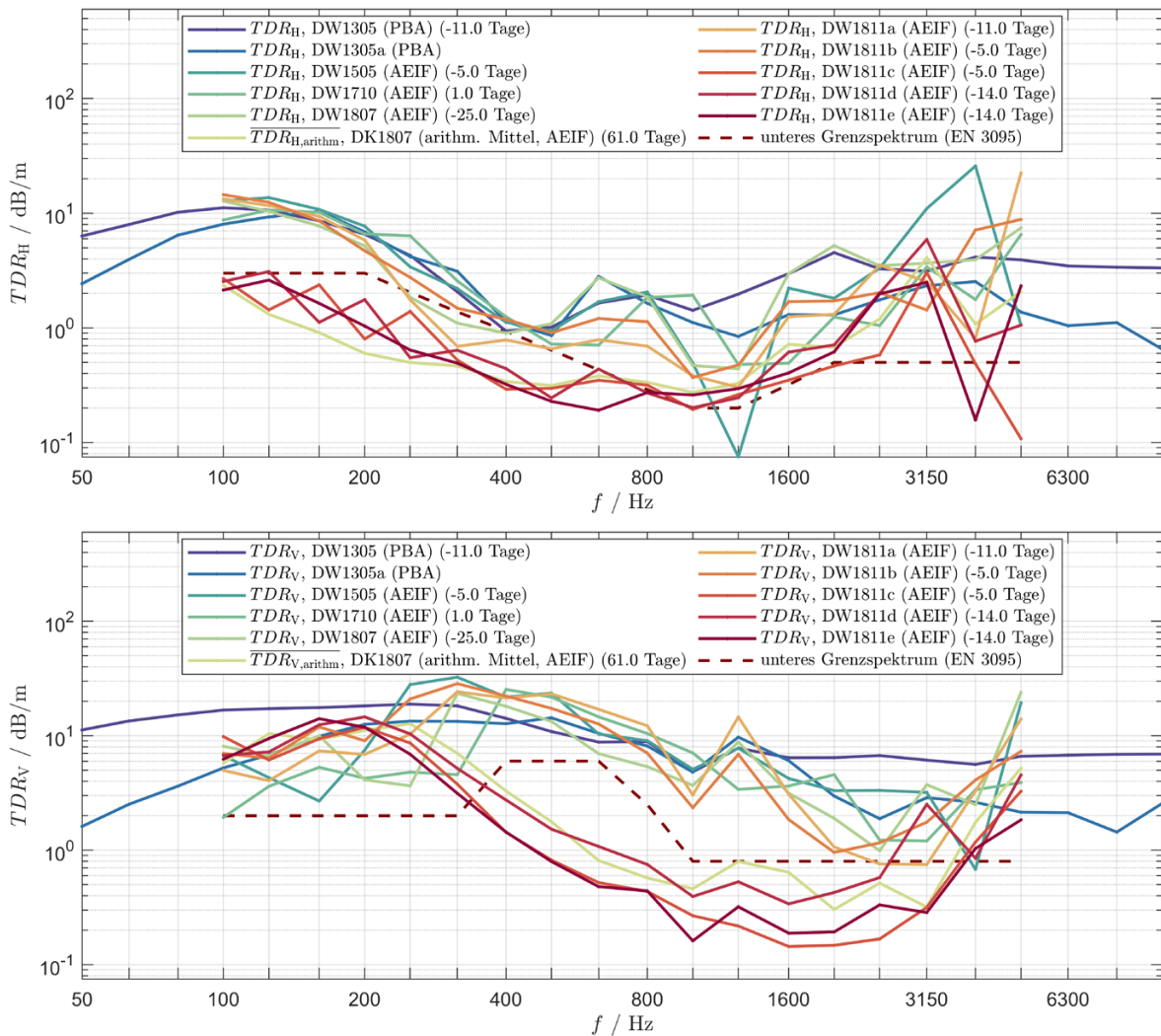


Abb. 6-10: Gegenüberstellung der horizontalen Gleisabklingraten (oben) und der vertikalen Gleisabklingraten (unten) aller Messserien, sowie untere Grenzspektren nach ÖNORM EN ISO 3095 [4]

Einen Hinweis für die Größenordnung der Auswirkung geänderter Gleisabklingraten liefert Thompson [23]. Dieser schätzt allgemein den Einfluss der Abklingrate einer einzelnen Schwingung auf den von der Schiene abgestrahlten Schall in Gleichung (6.22) durch einen Korrekturterm für den Schallleistungspegel von

$$-10 \cdot \log_{10} \Delta$$

mit der Abklingrate Δ in dB/m ab. Demzufolge führt beispielsweise eine Verdoppelung der Abklingrate zu einer Senkung der durch die Schiene abgegebenen Schalleistung von ~ 3 dB.

Allerdings geht aus dieser Abhandlung nicht hervor, wie in realen Situationen, bei welchen messtechnisch erfasste Abklingraten getrennt für vertikale und horizontale Schwingungen vorliegen, bei einer Abschätzung der Änderung der Gesamtemissionen zu verfahren ist.

Denn die Rauheiten wirken im Hinblick auf die Schwingungsanregung laut Thompson [23] grundsätzlich in vertikaler Richtung. Jedoch sind bei der Interaktion zwischen Rad und Schiene in Summe 6 Freiheitsgrade - bestehend aus drei Verschiebungsrichtungen und drei Rotationsmöglichkeiten - zu berücksichtigen, wobei abgesehen von der vertikalen Bewegungsrichtung der lateralen Richtung laut Thompson die größte Bedeutung zukommt. So ist in diesem Zusammenhang auch auf Wu und Thompson [24] zu verweisen, welche die lateralen und vertikalen Vibrationen bei breitbandiger Anregung durch Rauheiten und bei Auslenkung des Rad-Schiene Kontakts aus der Mittenposition theoretisch untersuchten: so sind zwar bei betrachteten Auslenkungen die lateralen Auslenkungen in der Regel geringer als die vertikalen, jedoch nimmt die frequenzabhängige Differenz mit zunehmender Auslenkung ab. Darüber hinaus ist zu beachten, dass Simulationen, welche auf einer einfachen 2-dimensionalen Annäherung der Schiene durch eine Linienquelle beruhen, für vertikale Vibrationen der Schiene auch eine Schallabstrahlung in bzw. nahe der horizontalen Ebene mit frequenzabhängigen Abschwächungen gegenüber der vertikalen Hauptabstrahlrichtung von zum Teil nur wenigen Dezibel ergeben [23]. Aufgrund der sich dadurch ergebenden Komplexität erscheint eine allgemein gültige Abschätzung des Einflusses von vertikaler und horizontaler Gleisabklingrate auf die Gesamtemission nicht möglich. Diese Einschätzung wird dadurch unterstrichen, dass keine Literaturstellen gefunden werden konnten, welche die Zusammenhänge mathematisch beschreiben.

Um dennoch die Wirkungszusammenhänge zu veranschaulichen, wird nachfolgend ein Vergleich zwischen den beiden zeitgleich an der Nordbahn durchgeführten Messserien in Deutsch-Wagram (DW1807) und Dürnkrot (DK1807) angestellt. Diese Messserien wurden gewählt, da zum einen idente Züge die Messquerschnitte passierten und da sich zum anderen die Gleisabklingraten der Messstellen voneinander deutlich unterschieden (siehe Abb. 6-11): während bei ersterer Messserie DW1807 die Anforderungen der ÖNORM EN ISO 3095 [4] an ein Testgleis weitgehend erfüllt sind, sind bei der Messserie DK1807 deutliche Unterschreitungen sowohl bei horizontaler, wie auch bei vertikaler Abklingrate zu beobachten. Darüber hinaus waren bei beiden Messstellen sehr glatte Schienen vorhanden, bei welchen sich die Rauheitspegel bei kurzen und mittleren Wellenlängen kaum und bei längeren Wellenlängen um wenige Dezibel unterschieden (vgl. Abb. 6-12). Da die Pegel im langwelligen Bereich jedoch bereits deutlich unter dem Grenzspektrum der ÖNORM EN ISO 3095 [4] liegen, ist entsprechend der Abschätzungen in Kap. 6.2 bzw. in Abb. 6-6 von keinem signifikanten, durch Differenzen in der Schienenrauheit

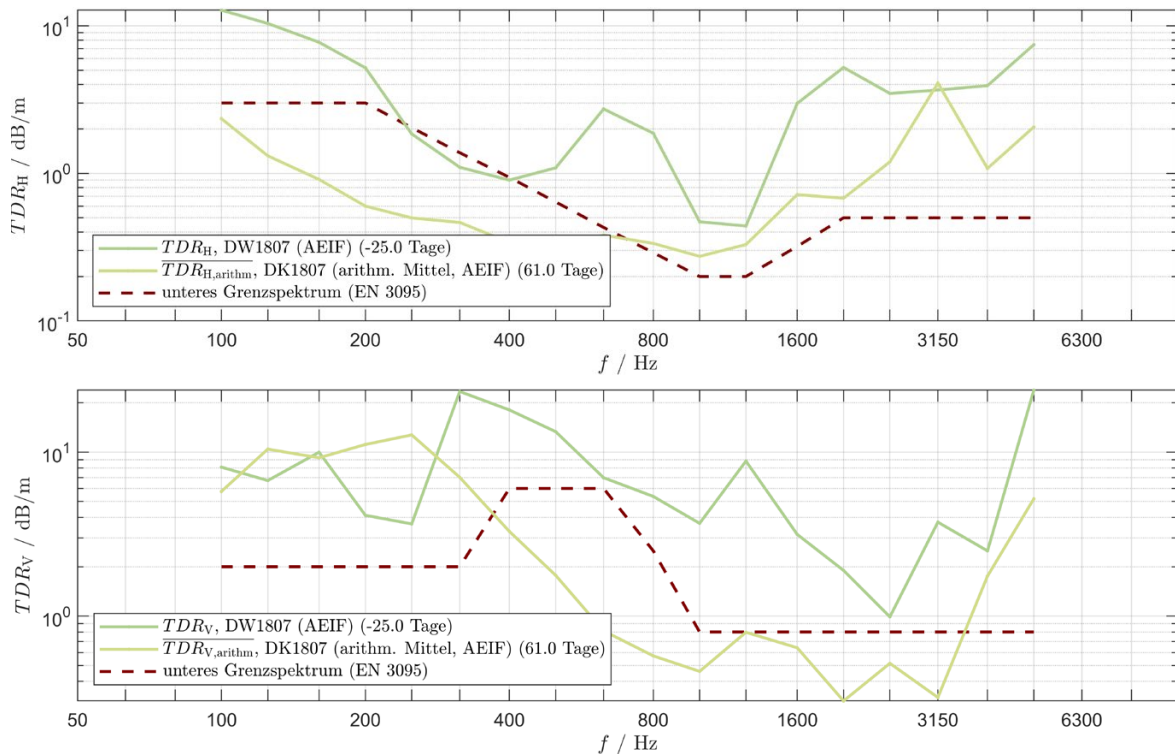


Abb. 6-11: Gegenüberstellung der horizontalen (oben) und vertikalen (unten) Gleisabklingraten der beiden Messserien DW1807 und DK1807

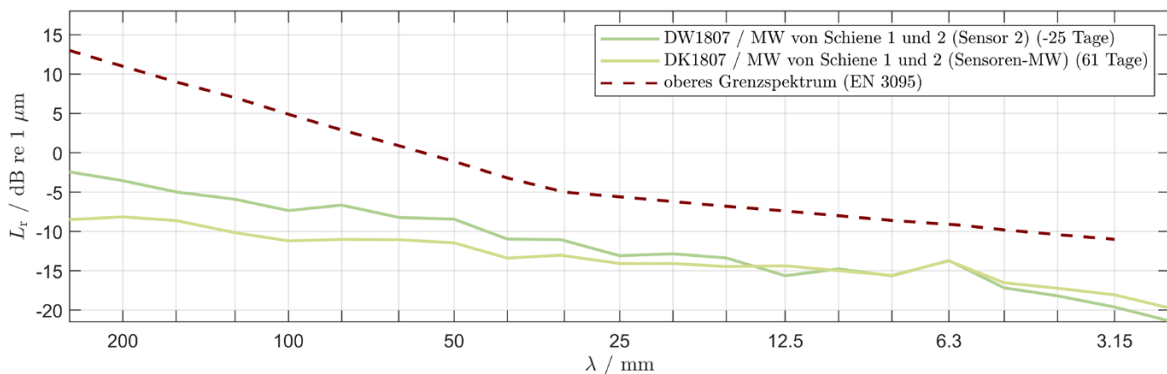


Abb. 6-12: Gegenüberstellung der Schienenrauheiten der beiden Messserien DW1807 und DK1807

verursachten Unterschied der Emissionen in dem Frequenzbereich der erhobenen Gleisabklingraten – zumindest bei graugrußgebremsten oder schiebengebremsten Fahrzeugen – auszugehen.

In Abb. 6-13 sind die Unterschiede der Gleisabklingraten aus Abb. 6-11 als Pegeldifferenzen, wie auch als logarithmierte Verhältnisse entsprechend des zuvor erwähnten Korrekturterms nach Thompson für den Schallleistungspegel dargestellt. Letztere spiegeln die Schätzung der in Dürnkrot erwarteten Erhöhungen der durch eine geringere Dämpfung von horizontalen und vertikalen Schienenschwingungen hervorgerufenen Emissionsanteile wieder.

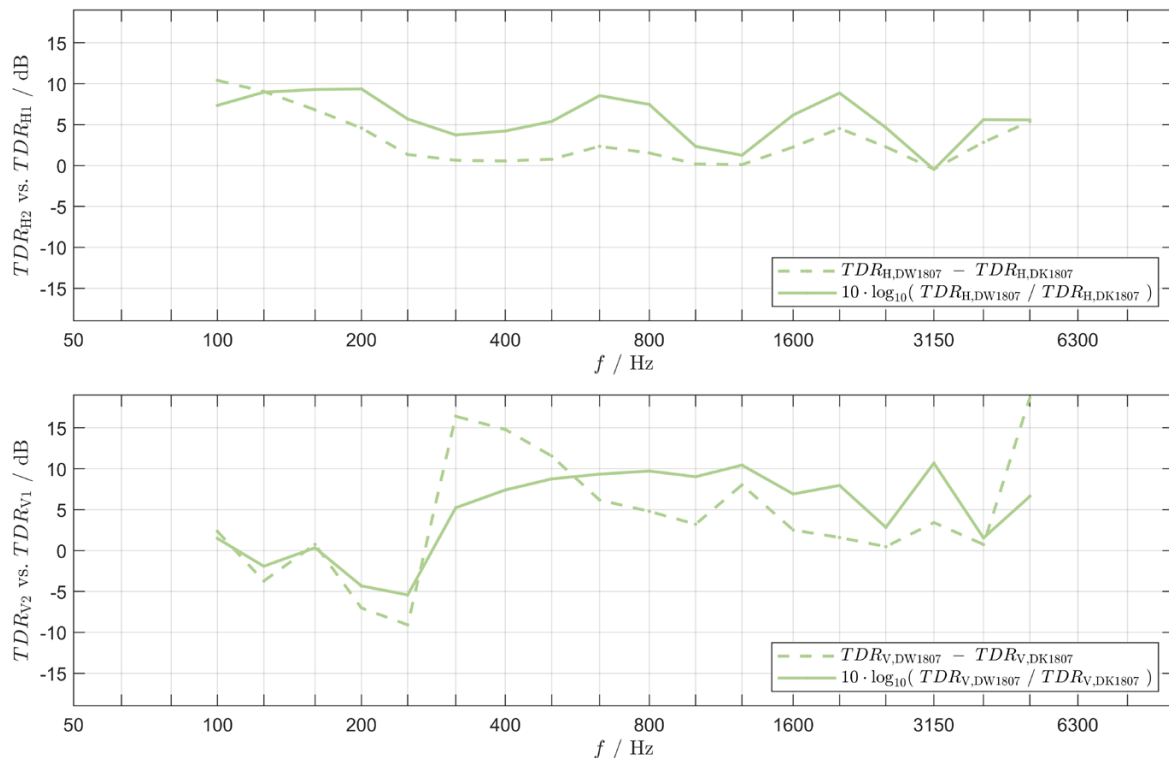


Abb. 6-13: Gegenüberstellung der horizontalen (oben) und vertikalen (unten) Gleisabklingraten der beiden Messserien DW1807 und DK1807 als Pegeldifferenz (strichliert) und als Korrekturterm für den Schalleistungspegel (durchgezogene Linie)

Für eine Abschätzung der Auswirkungen auf die Gesamtemission wäre zumindest die Kenntnis einer der beiden real auftretenden Emissionsanteile der Schiene (bzw. des Oberbaus) oder der Fahrzeuge erforderlich. Da diese Information in der Praxis weder im Allgemeinen, noch in vorliegendem Fall mit hinreichender Genauigkeit vorliegt, werden als grobe Näherung die Standardwerte der Transferfunktionen aus der Richtlinie 2015/996/EU für die weiteren Überlegungen herangezogen. Durch Differenzbildung zwischen den energetischen Summen beider Transferfunktionen – einmal mit einer um den Korrekturterm verminderten Schienentransferfunktion und einmal ohne eine derartige Verminderung – können die (vom Grundpegel bzw. der effektiven Gesamtraueit unabhängigen) Auswirkungen auf den Schalleistungspegel verdeutlicht werden. Die Transferfunktionen für Fahrzeugaufbauten werden bei nachfolgenden Betrachtungen vernachlässigt.

Konkret werden die in Abb. 6-14 als durchgezogene Linien dargestellten Transferfunktionen für einen Oberbau mit Monoblockschwelen und Zwischenlagen mittlerer Steifigkeit, sowie für Fahrzeuge mit Raddurchmessern von 920 mm verwendet, da diese für die Messstelle in Deutsch-Wagram bzw. für die nachfolgend betrachteten Güterzüge und Railjet-Reisezüge naheliegend erscheinen. Wie aus Abb. 6-14 ersichtlich

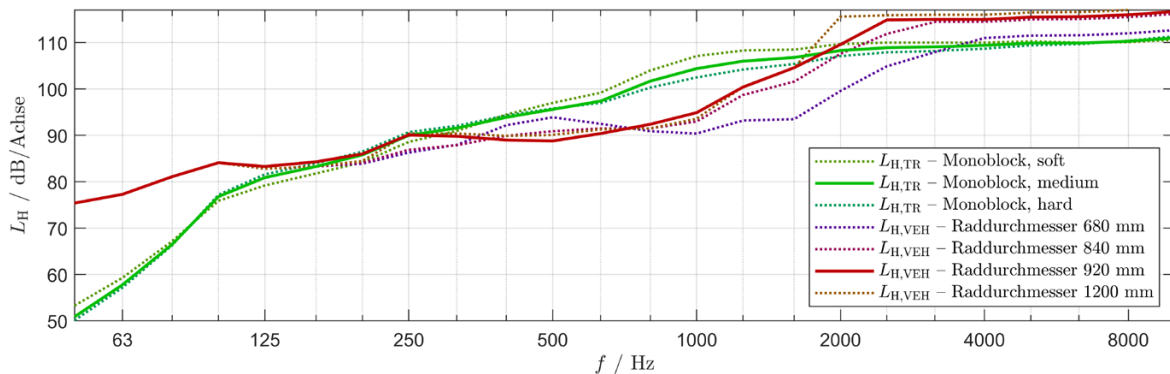


Abb. 6-14: Gegenüberstellung der Standardwerte der Richtlinie 2015/996/EU für die Transferfunktionen eines Oberbaus mit Monoblockschwellen und verschiedenen Zwischenlagensteifigkeiten, sowie für die Transferfunktionen von Fahrzeugen mit Raddurchmesser von 680 mm, 840 mm, 920 mm und 1200 mm

ist, wird der Korrekturterm den Schalleistungspegel vor allem im Frequenzbereich zwischen 250 Hz und 1,6 kHz beeinflussen, da hier der Schienenanteil dominiert. Hin zu tieferen oder höheren Frequenzbereichen gewinnen hingegen die Emissionen der Fahrzeuge an Bedeutung, sodass von Null verschiedene Korrekturwerte zunehmend abgeschwächt in die energetische Summe einfließen. Anhand Abb. 6-14 ist des Weiteren ersichtlich, dass selbst eine Variation auf weiche oder harte Zwischenlagen nur geringe Effekte auf den Einfluss des Korrekturterms zeigen würden.

Die durch Änderungen der Gleisabklingraten hervorgerufenen Auswirkungen auf den Schalleistungspegel werden getrennt für vertikale und horizontale Schwingungen der Schiene berechnet. Durch diese isolierte Betrachtung wird impliziert, dass die jeweilige Schwingungsrichtung Emissionen hervorruft, die den Gesamtschalleistungspegel dominieren. In Abb. 6-15 werden diese Auswirkungen den Unterschieden der Messwerte in Form von Differenzen der Mediane energieäquivalenter Dauerschallpegel $L_{eq,buf}$ der Zugsvorbeifahrten gegenüber gestellt. Dabei werden nur Züge betrachtet, die beide Messstellen mit vergleichbaren Geschwindigkeiten (gleichen Geschwindigkeitsklasse) passierten. Zudem erfolgt die Darstellung der Mediandifferenzen nur, wenn je Messstelle, Zugskategorie und Geschwindigkeitsklasse mindestens 10 Vorbeifahrten vorliegen.

Anhand Abb. 6-15 lässt sich erkennen, dass die Mediandifferenzen von Güterzügen und Railjets unterschiedlicher Geschwindigkeiten Ähnlichkeiten aufweisen, weshalb messstellenseitige Eigenschaften als Ursache nahe liegend sind. Der Vergleich mit den abgeschätzten Differenzen der Schalleistungspegel als Folge unterschiedlicher Gleisabklingraten weist insbesondere bei Betrachtung der vertikalen Richtung weitgehend eine gute Übereinstimmung des Verlaufs auf. Eine mögliche Erklärung für die Richtungsabhängigkeit wäre, dass vor allem die vertikalen Schienenschwingungen durch

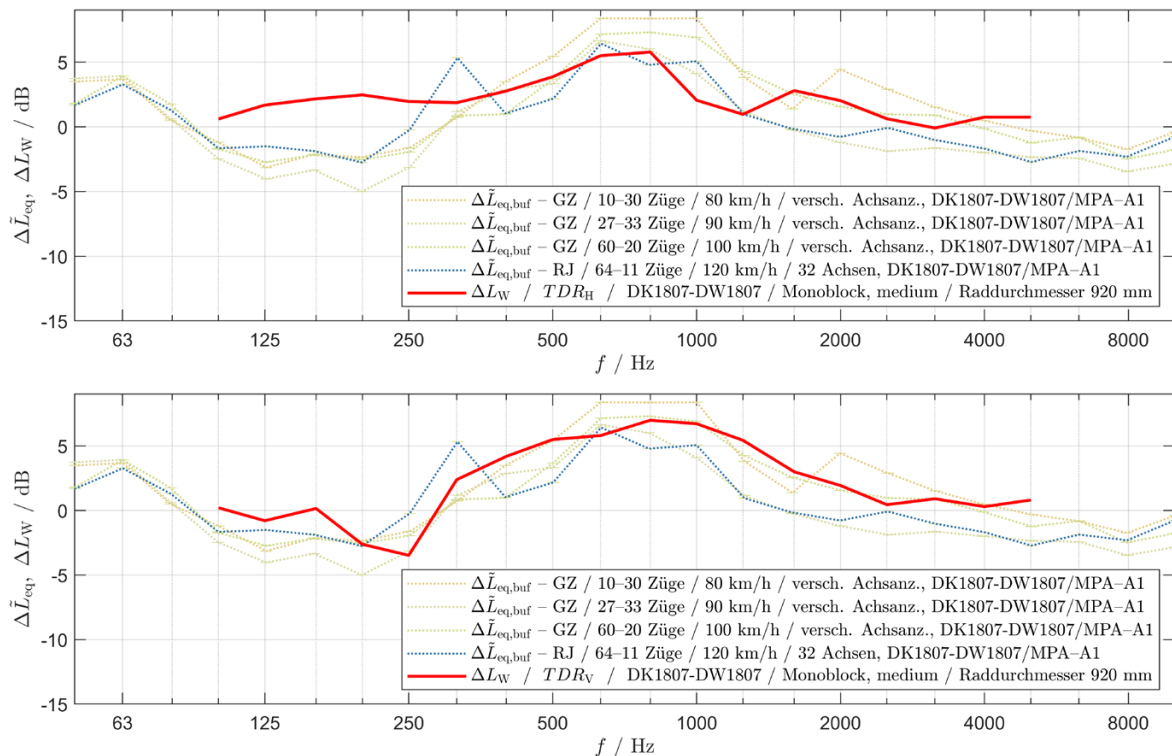


Abb. 6-15: Gegenüberstellung der Differenzen von Medianen energieäquivalenter Dauerschallpegeln $L_{eq,buf}$ von Güterzügen (Geschwindigkeitsklassen 80 km/h, 90 km/h und 100) und Railjet-Reisezugwagen (Geschwindigkeitsklasse 120 km/h), welche die Querschnitte der beider Messserien DW1807 und DK1807 passierten, und der Schalleistungspegeldifferenzen, die durch Unterschiede in der horizontalen (oben) oder vertikalen (unten) Gleisabklingrate hervorgerufen würde, sofern Emissionen durch horizontale bzw. vertikale Schwingungen den Gesamtschalleistungspegel dominieren

die Rauheitsanregung für die Emissionen verantwortlich sind und dementsprechend die vertikale Abklingrate entscheidend für die Pegeldifferenzen ist. Es sei jedoch betont, dass diese These lediglich durch das eine betrachtete Beispiel gestützt wird, und daher eine Verifizierung erst durch weiterführende systematische Untersuchungen erfolgen müsste. Gleichzeitig illustriert die Beispielrechnung die grundsätzlichen Effekte durch Änderungen der Gleisabklingrate. So wird einsichtig, dass Änderungen der Emissionen in jenen Frequenzbereichen deutlich stärker hervortreten werden, in welchen der Emissionsanteil der Schiene bzw. des Oberbaus dominiert. Gemäß den Standardwerten der Richtlinie 2015/996/EU wird dies bei mittelgroßen Rädern mit Durchmessern ≥ 800 mm im mittleren Frequenzbereich von einigen Hundert Hertz bis wenigen Kilohertz der Fall sein. Bei sehr kleinen Rädern wird der Einflussbereich der Gleisabklingrate hin zu höheren Frequenzen verschoben. Des Weiteren kann aus den Zusammenhängen abgeleitet werden, dass sich Verminderungen der Abklingraten gegenüber Erhöhungen gleichen Ausmaßes (bezogen auf das Verhältnis) aufgrund der energetischen Summe mit den als konstant angesetzten

Fahrzeugemissionen tendenziell betragsmäßig stärker bzw. im Hinblick auf den die Frequenzen über einen weiteren Bereich auswirken werden.

6.5. Transmission und deren Einflussgrößen

Nachdem die gesuchte Größe der Schalleistungspegel der vorbeifahrenden Schienenfahrzeuge ist, stellt die Bestimmung der Transmissionsfunktion zwischen Messpunkt und Schallemission eine wesentliche Voraussetzung dar. Grundsätzlich bietet sich eine theoretische Ableitung an. Für diese sind ideale Situationen wie beispielsweise eine unendlich lange Schienenstrecke im Raum mit einem Messpunkt im definierten Abstand anzunehmen. Im konkreten Fall liegen jedoch, abhängig vom Zeitpunkt der Messung und der Positionierung des Messpunktes, unterschiedliche Rahmenbedingungen für die Geometrie, die Bodenverhältnisse und die Schallausbreitung in der Atmosphäre vor. Zur Lösung dieser Problematik muss auf die ursprüngliche Aufgabenstellung verwiesen werden. Die ermittelten Schalleistungspegel dienen der Anwendung von Ersatzschallquellen für die rechnerische Ermittlung von Lärmindizes. Damit sind diese Schalleistungspegel streng mit der jeweiligen Definition der Ersatzschallquelle und der Schallausbreitungsberechnung verknüpft. Daher ist beim Vergleich von berechneten mit gemessenen Werten und bei der darauf basierenden Optimierung des Berechnungsmodells auf die richtige Wahl der schalltechnischen Größen zu achten.

Die RVE 04.01.02 aus 2019 gemeinsam mit der ÖAL 28 aus 2019 bieten ein Verfahren nach Richtlinie 2015/996/EU um die Lärmindizes L_{den} und L_{night} zu berechnen. Das Verfahren bietet grundsätzlich keine Möglichkeit eines zeitaufgelösten Vorbeifahrtspegels an. Ein Zwischenergebnis ist jedoch der $L_{eq,1h}$ für ein Vorbeifahrtsereignis pro Stunde. Diese schalltechnische Größe bietet sich für den Vergleich mit Messungen an.

Die Berechnungssimulation geht in einem ersten Schritt von einer quasi unendlich langen Strecke (10 km) aus, in welcher die Schienenoberkante (SOK) mit der Geländeoberkante (GOK) ident gesetzt wird. Zur Illustration der Variation von davon abweichenden Gelände- und Messsituationen soll der $L_{eq,1h}$ im Messpunkt A (nach ÖNORM EN ISO 3095) mit 0 dB normiert werden. Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit sind mit 10 °C und 70 % definiert. Die Bodendämpfung beruht auf einem durchgehend porösem Untergrund (Bodendämpfungsfaktor $G = 1$).

In Erweiterung zur ÖAL 28 wurden die Unterschiede für einzelne Terzbänder und nicht nur in Oktavbändern durchgeführt. Die atmosphärische Dämpfung wurde für die exakten Terzbandmittenfrequenzen nach ISO 9613-1 berechnet. Im Rahmen dieses Projekts wurden die Bodendämpfungswerte ebenfalls mit den exakten Terzbandmittenfrequenzen berechnet, wobei im Projektzeitraum eine noch offene Diskussion zur normgerechten Verwendung geführt wurde. In der noch nicht abgestimmten Norm ISO 17534-4 wurde letztlich die Verwendung der exakten Frequenzwerte für die atmosphärische Dämpfung und der nominellen Werte für die Bodendämpfung festgelegt. Allerdings sind die Auswirkungen bei den dominierenden kurzen Abständen zwischen Sender und Empfänger von untergeordneter Bedeutung. So ergab eine Gegenüberstellung berechneter Terzbandpegel in Punkt A eine Differenz von $< 0,0001$ dB für 50 Hz ansteigend bis $< 0,02$ dB bei 10 kHz. Die Fragestellung zur Verwendung der Terzbandmittenfrequenzen ist bei der Bestimmung der Ausbreitungsterme für den Schalldruckpegel in Punkt A daher vernachlässigbar.

Um diesen berechneten Wert mit Messungen zu vergleichen, müsste bei der Messung ebenfalls ein Intervall von 1 h mit einer einzelnen Vorbeifahrt gewählt werden. Da dies praktisch nicht ohne maßgeblichen Fremdgeräuscheinfluss möglich ist, wird der L_{eq} einer Vorbeifahrt angenommen, wobei der Zeitbereich auf jene Werte eingeschränkt wird, ab dem die A-bewertete Gesamtmission nicht unter 10 dB unter dem Wert am Zugende (Puffer) abgefallen ist (siehe Definition für energetisch gemittelten Dauerschallpegel $L_{eq,-10dB}$ in Kap. 4.2). Damit werden jene Bereiche, die nicht mehr maßgeblich zum Vorbeifahrtspegel beitragen können, nicht berücksichtigt. Diese Messwerte können nach Umrechnung auf den SEL und danach auf den $L_{eq,1h}$ den berechneten Werten gegenübergestellt werden.

Zur Veranschaulichung der Unterschiede, die sich für die Vergleichsgröße $L_{eq,1h}$ ergeben, wenn entweder die in anderen Messnormen gebräuchliche Vorgehensweise Zug- oder Fahrzeugvorbeifahrten von Puffer zu Puffer zu betrachten, oder wenn die gesamten, der Zugsvorbeifahrt zuordenbaren Emissionen bis zu einem Abfall von -10 dB genutzt wird, werden exemplarisch die Differenzen in Abb. 6-16 für ausgewählte Zugskategorien der Messserie DW1505 als Histogramme dargestellt. Gerade mit zunehmender Länge der Züge nimmt der Einfluss der Randbereiche ab, sodass bei den Güterzügen die Differenzen oft unter 0,1 dB liegen. 32-achsige Railjet-Reisezüge und 24-achsige Doppelgarnituren der Schnellbahnbaureihe 4020 weisen im Mittel bereits deutlich größere Differenzen im Bereich von 0,4 dB bis 0,5 dB auf, wobei Werte der Schnellbahnen –

vermutlich aufgrund der vier verschiedenen Anordnungsmöglichkeiten des in der Regel deutlich lautereren Triebwagens – sichtlich mehr streuen. Die höchsten mittleren Differenzen weist die Kürzeste der betrachteten Kategorien, die 12-achsigen Einfachgarnituren der Schnellbahnbaureihe 4020, mit rund 0,9 dB auf, wobei von einem verstärkenden Faktor durch den am Zugsanfang oder –ende angeordneten Triebwagen auszugehen ist.

Im Hinblick auf die in Abb. 6-17 dargestellten, zugehörigen spektralen Verteilung der Bandpegeldifferenzen ist anzumerken, dass Beiträge mit steigender Entfernung zum Messquerschnitt neben der geometrischen Dämpfung auch durch Bodeneffekte und atmosphärische Dämpfung theoretisch verringert werden. Diese Einflüsse sind frequenzabhängig. Man kann davon ausgehen, dass die atmosphärische Dämpfung mit steigender Frequenz zunimmt [25]. Für die höheren Frequenzen sollte daher der Unterschied zwischen "Puffer" zu "10 dB" kleiner werden. Die Bodendämpfung ist nicht stetig. So kann beispielsweise das Modell der Schallausbreitung nach Richtlinie 2015/996/EU im Bereich um 250 Hz stärkere Dämpfungen als in direkt darunter und darüber liegenden Oktavbändern ergeben. Einen derartigen Einbruch könnte man in diesem Frequenzbereich anhand der Messwertdifferenzen erkennen.

Eine weitere Fragestellung bezieht sich auf die Verwendung einer homogenen (neutralen) gegenüber der im Referenzfall gewählten ausbreitungsgünstigen Schallausbreitungsbedingung. Dies hat für die Referenzgeometrie einen maximalen Einfluss von 0,1 dB. Die wesentlich zum Gesamtpegel beitragenden nahe am Messpunkt liegenden Emissionsanteile werden nicht maßgeblich durch die Wahl der Schallausbreitungssituation beeinflusst. Der Effekt der Brechung der Schallwellen in der Atmosphäre aufgrund von Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit (hervorgerufen durch Gradienten der Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit) hat für diese Nahbereichsmessungen auf überwiegend porösem Boden keine nennenswerte Relevanz. Eine Variation ergibt sich aufgrund des tatsächlichen Höhenprofils. Im Messpunkt Deutsch-Wagram befand sich die SOK ~0,17 m über Boden und das SOK Niveau am Messpunkt A etwa ~0,30 m über Boden. Für die Definition der Ausgleichsebene nach ÖAL 28 ergibt sich damit eine Erhöhung von rund 0,2 m zur Berechnung von z_s ($0,2 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = 0,7 \text{ m}$) für die Ersatzschallquelle A und z_r ($0,2 \text{ m} + 1,2 \text{ m} = 1,4 \text{ m}$) für den Punkt A. Der Einfluss auf den Terzpegel bleibt auf 0,2 dB beschränkt, für Oktavbandpegel sinkt er auf 0,1 dB. Die zusätzliche Einschränkung auf eine 100 m Durchfahrt zeigt keinen zusätzlichen Einfluss.

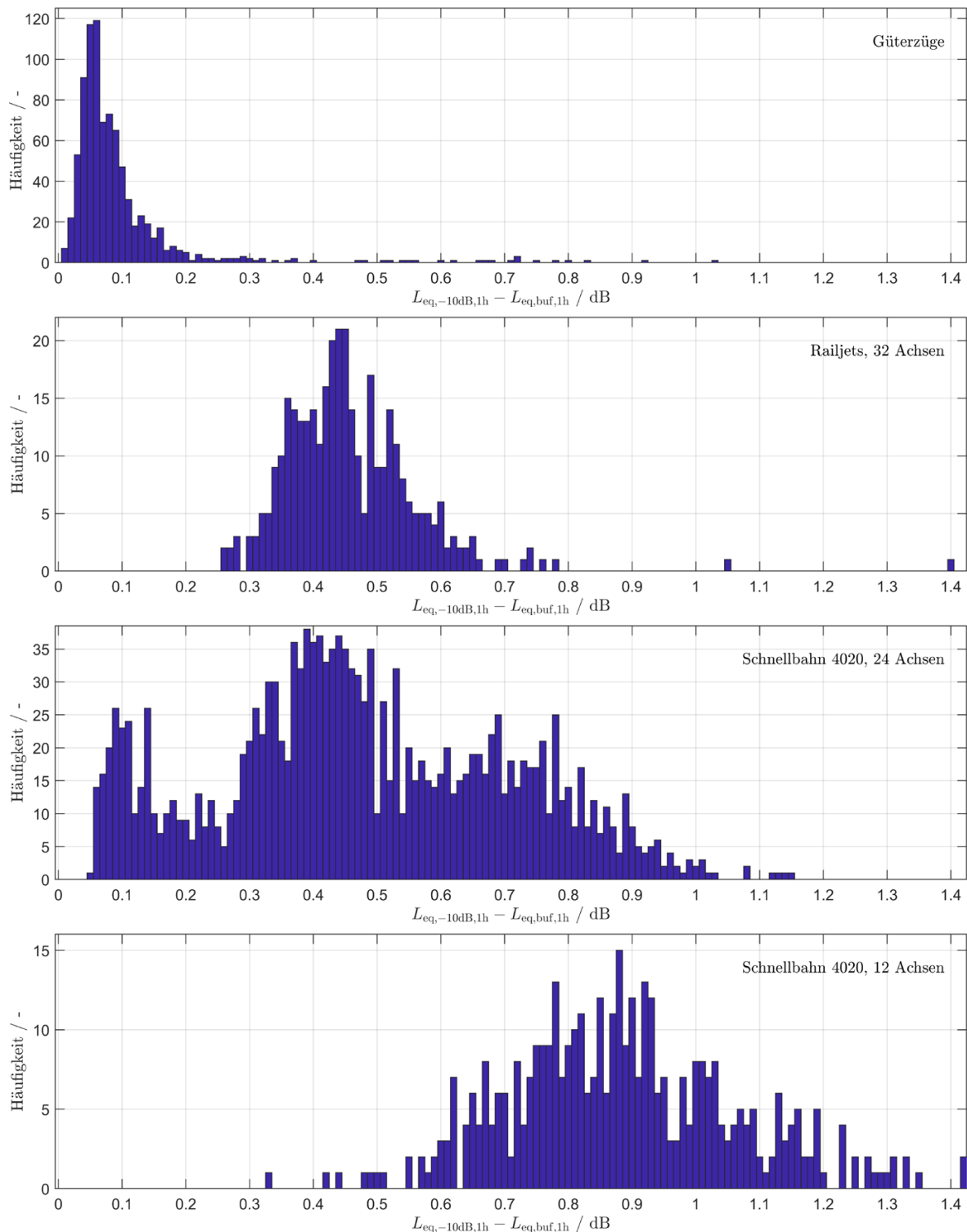


Abb. 6-16: Histogramme der Differenzen $L_{eq,-10dB,1h} - L_{eq,buf,1h}$ von äquivalenten und anschließend auf die Dauer von 1 h umgelegten Dauerschallpegel (Messserie DW1505, Messpunkt A1), die zwischen den Betrachtungen von Vorbeifahrten von Puffer zu Puffer gegenüber Betrachtungen bis zu Pegelabfällen von -10 dB gegenüber den Pegel bei den Pufferpositionen – wodurch letztlich der gesamte Energieinhalt der Vorbeifahrt genauer erfasst wird – entstehen (Diagramm von oben nach unten: Güterzüge, Railjets mit 32 Achsen, Schnellbahnen der Baureihe 4020 mit 24 Achsen und gleiche Baureihe mit 12 Achsen)

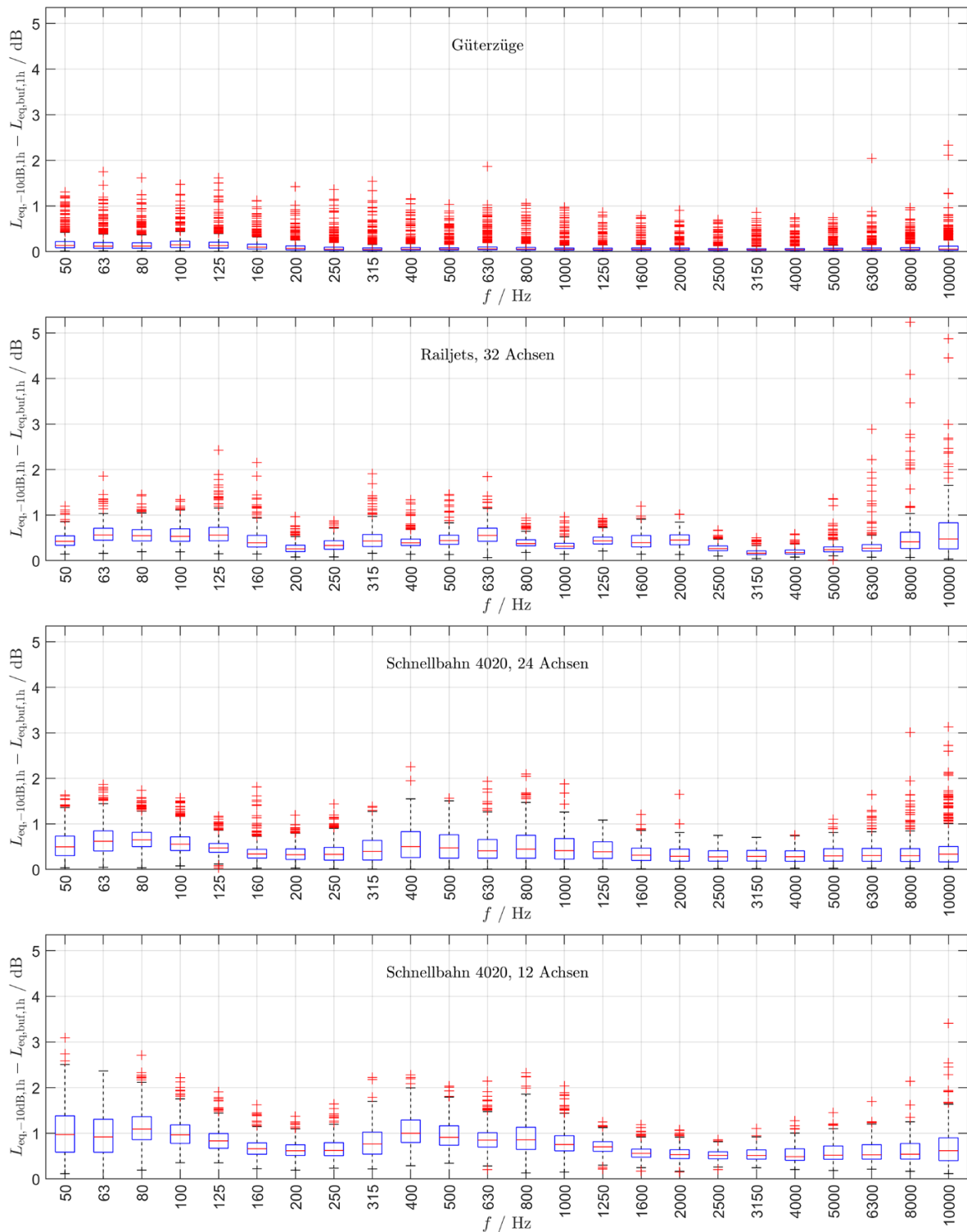


Abb. 6-17: Boxplots der spektralen Differenzen $L_{eq,-10dB,1h} - L_{eq,buf,1h}$ von äquivalenten und anschließend auf die Dauer von 1 h umgelegten Dauerschallpegel (Messserie DW1505, Messpunkt A1), die zwischen Betrachtungen von Vorbeifahrten von Puffer zu Puffer gegenüber Betrachtungen bis zu Pegelabfällen von -10 dB gegenüber den Pegel bei den Pufferpositionen – wodurch letztlich der gesamte Energieinhalt der Vorbeifahrt genauer erfasst wird – entstehen (Diagramm von oben nach unten: Güterzüge, Railjets mit 32 Achsen, Schnellbahnen der Baureihe 4020 mit 24 Achsen und gleiche Baureihe mit 12 Achsen)

Kombiniert man allerdings die veränderten Bodenniveauverhältnisse mit einer neutralen Schallausbreitung so sind teils gegenläufige Effekte zu beobachten (siehe 1000 Hz Terzband), welche zeigen, dass bei neutralen Verhältnissen die Bodenverhältnisse einen geringeren Einfluss auf die Ausbreitung bewirken und die Abweichungen von 0,2 dB zum Referenzfall wieder auf 0,1 dB sinken.

An der Messstelle Dürnkrut befand sich das Bodenniveau am Messpunkt 65 cm unter der SOK. Die Ausgleichsebene ergab Werte für z_s von 1,1 m und für z_r von 1,8 m. Dafür ergaben sich größere Abweichungen mit Pegelanstiegen um bis zu 0,4 dB gegenüber dem Referenzfall.

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine einheitliche Transmissionsfunktion für alle Messstellen gewählt, welche die geringsten Unsicherheiten aufweist. Dies war die Geometrie mit einer ebenen Fläche mit SOK + 0,2 m Boden, bei ausbreitungsgünstiger Situation. Damit verbleiben Unsicherheiten zumindest für Oktavbandbetrachtung < 0,2 dB und auch für die Terzbandbetrachtung zum überwiegenden Teil < 0,2 dB. Eine genauere Bestimmung wäre nur bei exakter Aufnahme der geometrischen Verhältnisse, der Bodenimpedanzen (für die G -Faktor Bestimmung) und der Schallgeschwindigkeitsgradienten während der Messung möglich. In Anbetracht der weitaus höheren Variationen der Fahrzeug- und Schienenemissionen wird auf eine detailliertere Berücksichtigung verzichtet.

Die präsentierten Unsicherheitsanalysen wurden für die Quelle B in 4,0 m über SOK wiederholt. Dafür ergaben sich für keine der oben diskutierten Bodengeometrie und Ausbreitungsbedingungen Variationen um mehr als 0,1 dB voneinander. Der Einfluss des Bodens auf die Schallausbreitung zum naheliegenden Messpunkt A ist für diese deutlich höher gelegene Quelle von vernachlässigbarer Bedeutung.

Die durchgeführten Unsicherheitsanalysen bezogen sich auf die Verhältnisse bei den beiden Messstellen in Deutsch-Wagram (km 14,6) und Dürnkrut (km 51,2), mit keiner nennenswerten Erhöhung der Schienenoberkante gegenüber dem umliegenden Boden und dem darauf positionierten Messpunkt A. Für Verhältnisse mit deutlich erhöhtem Bahndamm oder mit Schienenlagen in Einschnitten sind abweichende Transmissionsfunktionen zu bestimmen (siehe Kap. 8.3.1).

7. DISKUSSION DER PARAMETERBESTIMMUNG

7.1. Methodik

Die nachfolgenden Vergleiche von Berechnung und Messung beruhen auf einer einheitlichen Berechnung, welche unter anderem die in Kapitel 6 diskutierten Einflüsse berücksichtigt. Die wesentlichen Eigenschaften der Berechnung und der Vergleiche können wie folgt zusammengefasst werden:

- Messpunkt der Schallerfassung

Für die Vergleiche werden Messungen im Punkt A, welcher sich 7,5 m von der Gleisachse entfernt und in einer Höhe von 1,2 m über der Schienenoberkante befindet, herangezogen. Da bei einigen Messserien zum Teil zwei Messpunkte mit identen Abständen vorhanden waren, variieren die Bezeichnungen zwischen A, A1 und A2 (im Falle zweier, vorhandener Mikrofone mit identen Abständen wurde die Wahl entsprechend der Detailanalysen der Emissionsaufzeichnungen in Kap. 4.3 vorgenommen).

- Geschwindigkeitsklassen

Die Züge wurden entsprechend ihrer mittleren Achsgeschwindigkeiten $\overline{v_{\text{Achsen}}}$ in Klassen mit einer Breite von 10 km/h (rechtsoffene Intervalle) unterteilt. Der Klassenwert adressiert hier die Klassenmitte (beispielsweise definiert die Geschwindigkeitsklasse 100 km/h mittlere Achsgeschwindigkeiten von $95 \text{ km/h} \leq \overline{v_{\text{Achsen}}} < 105 \text{ km/h}$).

- Limitierung der Geschwindigkeitsänderung und der maximalen Beschleunigung

Zur Sicherstellung möglichst konstanter Vorbeifahrtsverhältnisse wurde die Geschwindigkeitsänderung zwischen letzter und erster Achse grundsätzlich mit 5 km/h, sowie die maximale Verzögerung betragsmäßig mit $0,1 \text{ m/s}^2$ begrenzt. Da dies bei Güterzügen, die vergleichsweise hohe Zuglängen aufweisen, jedoch zu einer starken Selektion führen würde, wurden diese Grenzen für Güterzüge auf 10 km/h bzw. $0,2 \text{ m/s}^2$ angehoben.

- Ermittlung der Terzspektren

Von den beiden, in Kap. 4.2 erwähnten Berechnungsansätzen wurde jener, welcher Filterbänke gemäß ANSI S1.11 nutzt, verwendet (MATLAB-Befehl `p octave`).

- Transformation der effektiven Gesamtraumigkeit vom Wellenlängen- in den Frequenzbereich

Zur Wahrung der Kompatibilität und internationale Vergleichbarkeit wurde angesichts der mäßig hohen Unterschiede zur Berechnung mit exakten Banddefinitionen Variante B* trotz des Verlustes der Vergleichbarkeit zu dem Testprogramm gewählt (Details siehe Kap. 6.3). Diese Transformationsvariante wird in den folgenden Abbildungen entsprechend projektinterner Benennung als „ λ -f Konv. 10“ bezeichnet.

- Wahl der zeitliche Grenzen der Vorbeifahrtsmessungen

Um den gesamten Energieinhalt der Vorbeifahrtsemissionen zu berücksichtigen, wurde der betrachtete Zeitbereich über die Pufferabstände ausgedehnt, bis der (über 50 ms kurzzeitgemittelte) Zeitverlauf des A-bewerteten Schalldruckpegels um 10 dB gegenüber den Pufferpositionen abfällt (Detailanalyse über die Auswirkung dieser Ausdehnung siehe Kap. 6.5).

- Transmission

Für die Transmission wurden schallausbreitungsgünstige Bedingungen und als Lage der SOK 0,2 m über einem ebenen porösem Boden (Bodendämpfungsfaktor $G = 1$) gewählt (Unsicherheitsanalyse siehe Kap. 6.5).

- ONR-Berechnung

Um einen Vergleich zu den Schalleistungsangaben der ONR 305011 zu illustrieren, wurden die $L_{eq,1h}$ Werte zusätzlich berechnet. Dabei kam wiederum die Geometrie einer 10 km langen Strecke mit SOK 0,2 m auf porösem Boden zur Anwendung. Die Berechnungen erfolgten mit der Software IMMI 2018 (Wölfel Engineering GmbH + Co.KG, Höchberg, Deutschland). Für Güterzüge erfolgte eine Berechnung für eine einheitlich festgelegte Länge, auf welche die Messwerte wiederum entsprechend normiert wurden.

- Normierung der Güterzüge

Nachdem Güterzüge eine variable Wagenanzahl und damit variable Achszahlen und Zuglängen aufweisen, werden diese auf einen einheitliche Achszahl von 80, sowie auf eine Zuglänge von 300 m normiert, da erst damit ein Vergleich mit einheitlich berechneten Werten möglich ist.

Eine Möglichkeit zur Optimierung der Eingangsparameter für die Berechnung nach Richtlinie 2015/996/EU bzw. RVE 04.01.02 bestünde in einem automatisierten

Näherungsverfahren (Inverse Optimierung). Bei entsprechend vielen Messergebnissen aus unterschiedlichen Messorten, mit variablen Vorbeifahrtsgeschwindigkeiten wäre sogar eine Optimierung auf Basis von machine learning grundsätzlich möglich. Dabei geht aber der wesentliche Zusammenhang der einzelnen Eingangsparameter mit den tatsächlichen örtlichen Verhältnissen und ihrer physikalischen Abhängigkeit verloren. Daher wurde entschieden, in diesem Bericht die Einflüsse der einzelnen Fahrzeug- und Schienenparameter getrennt zu untersuchen und darzustellen.

7.2. Auswertung für Güterzüge

In folgenden Unterkapiteln werden Güterzüge betrachtet, wobei aus Mangel an gesicherten Informationen über die an den Fahrzeugen jeweils vorhandenen Bremssysteme (Klotzbremsten, Radscheibenbremsen oder Scheibenbremsen) bzw. im Fall der überwiegend im Einsatz befindlichen Klotzbremsten über das verwendete Bremsklotzmaterial (Grauguss oder K-Sohle bzw. LL-Sohle) keine Unterscheidung zwischen verschiedenen lauten Fahrzeugen gemacht wird. Gerade bei den jüngeren Messserien muss davon ausgegangen werden, dass bereits ein nicht zu vernachlässigender Anteil der Güterwagen bereits mit leisen Bremssohlen ausgerüstet ist. Jedoch wirkt sich zum einen das Verhalten der energetischen Addition bei aus lauten und leisen Fahrzeugen gemischt zusammengesetzten Güterzügen bei mäßigen Anteilen an leisen Fahrzeugen mindernd auf die Senkung des Vorbeifahrtspegel aus. So verdeutlicht eine einfache Beispielrechnung bei Annahme eines Umrüstungseffekts am Fahrzeug von 10 dB, dass bei einem Anteil von 33 % umgerüsteter Fahrzeugen im Zugverband die Gesamtpegelsenkungen des Zuges lediglich ~1,5 dB und dass selbst bei einem Anteil von 50 % die Senkung nur ~2,6 dB beträgt. Zum anderen hilft auch der im Folgenden verwendete, gegen Ausreißer weitgehend unempfindliche Medianwert, dass bei Anteilen an besonders leisen Zügen von deutlich unter 50 % von geringen Effekten auf die Medianwerte auszugehen ist. Aus diesen Gründen, aber auch da vorliegendes Forschungsprojekt nicht auf die Ableitung konkreter Eingangsparameter abzielt, erscheint die undifferenzierte Verwendung aller Güterzugvorbeifahrten für die folgenden Auswertungen legitim. Da die Umrüstung zukünftig weiter voranschreiten wird und damit leise Güterzüge auch im Hinblick der Prognose rasch weiter an Bedeutung gewinnen werden, ist den rechentechnischen Aspekten der Umrüstung ein eigenes Unterkapitel gewidmet (siehe Kap. 7.2.9).

7.2.1. Vergleich mit RVE 04.01.02

Nachdem sich die Fragestellung auf Eingangsparameter für Berechnungsverfahren bezieht, sollen in einem ersten Schritt Vergleiche mit dem derzeitigen Stand der Technik durchgeführt werden. Dies sind der bisherige Stand der Technik nach ONR 305011 und die aktuelle RVE 04.01.02. Die Eingangsparameter für die RVE 04.01.02 beruhen auf den Werten der Richtlinie 2015/996/EU, wurden aber auf Übereinstimmung mit den gemessenen Werten der ONR 305011 justiert (siehe Kirisits et al. [26]). Nachdem die ONR Werte nur oktavbandweise vorliegen, werden die folgenden Vergleiche ebenfalls für Oktavbandpegel durchgeführt. Abb. 7-1 illustriert die Übereinstimmung der beiden Berechnungsverfahren in den Oktavbandpegeln 500 Hz bis 2000 Hz, welche sich auch in geringen Differenzen im A-bewerteten Gesamtpegel zeigt (siehe Kirisits et al. [26]). Im niedrigeren Frequenzbereich unter 500 Hz liegen die RVE Werte grundsätzlich niedriger, während im hohen Frequenzbereich über 2000 Hz die ONR Werte niedriger sind. Der Vergleich zu den Messwerten zeigt bei den 500 Hz und 1000 Hz Oktavbändern Übereinstimmung innerhalb der 50 % Perzentile.

Beide Berechnungsverfahren beziehen sich auf einen durchschnittlichen Oberbau, eine durchschnittliche Schienenrauheit und ein durchschnittliches Fahrzeugkollektiv. Für die Messungen DW1710 liegen die berechneten Werte tendenziell niedriger. Die berechneten Werte nach RVE wurden für 80 Achsen durchgeführt, weshalb die Messwerte ebenfalls auf diese Achszahl normiert wurden (strichlierte Linien). Die ONR sieht Schallleistungspegel nach Zuglängen vor, weswegen eine einheitliche Normierung auf eine konstante Länge (300 m) für Berechnung und Messwertnormierung (strichpunktierte Linien) verwendet wurde. Auffällig ist, dass die niederfrequenten RVE Werte nicht durch die Messungen bestätigt werden, ebenso wenig die hochfrequenten 8000 Hz Oktavbandpegel. Im mittleren, für die Bildung von A-bewerteten Lärmindizes wesentlichen Teil sind keine systematischen Differenzen zu sehen. Ausgenommen davon zeigt der Vergleich bei 100 km/h Geschwindigkeit für die gemessenen Oktavbandspektren ein Maximum bei 2000 Hz, während die berechneten Werte deutlich geringer liegen.

Es wird die Hypothese definiert, dass die vorliegenden Abweichungen der Messdaten aufgrund von Unterschieden zum Durchschnittsfall beruhen und durch Justierung der Eingangsdaten auf die tatsächlich vorliegenden Verhältnisse minimiert werden können (siehe Abschnitt 7.2.4).

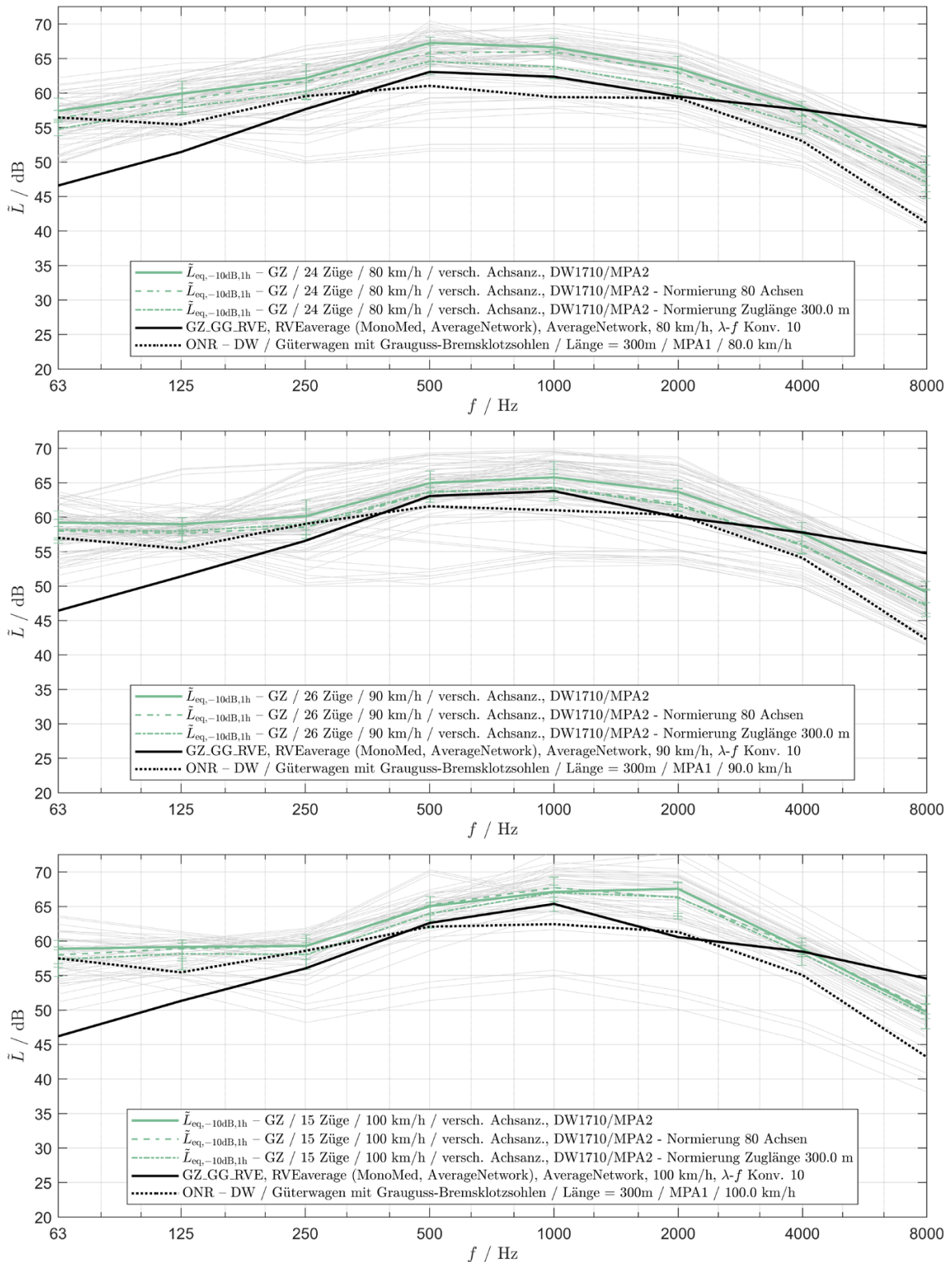


Abb. 7-1: Vergleich der Oktavbandpegel für Güterwagen mit Grauguss-Bremsklotzsohlen mit Geschwindigkeiten von 80 km/h (oben), 90 km/h (Mitte) und 100 km/h (unten) am Messort DW1710. Die berechneten Werte zeigen den derzeitigen Stand der Technik nach ONR 305011 (punktirt) und RVE 04.01.02.

7.2.2. Vergleich mit deutschen Berechnungsmethode (BUB)

In Deutschland wurde mit der Bekanntmachung im Bundesanzeiger vom 28. Dezember 2018 BAnz AT 28.12.2018 B7 die Datenbank für die Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe) (BUB-D) veröffentlicht. Sie enthält in Bezug auf Güterzüge folgende Koeffizienten

- $L_{r,veh,i}$ für die Radrauheit
Entspricht den Daten der Richtlinie 2015/996/EU und damit der RVE 04.01.02 für Güterzüge mit Graugussbremsen.
- $L_{r,tr,i}$ für die Schienenrauheit
Entspricht den Daten der Richtlinie 2015/996/EU und damit der RVE 04.01.02 für den durchschnittlichen Schienenzustand. Zusätzlich sind nur Schienenrauheiten für das besonders überwachte Gleis (BüG) ergänzt worden.
- $A_{3,i}$ für den Kontaktfilter
Kontaktfilter für eine Radlast von 75 kN und Raddurchmesser von 860 mm wurde für Güterwagen ergänzt.
- $L_{H,tr,f}$ für die Schienentransferfunktion
Für Betonschwellen im Schotterbett und Holzschwellen im Schotterbett liegen idente Terzbandpegel vor, wie jene für Monoblockschwellen auf mittlerer Zwischenlage nach 2015/996/EU, welche auch nach RVE vorgesehen sind.
- $L_{H,veh,f}$ für die Fahrzeugtransferfunktion
Für Güterwagen wird ein Rad mit einem Durchmesser von 860 mm vorgesehen. Die Werte dafür scheinen eine lineare Interpolation zwischen den Werten nach RVE und Richtlinie 2015/996 für 920 mm und 840 mm Raddurchmesser zu sein.

Weitere Angaben sind Ergänzungen zu Fahrbahnen, aber ohne Relevanz für die vorliegende Untersuchung.

Abb. 7-2 führt schrittweise durch die Auswirkungen der deutschen Eingangswerte und die Gegenüberstellung mit Güterzugvorbeifahrten bei 70 km/h in Deutsch-Wagram (DW1505). Durch die Verwendung der deutschen Eingangswerte für Fahrzeugtransferfunktion und Kontaktfilter muss zwangsläufig ein Gleichbleiben bzw. eine Erhöhung der Pegelwerte erfolgen. Sowohl die Senkung der Radlast für den Kontaktfilter, als auch die Verwendung eines kleineren Raddurchmessers führt in der Regel zu höheren Werten (Kirisits et al. [27]). Diese kann im vorliegenden Vergleich auch beobachtet

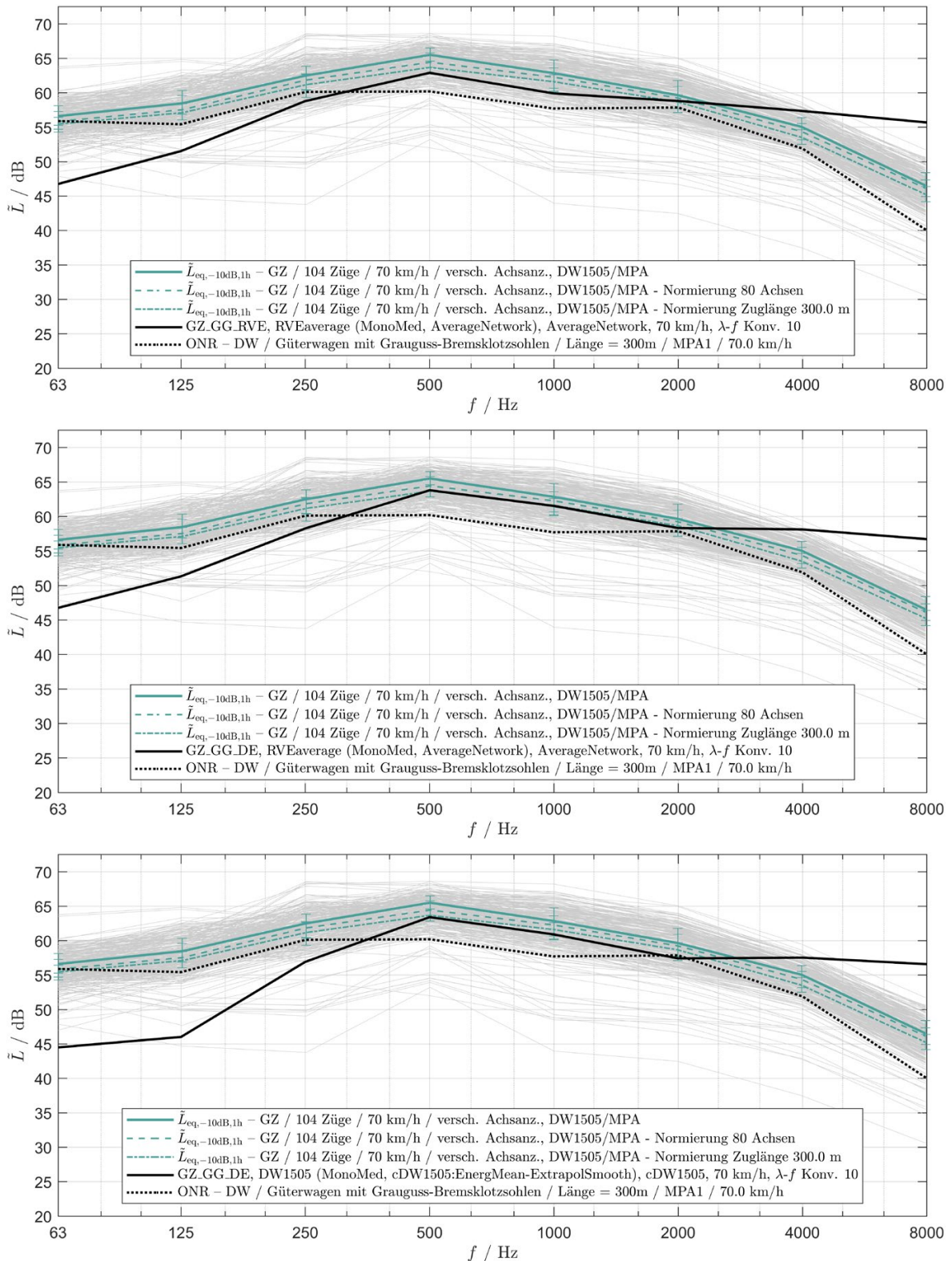


Abb. 7-2: Vergleich der Berechnungen nach RVE 04.01.02 (oben) mit der deutschen Umsetzung von Richtlinie 2015/996/EU (Mitte) für graugussgebremste Güterzüge mit 70 km/h und dem durchschnittlichen Netz nach Richtlinie. Für den Vergleich mit den Messwerten in Deutsch-Wagram (DW1505) wurde zusätzlich die durchschnittliche Schienenrauheit mit der tatsächlichen ersetzt (unten).

werden, womit nun auch im 1000 Hz Band die berechneten Werten nach oben, in die 50 % Perzentile der Messdaten verschoben wird. Die Verwendung der tatsächlichen Schienenrauheiten in Deutsch-Wagram (DW1505) zeigt ident zu den Vergleichen nach RVE eine leichte Senkung der Pegel die wiederum hauptsächlich auf den unteren Frequenzbereich beschränkt bleibt (siehe 7.2.4). Insgesamt unterscheiden sich die A-bewerteten Pegel nach RVE und BUB-D bei 70 km/h um 0,7 dB für die durchschnittliche Schienenrauheit.

7.2.3. Vergleich mit niederländischen Berechnungsmethode

Im niederländischen Bericht RIVM Letter report 2019-0023 [20] werden adaptierte Eingangswerte für die Schienenlärmemissionen vorgeschlagen. Die in der Originalrichtlinie verwendete Schienenrauheit für ein Netz im Durchschnitt stammt aus gemittelten Messwerten von 30 Messorten in den Niederlanden durchgeführt in den 90er Jahren. Zur einfacheren Handhabung der Werte wurden die gemittelten Werte weiter vereinfacht (teils linearisiert) womit ihre Feinstruktur verloren ging. Zum damaligen Zeitpunkt schien dies aufgrund der großen Streuung der gemessenen Rauheiten gerechtfertigt. Im Bericht aus 2019 schlägt die niederländische Expertengruppe aber eine detaillierte neue Variante für die durchschnittliche Schienenrauheit vor. Dabei stammen die Werte von 100 mm bis 1 mm weiterhin aus den ursprünglichen Messdaten von 30 Orten in den Niederlanden [28]. Von 315 mm bis 100 mm werden Daten hingegen aus Messungen im niederländischen Netz aus 1999 [29] und für den Bereich von 1000 mm bis 315 mm von Grassie [30] verwendet. Für die kurzen Wellenlängen ergibt dies geringere Rauheitspegel. Die bisherige CNOSSOS Standardvariante überschätzt nach Ansicht der niederländischen Gruppen in diesem Bereich, weil die ursprünglichen Werte hier linear extrapoliert wurden. Im Bereich längerer Wellenlängen kommt es aber zu einer deutlichen Anhebung. Dieser Bereich war in den ursprünglichen Messungen offensichtlich nicht abgedeckt und kann jetzt durch vorliegende Messungen ergänzt werden. Angemerkt wird, dass der neue Vorschlag wieder für ein Netz im Durchschnitt gilt und im Bereich von Messpunkten die tatsächlich gemessenen Rauheiten abweichen können. Dies ist mit den niedrigeren Rauheitswerten vergleichbar, wie sie für die Messstelle Deutsch-Wagram vorliegen.

Für die Kontaktfilter wird ebenfalls eine Korrektur vorgeschlagen. So wird erläutert, dass die in STAIRRS 2000-2002 errechneten und in einem internen Bericht publizierten Kontaktfilter bereits kurz darauf maßgeblich korrigiert wurden. Die bereits publizierten Werte wurden jedoch in HARMONOISE, IMAGINE und danach in CNOSSOS-EU

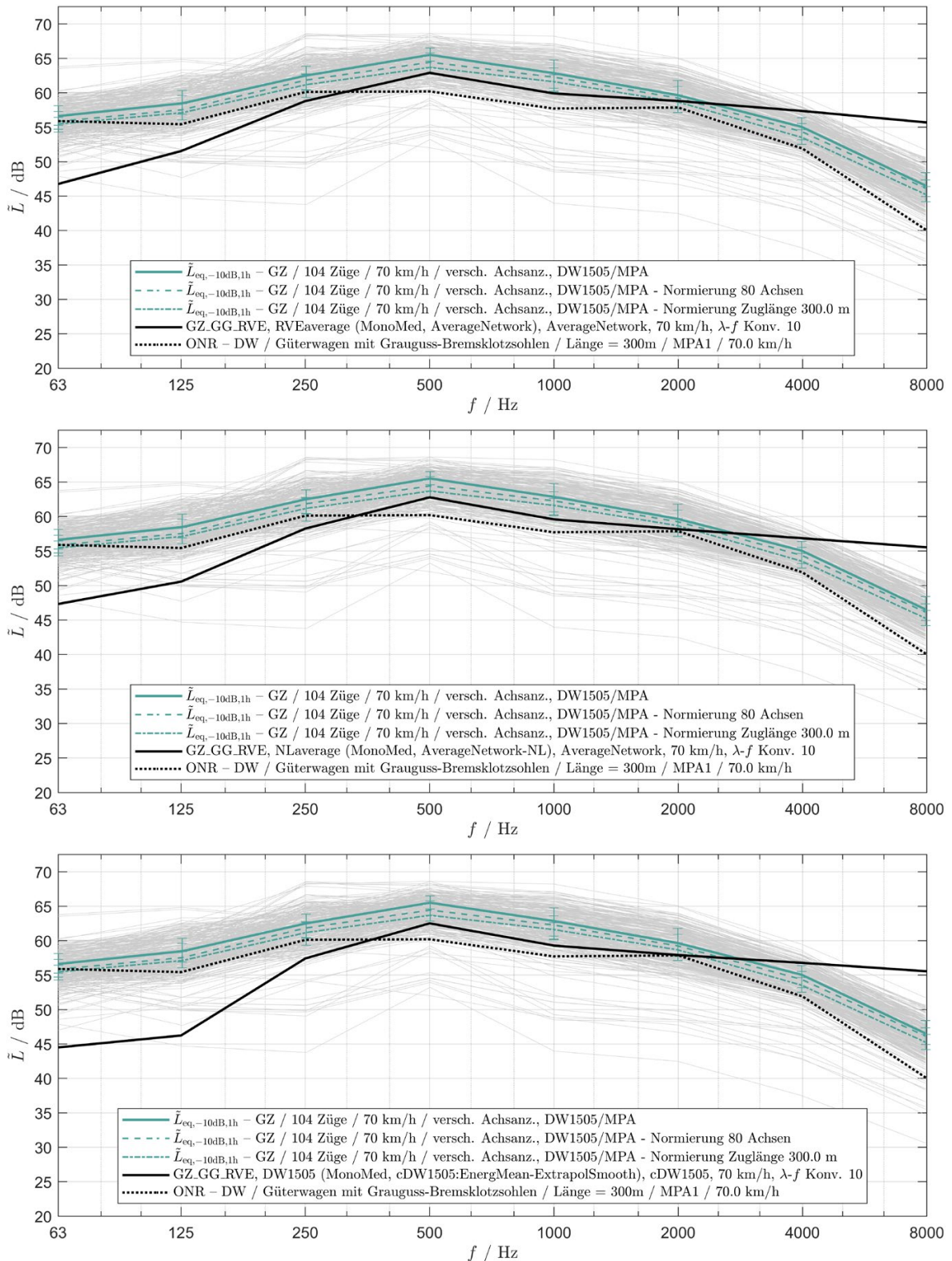


Abb. 7-3: Vergleich der Berechnungen nach RVE 04.01.02 (oben) mit der niederländischen Umsetzung von Richtlinie 2015/996/EU (Mitte) für graugussgebremste Güterzüge mit 70 km/h und dem durchschnittlichen Netz nach der jeweiligen Richtlinie. Für den Vergleich mit den Messwerten in Deutsch-Wagram (DW1505) wurde zusätzlich die durchschnittliche Schienenrauheit mit der tatsächlichen ersetzt (unten).

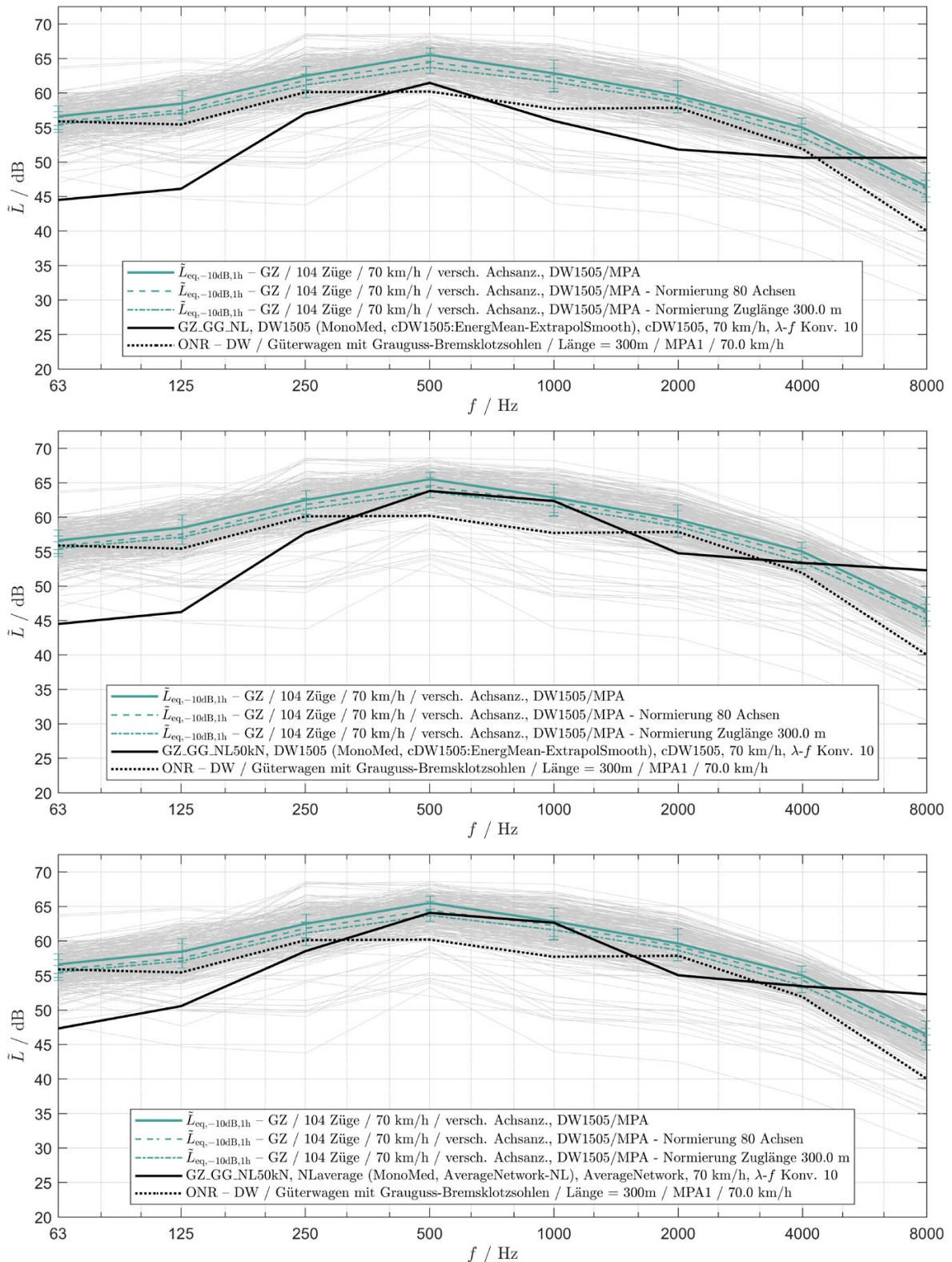


Abb. 7-4: Pegelwerte bei Verwendung des niederländischen Vorschlags für Kontaktfilter von standardmäßig 100 kN (oben) und 50 kN (Mitte). Zur Vollständigkeit erfolgt auch die Gegenüberstellung bei der die Schienenrauheit wieder nach dem niederländischen Durchschnitt für die Schienenrauheit dargestellt ist (unten).

übernommen. Es wird vorgeschlagen die Kontaktfilter aus dem Buch „Railway Noise and Vibration“ von David Thompson [23] zu verwenden. Diese sind allgemein für den Faktor l/a angegeben – mit l für die Wellenlänge und a für Halbachse des Ellipsoids der Kontaktfläche Rad/Schiene in Laufrichtung. Damit können abhängig von Raddurchmesser und Radlast die Kontaktfilter für die CNOSSOS-EU Kontaktfilter für 680 mm und 920 mm bei 25 kN, 50 kN und 100 kN durch Interpolation ermittelt werden. Interessanterweise erwähnt der Bericht die Wahl von 920 mm als Raddurchmesser und 100 kN als Radlast für Güterzüge, während für Personenzüge eine Radlast von 50 kN bis 90 kN angegeben wird. Die Kombination von 680 mm und 50 kN wird für Straßenbahnen als repräsentativ erachtet.

Wesentlich im Bericht ist die Anmerkung, dass die Veränderung der Schienenrauheit und der Kontaktfilter zu einer deutlichen Abnahme der Emissionen führen wird. Da dies im Rauheitsspektrum ihren Ursprung hat, wird angeraten die Radrauheiten entsprechend anzupassen und nicht die Fahrzeugtransferfunktionen zu adaptieren.

Die Auswirkungen sollen im Folgenden für Güterzüge illustriert werden. Abb. 7-3 vergleicht die Anwendung der Standardwerte nach RVE und den niederländischen Vorschlag mit gemessenen Werten von Deutsch-Wagram (DW1505) und Güterzügen bei 70 km/h. Durch die Verwendung des wenig rauen niederländischen Durchschnittsspektrums und des noch glatteren Spektrums am Messort sinken die Pegel ab, wobei dies für graugussgebremste Güterzüge nur gering ausfällt. Einen deutlichen Abfall der Pegel bei Verwendung der neuen niederländischen Vorschläge für die Kontaktfilter zeigt Abb. 7-4. Allerdings ergibt sich durch die Wahl von 50 kN statt 100 kN Radlast eine ausreichend gute Übereinstimmung in den maßgeblichen Oktavbändern. Die Wahl der Kontaktfilterwerte beeinflusst im maßgeblichen mittleren Frequenzbereich (500 Hz bis 2000 Hz) das Ergebnis wesentlich stärker als die Anpassung der Schienenrauheit.

7.2.4. Verwendung der gemessenen Schienenrauheiten

Die Schienenrauheit ist ein wesentlicher Parameter des Emissionsmodells. Im Sinne der Richtlinie 2002/49/EG sind für die Immissionsberechnung kennzeichnende Zustände dafür zu verwenden. Dies werden Durchschnittswerte über mehrere Jahre für das gesamte Netz oder Netzabschnitte sein. Für die tatsächliche Gegenüberstellung von gemessenen Werten bzw. für die Bestimmung der Emissionsparameter ist jedoch die tatsächliche Schienenrauheit zu verwenden. Letztlich ist die Gesamtrauheit als Kombination von Radrauheit, Schienenrauheit und Kontaktfilter relevant. Liegt die

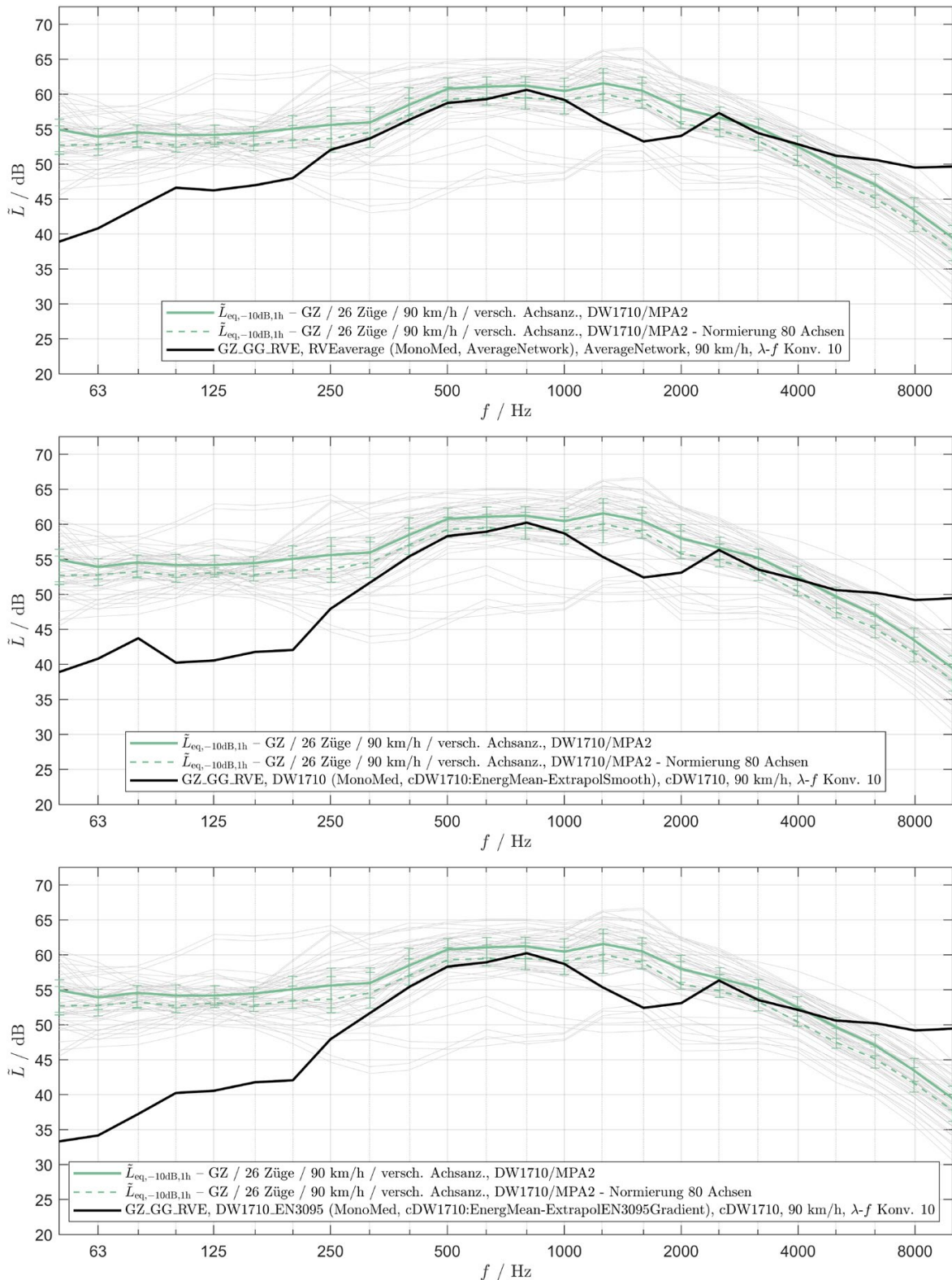


Abb. 7-5: Berechnete Pegelwerte von Güterzugsvorbeifahrten für die Schienenrauheit nach RVE 04.01.02 Durchschnittswert (oben), der tatsächlich bestimmten Rauheit (Mitte) und jener mit nach ÖNORM EN ISO 3095 im untersten und obersten Wellenlängenbereich extrapolierten Werten (unten).

Radrauheit deutlich über der Schienenrauheit sind somit nur geringe Einflüsse durch die Schiene zu erwarten. Im Falle von graugussgebremsten Güterzügen wird davon ausgegangen. Abb. 7-5 bestätigt die Hypothese für den überwiegenden Teil des Frequenzspektrums bei Vorbeifahrten der Geschwindigkeitsklasse 90 km/h. Allerdings sind unterhalb von 250 Hz doch Pegelminderungen von mehreren Dezibel zu beobachten. Dies entspricht bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h dem Bereich von Wellenlängen über 0,1 m. Im Bereich über 0,4 m wurden die Schienenrauheiten mangels Messwerten extrapoliert. Somit wirkt sich die Wahl der Extrapolationsmethode selbst bei Güterzügen in unteren Frequenzbereichen aus. Dies ist im unteren Bild von Abb. 7-5 dargestellt, indem eine Extrapolation folgend ÖNORM EN ISO 3095 als Grundlage gewählt wurde (siehe Abschnitt 6.2).

7.2.5. Variation und Adaption der Schienentransferfunktion

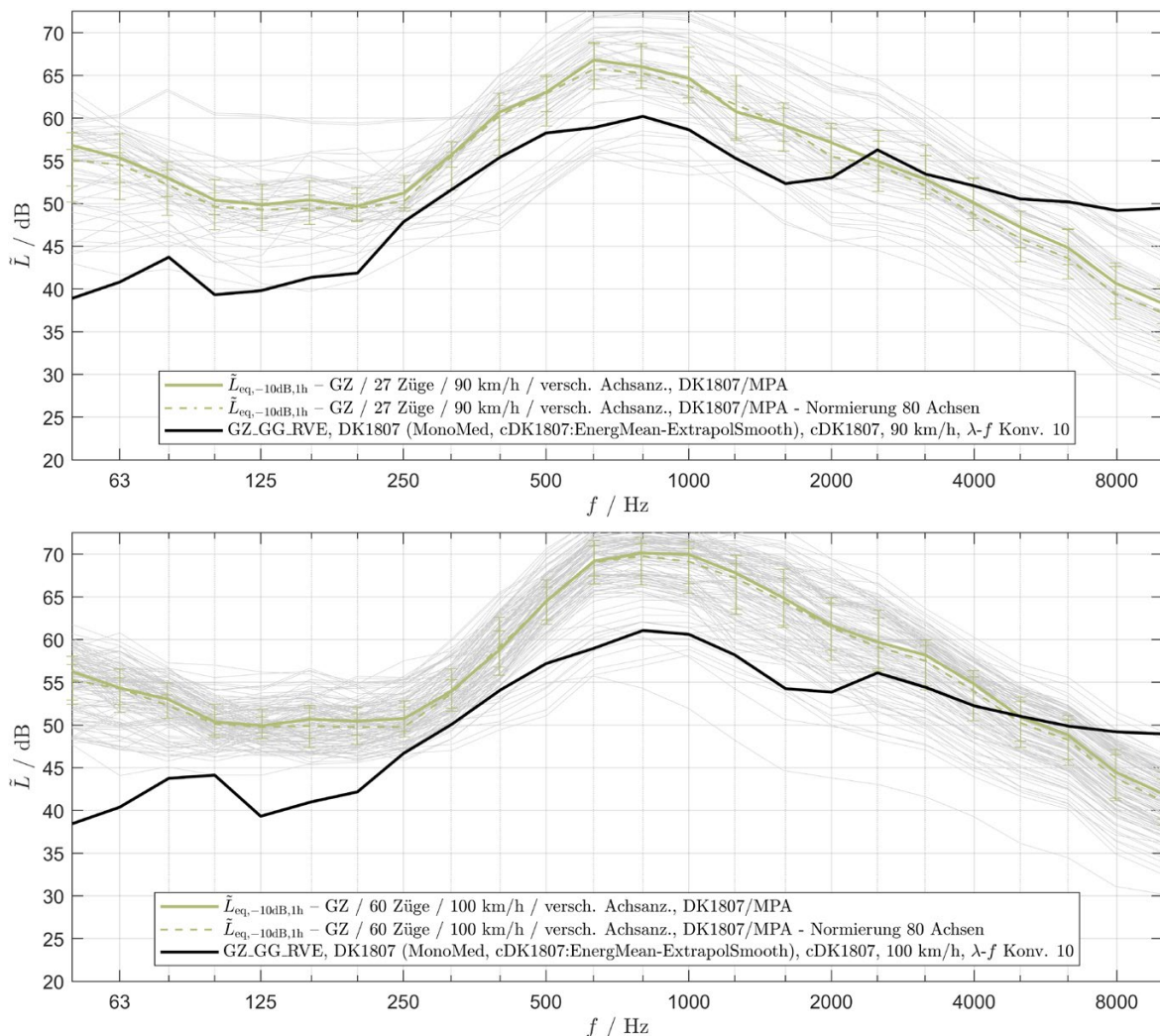


Abb. 7-6: Messwerte für Dürnkrot (DK1807) und Güterzugvorbeifahrten bei 90 km/h (oben) und 100 km/h (unten) und die jeweiligen berechneten Werte nach RVE 04.01.02

Die Transferfunktion $L_{H,TR,i}$ beschreibt die Schallemission durch den Oberbau entsprechend seiner Spezifikationen (Schwellentyp bzw. Zwischenlagen). Nach RVE 04.01.02 stehen dafür weiche, mittlere und harte Zwischenlagen zur Verfügung. Liegen keine abweichenden Untersuchungen vor ist normgemäß mit mittleren Zwischenlagen zu rechnen. Weiche Zwischenlagen wären ab einer akustischen (dynamischen) Steifigkeit von $< 250 \text{ MN/m}$ anzunehmen.

Abb. 7-6 zeigt den Vergleich der Messwerte DK1807 mit den berechneten Werten nach RVE 04.01.02. Die Messwerte liegen dabei insbesondere auch im wesentlichen Bereich von 500 Hz bis 1600 Hz über den berechneten Werten. In Abschnitt 6.4 wurden die Verhältnisse der Track Decay Rate dieser Messserie schon detailliert dargestellt. Die verminderte Track Decay Rate soll in einem ersten Schritt durch Verwendung einer

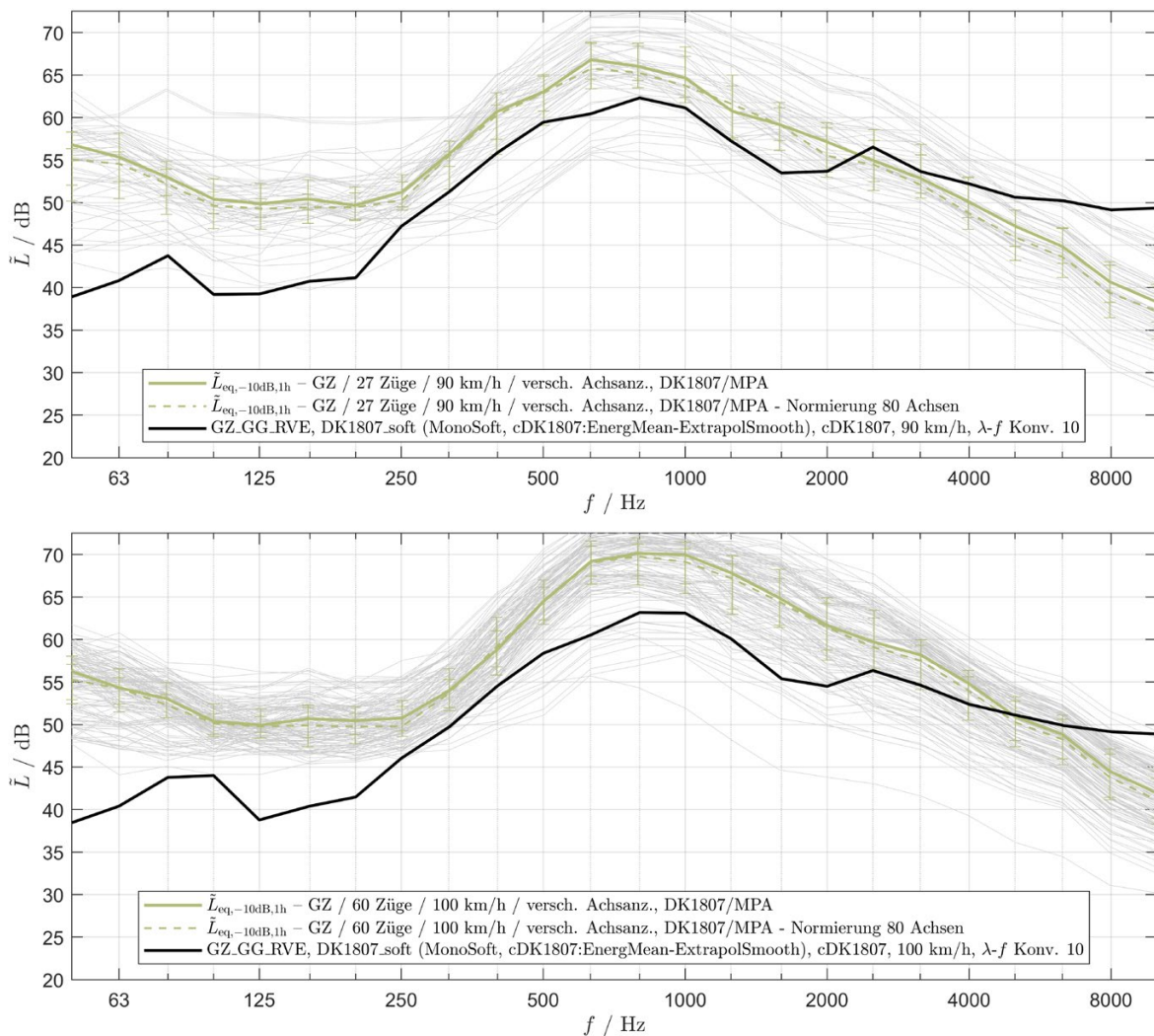


Abb. 7-7: Messwerte für Dürnkrot (DK1807) und Güterzugvorbeifahrten bei 90 km/h (oben) und 100 km/h (unten) und die jeweiligen berechneten Werte nach RVE 04.01.02 mit Verwendung der Schienentransferfunktion für weiche Zwischenlagen

Schientransferfunktion für weiche Zwischenlagen berücksichtigt werden. Abb. 7-7 demonstriert die Wirkung dieser Änderung. Sie führt gerade in den wesentlichen Frequenzbereichen mit hoher Abweichung zu einer Erhöhung der Schallpegel und einer tendenziellen Verbesserung für die Übereinstimmung.

Eine weitere Erhöhung ist mit den vorliegenden Eingangswerten theoretisch noch durch das Einsetzen der Transferfunktion für Zweiblock-Schwellen auf weicher Zwischenlage möglich, da die damit berechneten Pegel beispielsweise bei 1000 Hz um weitere 0,8 dB höher liegen. Es zeigt sich aber, dass das Erreichen der gemessenen Werte an diesem Messort und seiner besonderen TDR nur durch Verwendung einer eigens erstellten Schientransferfunktion möglich wird, welche sich deutlich von den Durchschnittswerten der bisherigen europäischen und nationalen Werte unterscheiden würde.

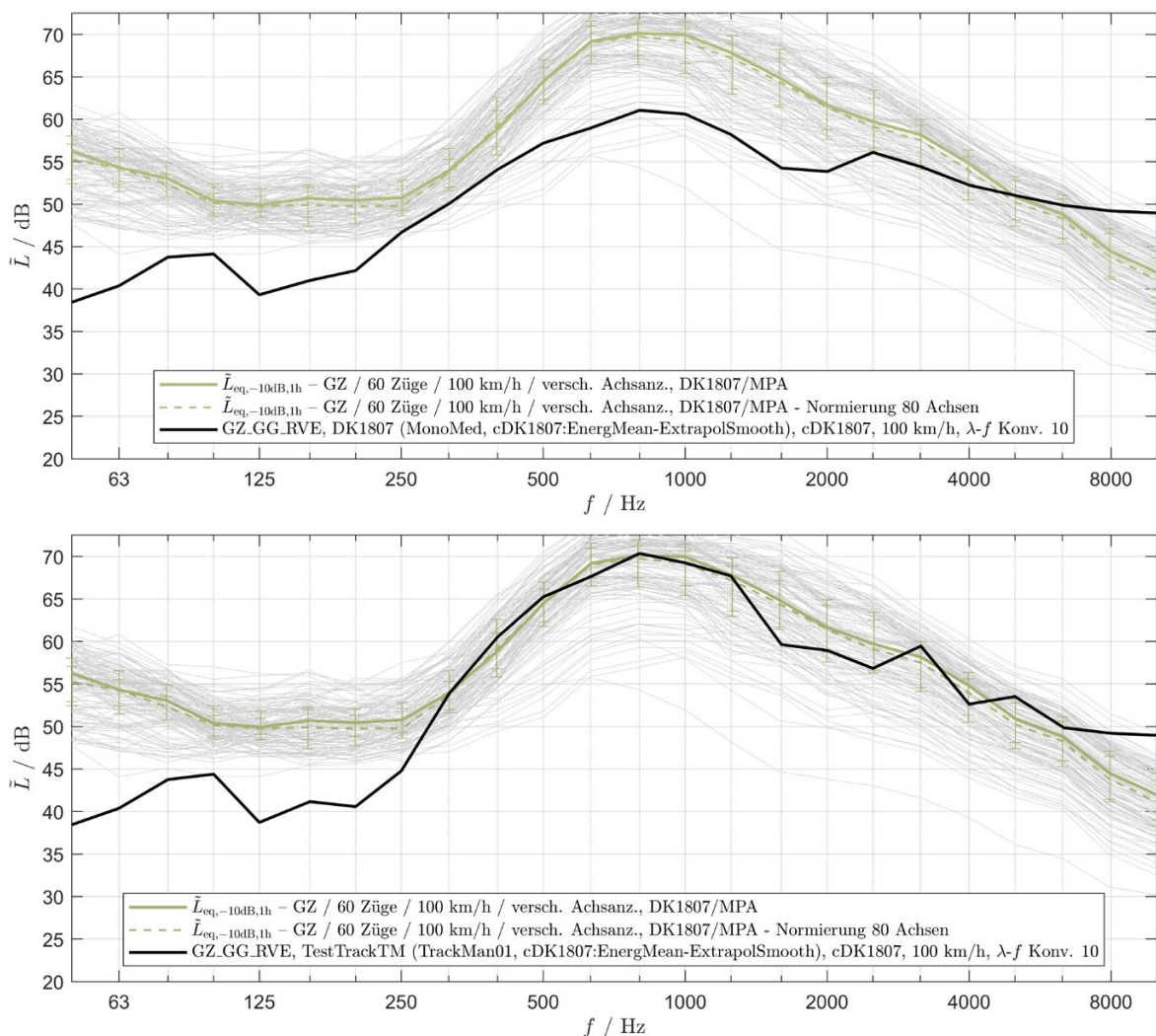


Abb. 7-8: Gegenüberstellung der Spektren mit der standardisierten Schientransferfunktion für mittlere Zwischenlagen (oben) und einer auf Basis der TDR angepassten Schientransferfunktion (unten)

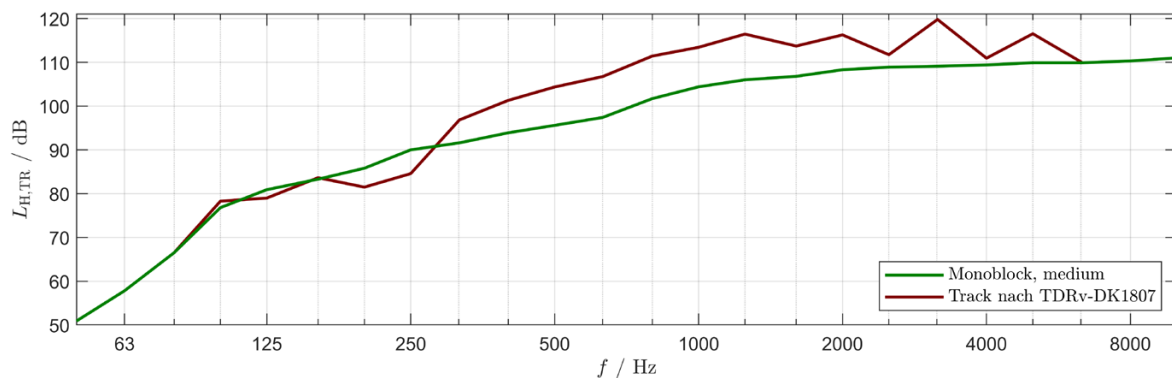


Abb. 7-9: Schienentransferfunktion für mittlere Zwischenlagen nach RVE 04.01.02 und einer auf Basis des Verhältnisses der vertikalen TDR zwischen DK1807 und DW1807 korrigierten Alternative

Aufbauend auf Abschnitt 6.4 wird der Einfluss einer alternativen Schienentransferfunktion analysiert. Dazu wurde der Korrekturterm verwendet, der sich durch Differenz der vertikalen Track Decay Rate zwischen DK1807 und DW1807 ergibt (siehe Abb. 6-13). Die sich damit ergebende, in Abb. 7-9 dargestellte, modifizierte Transferfunktion wirkt sich, wie in Abb. 7-8 illustriert, durch eine entsprechende Anhebung der Pegel in den betroffenen Frequenzbereichen aus. Im Bereich um 500 Hz bis 1000 Hz liegt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen damit berechneten und tatsächlich gemessenen Pegeln vor.

7.2.6. Variation und Adaption der Radrauheit

Die Radrauheiten der RVE 04.01.02 sind direkt aus der Richtlinie 2015/996/EU übernommen. Diese wiederum stammen aus der IMAGINE Datenbank, wobei Details zu deren Generierung nicht mehr nachvollziehbar sind (Annex 6 in [20]). Aus Arbeitstabellen, welche im Zuge des CNOSSOS-EU Projekts öffentlich wurden, als auch durch die ersichtlich gleichbleibenden Werte erkennt man eine Extrapolation mit konstanten Werten im Bereich über 100 mm bzw. unter 3,2 mm Wellenlänge. Ersetzt man diese extrapolierten Werte und entfernt den Abfall der Rauheiten bei Wellenlängen größer als 50 mm durch einen kontinuierlichen Anstieg sowie den Anstieg bei Wellenlängen kleiner 6,3 mm durch gleichbleibende niedrigere Werte so ergibt sich eine modifizierte Radrauheit wie in Abb. 7-11 dargestellt. Dabei ist zu festzuhalten, dass diese Modifikation auf keiner messtechnischen Evidenz beruht, sondern nur im Sinne dieses Projekts zur Demonstration der Auswirkungen verwendet wird. Belässt man die einzelnen Transferfunktionen, den Kontaktfilter sowie die gemessene Schienenrauheit führt diese substantielle Korrektur der Radrauheit zu einer guten Übereinstimmung in den untersten betrachteten Terzbändern (vgl. Abb. 7-10). Im oberen Frequenzbereich ergibt sich nur eine leicht tendenziell bessere Übereinstimmung. Das Beispiel zeigt, wie hoch

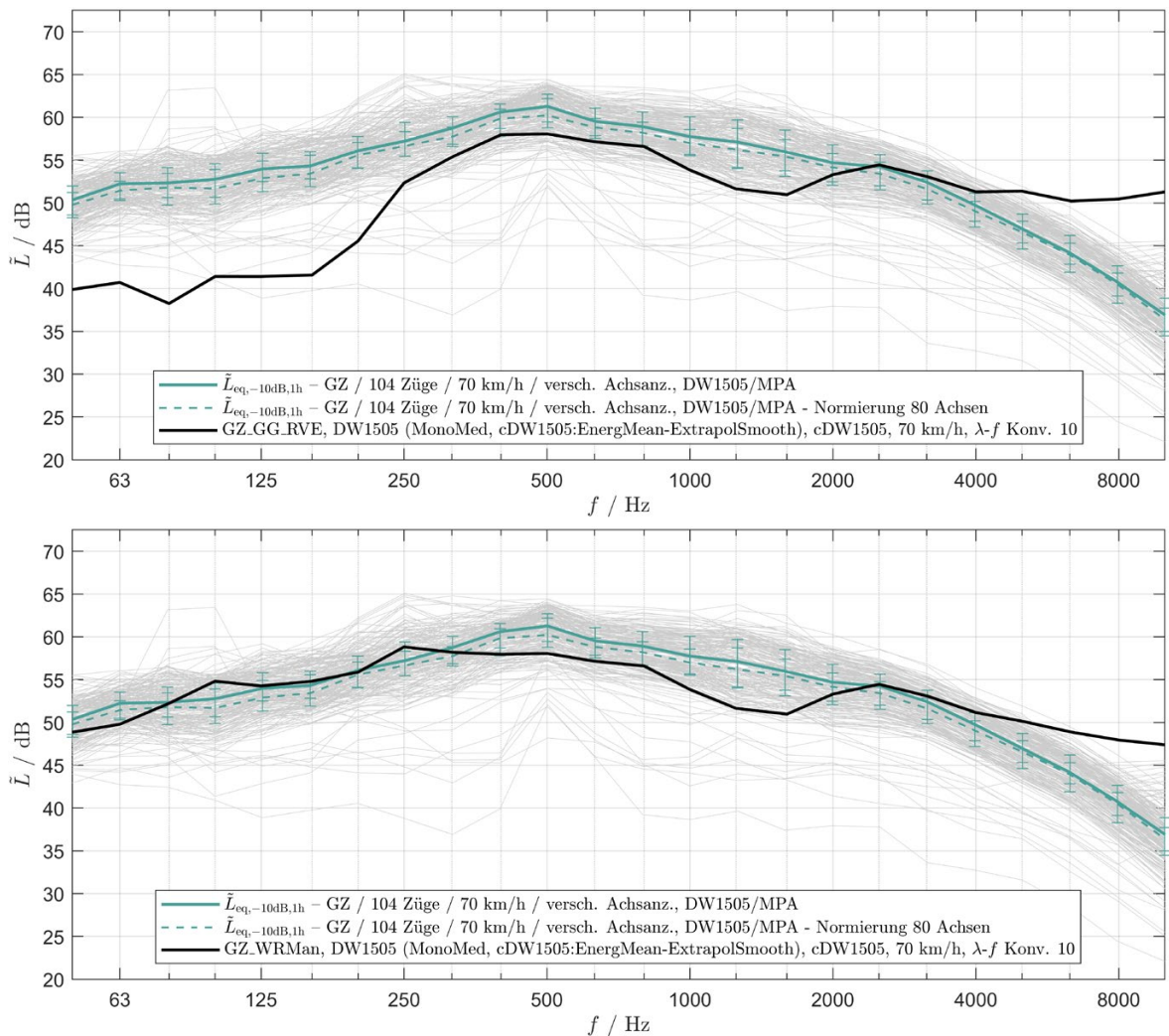


Abb. 7-10: Gegenüberstellung der Spektren mit der standardisierten Radrauheit bei Grauguss Bremsen und einer veränderten Radrauheit im Vergleich zu tatsächlich gemessenen Pegelwerten

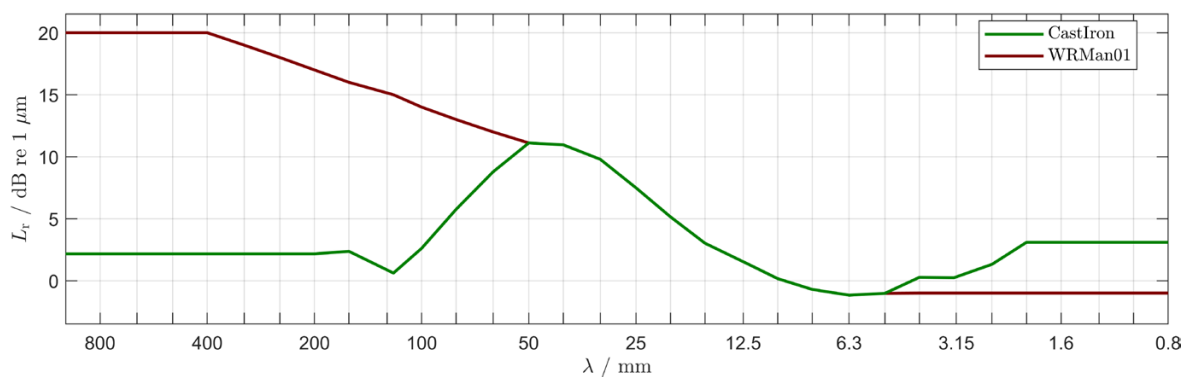


Abb. 7-11: Darstellung der standardisierten Radrauheit bei Grauguss Bremsen und einem zu Demonstrationszwecken stark veränderten Spektrum (WRMan01)

Korrekturen an der Radrauheit ausfallen müssten, um die standardmäßig stark abweichenden Mess- und Berechnungsergebnisse im unteren Frequenzbereich in Deckung zu bringen.

7.2.7. Variation des Kontaktfilters

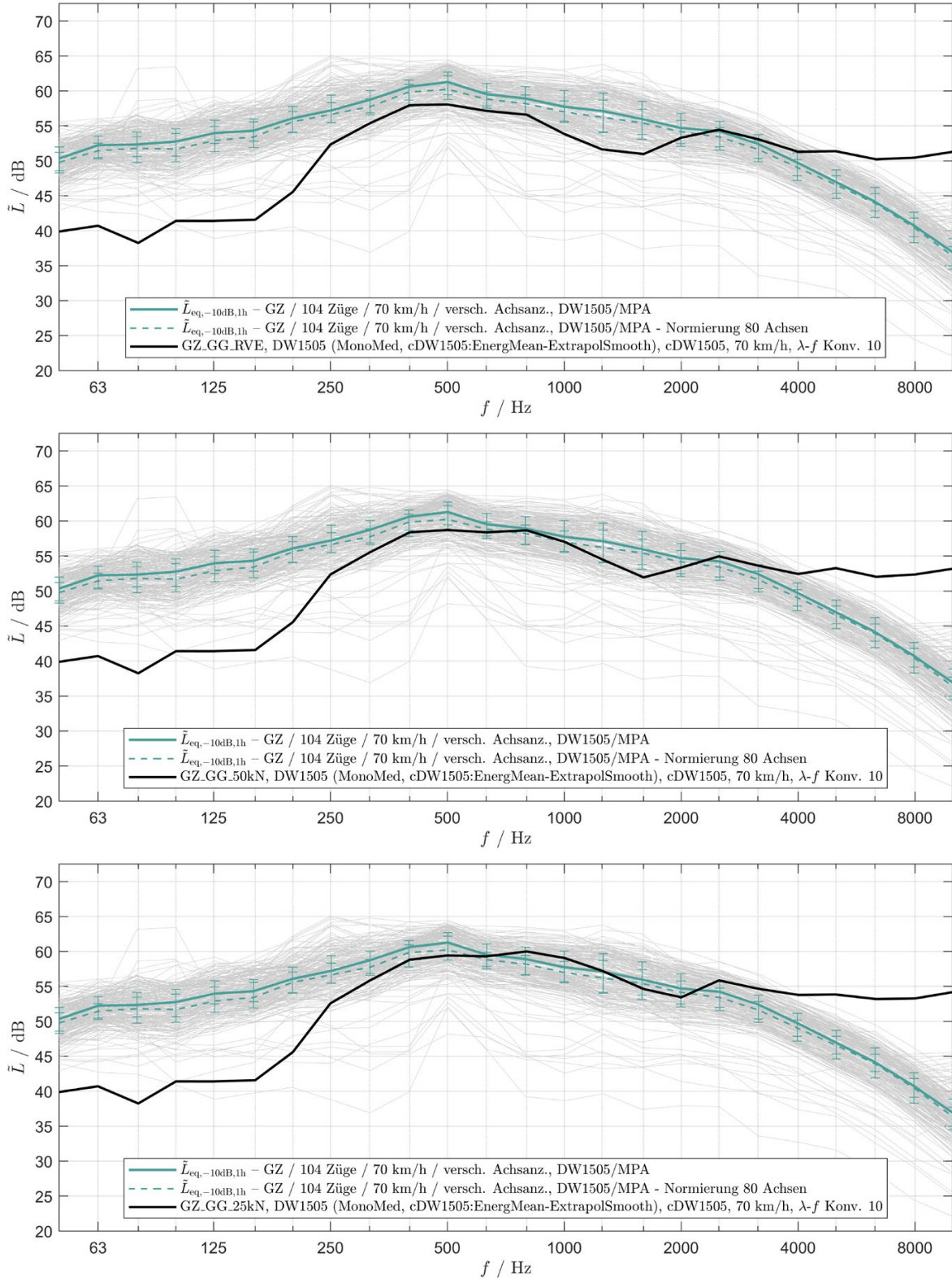


Abb. 7-12: Schrittweise Veränderung der Kontaktfilterstandardwerte für Radlasten von 100 kN (oben), 50 kN (Mitte) und 25 kN (unten) und Vergleich mit Messwerte aus Deutschwagram (DW1505) für Güterzüge bei 70 km/h

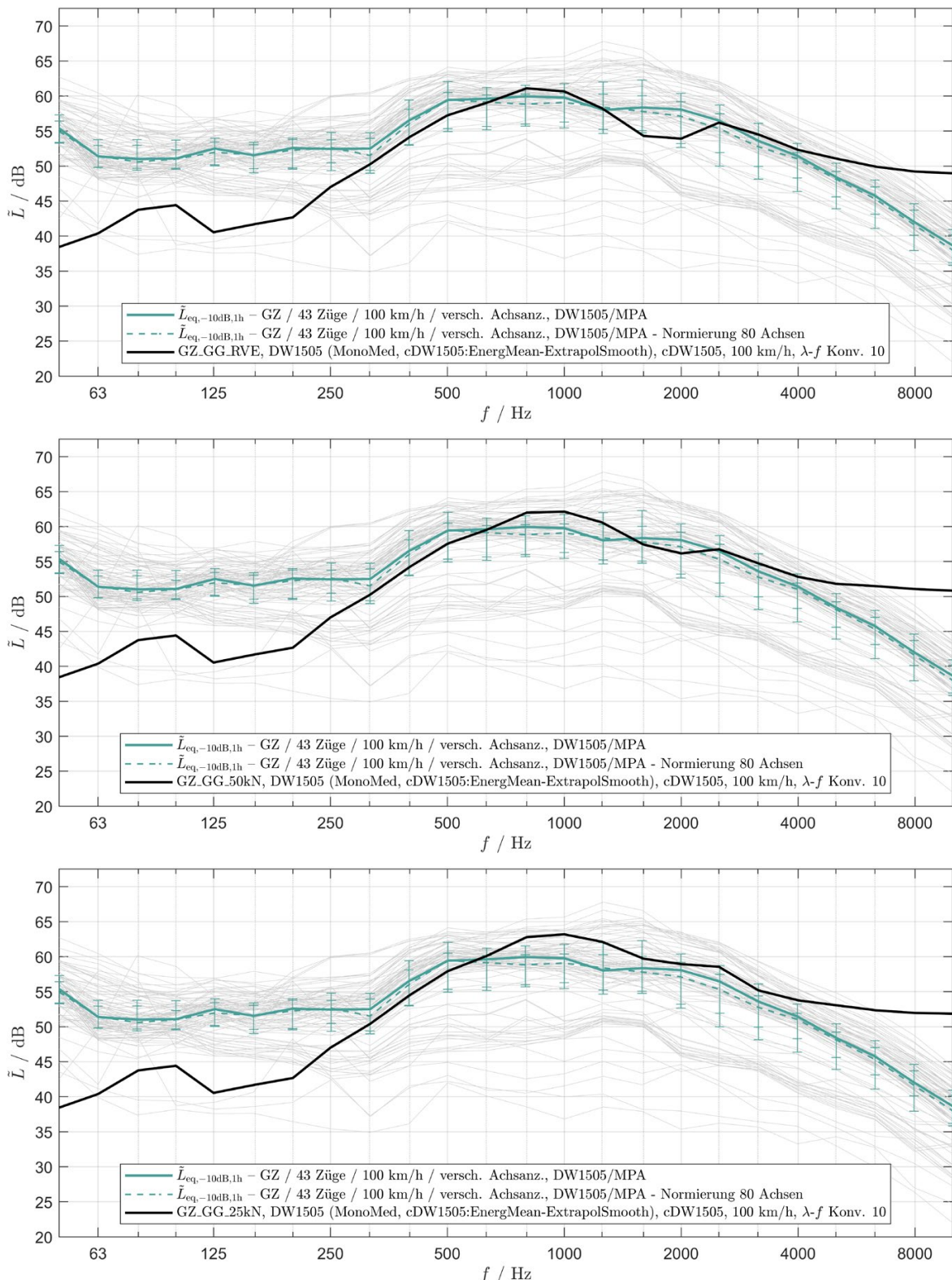


Abb. 7-13: Schrittweise Veränderung der Kontaktfilterstandardwerte für Radlasten von 100 kN (oben), 50 kN (Mitte) und 25 kN (unten) und Vergleich mit Messwerte aus Deutsch-Wagram (DW1505) für Güterzüge bei 100 km/h

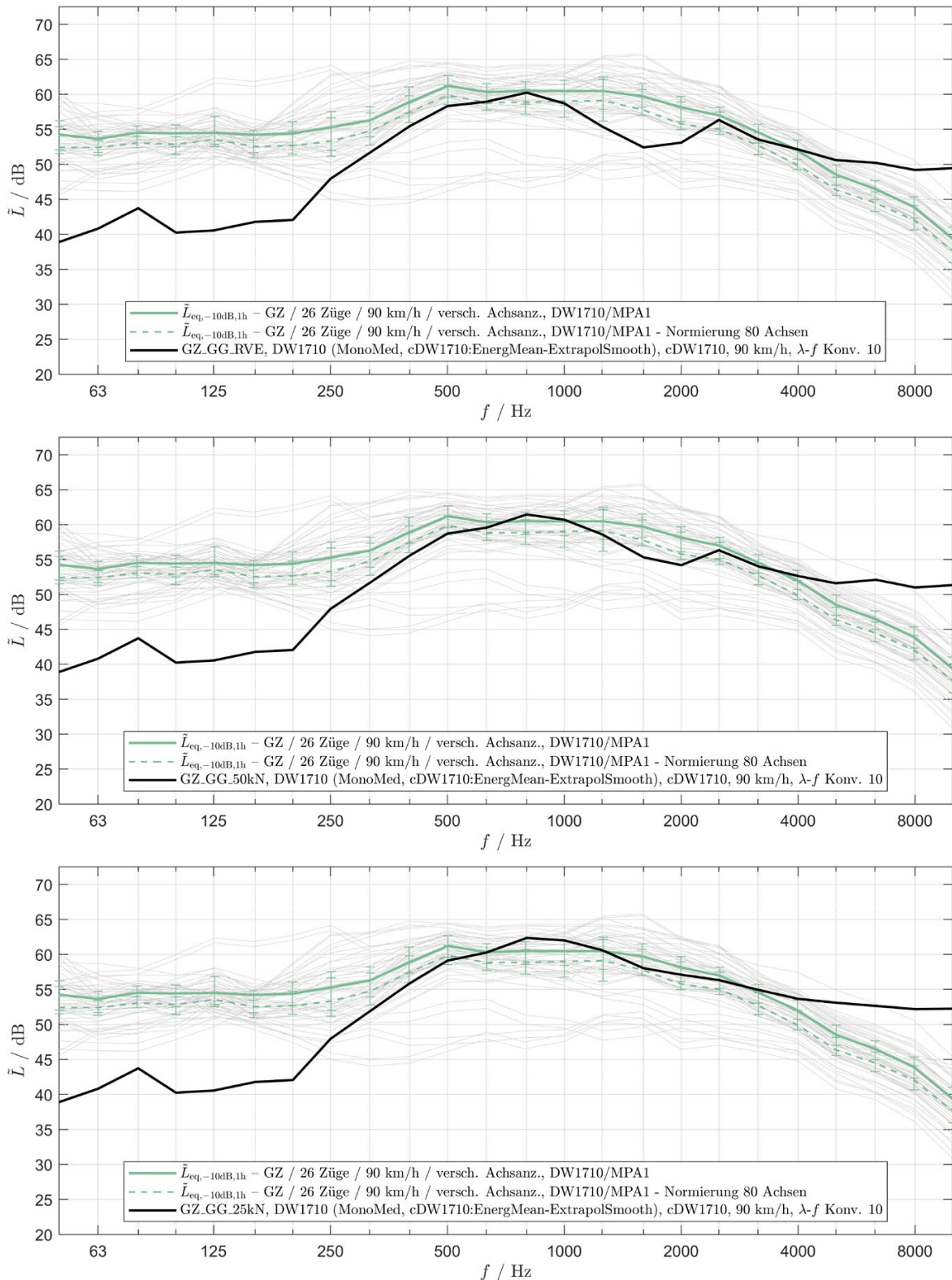


Abb. 7-14: Schrittweise Veränderung der Kontaktfilterstandardwerte für Radlasten von 100 kN (oben), 50 kN (Mitte) und 25 kN (unten) und Vergleich mit Messwerte aus Deutsch-Wagram (DW1710) für Güterzüge bei 90 km/h

Die vorangegangenen Abbildungen (Abb. 7-12 bis Abb. 7-14) zeigen für bestimmte Messquerschnitte und Geschwindigkeiten den jeweiligen Einfluss der Kontaktfilte Wahl. In DW1505 bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h (Abb. 7-12) liegen die berechneten Pegel mit Ausnahme ab 2000 Hz durchgehend unterhalb der 50 % Perzentile der Messwerte. Hier ergibt die Wahl eines Kontaktfilters von 50 kN bereits eine deutliche Anhebung und gute Übereinstimmung, wenn man noch aus den Terzbandpegeln die relevanten Oktavbandpegel 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz bildet. Eine weitere Absenkung der Radlast für den Kontaktfilter auf 25 kN zeigt bereits eine Überschätzung der Werte in den wesentlichen Frequenzbereichen. Wiederholt man den Vergleich am selben Messort für 100 km/h Vorbeifahrten (Abb. 7-13), so zeigt sich bereits bei der Wahl von 100 kN eine gute Übereinstimmung, während durch Wahl von 50 kN und 25 kN stärkere Abweichungen im Bereich um 1000 Hz auftreten. Bei dem letzten Vergleich in Abb. 7-14 mit dem Messort DW1710 sind wiederum bessere Übereinstimmung mit Radlasten von 50 kN zu beobachten. Eine abschließende Festlegung ist demzufolge nicht möglich. Es zeigt sich aber, dass die Kontaktfilte Wahl möglicherweise zwischen 100 kN und 50 kN liegt, bei Verwendung der derzeitigen Richtlinien Werte. Diese Vorgangsweise hat letztlich Deutschland mit der BUB-D gewählt. Nimmt man die neu vorgeschlagenen Werte für Kontaktfilte aus den Niederlanden so ist die idente Interpolation nicht mehr möglich und die Wahl der Radlast ist durch entsprechenden Vergleich der berechneten Vorbeifahrtspegel mit den berechneten Werten erst zu verifizieren.

7.2.8. Verwendung der Aufbau transferfunktion

Geräusche ausgehend vom Aufbau von Güterwagen können mit dem Modell der Richtlinie 2015/996/EU bzw. RVE 04.01.02 mittels der Aufbau transferfunktion $L_{H,VEH,SUP}$ berücksichtigt werden. Nähere Erläuterungen oder Referenzen werden in der Richtlinie nicht angeführt. Im CNOSSOS-EU JRC Reference Report aus 2010 [31], bei dem noch detaillierter Quellenhöhen vorgesehen waren, sollte dieser Geräuschanteil noch auf eine Ersatzschallquelle in 2,5 m Höhe über SOK bezogen werden. In der Richtlinie wird als Standardwert für die Transferfunktion für alle Terzbänder durchgehend 0,0 dB angegeben. Diese Angabe ist zwar physikalisch nicht nachvollziehbar, bedeutet aber praktischerweise nur einen vernachlässigbaren Beitrag und damit letztlich keine Berücksichtigung dieses Geräuschanteils.

Prinzipiell erlaubt die Funktion die Anpassung der Emissionsparameter für bestimmte Typen von Güterwagen. Dies könnte jedoch nur mittels selektionierter Messreihen erfolgen, da eine Anpassung an eine Gesamtkohorte von Vorbeifahrten nicht

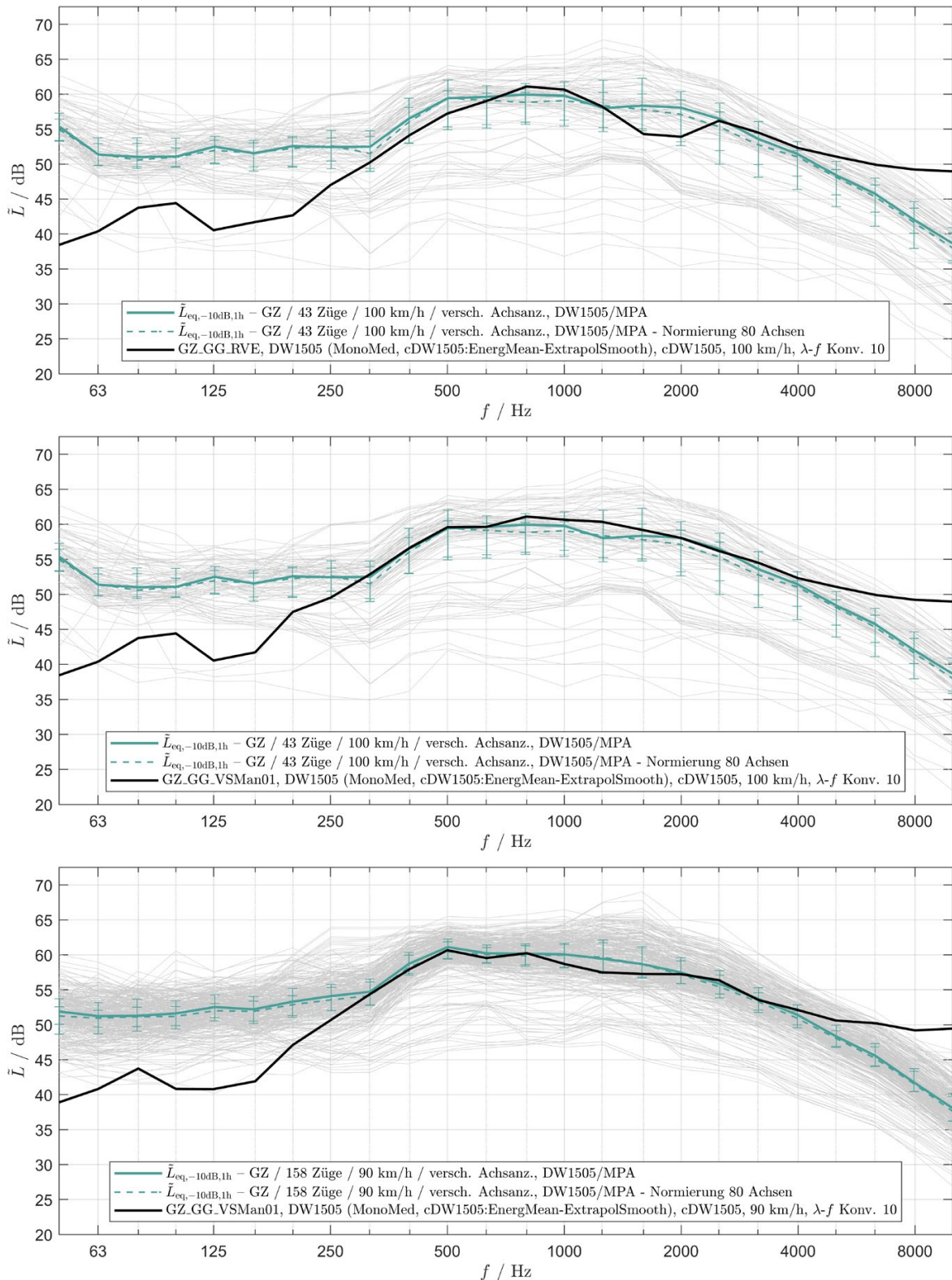


Abb. 7-15: Beispiel zum Einfluss der Aufbauentransferfunktion - ausgehend vom Vergleich zwischen Messung und Berechnung von Vorbeifahrten in DW1505 (oben) wird eine optimierte Funktion für 100 km/h (Mitte) und 90 km/h (unten) dargestellt

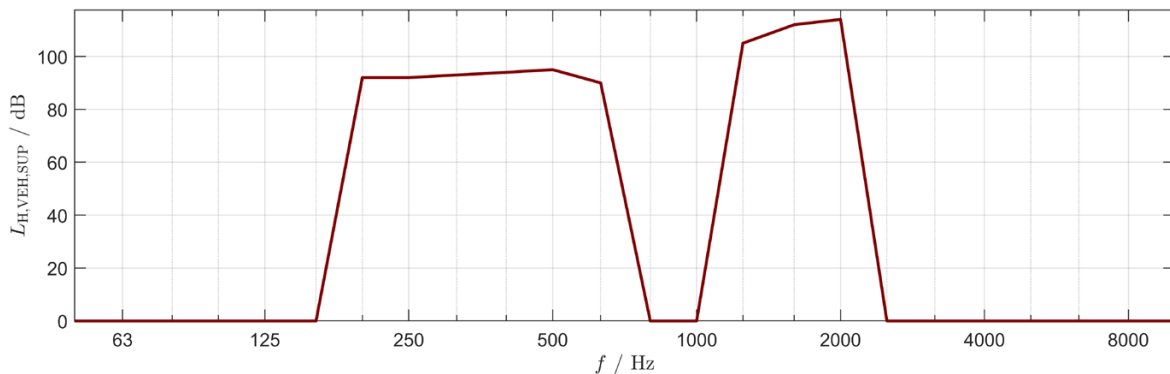


Abb. 7-16: Beispiel einer Aufbautentransferfunktion um berechnete und gemessene Emissionen für Güterzüge aufeinander abzustimmen

kontrollierbare Unsicherheiten inkludieren würde. Anhand eines Beispiels sollen die Größenordnung möglicher Aufbautentransferfunktionen untersucht werden. Dafür wurde für Vorbeifahrten der Messung in DW1505 eine Transferfunktion optimiert. In Abb. 7-15 ist die Situation ohne Transferfunktion dargestellt, sowie jene für die neue, in Abb. 7-16 dargestellten Transferfunktion bei zwei Geschwindigkeiten. Die Optimierung blieb auf den Frequenzbereich ab 200 Hz beschränkt, da die Abweichungen im unteren Frequenzbereich ebenfalls für Reisezüge auftreten und hier offensichtlich der Aufbau nach dem Modell nicht Einfluss haben kann. Die optimierte Transferfunktion zeigt zwar die prinzipielle Möglichkeit für eine gute Übereinstimmung zwischen prognostizierten und gemessenen Werten, wobei dies teils nur bedingt möglich ist. Vergleicht man die beiden Darstellungen für 90 km/h und 100 km/h, zeigt sich, wie im 1250 Hz Terzband nur ein Ausgleich zwischen Über- und Unterschätzung in den beiden Gruppen erreicht werden kann.

7.2.9. Aspekte der Umrüstung auf leise Bremssohlen

Wie bereits im Eingang dieses Abschnitts (Unterkapitel 7.2) erläutert, wurden alle Vergleiche mit Radrauhheiten für Grauguss gebremste Güterwagen durchgeführt. Abb. 7-17 zeigt gemessene Spektren bei 100 km/h Vorbeifahrten in DW1505. Betrachtet man die gemessenen, auch auf konstante Achszahlen normierten Werte so erkennt man einen Anteil an Zugvorbeifahrten, die sich deutlich vom Median nach unten unterscheiden. Man könnte vermuten, dass es sich dabei um Züge mit einem besonders hohen Anteil an leisen, K/LL-Sohlen gebremsten Wagen handelt. Ausgenommen dem Frequenzbereich größer 4000 Hz zeigt sich dafür eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten für „leise“ Güterzüge. Insbesondere der für den A-bewerteten Gesamtpegel wesentliche mittlere Frequenzbereich zeigt mit seinem Verlauf die deutliche Absenkung bei Verwendung des lärmtechnisch verbesserten Bremssystems.

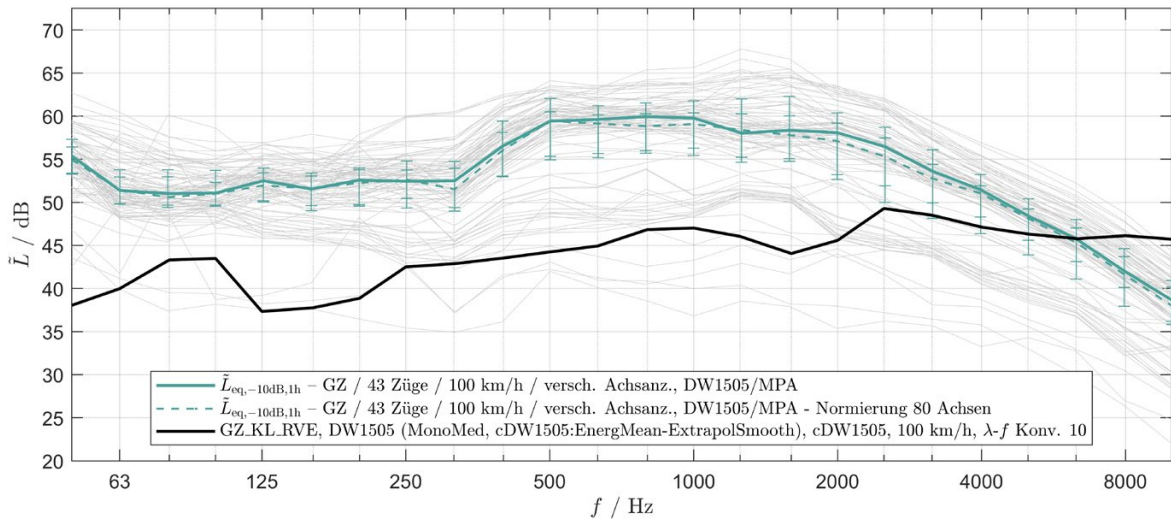


Abb. 7-17: Darstellung der Werte nach RVE 04.01.02 für Güterzüge mit K/LL-Bremssohlen

7.2.10. Zusätzliche Beispiele

Folgende Vergleiche in Abb. 7-18, Abb. 7-19 und Abb. 7-20 zeigen weitere Messserien und dazu berechneten Werte nach RVE 04.01.02.

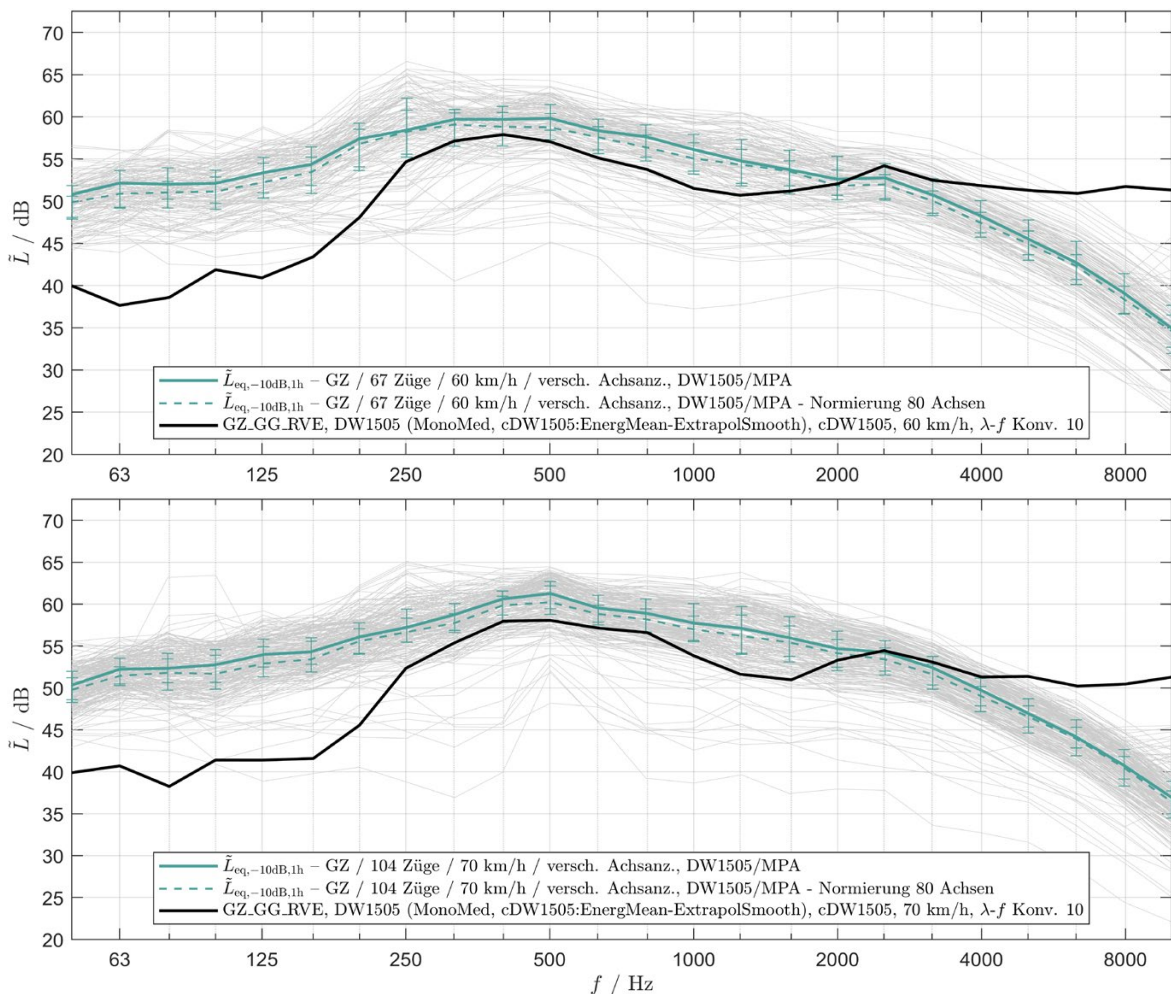


Abb. 7-18: Vergleich v. Güterzugsvorbeifahrten in DW1505 bei 60 km/h (o.) und 70 km/h (u.)

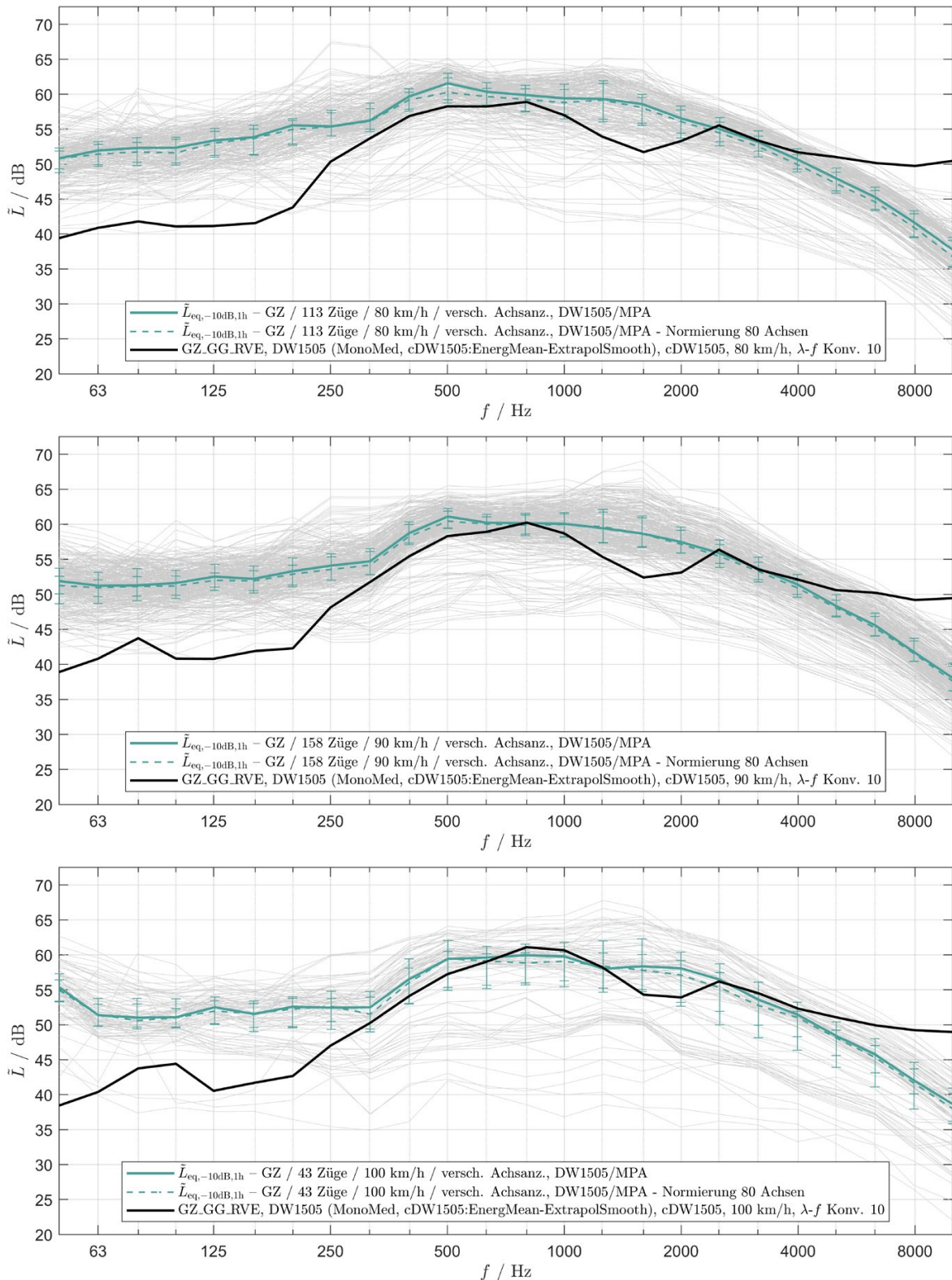


Abb. 7-19: Vergleich von Güterzugvorbeifahrten in DW1505 bei 80 km/h (oben), 90 km/h (Mitte) und 100 km/h (unten)

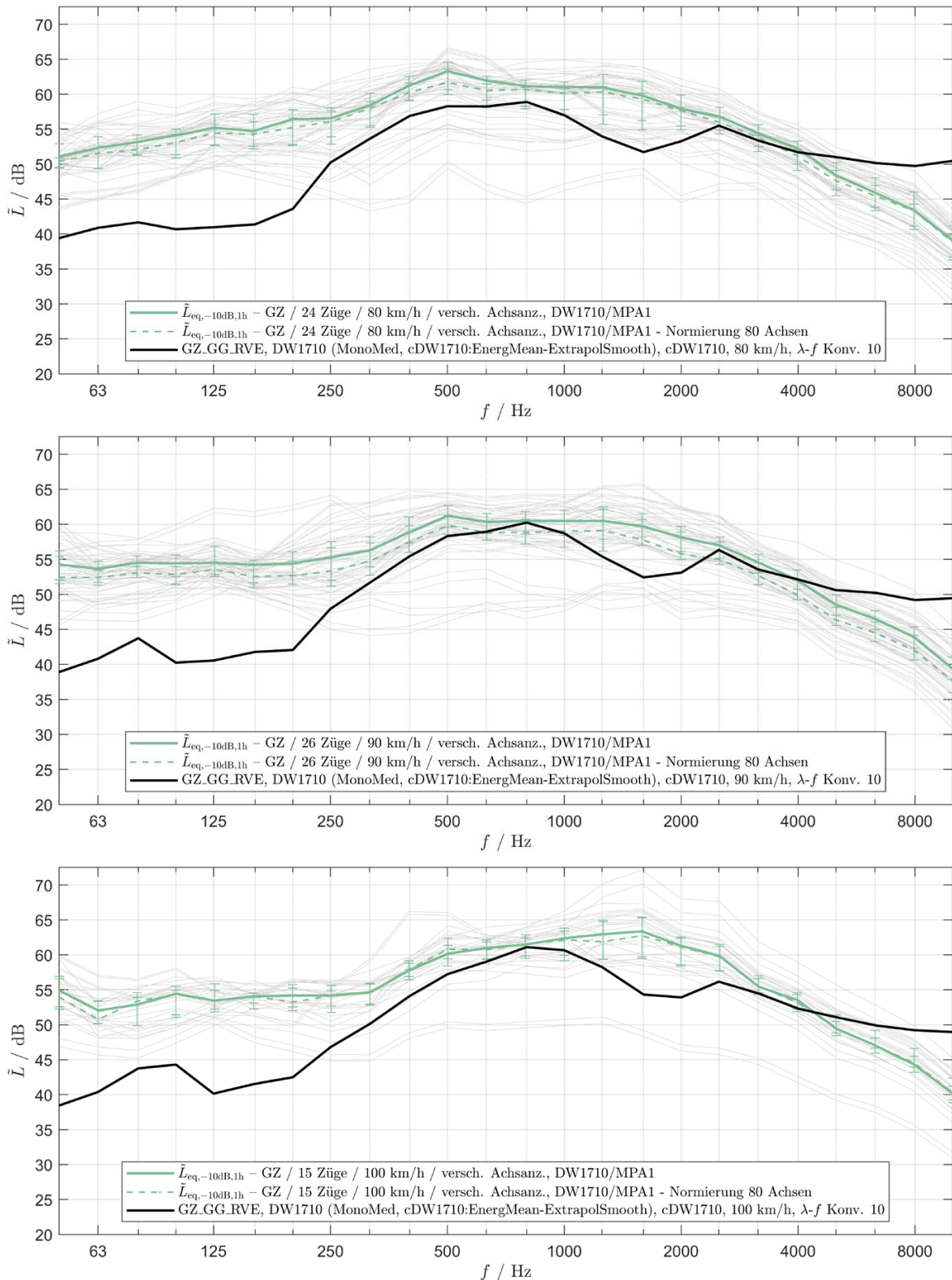


Abb. 7-20: Vergleich von Güterzugvorbeifahrten in DW1710 bei 80 km/h (oben), 90 km/h (Mitte) und 100 km/h (unten)

7.3. Auswertung für Fernreisezüge Typ Railjet

7.3.1. Vergleich mit RVE 04.01.02

Ein direkter Vergleich zwischen den berechneten Werten mit den Eingangsparametern nach RVE 04.01.02 und Messwerten erfolgt anhand von Oktavbandpegeln, da diese Basis für deren Ermittlung ausgehend von den Oktavbandpegeln der ONR 305011 waren. In Abb. 7-21 zeigt sich die gute Übereinstimmung zwischen den nach ONR und RVE berechneten Werten im Frequenzbereich von 500 Hz bis 2000 Hz, der auch in einer bekannten guten Übereinstimmung der A-bewerteten Gesamtpegel resultiert [26]. Der Vergleich zu den tatsächlich gemessenen Werten zeigt in diesem Fall bis auf die Frequenzbänder kleiner 500 Hz eine doch deutliche Überschätzung bei Anwendung der

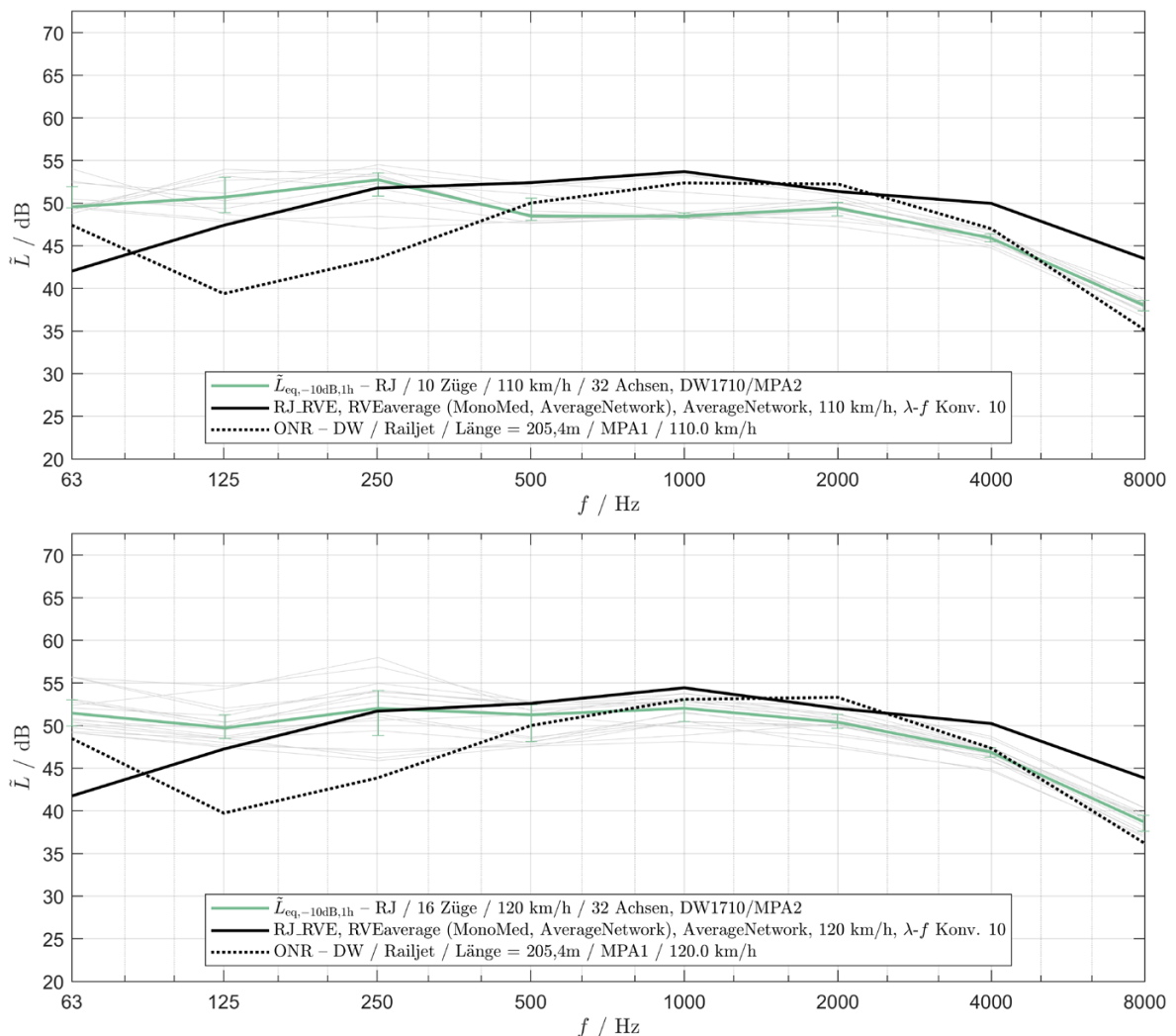


Abb. 7-21: Vergleich der Oktavbandpegel für Vorbeifahrten von Railjets der 110 km/h (oben) und der 120 km/h (unten) Geschwindigkeitsklasse. Neben den gemessenen Werten sind die nach RVE 04.01.02 (durchgezogen) und nach ONR 305011 (punktiert) berechneten Werte dargestellt.

Berechnung. Diese ist, wie in Kap. 7.3.4 noch gezeigt wird, vor allem auf die Verwendung einer durchschnittlichen Schienenrauheit zurückzuführen, während bei der Messserie in Deutsch-Wagram (DW1710) ein davon abweichendes Rauheitsspektrum vorliegt.

7.3.2. Vergleich mit deutschen Berechnungsmethode (BUB)

Wie bereits in Abschnitt 7.2.2 erläutert liegen mit der BUB-D alternative Eingangsparameter vor. Konkret bedeutet dies für Railjets

- $L_{r,veh,i}$ für die Radrauheit
Entspricht den Daten der Richtlinie 2015/996/EU und damit der RVE 04.01.02 für Personenwagen und Triebwagen mit Scheibenbremsen.
- $L_{r,tr,i}$ für die Schienenrauheit
Entspricht den Daten der Richtlinie 2015/996/EU und damit der RVE 04.01.02 für den durchschnittlichen Schienenzustand. Zusätzlich sind nur Schienenrauheiten für das besonders überwachte Gleis (BüG) ergänzt worden.
- $A_{3,i}$ für den Kontaktfilter
Kontaktfilter für eine Radlast von 75 kN und Raddurchmesser von 860 mm wurde für Reisezugwagen ergänzt. Zusätzlich wurde eine Kategorie mit Radlast 80 kN und 860 mm Raddurchmesser für Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge eingeführt. Für „Elektroloks“ ist ein Kontaktfilter von 100 kN und 1250 mm Raddurchmesser vorgesehen. Dieser Kontaktfilter zeigt deutlich „extrapolierte“ Werte die sich bei 0,8 mm Wellenlänge um bis zu etwa 2 dB von den RVE Werten für 100 kN und 920 mm Raddurchmesser unterscheiden. Im für 100 km/h und 1000 Hz relevanten Bereich von etwa 25 mm Wellenlänge variiert der Kontaktfilter von -5,8 dB nach RVE zu -7,2 dB nach BUB-D.
- $L_{H,tr,f}$ für die Schienentransferfunktion
Für Betonschwellen im Schotterbett und für Holzschwellen im Schotterbett liegen idente Terzbandpegel vor, wie jene für Monoblockschwellen auf mittlerer Zwischenlage nach der Richtlinie 2015/996/EU, welche auch nach RVE vorgesehen sind.
- $L_{H,veh,f}$ für die Fahrzeugtransferfunktion
Für Reisezugwagen, als auch Hochgeschwindigkeitswagen wird ein Rad mit einem Durchmesser von 860 mm vorgesehen. Die Werte dafür scheinen eine lineare Interpolation zwischen den Werten nach RVE und Richtlinie 2015/996/EU für 920 mm und 840 mm Raddurchmesser zu sein. Für eine Kategorie „Elektrolok“ wird als

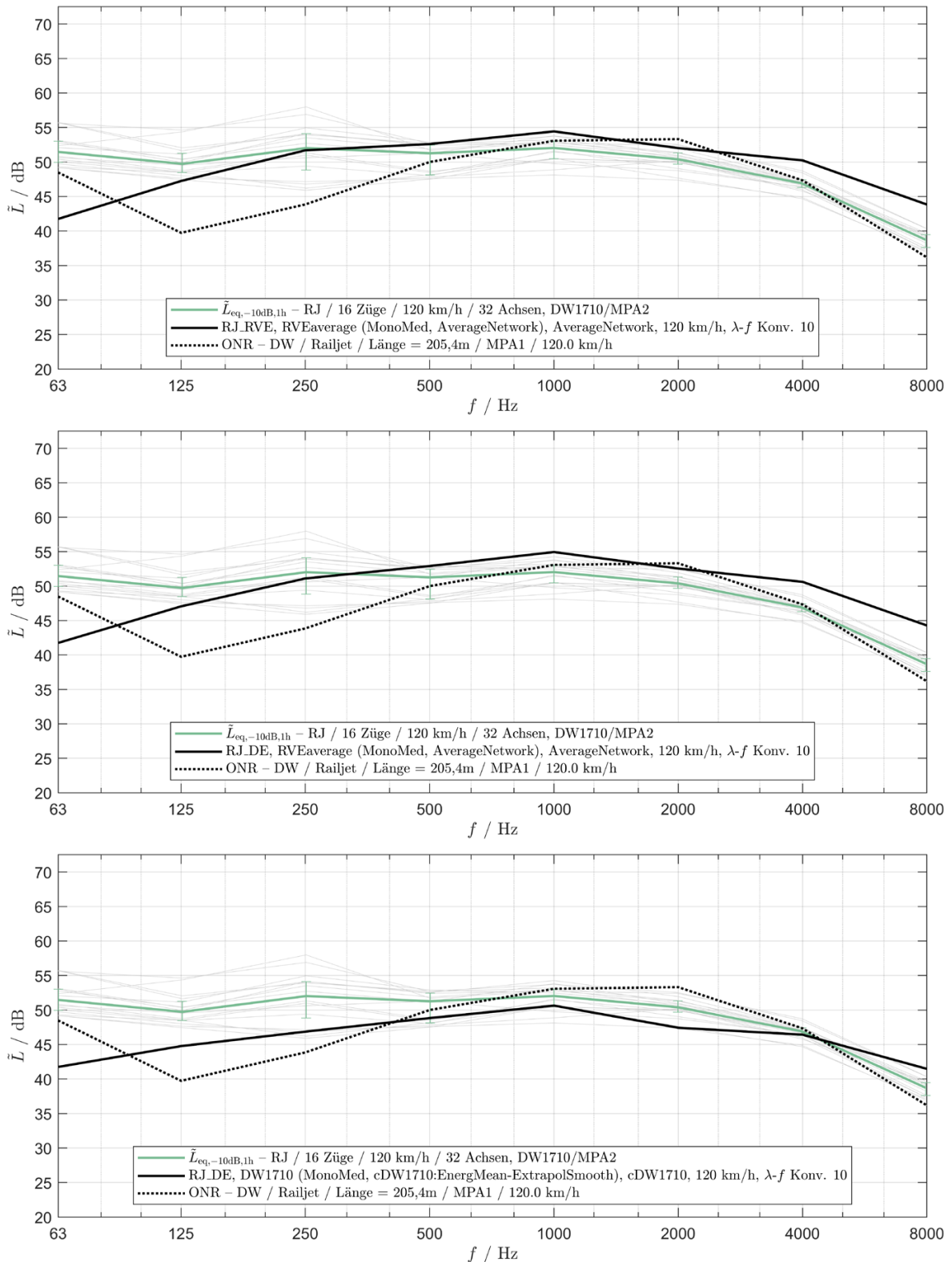


Abb. 7-22: Vergleich der Berechnungen nach RVE 04.01.02 (oben) mit der deutschen Umsetzung von Richtlinie 2015/996 (Mitte) für Railjets mit 120 km/h und dem durchschnittlichen Netz nach Richtlinie. Für den Vergleich mit den Messwerten in Deutsch-Wagram (DW1710) wurde zusätzlich die durchschnittliche Schienenrauheit mit der tatsächlichen ersetzt (unten).

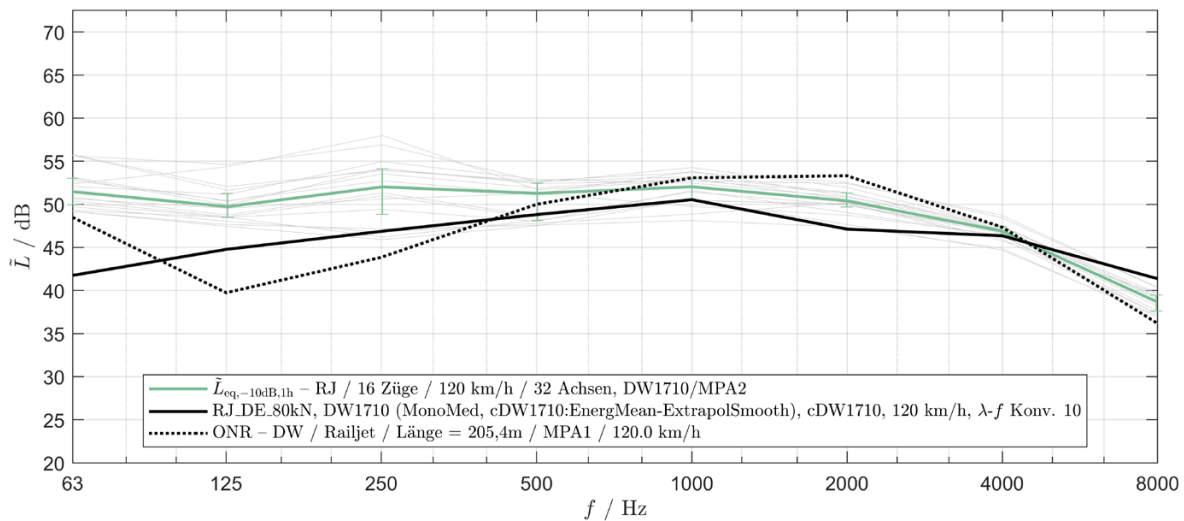


Abb. 7-23: Darstellung ident zu Abb. 7-22 (unten), wobei für den Kontaktfilter jener für 80 kN (Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge) verwendet wurde

Durchmesser 1250 mm angegeben, wobei sich die Fahrzeugtransferfunktion nur um 0,2 dB von jener für Raddurchmesser von 1200 mm der europäischen Richtlinie als auch der RVE unterscheidet.

Die in Abb. 7-22 dargestellten Auswirkungen bei Verwendung der BUB-D Werte zeigen insgesamt eine Erhöhung der Pegel. Die Erhöhungen aufgrund der Kontaktfilter- und Transferfunktionswahl für kleinere Räder und niedrigere Radlasten ist dafür direkt ausschlaggebend. Die niedrigeren Werte, die für größere Raddurchmesser von 1250 mm bei Triebfahrzeugen resultieren müssten, können dieses Ergebnis für die Gesamtvorbeifahrtspegel nicht mehr verändern. Die berechneten Werte liegen jedenfalls von 500 Hz aufwärts durchgehende über den gemessenen Werten. Im vorliegenden Fall der DW1710 Messungen lagen aber weit bessere Schienenrauheitswerte vor. Inkludiert man dies in die Berechnungen ergibt sich ein Absinken der Werte, sodass selbst die Eingangswerte nach BUB-D für den aus Wagen und Triebfahrzeug zusammengesetzten Railjet Berechnungswerte unterhalb der 50 % Perzentile ergeben.

Die deutsche Richtlinie bietet zusätzlich Kontaktfilter für eine Radlast von 80 kN, welche für Hochgeschwindigkeitsfahrzeuge vorgesehen sind. Abb. 7-23 zeigt, dass die Verwendung dieser Alternative für den untersuchten Geschwindigkeitsbereich nur geringste Unterschiede zu einer Radlast von 75 kN aufweist.

7.3.3. Vergleich mit niederländischen Berechnungsmethode

Abb. 7-24 zeigt die Berechnungsergebnisse von Railjetvorbeifahrten mit 120 km/h bei Anwendung der Standardwerte nach RVE und nach ONR 305011 im Vergleich zu den

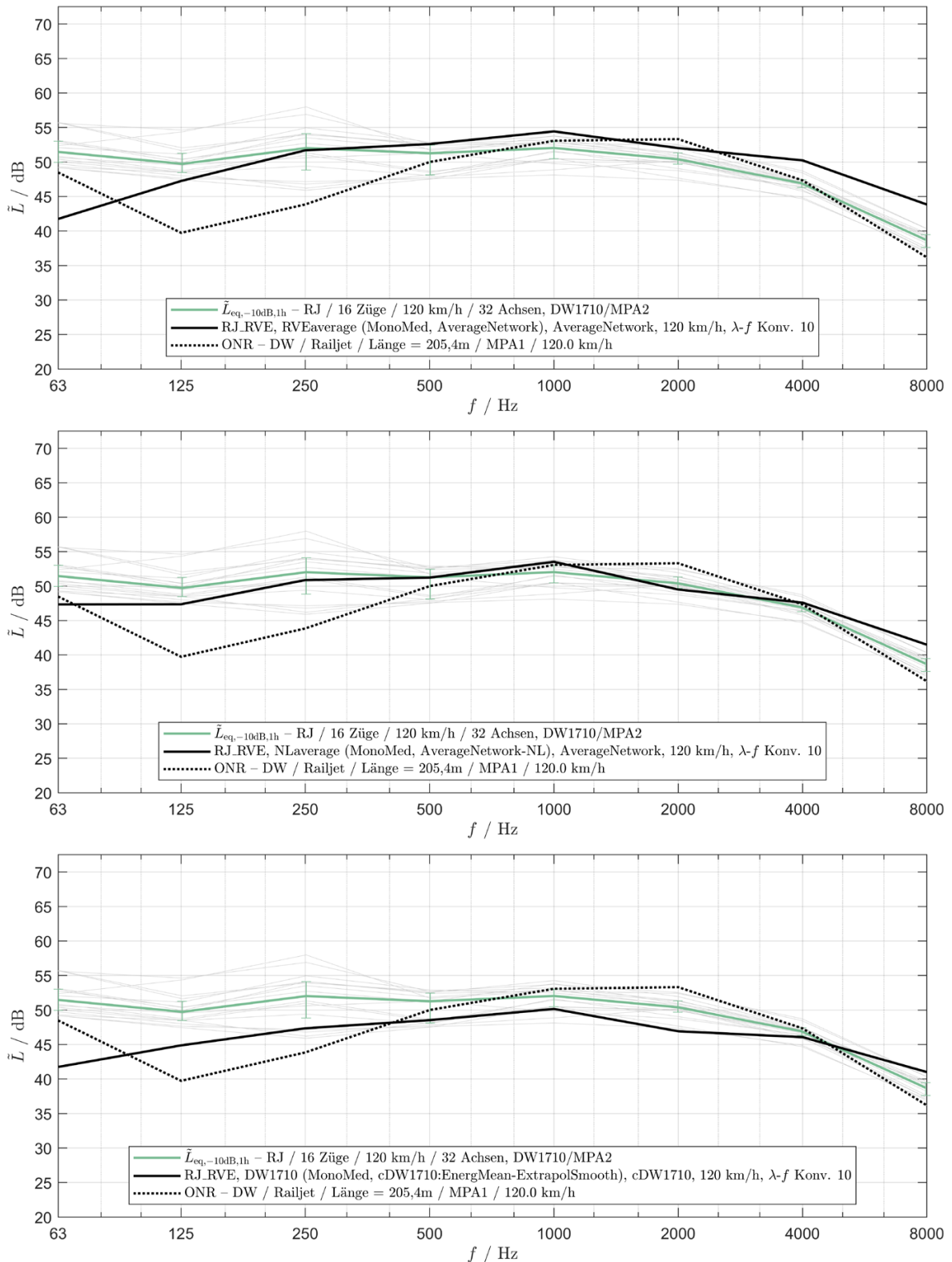


Abb. 7-24: Vergleich der Berechnungen nach RVE 04.01.02 (oben) mit der niederländischen Umsetzung von Richtlinie 2015/996/EU (Mitte) für Railjet Vorbeifahrten mit 120 km/h und dem durchschnittlichen Netz nach der jeweiligen Richtlinie. Für den Vergleich mit den Messwerten in Deutsch-Wagram (DW1710) wurde zusätzlich die durchschnittliche Schienenrauheit mit der tatsächlichen ersetzt (unten).

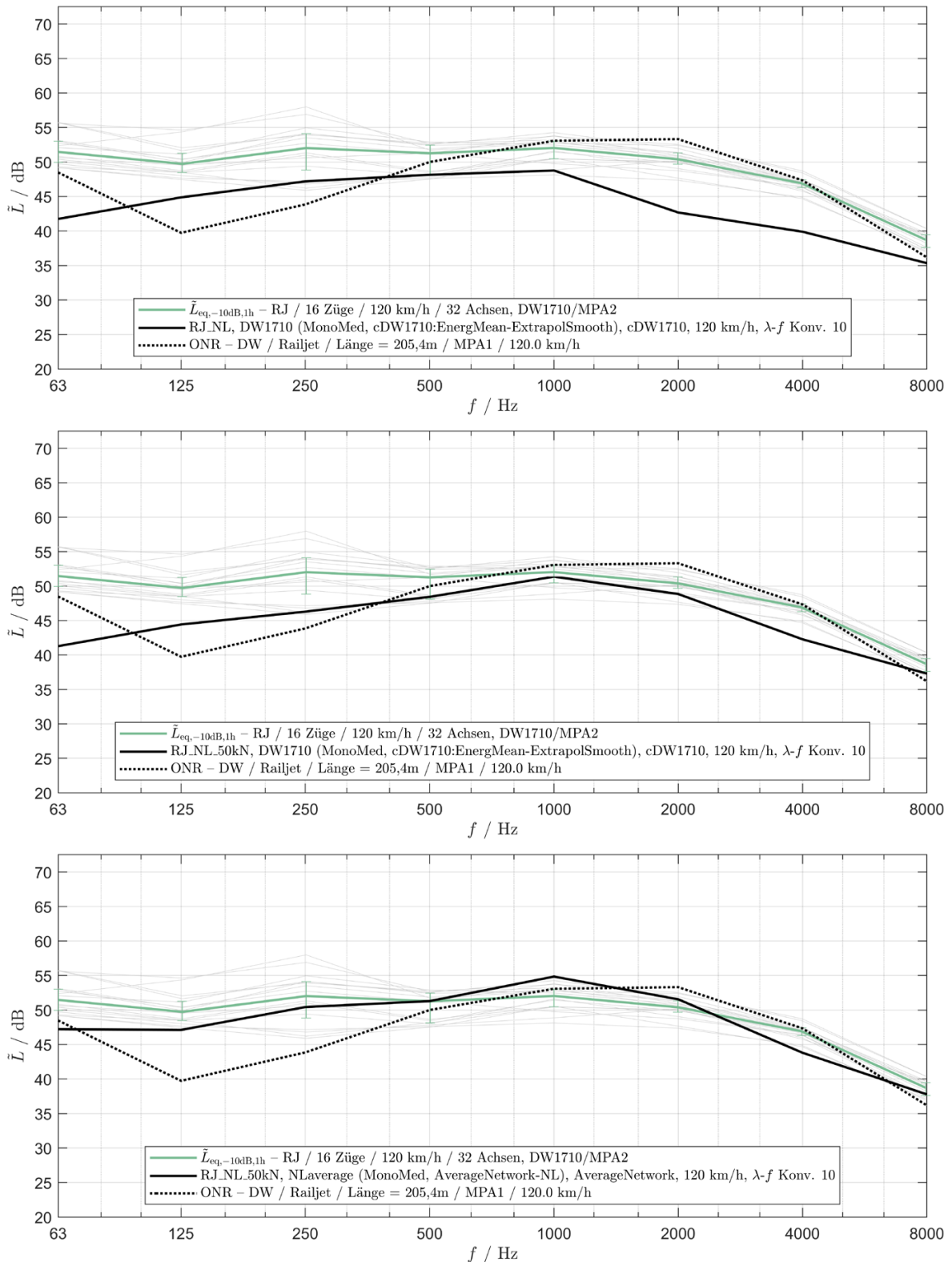


Abb. 7-25: Pegelwerte bei Verwendung des niederländischen Vorschlags für Kontaktfilter von 100 kN (oben) und 50 kN (Mitte). Zur Vollständigkeit erfolgt auch die Gegenüberstellung der Pegelwerte bei Schienenrauheiten nach dem niederländischen Durchschnitt (unten).

gemessenen Werten für die Serie Deutsch-Wagram (DW1710). Zu erkennen ist die bereits bekannte gute Übereinstimmung von ONR mit RVE Werten für den relevanten Bereich von 1000 Hz und 2000 Hz, welche in weiterer Folge die besonders gute Übereinstimmung im A-bewerteten Gesamtpegel ergibt. Die Verwendung des korrigierten niederländischen Schienenrauheitsspektrums führt zu den erwarteten Veränderungen mit einem Absinken der Werte (vgl. Abb. 7-24, Mitte). Setzt man tatsächlich vor Ort gemessene Rauheitswerte ein, so liegt das Spektrum bereits deutlich unter den gemessenen Werten (vgl. Abb. 7-24, unten). Variiert man, wie in Abb. 7-25 (oben) ersichtlich, nun noch den Kontaktfilter nach den vorgeschlagenen, neuen niederländischen Werten sinken die Pegel weiter ab, insbesondere für die höherfrequenten Oktavbänder. Eine Absenkung der Radlasten auf 50 kN statt 100 kN kann diesen Effekt teils kompensieren und zeigt in Abb. 7-25 (Mitte) eine bessere Übereinstimmung mit den Messwerten. Die Rechnung liegt dennoch weiterhin durchgehend unter den Messwerten. Hier wäre nun eine Anpassung der Radrauheiten notwendig, um Messung und Berechnung in Deckung zu bringen. Abb. 7-25 (unten) zeigt zur Vollständigkeit die Situation, wenn die letzte gewählte Einstellung für die Fahrzeugdaten mit den neuen, niederländischen durchschnittlichen Schienenrauheiten kombiniert wird.

7.3.4. Verwendung der gemessenen Schienenrauheiten

Abb. 7-26 zeigt den Einfluss der Schienenrauheit auf die berechneten Vorbeifahrtspegel für die Messungen in Deutsch-Wagram (DW1710) bei 120 km/h. Im Gegensatz zu den Güterzügen zeigt sich bei den Vorbeifahrten der scheibengebremsten Railjets eine deutliche Absenkung des Spektrums bereits ab etwa 250 Hz (siehe Abb. 7-26, Mitte). Der Bereich darunter ist auch wesentlich von der Wahl des Extrapolationsverfahrens für lange Wellenlängen beeinflusst wie in Abb. 7-26 (unten) zu sehen. So führt die Verwendung einer an die Randpegel des Rauheitsspektrums angepassten Grenzkurve statt Verwendung der unverschobenen Grenzkurve nach ÖNORM EN ISO 3095 (vgl. Kap. 6.2) zu einem weiteren deutlichen Absinken. Insgesamt liegen die berechneten Werte bei Verwendung der tatsächlichen Schienenrauheiten zu niedrig und müssten durch adäquate Wahl von Fahrzeugparametern ausgeglichen werden. Allerdings führt selbst die Wahl der interpolierten Werte nach BUB-D oder den niederländischen Kontaktfiltern zu keiner befriedigenden Übereinstimmung. Insgesamt könnte eine Interpolation zwischen den Radlasten von 100 kN und 50 kN nach der niederländischen Methode für neue Kontaktfilter einen Lösungsansatz darstellen.

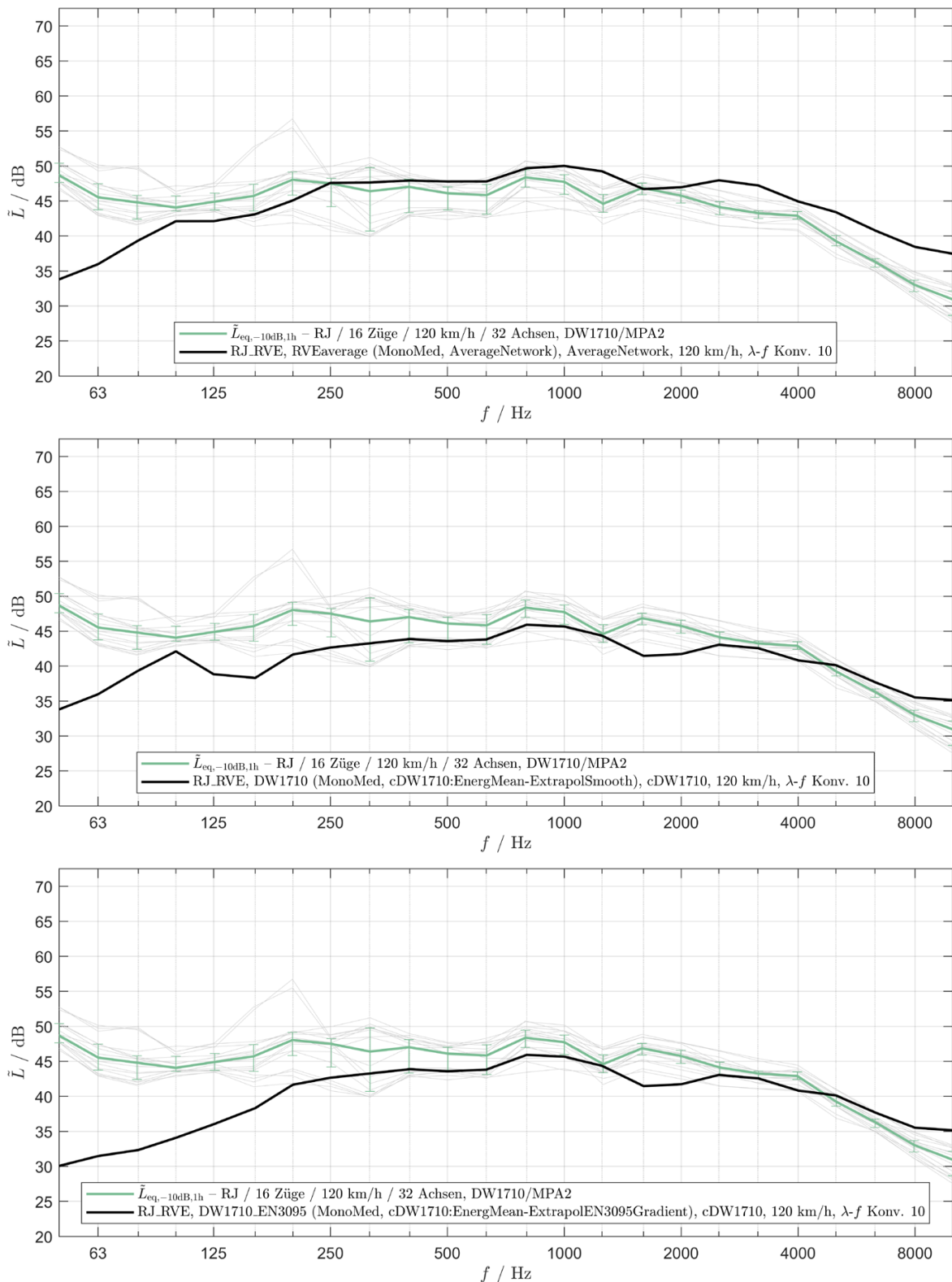


Abb. 7-26: Berechnete Pegelwerte von Railjetvorbeifahrten mit 120 km/h für die Schienenrauheit nach RVE Durchschnittswert 04.01.02 (oben), der tatsächlich bestimmten Rauheit (Mitte) und jener mit nach ÖNORM EN ISO 3095 extrapolierten Werten im untersten und obersten Wellenlängenbereich

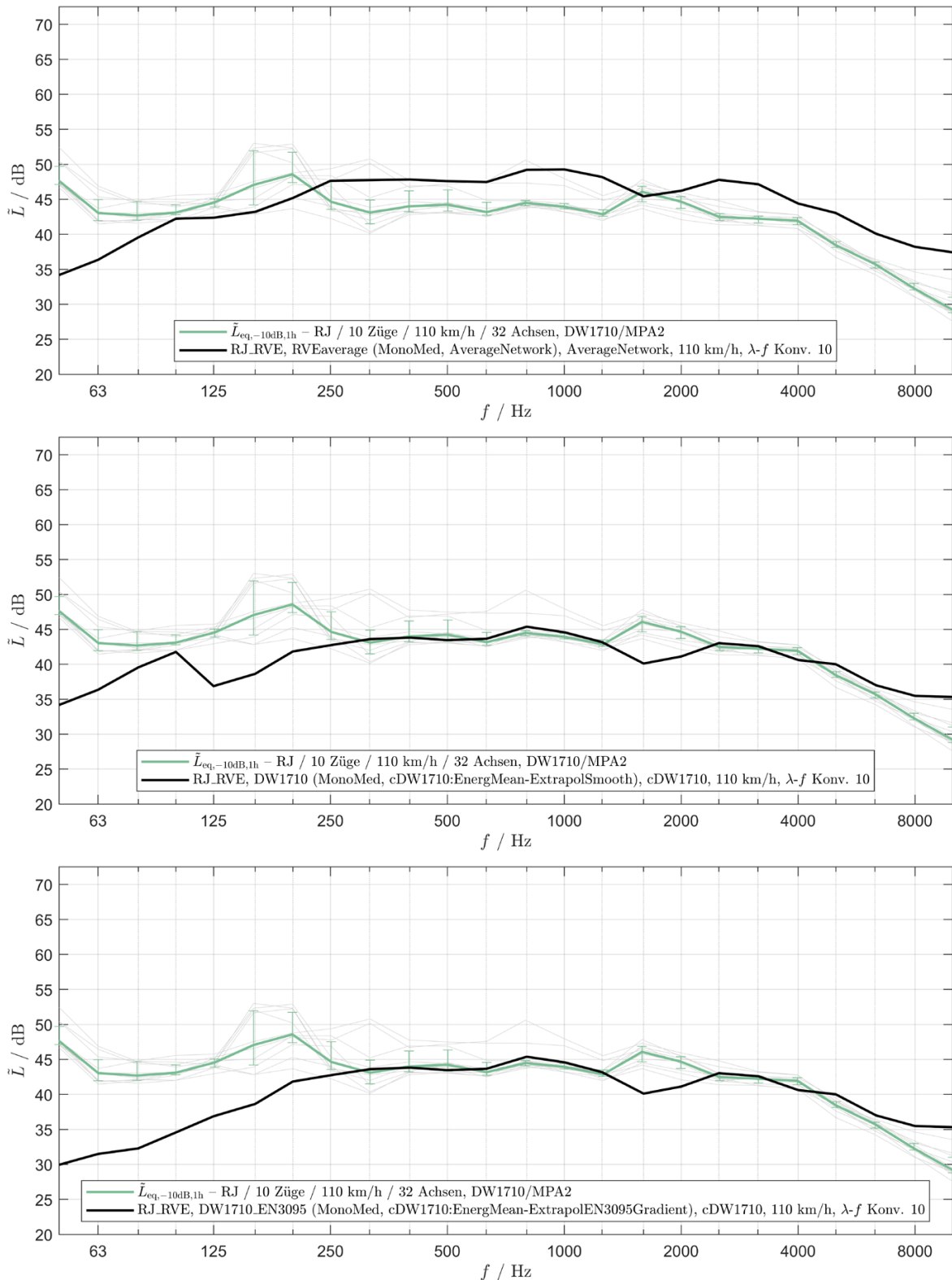


Abb. 7-27: Berechnete Pegelwerte von Railjetvorbeifahrten mit 110 km/h für die Schienenrauheit nach RVE Durchschnittswert 04.01.02 (oben), der tatsächlich bestimmten Rauheit (Mitte) und jener mit nach ÖNORM EN ISO 3095 extrapolierten Werten im untersten und obersten Wellenlängenbereich

Abb. 7-27 zeigt wie die Verwendung der gemessenen Schienenrauheit in DW1710 zum identen Sinken der berechneten Werte für die Geschwindigkeitsklasse 110 km/h führt. Im Bereich ab 250 Hz liegt eine sehr gute Übereinstimmung der Pegelwerte vor.

7.3.5. Variation und Adaption der Schienentransferfunktion

In Analogie zu Kap. 7.2.5 wird in Abb. 7-28 und Abb. 7-29 dargestellt, dass die Wahl der nach RVE 04.02.11 normierten weichen anstelle von mittleren Zwischenlagen für die Schienentransferfunktion zu einem Ansteigen der Pegel auch für Railjetvorbeifahrten führt.

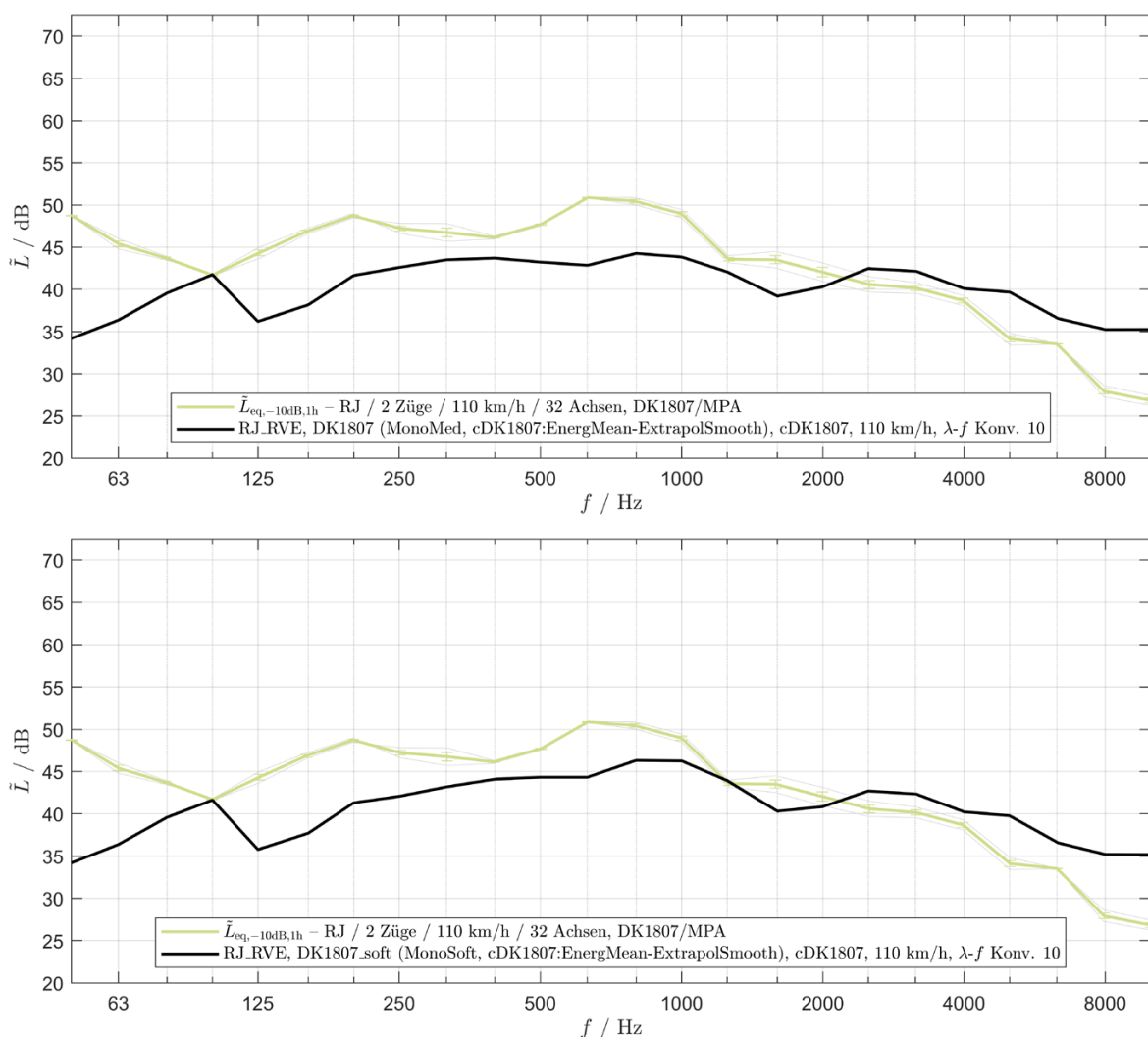


Abb. 7-28: Einfluss der Schienentransferfunktion am Beispiel von Railjetvorbeifahrten mit 110 km/h in Dürnkrot (DK1807) mit mittleren (oben) und weichen (unten) Zwischenlagenwerten

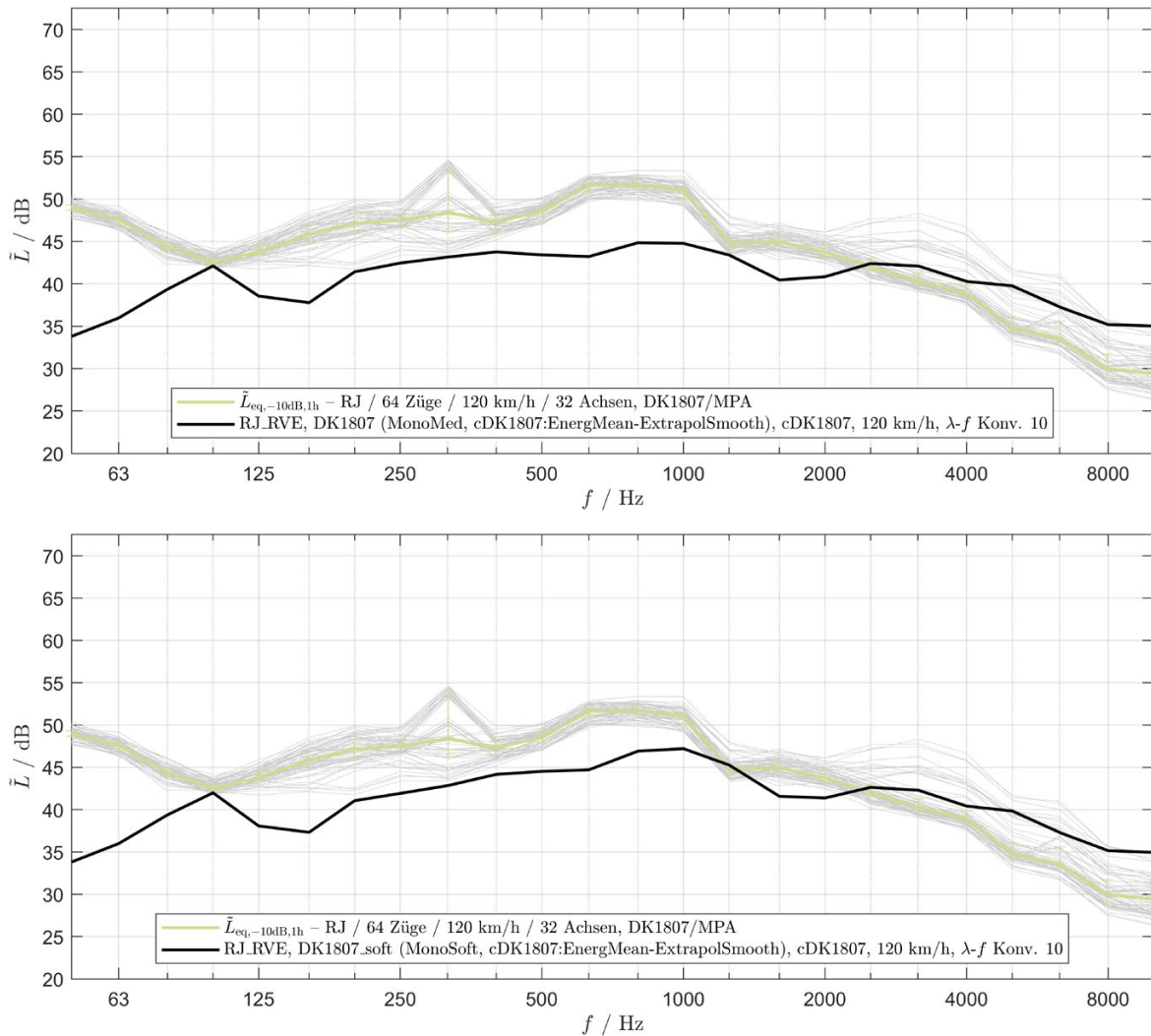


Abb. 7-29: Einfluss der Schienentransferfunktion am Beispiel von Railjetvorbeifahrten mit 120 km/h in Dürnkrot (DK1807) mit mittleren (oben) und weichen (unten) Zwischenlagenwerten

Eine weitere Anpassung ist durch Verwendung einer modifizierten Schienentransferfunktion möglich, welche entsprechend der Differenzen der vertikalen TDR in DK1807 und DW1807 angepasst wurde (siehe Abschnitt 6.4). Abb. 7-30 zeigt dazu die bereits bei Güterzügen demonstrierte Anhebung der berechneten Werte aufgrund der höheren Pegel für die Schienentransferfunktion. Im Bereich von etwa 1000 Hz bis 2000 Hz führt die Anpassung jedoch zu einer Überschätzung gegenüber den gemessenen Werten.

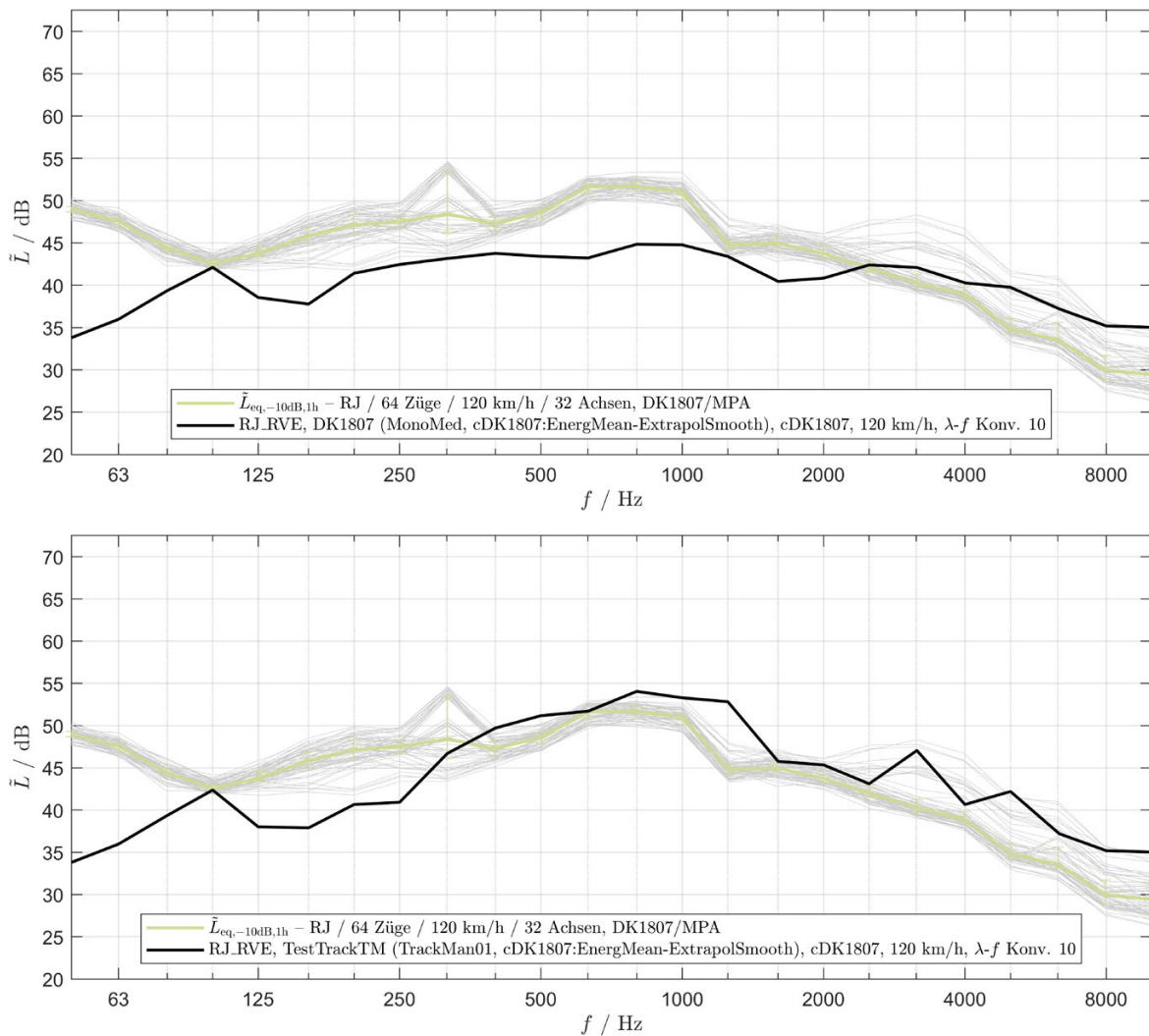


Abb. 7-30: Illustration der Auswirkungen der standardmäßigen Schienentransferfunktion (oben) gegenüber einer entsprechend der vertikalen TDR korrigierten Schienentransferfunktion (unten)

7.3.6. Variation und Adaption der Radrauheit

In Abschnitt 7.2.6 wurde bereits die offensichtliche Problematik mit den in der Richtlinie 2015/996/EU in den unteren und oberen Wellenlängenbereich extrapolierten Eingangsdaten erläutert. Abb. 7-31 zeigt die bereits für Güterzüge durchgeführte Demonstration entsprechend für Railjetvorbeifahrten. Die dabei, in Abb. 7-32 dargestellte Anpassung des Radrauheitsspektrums, wurde im Gegensatz zu den Güterzügen nur limitiert durchgeführt. Damit lassen sich bereits deutlich bessere Übereinstimmung im unteren Bereich bei ~125 Hz erreichen.

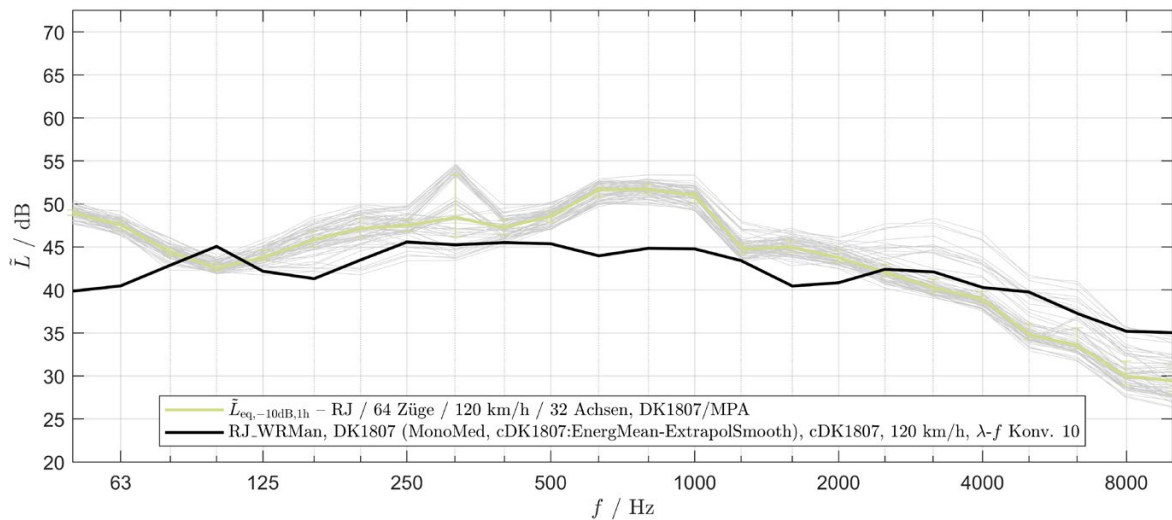
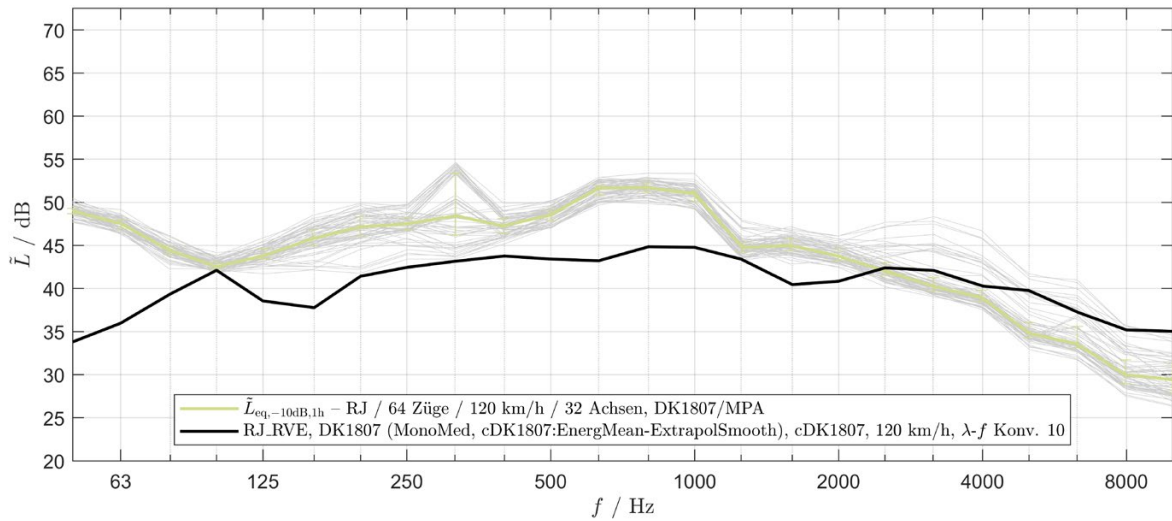


Abb. 7-31: Gegenüberstellung der Spektren mit der standardisierten Radrauheit bei Scheibenbremsen und einer veränderten Radrauheit im Vergleich zu tatsächlich gemessenen Pegelwerten

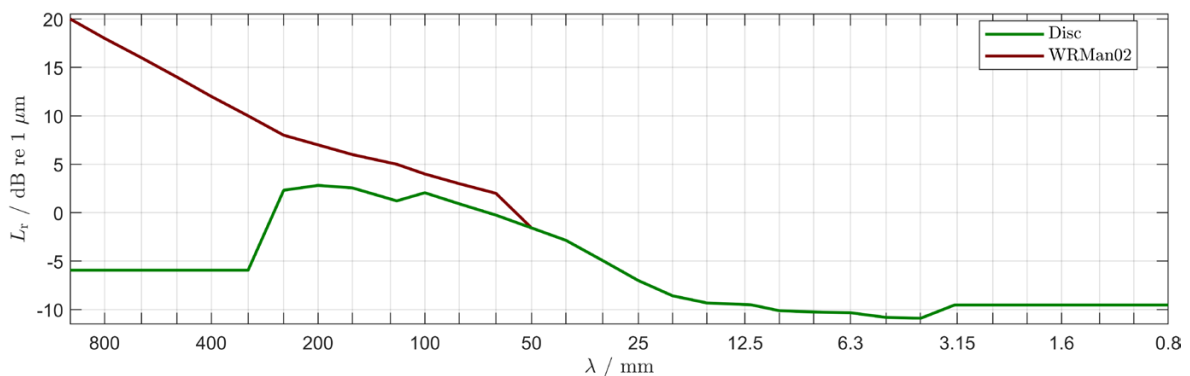


Abb. 7-32: Darstellung der standardisierten Radrauheit bei Scheibenbremsen und einem zu Demonstrationszwecken stark veränderten Spektrum (WRMan02)

7.3.7. Variation des Kontaktfilters

Gemäß den Fahrzeugdaten (Abschnitt 2) liegen die mittlere Achslasten der Railjet-Reisezugwagen (ohne Lok) bei 11,786 t (leer) bzw. 14,395 t (vollbeladen mit 75 kg/Person). Damit ergeben Radlasten von 57,8 kN (leer) bis 70,6 kN (beladen). Tauscht man, bei ansonsten gleichbleibenden Parametern die Kontaktfilter für die Reisezugwagen von 100 kN auf 50 kN aus, so ergeben sich die in Abb. 7-33 dargestellten Veränderungen. Im Bereich ab 500 Hz ist dafür ein Ansteigen der Pegel zu beobachten. Bei 1000 Hz liegt dieses mit 0,8 dB deutlich vor.

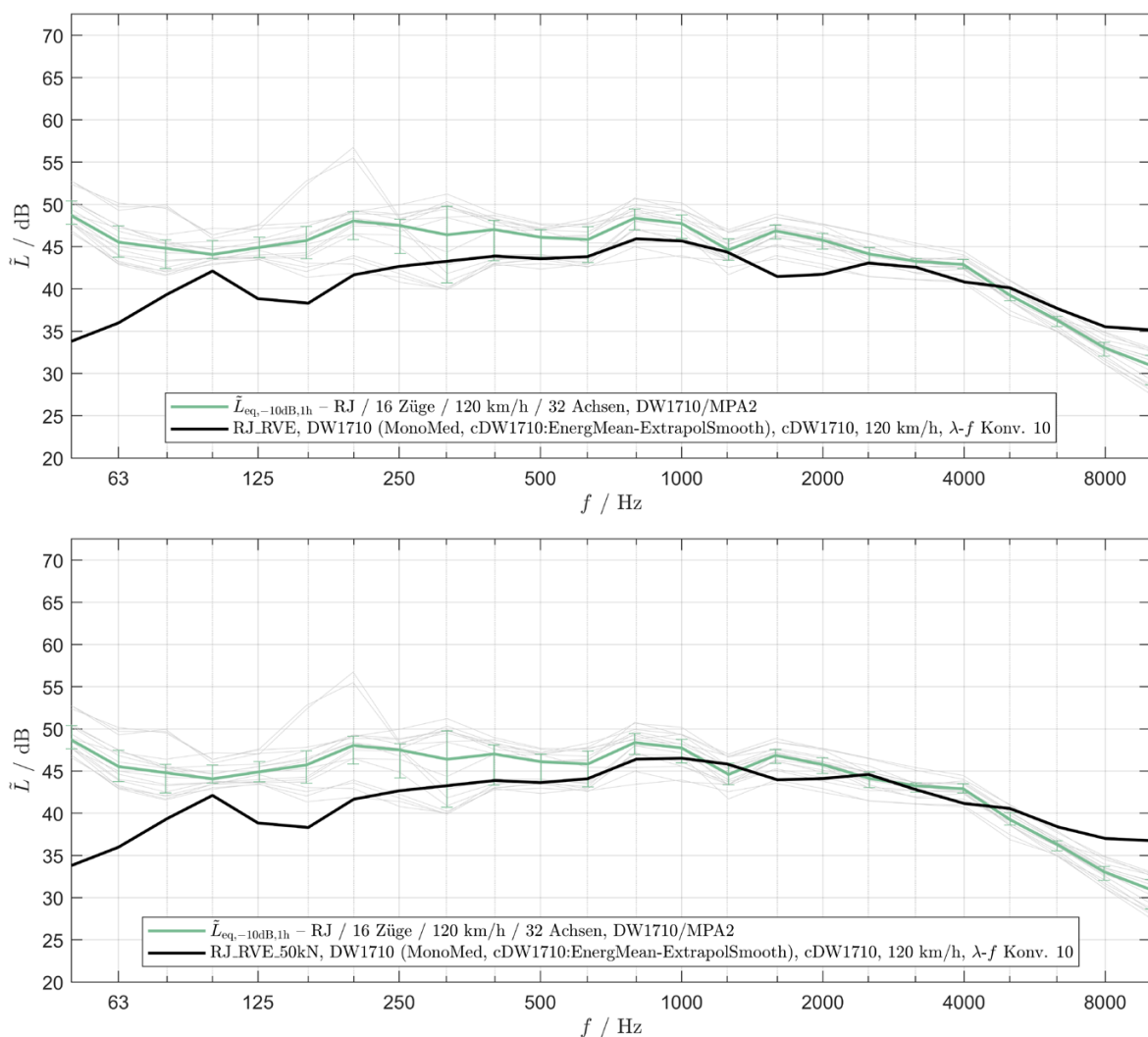


Abb. 7-33: Gegenüberstellung der Spektren bei Senkung der Radlasten für den Kontaktfilter von 100 kN (oben) auf 50 kN (unten) und Vergleich mit Messwerten aus Deutsch-Wagram (DW1710) für Railjets bei 120 km/h

7.3.8. Einfluss der Traktionsgeräusche

Die Richtlinie 2015/996/EU hat nach einem langwierigen Diskussionsprozess nur Traktionsgeräusch für wenige ausgewählte Antriebstypen und ausschließlich für den Betriebszustand „konstante Geschwindigkeit“ angegeben. Dieser Betriebszustand wurde für alle bisherigen Vergleiche von berechneten und gemessenen Pegeln verwendet. Im Rahmen des CNOSSOS-EU Projektes wurden zusätzlich Werte für beschleunigte Fahrten sowie verzögerte Fahrten (bzw. Leerlauf) veröffentlicht. Abb. 7-34 zeigt eine Gegenüberstellung zu diesen beiden zusätzlichen Traktionszuständen. Die Schalleistungspegel für die beschleunigte Fahrt des Triebfahrzeuges sind in den Terzbändern 63 Hz, 200 Hz, 400 Hz und 1000 Hz im Vergleich zur konstanten Fahrt um 4 dB erhöht – dies sowohl für die Quelle A in 0,5 m als auch für die Quelle B in 4 m Höhe über SOK. Die Auswirkungen dieser Erhöhungen sind in den entsprechenden Terzbändern ersichtlich. Die 200 Hz und 400 Hz Erhöhungen sind beim Vergleich mit den gemessenen Werten als Tendenz erkennbar. Zur Vollständigkeit wird auch die Situation mit verzögerter Fahrt gezeigt. Diese Schalleistungspegel des Triebfahrzeuges sind durchgehend 9 dB niedriger als jene für konstante Fahrt, ausgenommen die Terzbändern 63 Hz, 200 Hz, 400 Hz und 1000 Hz mit 6 dB Verminderung. Das Resultat zeigt ein Absinken der berechneten Werte im Vergleich zu den gemessenen Werten der Zugvorbeifahrt. Dieses wirkt sich besonders in Terzbändern aus, in welchen das Antriebsgeräusch einen bedeutenden Beitrag liefert. Dazu ist das 200 Hz Terzband auffällig, da die 6 dB Verminderung der Antriebsschalleistung in einem Abfall des Gesamtpegels von ~2 dB resultiert.

Der Einfluss auf den A-bewerteten Gesamtpegel bleibt im durchgeführten Vergleich sehr gering. So bewirkt die Verwendung der Schalleistung für beschleunigte Fahrt weniger als 0,1 dB Gesamterhöhung.

Dazu muss aber angemerkt werden, dass die Ersatzschallquelle B in 4 m Höhe den wesentlichen Teil des Antriebsgeräusches beinhaltet und daher im Falle von Abschirmungen entlang der Bahntrasse ein weitaus höherer Einfluss des Traktionsgeräusches auftreten wird.

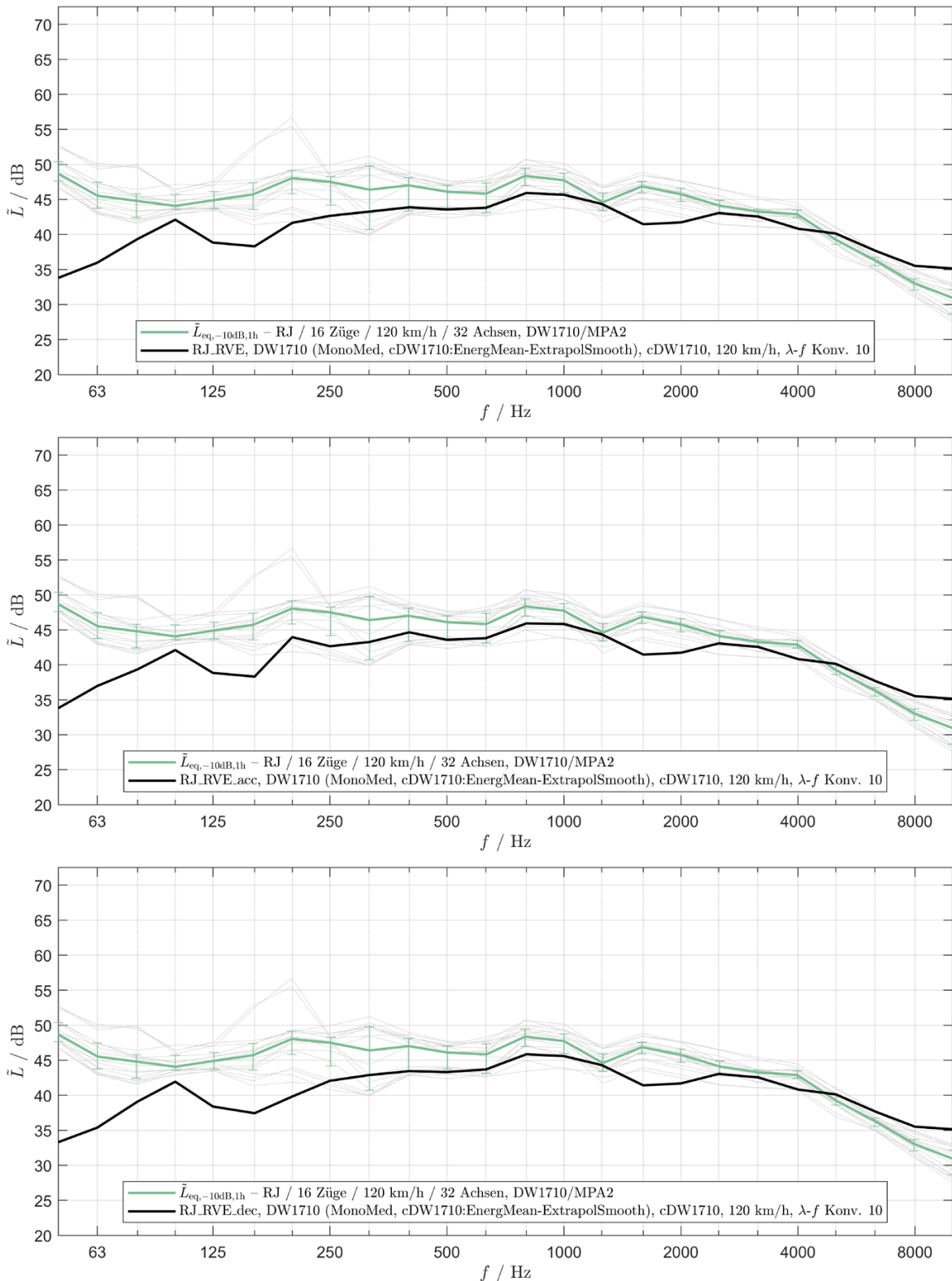


Abb. 7-34: Vergleich von Railjetvorbeifahrten für konstante Fahrt (oben), beschleunigte Fahrt (Mitte) und verzögerte Fahrt bzw. Leerlauf (unten) nach Daten des CNOSSOS-EU Projektes

8. SCHLUSSBETRACHTUNGEN

Nach der eingehenden Analyse von Einflussfaktoren in den Kapiteln 6 und 7 werden im Folgenden die Erkenntnisse strukturiert nach Themen aufgearbeitet. Dabei werden zunächst die übergeordnete Aufgabenstellung und der gewählte Ansatz der Bestimmung von Eingangsparametern zusammengefasst dargestellt und inhaltlich abgegrenzt. Im Anschluss werden die verschiedenen Themen jeweils separat behandelt: nach einer Darlegung der jeweiligen Fragestellung wird bei bestehendem Abstimmungsbedarf in internationalen Regelwerken dieser aufgezeigt bzw. werden konkrete Vorschläge hierfür unterbreitet. Des Weiteren werden Empfehlungen für die zukünftige Handhabung bei einer messtechnischen Parameterbestimmung für das Prognosemodell gemäß der RVE 04.01.02 gegeben. Diese themenbezogenen Schlussbetrachtungen stellen gemeinsam mit dem letzten Unterkapitel „Lessons Learned“ den Status quo der Erkenntnisse des vorliegenden Forschungsprojekts dar und bilden gleichzeitig die Grundlage für Abstimmungen in internationalen Normenarbeiten und für etwaige, weiterführende Forschungsaktivitäten.

8.1. Gegenstand der Bestimmung

Grundsätzlich kann die Lärmprognoserechnung inhaltlich grob in zwei Teilaufgaben gegliedert werden. In einem ersten Schritt sind für die jeweils betrachteten Fahrzeuge, für die jeweils betrachteten Streckenabschnitte und für die jeweils betrachteten Rahmenbedingungen die Emissionsstärken zu bestimmen. Basierend auf diesen Quellstärken ist in einem zweiten Schritt auf die Schallimmission in dem jeweils betrachteten Ort mittels Ausbreitungsrechnung zu schließen. Die Schallimmission wird dabei entsprechend der Richtlinie 2002/49/EG durch Lärmindizes ausgedrückt, welche auf A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel basieren und die sich auf ein für die Lärmemission ausschlaggebendes und hinsichtlich der Witterungsbedingungen durchschnittliches Jahr beziehen.

Die im ersten Schritt verwendeten Schallemissionen für Schienenverkehrslärm sind jedoch fest an ein schalltechnisches Ersatzmodell gebunden, welches die gesamten Emissionen durch zwei Linienquellen in unterschiedlichen Höhen über der Gleisachse annähert. Zur Prognose der Quellstärken für ein bestimmtes Fahrzeug und einen bestimmten Streckenabschnitt müssen entsprechende fahrzeug- und streckenspezifische Eingangsparameter des Modells bekannt sein. Zwar werden in der Europäischen Richtlinie 2015/996/EU bzw. in der nationalen Umsetzung, der RVE 04.01.02, bereits

Standardwerte vorgeben, jedoch besteht Bedarf diese Parameter für österreichische Gegebenheiten (Fahrzeuge, Oberbaueigenschaften, etc.) zu verifizieren und gegebenenfalls zu ergänzen. Dazu wird die Parameterermittlung auch für Fahrzeuge, deren Eigenschaften entweder nicht durch die Standardwerte ausreichend abgedeckt sind, oder für zukünftige, neu- oder weiterentwickelte Fahrzeuge erforderlich sein.

ELSEC beschäftigt sich daher eingehend mit der Fragestellung der Parameterbestimmung für das Prognosemodell entsprechend der Richtlinie 2015/996/EU bzw. der nationalen Umsetzung in der RVE 04.01.02 und der ÖAL 28 (insbesondere der fahrzeugbezogenen Parameter, die für das Roll- und Antriebsgeräusch von Bedeutung sind). Zu unterstreichen ist, dass das Prognosemodell seinerseits zum Ziel hat, für Immissionsorte Lärmindizes zur Bewertung der Schallimmissionen für festgelegte Bedingungen an die Emission als auch an die Schallausbreitung zu bestimmen. So finden sich beispielsweise zeitliche Strukturen der einzelnen Zugsvorbeifahrten in der Prognoserechnung nicht wieder, sondern es werden die Vorbeifahrten in den Ersatzschallquellen ausschließlich anhand mittlerer, auf die Zeit bezogener Schalleistungen charakterisiert. Als Konsequenz etwa muss sich eine messtechnisch basierte Parameterbestimmung von den in der Emissionsbeschreibung von Schienenfahrzeugen gebräuchlichen Größen wie dem Vorbeifahrtspegel lösen und durch eine angepasste Größe ersetzen.

Des Weiteren sind Eingangparameter durch den Bezug zum Modell der Ersatzquellen, welches als inhärente Eigenschaft eines jeden Modells nur eine Näherung realer Verhältnisse darstellt, prinzipiell als theoretische Größen zu verstehen, die reale Verhältnisse zwar näherungsweise quantitativ beschreiben können (und dies – wie nachfolgend erläutert – zum Teil auch sinnvollerweise sollten), dies jedoch für eine korrekte Prognose nicht zwangsweise müssen. Beispielsweise könnten im Modell Rad- und Schienenrauheiten um betragsweise gleiche Werte, jedoch mit unterschiedlichen Vorzeichen beaufschlagt werden und alle abgeleiteten Größen der Prognoserechnung – von den Quellstärken bis hin zu den Lärmindizes – würden davon unbeeinflusst bleiben.

Demgegenüber ist jedoch festzuhalten, dass einige der Eingangparameter, wie Rad- oder Schienenrauheiten, konkrete physikalische und entsprechend bestehender Messnormen ermittelbare Größen darstellen. Als Folge sind daher bei der Bestimmung von fahrzeugseitigen Eingangparameter nur jene dieser (theoretischen) Modellparameter als prinzipiell anpassbar anzusehen, die in der Praxis nicht messtechnisch (in ausreichendem Umfang oder mit ausreichender Genauigkeit) bestimmbar sind.

8.2. Bestimmungsansatz

Derzeit werden in Österreich Immissionen gemäß der ON-Regel 305011 prognostiziert, welche bereits Standardwerte der Emissionen für bestimmte Fahrzeuge enthält. Dabei handelt es sich um geschwindigkeitsabhängige Schalleistungspegel für eine einzelne Ersatzschallquelle. Aufgrund des weitaus detailreicheren Modells der RVE 04.01.02 wird in ELSEC eine iterative Anpassung der Eingangsparameter vorgeschlagen, welche auf einem Vergleich von Mess- und Rechenwerten in einem oder mehreren Messpunkten beruht. Im Detail wird zunächst von naheliegenden Standardwerten der Eingangsparameter für ein Fahrzeug und für den Messabschnitt bzw. die vorherrschenden Messbedingungen ausgegangen, mittels Ausbreitungsmodell auf die mittlere Schallsituation für Zugsvorbeifahrten in den Messpunkten geschlossen und im Fall von signifikanten Unterschieden Eingangsparameter angepasst. Als die hierbei relevanten Eingangsparameter des Prognosemodells sind grundsätzlich

- die akustische Schienenrauheit (infrastrukturseitig)
- die akustische Radrauheit (fahrzeugseitig)
- der Kontaktfilter (fahrzeugseitig)
- die Schienentransferfunktion (infrastrukturseitig)
- die Fahrzeugtransferfunktion (fahrzeugseitig)
- die Aufbautentransferfunktion (fahrzeugseitig) und
- das Antriebsgeräusch (fahrzeugseitig)

zu nennen. Das Modell soll auf das gesamte Streckennetz anwendbar sein, weshalb es für unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten gelten muss. Darüber hinaus sind die verschiedenen Parameter nicht völlig isoliert voneinander zu sehen, sondern sie weisen im Hinblick auf die resultierenden Quellstärken Abhängigkeiten auf. So werden beispielsweise die Auswirkungen von Änderungen der Radrauheit auf die Emissionen direkt von der Differenz zur Schienenrauheit beeinflusst (so schwindet der Einfluss der Radrauheit je geringer sie gegenüber der Schienenrauheit ist). Gleiches gilt jeweils auch für das Triplet bestehend aus Schienen-, Fahrzeug- und Aufbautentransferfunktion.

Des Weiteren ist bei der Anpassung von Parametern zu beachten, dass deren Wahl in einer Vielzahl von Kombinationen aus Infrastruktur, Fahrzeug und Betriebsparameter zuverlässige Ergebnisse hervorbringen muss. Welche Parameter sich für die jeweilige Anpassung eignen, hängt unter anderem von deren (unterschiedlichen) Wirkungsweisen

ab. So sind Änderungen von den drei Bestandteilen der effektiven Gesamtrauheit (Radrauheit, Schienenrauheit und Kontaktfilter) nicht nur in den absoluten Quellstärken sichtbar, sondern es kommt auch zu einer zur Geschwindigkeit direkt proportionalen spektralen Verschiebung des Emissionsspektrums. Demgegenüber können mit der Gruppe der Transferfunktionen Änderungen für bestimmte Frequenzen realisiert werden. Im Güterverkehr existieren viele unterschiedliche Fahrzeugtypen und diese werden im Zugverband oft miteinander kombiniert. Da die Prognose auf ein durchschnittliches Jahr abzielt, wird auf eine differenzierte Betrachtung von Güterwagentypen in der Regel verzichtet und die Eingangsparameter sind für durchschnittliche Fahrzeugeigenschaften auszulegen. Zudem fallen aufgrund der Güterzuglänge ein oder mehrere Triebfahrzeuge akustisch nicht ins Gewicht, weshalb deren Emissionen meist nicht gesondert behandelt werden. Personenzüge bestehen hingegen im Allgemeinen aus einem Triebfahrzeug und mehreren, akustisch ähnlichen Reisezugwagen. Da Triebfahrzeuge oftmals andere, meist höhere Schallemissionen aufweisen und diese demnach die Gesamtemissionen merklich beeinflussen können, sind diese gesondert zu berücksichtigen. Um die Komplexität bei einer Parameterbestimmung niedrig zu halten, wird (je nach Möglichkeit) empfohlen, die Parameter für Reisezugwagen und Triebfahrzeuge anhand von Zugsverbänden zu bestimmen, bei welchen die Parameter der weiteren Fahrzeuge bekannt sind.

Um die Anforderung zuverlässiger Ergebnisse bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen erfüllen zu können, sind jedenfalls Messungen bei und Abgleiche für (zumindest einige) möglichst diversitäre Bedingungen notwendig. Zudem wird als Folge der in ELSEC dargestellten Streuungen erfasster Emissionen von gleichen Zügen bei ähnlichen Rahmenbedingungen auch ein gewisses Ensemble an Messserien und an vorhandenen, jeweils von Fremdgeräuschen unbeeinflussten Vorbeifahrten als Voraussetzung für eine belastbare Parameterbestimmung empfohlen. Ein möglicher Ansatz zur Erzielung einer entsprechenden Datenbasis kann darin bestehen, zunächst erfasste Emissionen über einen längeren Zeitraum (Dauermessstelle) hinsichtlich deren Streuung über der Zeit und über Fahrzeuge des gleichen Typs zu untersuchen. Darauf aufbauend kann durch einzelne, jeweils parallel durchgeführte, temporäre Messungen die Variationsbreite durch unbekannte Einflüsse (beispielsweise des Oberbaus) bestimmt werden. Der Umfang und die Dauer dieser temporären Messserien sind von den Ergebnissen abhängig und kann daher nicht allgemein festgelegt werden. Nach Einschätzung der Autoren sind jedoch zumindest 2 temporäre Messserien erforderlich, um sinnvolle Aussagen über die Gesamtanzahl ableiten zu können.

8.3. Relevante Themen für Bestimmung von Eingangsparmeter

8.3.1. Schallausbreitungsmodell

Problemstellung

Die Prognose von Schallimmissionen nach Richtlinie 2015/996/EU beruht auf einem Modell mit Ersatzschallquellen in 0,5 m und 4,0 m Höhe über SOK und den dafür anzunehmenden und zum Teil vordefinierten Schallleistungspegeln. Die Schallleistungspegel sind daher keiner direkten messtechnischen Erhebung zugänglich, sondern können nur aus Schalldruckpegelmessungen abgeleitet werden. Um konsistente Ableitungen zu erhalten, ist für die Transmission zwischen Messpunkt und Ersatzschallquelle das idente Berechnungsverfahren zu verwenden, welches die Transmission zwischen Ersatzschallquelle und Immissionspunkten (beispielsweise Messpunkt, aber insbesondere die anrainerseitigen Immissionspunkte) regelt.

Regelungsbedarf in Regelwerken

Die derzeitige ÖNORM S 5026 ist nicht geeignet, Schallleistungspegel für das Verfahren nach Richtlinie 2015/996/EU zu liefern, da weder die dort enthaltene Transmissionsberechnung noch die Verortung der Ersatzschallquellen dem europäischen Ausbreitungsmodell entspricht. Bei zukünftigen Regelwerken sollte nicht auf eigene Ausbreitungsberechnungen aufgebaut werden, sondern das idente Verfahren wie nach der Richtlinie 2015/996/EU verwendet werden. Dazu sind die konkrete geometrische Situation und die Bodendämpfung vor Ort sowie die Parameter zur Ausbreitung von Luftschall in der Atmosphäre zu berücksichtigen (Meteorologie).

Nationale Durchführung

Bei der Durchführung der Messung sollten grundsätzlich Bedingungen wie für Freifeldmessungen in der ÖNORM S 5004 gegeben sein. Der gewählte Messpunkt (beispielweise ein einzelner Messpunkt der ÖNORM EN ISO 3095) hat frei von möglichen Einflüssen durch Reflexionen an vertikalen Objekten zu sein (Lärmschutzwände, Mauern, Gebäude). Die Bodendämpfung zwischen Schiene und Messpunkt, als auch in einem Bereich von mindestens dem zweifachen Abstand in beide Richtungen sollte durchgehend porös sein (Bodenfaktor $G = 1$ nach dem Berechnungsverfahren). Die SOK hat jedenfalls über dem Bodenniveau bis zum Messpunkt zu liegen. Liegt die SOK nicht mehr als 0,7 m über dem Bodenniveau auf dem sich der Messpunkt befindet, so kann die Transmission für eine freie Ausbreitung auf ebener Fläche und SOK = 0,2 m über Boden

herangezogen werden. Für die Ausbreitungsrechnung ist die ausbreitungsgünstige Situation zu wählen. Meteorologische Abweichungen von dieser Situation sowie von den standardisiert bei der Berechnung zu verwendenden Bedingungen von 10 °C Lufttemperatur und 70 % Luftfeuchtigkeit sind in diesem Fall vernachlässigbar. Weicht die Messgeometrie in Bezug auf die Bodenebene oder die Bodendämpfung maßgeblich von den oben beschriebenen Bedingungen ab, ist eine detaillierte Modellierung der Situation vor Ort durchzuführen.

8.3.2. Messverfahren

Problemstellung

Die Wahl einer messtechnisch zweckmäßigen schalltechnischen Größe richtet sich auch nach dem Berechnungsverfahren, für welches Emissionsparameter zu ermitteln sind. Das Verfahren nach der Richtlinie 2015/996/EU liefert letztendlich Lärmindizes und bietet damit keine direkte Berechnung des zeitlichen Vor- und Nachlaufs für Vorbeifahrtspegel von Schienenfahrzeugen.

Regelungsbedarf in Regelwerken

Es wäre empfehlenswert, wenn Normen eine eindeutige Definition von geeigneten schalltechnischen Größen zur direkten Gegenüberstellung zu berechneten Werten beinhalten.

Nationale Durchführung

Ein für die Vorbeifahrt von Triebzügen oder nichttrennbaren Einheiten nach ÖNORM EN ISO 3095 definierter, äquivalenter Dauerschallpegel wird über die Dauer der Vorbeifahrt von Zuganfang zu Zugende gebildet. Ein derartig ermittelter Vorbeifahrtspegel ermöglicht jedoch keine direkte Vergleichbarkeit mit den berechneten Werten nach der Richtlinie 2015/996/EU, welche quellseitig stets die gesamte Schalleistung bzw. -energie einer Vorbeifahrt betrachtet und diese bei Darstellung als längenbezogenen Schalleistungspegel auf eine Stunde skaliert.

Zur Erlangung einer Vergleichbarkeit sind daher die zeitlichen Grenzen einer Zugvorbeifahrt, definiert als das Schallereignis, welches sich *deutlich wahrnehmbar vom übrigen Geräusch abhebt und eindeutig der Vorbeifahrt eines Zuges zugeordnet werden kann* (vergleiche ÖNORM S 5005), für eine automatisierte Verarbeitung entsprechend festzulegen. Um alle beitragenden Geräusche der gesamten Zugvorbeifahrt zu summieren, wird als Beginn und Ende der Messzeit jener Punkt im Pegelverlauf empfohlen, welcher 10 dB unterhalb des Pegelwerts am Anfang bzw. Ende des Zugs

entspricht. Um unerwünschte Beiträge von Fremdgeräuschen zu vermeiden ist zusätzlich zu belegen, dass die Pegel an den Endpunkten nicht von Fremdgeräuschen bestimmt werden. In der Regel wird dies bei einem Abstand von 10 dB erzielt.

8.3.3. Transformation Wellenlänge zu Frequenz

Problemstellung

Im Rechenmodell der Richtlinie 2015/996/EU ist, nachdem die effektive Gesamtrauheit aus Rad- und Schienenrauheiten, sowie dem Kontaktfilter gebildet wurde, das Spektrum vom Wellenlängen- in den Frequenzbereich mittels der Fahrgeschwindigkeit zu transformieren. Da zum einen mit Nennwerten der Bandmitten gearbeitet wird und zum anderen unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten auftreten werden, kommen die Terzbänder beider Bereiche im Allgemeinen nicht deckungsgleich zu liegen. In weiterer Konsequenz sind die Terzbandpegel gemäß der Richtlinie 2015/996/EU durch energetische und proportionale Mittelung benachbarter Bänder im Wellenlängenbereich zu ermitteln.

Einige der Nennwerte der Bandmitten in der Richtlinie 2015/996/EU weichen gegenüber den exakten Bandmitten signifikant ab. In Abhängigkeit der Pegeldifferenzen benachbarter Terzbänder der effektiven Gesamtrauheit können diese Nennwerte im Vergleich zu der Berechnung mit exakten Mittenwerten bei der Transformation zu deutlichen Fehlern führen (in ungünstigen Fällen auch im dB-Bereich). Um dem entgegenzuwirken, wurden beispielsweise in der deutschen Umsetzung der Richtlinie 2015/996/EU und in niederländischen Untersuchungen zum Prognosemodell zum Teil Änderungen der Bandmittennennwerte vorgenommen. Zudem bestehen in den Arbeiten offensichtlich verschiedene (nicht nachvollziehbare) Interpretationen der mathematischen Transformation (beispielsweise Transformation im Frequenz- statt im Wellenlängenbereich oder lineare statt energetische Umrechnung).

Regelungsbedarf in Regelwerken

Für eine einheitliche, europaweite Umsetzung sind die nationalen Implementierungen abzustimmen. Dies umfasst sowohl die mathematische Umrechnung, als auch die Festlegung einheitlicher Bandmittenwerte (entweder durch Definition einheitlicher Nennwerte oder durch Festlegung der Verwendung exakter Bandmittenwerte, wobei bei beidem beispielsweise auf die EN ISO 266 [32] über Normfrequenzen verwiesen werden kann).

Nationale Durchführung

Die Umrechnung in Österreich sollte sich an den Ergebnissen internationaler Abstimmungen orientieren.

8.3.4. Rauheit der Schiene

Problemstellung

Gemeinsam mit Kontaktfilter und Radrauheit bildet die Schienenrauheit die effektive Gesamtrauheit $L_{R,TOT}$, die im Rechenmodell der Richtlinie 2015/996/EU letztendlich für die Schwingungsanregung von Oberbau und Fahrzeug alleinig verantwortlich ist. Bei akustischen Messungen, die eine Bewertung von absoluten Schallgrößen zum Ziel haben, sind Schienenrauheiten zumeist – bei Zulassungsmessungen zwingend – unterhalb der Grenzkurve der ÖNORM EN ISO 3095 vorgesehen. Bisherige Messungen von Schienenrauheiten im österreichischen Schienennetz deuten sowohl auf deutliche Unterschreitungen dieser Grenzkurve aber auch auf die dabei auftretenden größeren Variationen zwischen Messstellen hin.

Regelungsbedarf in Regelwerken

Es besteht hinsichtlich der Richtlinie 2015/996/EU kein Handlungsbedarf, da die Verwendung von Rauheiten abseits der Standardwerte möglich ist.

Nationale Durchführung

Entsprechend bisherigem Kenntnisstand führen der Standardwert „durchschnittliches Netz“, aber auch der Standardwert „EN ISO 3095:2013“ der RVE für das österreichische Schienennetz vermutlich zu einer Überschätzung der Schienenrauheit und in weiterer Folge zu einer Überschätzung der Schallemissionen, wobei die Höhe und die spektrale Verteilung von Radrauheiten und Kontaktfiltern abhängig ist. Grundsätzlich wird daher empfohlen, bei der Bestimmung von Eingangsparametern tatsächlich vorhanden Rauheitswerte zu verwenden. Jedoch wird auch auf die erläuterte Anforderung für Kontaktfilter in Kap. 8.3.7 hingewiesen, entsprechend aktuelle, standardisierte Spektren zu verwenden.

8.3.5. Bandbegrenzung gemessener Schienenrauheiten

Problemstellung

Rauheitsmessungen stellen in der Praxis nur in einem begrenzten Wellenlängenbereich Information über vorhandene Rauheiten bereit (ÖNORM EN 15610 fordert beispielsweise

Ergebnisse in einem Bereich von 0,003 m bis 0,1 m oder gegebenenfalls 0,25 m). Für Emissionsspektren in den Terzbändern von 50 Hz bis 10 kHz und betrachteten Geschwindigkeiten von beispielsweise 50 km/h bis 250 km/h wären jedoch Rauheiten in einem Wellenlängenbereich von $0,0012 \text{ m} \leq \lambda \leq 1,56 \text{ m}$ erforderlich. Die RVE 04.01.02 definiert die Standardwerte für Schienenrauheiten bereits für einen erweiterten Wellenlängenbereich von 0,0008 m bis 1,0 m, mit welchem Emissionsspektren bis zu Geschwindigkeiten von etwa ~180 km/h ermittelbar sind. Diese erweiterten Rauheitsspektren der Richtlinie wurden – als eine mögliche Strategie der spektralen Erweiterung – durch Extrapolation mit konstanten Werten für Wellenlängen $< 2 \text{ mm}$ und $> 315 \text{ mm}$ gebildet.

Regelungsbedarf in Regelwerken

Einerseits sind in der Normgebung die Rauheitsspektren im langwelligen Bereich zu erweitern, um auch Prognosen für Geschwindigkeiten bis 250 km/h zu erlauben. Darüber hinaus ist auf internationaler Ebene zu diskutieren, inwiefern nicht anderer Strategien zur Extrapolation zu etablieren wären, die vorhandene, physikalisch nicht begründbare Änderung der Steigung bzw. des Abfalls im Leistungsdichtespektrum vermeiden.

Nationale Durchführung

Grundsätzlich bestehen verschiedene Möglichkeiten einer Extrapolation. Zur Vermeidung der erwähnten Steigungsänderungen wird - falls keine international einheitliche Lösung gefunden wird - für die iterative Bestimmung von Eingangsparmeter empfohlen, gemessene Rauheitsspektren gemäß dem oberen Grenzspektrums der ÖNORM EN ISO 3095 fortzuführen, indem dies entsprechend der Rauheitspegel der jeweiligen Randterzbänder des erfassten Spektrums verschoben wird.

8.3.6. Messspur bei Schienenrauheitsmessungen

Problemstellung

An Oberseite des Schienenkopfs entsteht unter den üblichen Betriebsbedingungen des Schienenverkehrs die sogenannte Schienenfahrfläche, ein glänzender Teilbereich der auch Fahrspiegel genannt wird. Die ÖNORM EN 15610 sieht bei hinreichender Breite der gewählten Referenzfläche (zur Beurteilung der akustischen Rauheit gewählte Fläche auf dem Schienenkopf innerhalb des Fahrspiegels) vor, die Rauheiten an drei anstatt nur einer Messspur je Schiene zu ermitteln. Allerdings können über die Querrichtung gesehen deutliche Variationen der Rauheit bestehen.

Regelungsbedarf in Regelwerken

Der Rad-Schiene Kontakt und damit auch die laterale Lage auf der Schienenfahrfläche ist stark von dem jeweiligen Schienen- und Radprofil abhängig. Darüber hinaus ist von einer signifikanten Beeinflussung durch die Fahrdynamik auszugehen, wobei aufgrund der Vielzahl an Einflüssen im Bereich des Oberbaus, der Fahrzeuge und der lokalen Umgebungsbedingungen die Ausbildung der konkreten, lateralen Lage vermutlich einem Zufallsprozess ähnlich sein wird. Eine differenzierte Bewertung der Radrauheiten verschiedener Messspuren erscheint für die Prognoserechnung daher weder umsetzbar noch zielführend. Allerdings geht die ÖNORM EN 15610 aus dem Jahr 2009 nicht darauf ein, wie die getrennt als Ergebnisse darzustellenden Rauheitsspektren mehrerer Messspuren bzw. der Rauheitsspektren beider Schienen eines Gleises in ein repräsentatives Spektrum des betrachteten Streckenabschnittes überzuführen sind. Lediglich der Normentwurf aus 2017 fordert zusätzlich zur Angabe der einzelnen Rauheitsspektren je Schiene und Messspur, dass auch für alle Spuren und beide Schienen die mittlere Rauheitsspur als ein energetischer Mittelwert (RMS) berechnet werden muss. Diesen Ansatz einer energetischen Mittelung auch für die Prognoserechnung zu verwenden, scheint im Sinne der Richtlinie 2015/996/EU praktisch durchführbar, sollte jedoch international abgestimmt werden.

Nationale Durchführung

Da auch fahrzeugspezifische Unterschiede im Rad-Schiene Kontakt möglich sind und in weiterer Folge bestimmte Fahrzeuge auch nur Teile der Schienenlauffläche nutzen können, ist bei Verwendung von gemessenen Schienenrauheiten im Prognosemodell darauf zu achten, für die betrachteten Fahrzeuge möglichst repräsentative Rauheitsspektren zu verwenden.

8.3.7. Kontaktfiter

Problemstellung

Der Kontaktfiter als wesentlicher Parameter, um aus Schienenrauheit und Radrauheit eine effektive Gesamtrauheit zu bilden, wird in Richtlinie 2015/996/EU in Abhängigkeit von Raddurchmesser und Achslast angegeben. Derzeit bestehen konkrete Zweifel (siehe beispielsweise RIVM Letter report 2019-0023) an der Richtigkeit dieser Werte sowie an der Verwendung der Bezeichnung „Achslast“, welche korrekterweise „Radlast“ heißen müsste.

Regelungsbedarf in Regelwerken

Es besteht akuter Bedarf die korrekte Bezeichnung „Achslast“ versus „Radlast“ aufzuklären und richtigzustellen. Die entsprechenden Kontaktfilterwerte sind in Regelwerken zu normieren.

Nationale Durchführung

Zum derzeitigen Zeitpunkt ist die korrekte Berechnung der effektiven Gesamtrauheit nur bei Verwendung aller vorgegebenen Parameter (Schienenrauheit, Radrauheit, Kontaktfilter) gewährleistet. Werden tatsächlich gemessenen Schienenrauheiten oder Radrauheiten eingesetzt, so sollten zuerst die jeweils aktuellsten, dem Stand der Technik entsprechenden Kontaktfilter verwendet werden. In weiterer Folge ist die optimale Wahl des Tripletts zu verifizieren und dauerhaft festzulegen. Bei Anwendung eines geänderten Kontaktfilters muss jedenfalls eine neuerliche Anpassung von Rad- und Schienenrauheit geprüft werden.

8.3.8. Radrauheit

Problemstellung

Die Radrauheit ergibt gemeinsam mit Schienenrauheit und Kontaktfilter die effektive Gesamtrauheit. Das derzeitige Verfahren nach Richtlinie 2015/996/EU stellt tabellierte Werte für drei Standardradrauheiten gültig für Grauguss-Bremssklotzsohlen, kombinierte Bremssklotzsohlen und Scheibenbremsen zur Verfügung. Die Kenntnis der Radrauheiten für Schienenfahrzeuge zum Zeitpunkt der Messung ermöglicht eine genaue Justierung der übrigen unbekannt Parameter (Transferfunktionen), für die spätere Berechnung von Lärmindizes sind wiederum durchschnittliche Werte zu verwenden.

Regelungsbedarf in Regelwerken

Der Normenentwurf der ÖNORM EN 15610 (Messung der Schienen- und Radrauheiten im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen) aus dem Jahr 2017 beschreibt unter anderem die Messung von Radrauheiten. Damit könnten Radrauheiten für konkrete Testfahrzeuge erhoben werden, um die unbekannt Transferfunktionen zu ermitteln. Für die Berechnung der Lärmindizes sind jedoch normierte Werte notwendig, welche den Zustand des jeweiligen Radtyps bzw. Bremstyps im Durchschnitt beschreiben.

Nationale Durchführung

Die konkrete Erhebung von Radrauheiten sollte europäischen Regelwerken überlassen werden. Alternativ kann die Radrauheit von Testfahrzeugen ermittelt werden, bzw. das

Langzeitverhalten von Rad/Bremstypen für Fahrzeugtypen in einer Grundlagenstudie erhoben werden.

8.3.9. Schienentransferfunktion

Problemstellung

Die Schienentransferfunktion ergibt mit der effektiven Gesamtraueheit den Schalleistungspegel der Ersatzschallquelle für das abgestrahlte Geräusch der Schiene. Die Richtlinie 2015/996/EU bietet insgesamt 7 tabellierte Schienentransferfunktionen für Monoblock und Bi-Blockschwelen mit je 3 Zwischenlagentypen (hart, mittel, weich) sowie eine Funktion für Holzschwelen an. Als wesentlicher Parameter wird dazu die dynamische Steifheit der Zwischenlagen erwähnt.

Regelungsbedarf in Regelwerken

Nachdem Schientypen in Europa standardisiert sind wäre die Angabe von entsprechenden Transferfunktionen in einer Norm vorteilhaft. Der Parameter der dynamischen Steifheit der Zwischenlagen zur Zuordnung der einzelnen Datensätze ist jedenfalls konkret zu beschreiben (beispielsweise Frequenzbereich für die Einstufung in hart, mittel und weich), um eine eindeutige Auswahl in Abhängigkeit der Steifheit zu erlauben. Eine mögliche Korrelation der Schienentransferfunktion mit der Gleisabklingrate (TDR) ist im Detail zu prüfen, um damit möglicherweise eine direkte messtechnische Erhebung zu ermöglichen.

Nationale Durchführung

Bis zum Vorliegen einer europäischen Norm zur Bestimmung der Schienentransferfunktion kann auf die bestehenden publizierten Datensätze zurückgegriffen werden. Ein Unter- oder Überschreiten der Gleisabklingraten von den Grenzspektren der ÖNORM EN ISO 3095 kann mittels der Wahl einer weichen oder harten anstelle der in der RVE 04.01.02 standardmäßig für Österreich empfohlenen, mittleren Zwischenlage bei der Modellierung berücksichtigt werden. Stärkere Abweichungen unter oder über die Grenzkurven der Gleisabklingraten weisen auf ungeeignete Messstellen hin, allerdings sind hierzu keine quantifizierbaren Aussagen möglich. Dazu wären erst Untersuchungen bzw. Normierungen (siehe oben) notwendig, um ausgehend von der TDR auf eine Zwischenlagenkategorie bzw. allgemeiner Transferfunktion zu schließen.

8.3.10. Fahrzeugtransferfunktion

Problemstellung

Die Fahrzeugtransferfunktion ergibt mit der Gesamtrauheit den Schalleistungspegel der Ersatzschallquelle für die Rad- bzw. Drehgestellemissionen. Die Richtlinie 2015/996/EU bietet Datensätze für Raddurchmesser 680 mm, 840 mm, 920 mm und 1200 mm an. Diese ermöglichen nur einfache Zuordnungen, da es sowohl Zwischengrößen an Raddurchmessern gibt als auch spezielle Drehgestellkonstruktionen. Die Ermittlung der Fahrzeugtransferfunktion ist damit ein wesentlicher Punkt um verlässliche Emissionsparameter für spezifische Schienenfahrzeuge zu bestimmen.

Regelungsbedarf in Regelwerken

Eine europäische Datenbank für Transferfunktionen von spezifischen Fahrzeugen wäre von erheblichem Vorteil.

Nationale Durchführung

Nach Festlegung aller bisher beschriebenen Parameter kann die Fahrzeugtransferfunktion direkt an gemessene Werte angepasst werden. Dazu können ausgehend von einem naheliegenden Datensatz passend zu den Raddurchmessern iterativ die einzelnen Terzbandwerte eingestellt werden, um die beste Übereinstimmung mit den Messergebnissen zu erhalten.

8.3.11. Aufbautentransferfunktion

Problemstellung

Die Aufbautentransferfunktion ergibt mit der Gesamtrauheit den Schalleistungspegel der Ersatzschallquelle für die Schallemission der Aufbauten von Güterwagen. Die Richtlinie 2015/996/EU bietet dazu nur einen Standardwert, der zu einem völlig vernachlässigbaren Beitrag dieser Schallquelle führt.

Regelungsbedarf in Regelwerken

Eine europäische Datenbank für Transferfunktionen von spezifischen Fahrzeugen wäre von erheblichem Vorteil.

Nationale Durchführung

Nach Festlegung aller bisher beschriebenen Parameter kann die Fahrzeugtransferfunktion direkt an gemessene Werte angepasst werden. Dies wäre allerdings nur dann zweckmäßig, wenn bei identem Rad- bzw. Drehgestell verschiedene

Aufbauten unterschieden werden könnten. Eine mögliche Anwendung wäre die Bestimmung der Fahrzeugtransferfunktion für ein Fahrzeug ohne besonderem (akustisch unauffälligen) Aufbau und die darauf folgende Bestimmung der Aufbautentransferfunktion für ein Fahrzeug, welches sich nur durch den zusätzlichen, auch offensichtlich Geräusche verursachenden Aufbau unterscheidet.

8.3.12. Traktionsgeräusch

Problemstellung

Nach Richtlinie 2015/996/EU können die Schalleistungspegel der Traktionsgeräusche sowie ihre Aufteilung auf die beiden Ersatzschallquellen (0,5 m und 4,0 m über SOK) *einerseits durch Messung aller Quellen in den verschiedenen Betriebszuständen ermittelt werden, oder die Teilquellen können einzeln durch Bestimmung ihrer Parameterabhängigkeit und relativen Stärke charakterisiert werden.* Dazu wird auf Messungen nach ÖNORM EN ISO 3095:2014 an einem stehenden Fahrzeug verwiesen.

Regelungsbedarf in Regelwerken

Auch wenn die ÖNORM EN ISO 3095 die Ermittlung von Traktionsgeräuschen beschreibt, so fehlt eine standardisierte Arbeitsanweisung, damit die Bestimmung der Schalleistung für die beiden Ersatzschallquellen nach Richtlinie 2015/996/EU europaweit einheitlich durchgeführt werden kann.

Nationale Durchführung

Derzeit besteht die Möglichkeit im Rahmen des iterativen Verfahrens (nach Bestimmung aller übrigen Parameter für Rollgeräusche) den beiden Ersatzschallquellen Schalleistungspegel für die Traktion zu addieren.

8.4. Lessons Learned

Die gesammelten Erfahrungen gehen über die Erkenntnisse hinsichtlich der Bestimmung von Eingangsparametern des Rechenmodells hinaus. So verdeutlicht die Einbeziehung von historischen Emissionsdaten und die damit entstehende große Anzahl von 12 verschiedenen Messserien der vergangenen Jahre, dass besonderes Augenmerk auf die Sicherstellung einer hohen Datenqualität zu richten ist. Das betrifft insbesondere folgende Punkte:

- Messstellenauswahl: sinngemäß vergleichbar mit den Forderungen der ÖNORM EN ISO 3095 müssen die gemessenen Schallemissionen der Zugsfahrten zumindest frei von wahrnehmbaren Störgeräuschen sein, wobei dies sowohl auf Geräusche durch

Eigenschaften des Oberbaus (Schienenstöße oder verschlissene Schweißstöße, Weichen, etc.), wie auch der Messung bzw. der Messbedingungen (Windgeräusche, Geräusche der Umgebung, etc.) gilt

- Messunsicherheit: es wird empfohlen, die Schallemissionen jedes Messpunkts stets mit zumindest zwei Mikrofonen in unmittelbar benachbarten, akustisch vergleichbaren Querschnitten zu erfassen und erst bei ausreichender spektraler Übereinstimmung die Ergebnisse für die Parameterbestimmung zu verwenden (beispielsweise wird im Zuge der Erstellung der internationalen Norm TC 256 WI 00256879 zur Messung der Eingangsparameter für Umgebungslärberechnungen eine maximale Abweichung von 1,5 dB diskutiert)
- Messdauer: bei der Triggerung der Aufzeichnungen ist auf einen ausreichenden Abstand zwischen Mess- und Zugbeginn, sowie zwischen Zug- und Messende zu achten, um das gesamte Schallereignis einer Vorbeifahrt im Hinblick auf die mittlere Schalleistung beurteilen zu können (dies erscheint mit ausreichender Genauigkeit gegeben, wenn die Aufzeichnungen bis zu einem Abfall von 10 dB gegenüber den Pegelwerten zum Zeitpunkt der Pufferpositionen am Zuganfang und –ende vorliegen)
- Pegelberechnung: ein Vergleich von Emissionen unterschiedlicher Messserien sollte nur mit gleicher Berechnung von Pegeln und Spektren bzw. softwaretechnischer Implementierung erfolgen, um rechentechnisch verursachte Unterschiede zuverlässig ausschließen zu können
- Nullmessung: zur Beurteilung des Hintergrundgeräusches sind regelmäßige Nullmessungen von Vorteil (hinsichtlich der Aufzeichnungshäufigkeiten sind bei Langzeitmessungen beispielsweise tägliche Nullmessungen ausreichend, während bei aufwändigen, kurzzeitigen Messkonfigurationen auch durchgehende Nullmessungen zweckmäßig sein können)

Neben den Messungen war zudem die beobachtete Variabilität der Schallemissionen insbesondere zwischen den Messserien bemerkenswert, obwohl die gleichen Zugkategorien unter (vermeintlich) gleichen Rahmenbedingungen wie Fahrgeschwindigkeit, glatte Gleise, hohe Gleisabklingraten, etc. einander gegenüber gestellt wurden. Diese Beobachtung erscheint essentiell im Hinblick auf den Umfang an verschiedenen Messserien bei der Parameterbestimmung.

Des Weiteren wurden während der Projektlaufzeit nicht nur die österreichische Umsetzung der Europäischen Richtlinie 2015/996/EU, sondern auch deutsche und niederländische Arbeiten zu der Prognoserechnung publik. Entgegen der

Erwartungshaltung einer starken Übereinstimmung zu den Inhalten der Richtlinie wurden jedoch zahlreiche Teile verschieden interpretiert und/oder abgeändert national implementiert. Analysen zeigen hier zum Teil deutliche Unterschiede. Diese nationalen Alleingänge haben schlussendlich zur Folge, dass der Grundgedanke der Richtlinie einer europaweit einheitlichen und damit vergleichbaren Lärmprognose – zum Teil durch fehlende internationale Abstimmung – mit gegenwärtigem Wissensstand nicht erfolgreich umgesetzt werden kann.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] World Health Organisation (WHO): "Environmental Noise Guidelines for the European Region", 2018, ISBN 978 92 890 5356 3.
- [2] Europäisches Parlament und Rat: "Richtlinie (EU) 2002/49/EG über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm", Amtsblatt L 189 der Europäischen Gemeinschaft vom 18. Juli 2002, 25. Juni 2002.
- [3] Fachnormenausschuss 138 Akustik: "ÖNORM S 5026 - Messung der Schallemission von Schienenfahrzeugen - Längenbezogener Schalleistungspegel", 1. März 1996.
- [4] Österreichisches Normungsinstitut (ON): "ÖNORM EN ISO 3095 - Akustik - Bahnanwendungen- Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen", 15. Dez. 2014.
- [5] Europäische Kommission: "Richtlinie (EU) 2015/996 zur Festlegung gemeinsamer Lärmbewertungsmethoden gemäß der Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates", Amtsblatt L 168 der Europäischen Gemeinschaft vom 1. Juli 2015, 19. Mai 2015.
- [6] Fachnormenausschuss 138 Akustik: "ONR 305011 - Berechnung der Schallimmission durch Schienenverkehr - Zugverkehr, Verschub- und Umschlagbetrieb", 2004.
- [7] European Commission: "Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU)", Joint Research Centre, Institute for Health and Consumer Protection, 2012, ISBN 978-92-79-25281-5, ISSN 1831-9424.
- [8] Österreichisches Normungsinstitut (ON): "ÖNORM ISO 9613-2 - Akustik - Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren", 1. Juli 2008.
- [9] Europäische Kommission (2014) 1304: "Verordnung der Kommission über die technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Lärm“, Amtsblatt L 356 der Europäischen Union , 26. 11. 2013.
- [10] Österreichisches Normungsinstitut (ON): "ÖNORM EN 15610 - Bahnanwendungen - Geräuschemission - Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen", ident mit EN 15610:2009-05, 15. Aug. 2009.
- [11] Österreichisches Normungsinstitut (ON): "ÖNORM EN 15461 - Bahnanwendungen - Schallemission - Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Gleisabschnitten für Vorbeifahrtgeräuschmessungen", 15. Dez. 2010.

- [12] "Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr über die Lärmzulässigkeit von Schienenfahrzeugen (Schienenfahrzeug-Lärmzulässigkeitsverordnung – SchLV)", Bundesgesetzblatt 452/1993, 25. Juni 1993.
- [13] Österreichisches Normungsinstitut (ON): "Entwurf ÖNORM EN 15610 - Bahnanwendungen - Akustik - Messung der Schienen- und Radrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen", 15. Okt. 2017.
- [14] American National Standards Institute: "ANSI S1.11 - Specification for Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog nad Digital Filters", Acoustic Society of America, Melville, New York, 2004.
- [15] Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV), Arbeitsausschuss Schienenverkehrslärm: "RVE 04.01.02 - Berechnung von Schienenverkehrslärmemissionen", Feb. 2019.
- [16] OVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik: "ÖVE/ÖNORM EN 61260-1 - Elektroakustik - Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven - Teil 1: Anforderungen", ident mit EN 61260-1:2014, Aug. 2015.
- [17] Europäische Kommission: Bibliothek zu CNOSSOS-EU - finale Methoden und Software, Online: <https://circabc.europa.eu/faces/jsp/extension/wai/navigation/container.jsp>, 29. Aug. 2019.
- [18] Bundesanzeiger BAnz AT 28.21.2018 B7: "Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe) (BUB)", Bekanntmachung, 28. Dezember 2018.
- [19] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: "Bahnanwendungen – Akustik – Messverfahren für kombinierte Rauheit, Gleisabklingraten und Übertragungsfunktionen; Deutsche Fassung CEN/TR 16891:2016", März 2017.
- [20] Arnaud Kok und A. van Beek: "Amendments for CNOSSOS-EU - Description of issues and proposed solutions (RIVM Letter report 2019-0023)", National Institute for Public Health and the Environment, Bilthoven, Niederlande, 2019, DOI 10.21945/RIVM-2019-0023.
- [21] ISO/TC 43/SC 1: "ISO/DTR 17534-4: Acoustics — Software for the calculation of sound outdoors — Part 4: Recommendations for quality assured implementation of CNOSSOS EU calculation methods in software according to ISO", under development.

- [22] "ISO 1996-1 Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 1: Basic quantities and assessment procedures", Second edition, Aug. 2008.
- [23] 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.
- [24] T.X. Wu und D.J. Thompson: "Wheel/Rail Non-linear Interactions With Coupling Between Vertical and Lateral Directions", in *Vehicle System Dynamics*, Vol. 41, Nr. 1, 2004, S. 27-49, ISSN: 0042-3114, DOI 10.1076/vesd.41.1.27.23407.
- [25] ISO 9613-1: "Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere", Juni 1993.
- [26] Christian Kirisits, Günter Dinthobl und Christoph Lechner: "The Implementation of EC Directive 2015/996 for the Austrian Railway Network", in *Proceedings of the 47th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 2018)*, Chicago, USA, 2018, S. 2950-2960.
- [27] Christian Kirisits und Christoph Lechner: "Variations and uncertainties calculating noise indices using the new Annex II methods of the European noise directive", in *Proceedings of the 44th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (INTER-NOISE 201)*, San Francisco, USA, 2015, S. 4587-4596.
- [28] P. C. Dings und M. G. Dittrich: "Roughness on Dutch railway wheels and rails", in *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 193, Nr. 1, Mai 1996, S. 103-112, doi:10.1006/jsvi.1996.0250.
- [29] Anemarie van Beek et al.: "Definition of track influence: Roughness in rolling noise (Part 1)", Harmonoise WP1.2 Deliverable 12 (HAR12TR-020813-AEA10), Juli 2003.
- [30] Stuart L. Grassie: "Routine measurement of long wavelength irregularities from vehicle-based equipment", in *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems - Proceedings of the 12th International Workshop on Railway Noise, Sept. 2016 (Part of the Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design book series, Vol. 139)*, Jän. 2018, S. 333-342, doi: 10.1007/978-3-319-73411-8_24.
- [31] Joint Research Center European Commission: "Draft JRC Reference Report on Common NOise ASSESSMENT MethOdS in EU", Report No.: Version 2d, 28. 5. 2010.
- [32] "EN ISO 266 - Akustik - Normfrequenzen", 1. Nov. 1997.

Anhang A Akustische Oberbauparameter

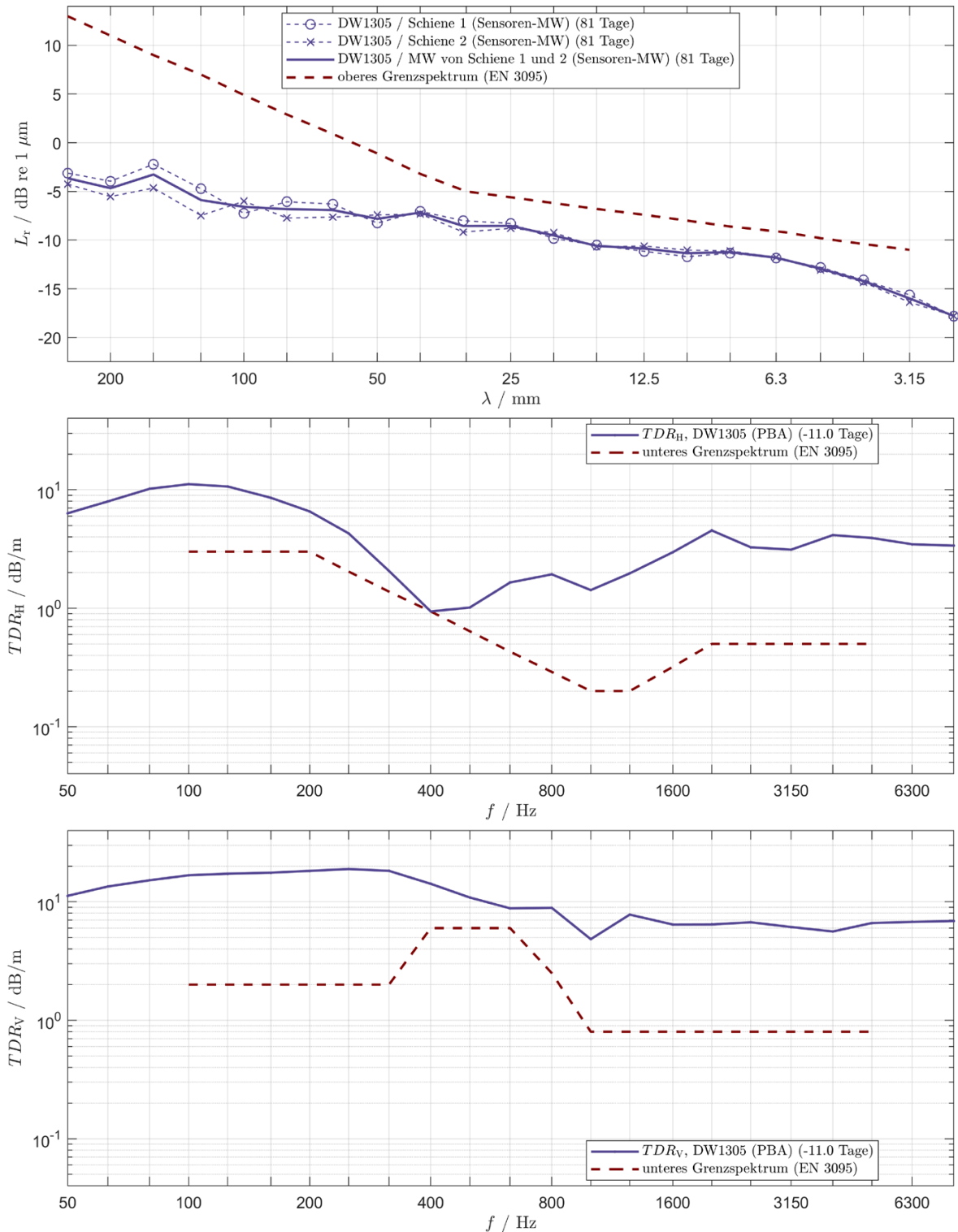


Abb. A-1: akustische Schienenrauheit (oben), horizontale Gleisabklingrate (Mitte) und vertikale Gleisabklingrate (unten) der Messungen DW1305 (Details siehe Tab. 4-1) inkl. jeweils zugehöriger Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 [4] und Angabe der Zeitabstände der Erhebung zum zeitlichen Mittelpunkt der akustischen Aufzeichnungen

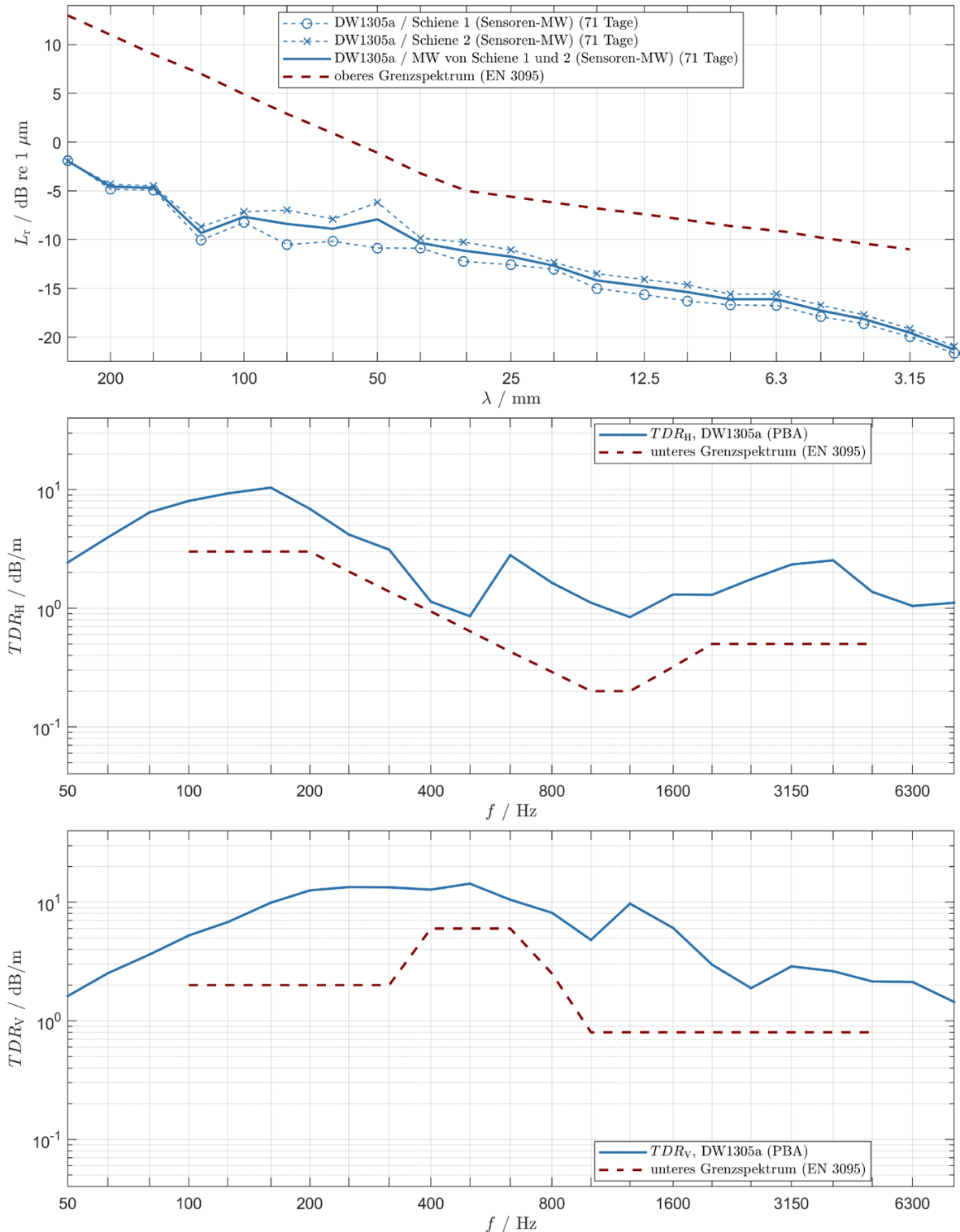


Abb. A-2: akustische Schienenrauheit (oben), horizontale Gleisabklingrate (Mitte) und vertikale Gleisabklingrate (unten) der Messungen DW1305a (Details siehe Tab. 4-1) inkl. jeweils zugehöriger Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 [4] und Angabe der Zeitabstände der Erhebung zum zeitlichen Mittelpunkt der akustischen Aufzeichnungen

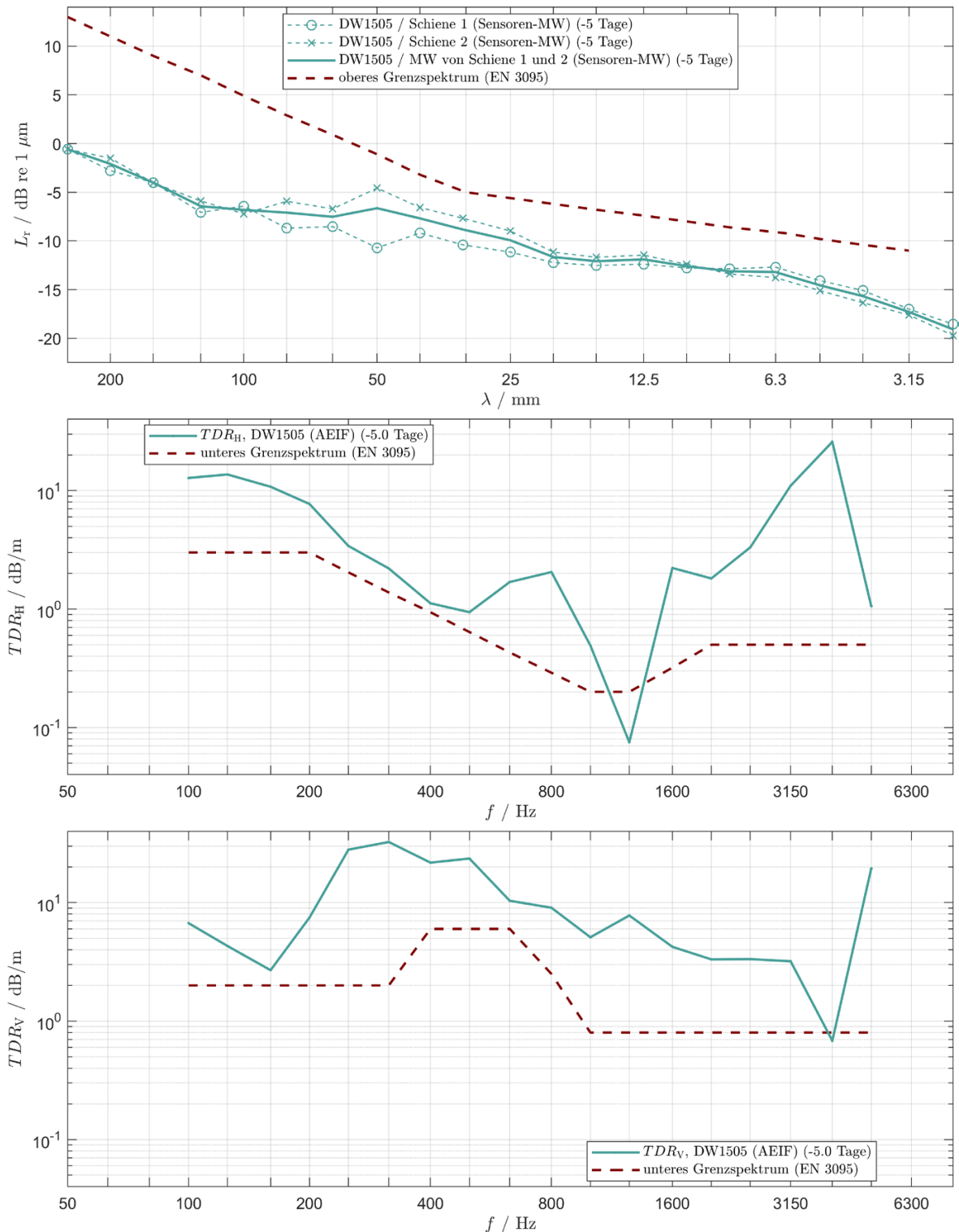


Abb. A-3: akustische Schienenrauheit (oben), horizontale Gleisabklingrate (Mitte) und vertikale Gleisabklingrate (unten) der Messungen DW1505 (Details siehe Tab. 4-1) inkl. jeweils zugehöriger Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 [4] und Angabe der Zeitabstände der Erhebung zum zeitlichen Mittelpunkt der akustischen Aufzeichnungen

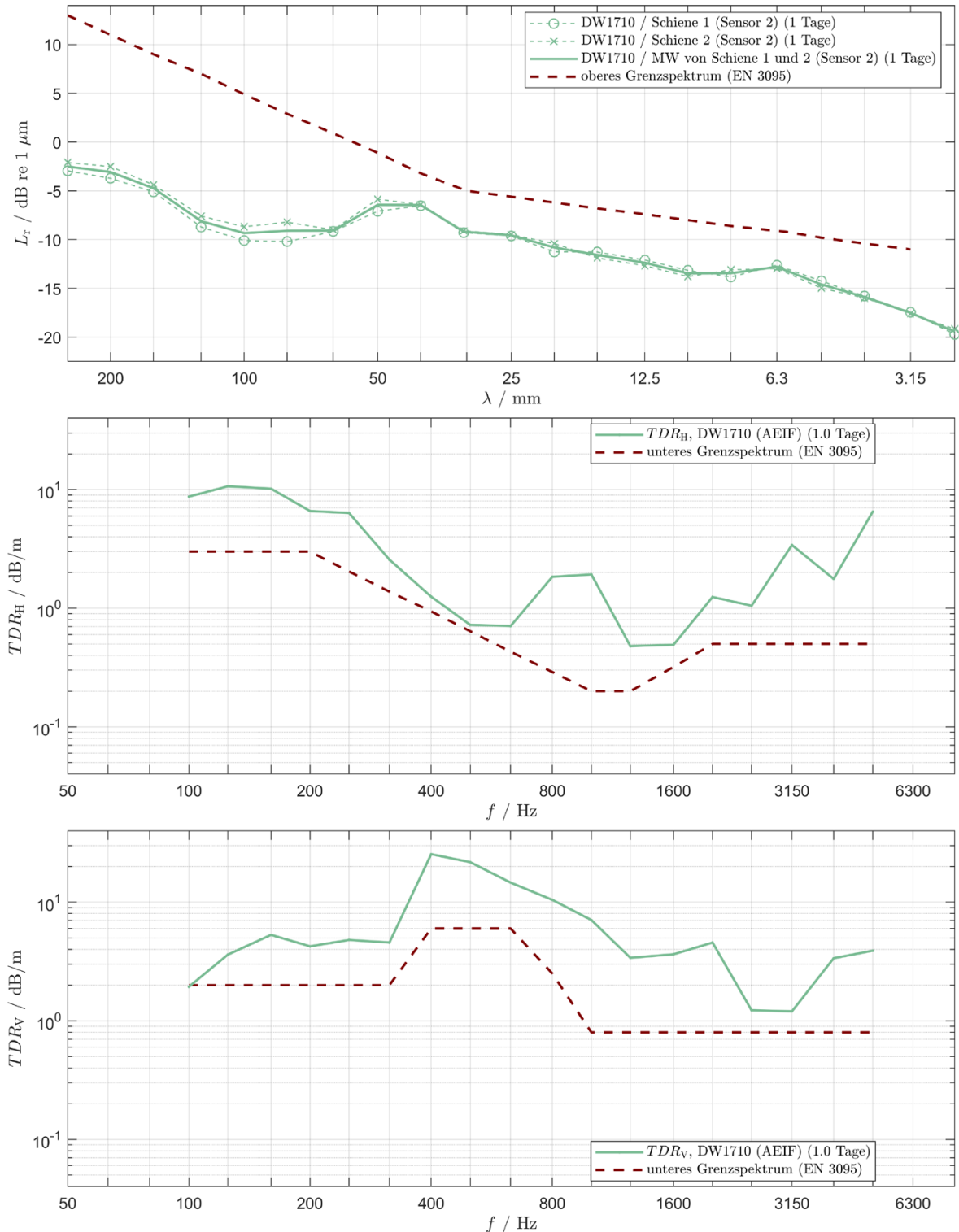


Abb. A-4: akustische Schienenrauheit (oben), horizontale Gleisabklingrate (Mitte) und vertikale Gleisabklingrate (unten) der Messungen DW1710 (Details siehe Tab. 4-1) inkl. jeweils zugehöriger Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 [4] und Angabe der Zeitabstände der Erhebung zum zeitlichen Mittelpunkt der akustischen Aufzeichnungen

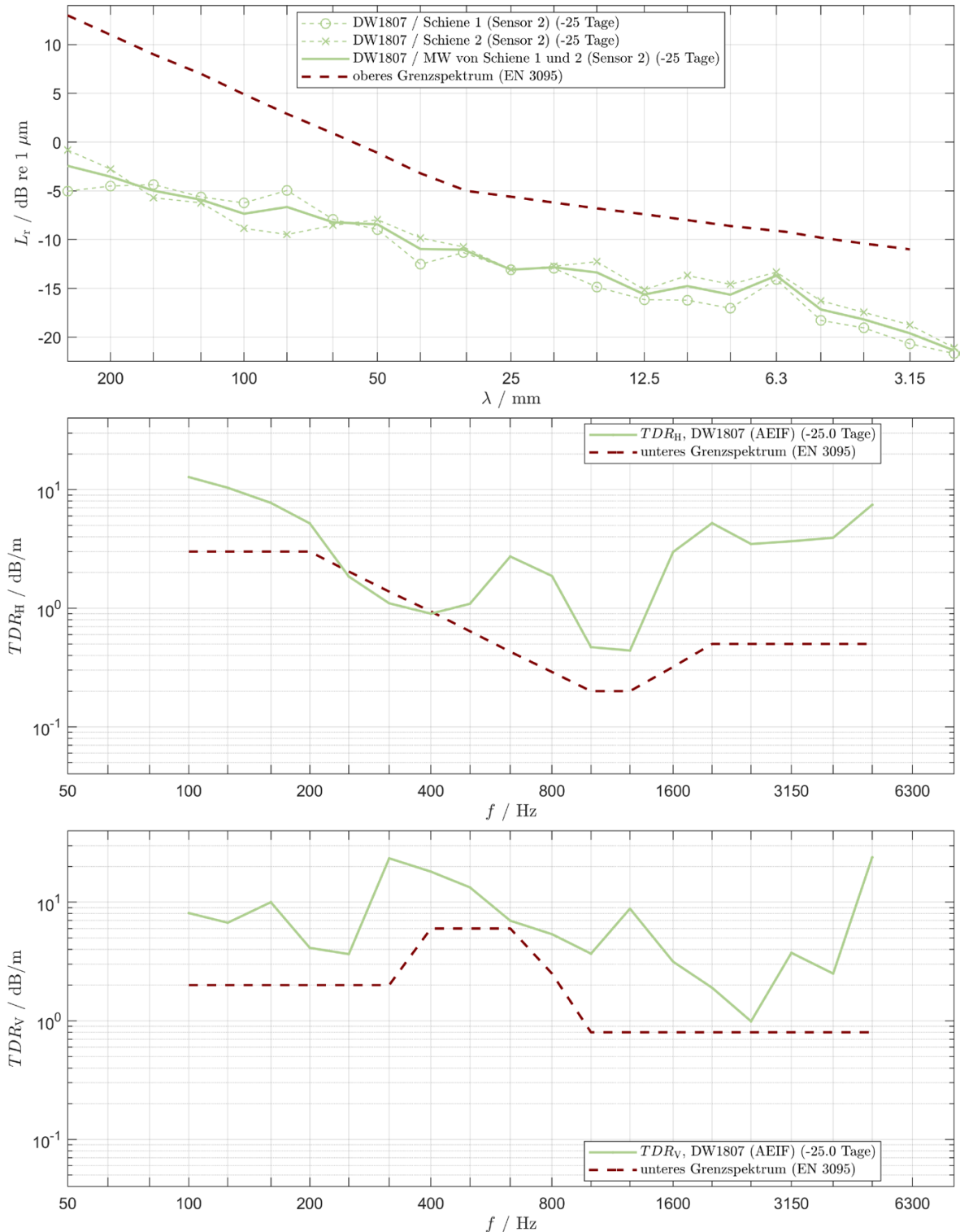


Abb. A-5: akustische Schienenrauheit (oben), horizontale Gleisabklingrate (Mitte) und vertikale Gleisabklingrate (unten) der Messungen DW1807 (Details siehe Tab. 4-1) inkl. jeweils zugehöriger Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 [4] und Angabe der Zeitabstände der Erhebung zum zeitlichen Mittelpunkt der akustischen Aufzeichnungen

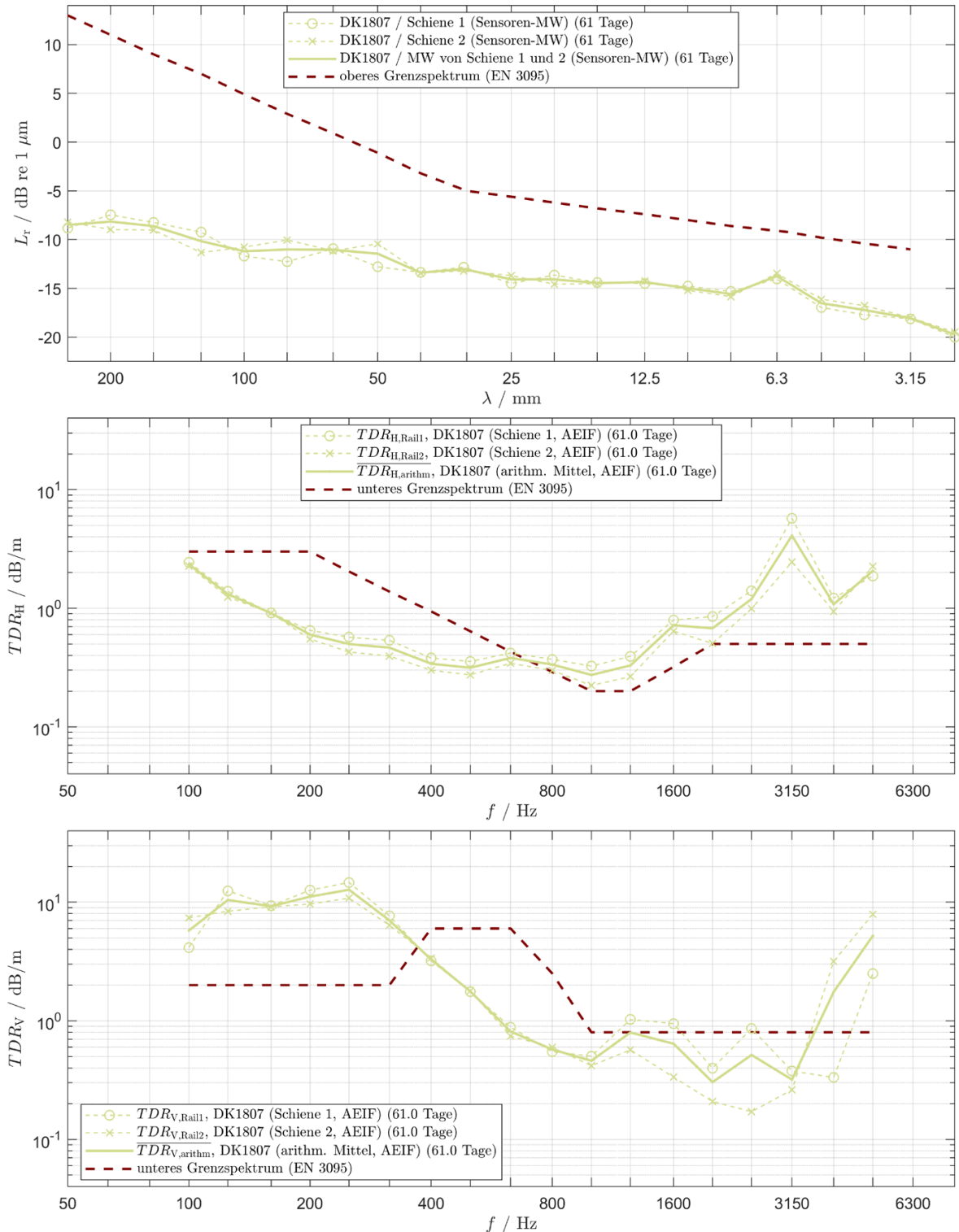


Abb. A-6: akustische Schienenrauheit (oben), horizontale Gleisabklingrate (Mitte) und vertikale Gleisabklingrate (unten) der Messungen DK1807 (Details siehe Tab. 4-1) inkl. jeweils zugehöriger Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 [4] und Angabe der Zeitabstände der Erhebung zum zeitlichen Mittelpunkt der akustischen Aufzeichnungen

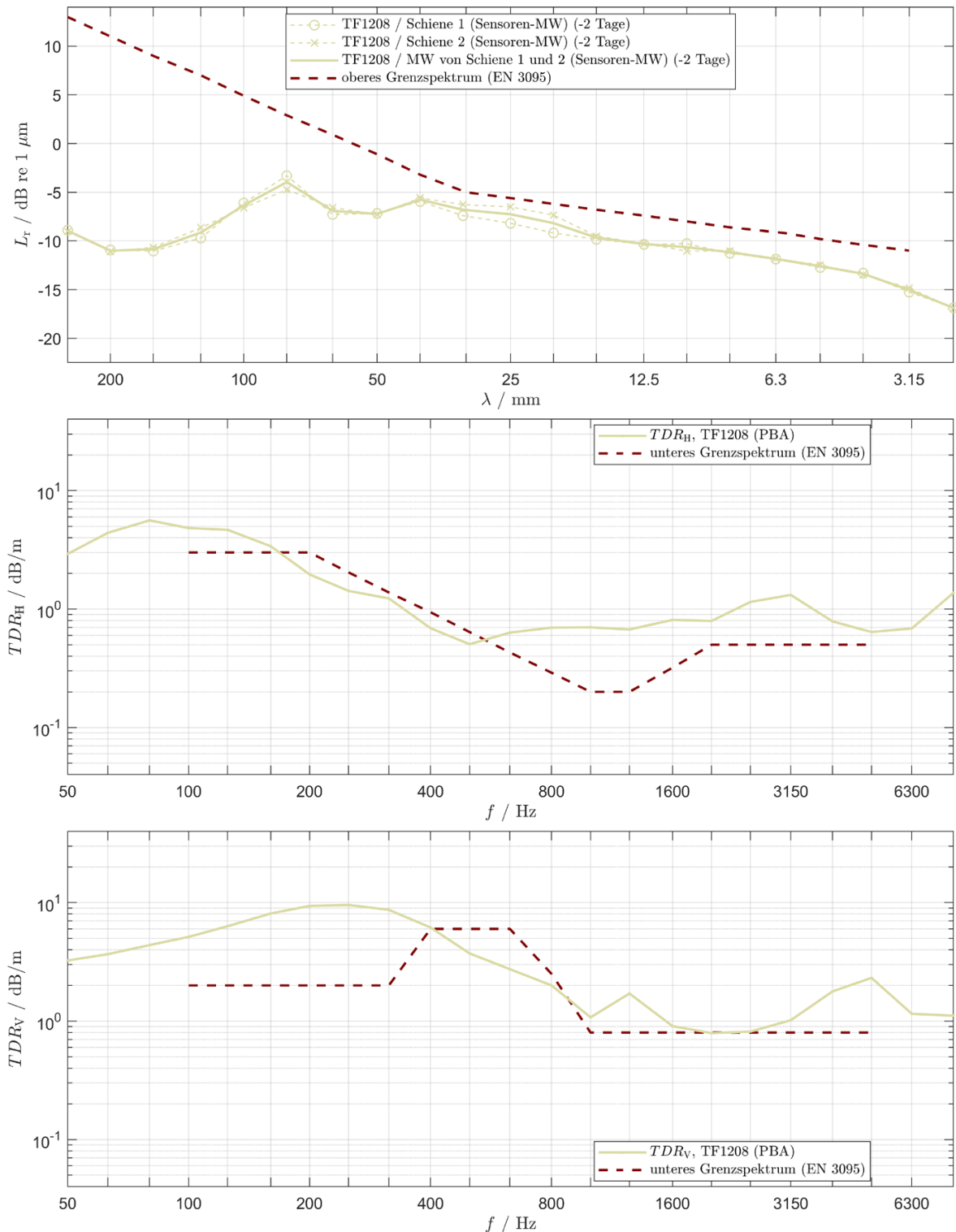


Abb. A-7: akustische Schienenrauheit (oben), horizontale Gleisabklingrate (Mitte) und vertikale Gleisabklingrate (unten) der Messungen TF1208 (Details siehe Tab. 4-1) inkl. jeweils zugehöriger Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 [4] und Angabe der Zeitabstände der Erhebung zum zeitlichen Mittelpunkt der akustischen Aufzeichnungen

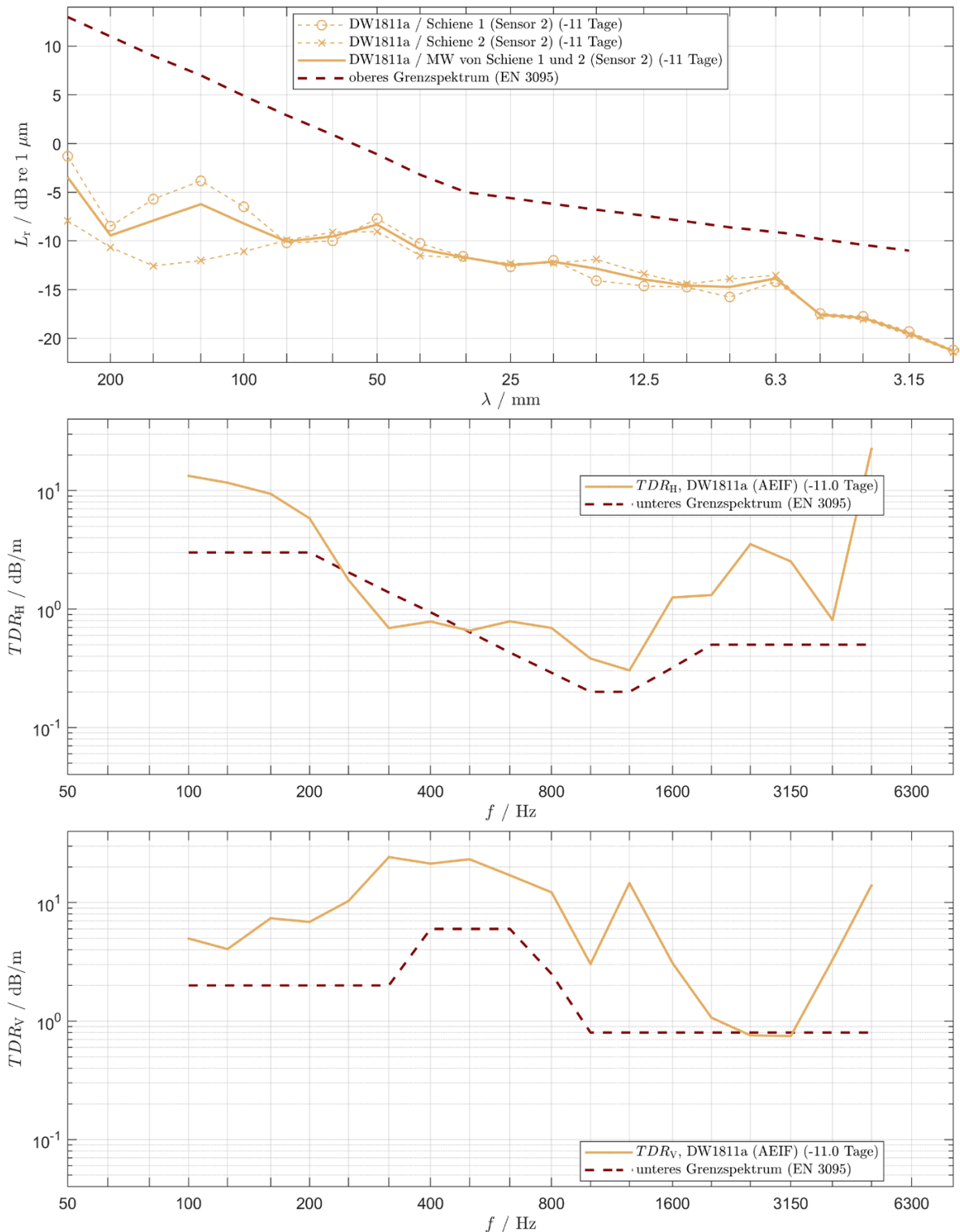


Abb. A-8: akustische Schienenrauheit (oben), horizontale Gleisabklingrate (Mitte) und vertikale Gleisabklingrate (unten) der Messungen DW1811a (Details siehe Tab. 4-1) inkl. jeweils zugehöriger Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 [4] und Angabe der Zeitabstände der Erhebung zum zeitlichen Mittelpunkt der akustischen Aufzeichnungen

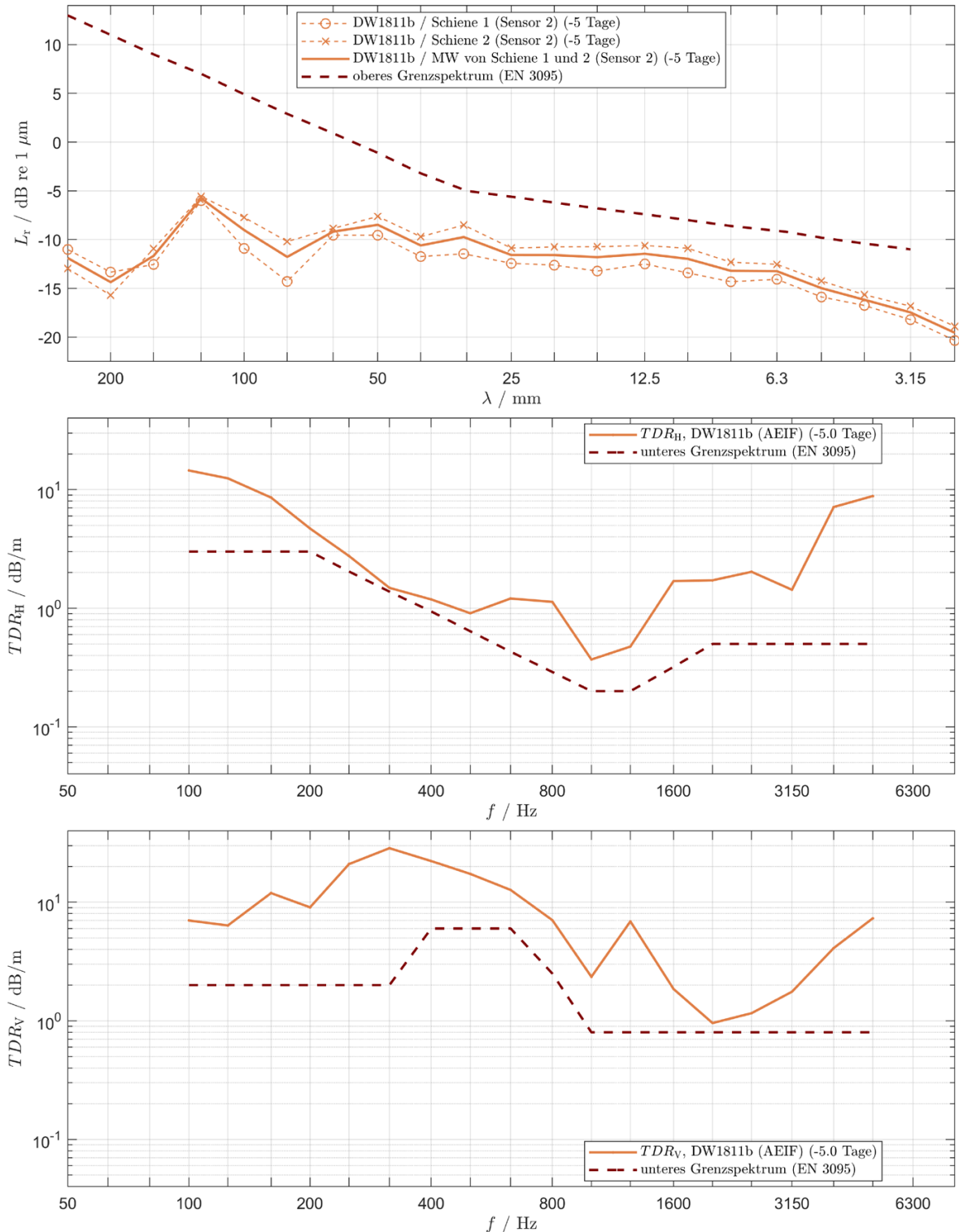


Abb. A-9: akustische Schienenrauheit (oben), horizontale Gleisabklingrate (Mitte) und vertikale Gleisabklingrate (unten) der Messungen DW1811b (Details siehe Tab. 4-1) inkl. jeweils zugehöriger Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 [4] und Angabe der Zeitabstände der Erhebung zum zeitlichen Mittelpunkt der akustischen Aufzeichnungen

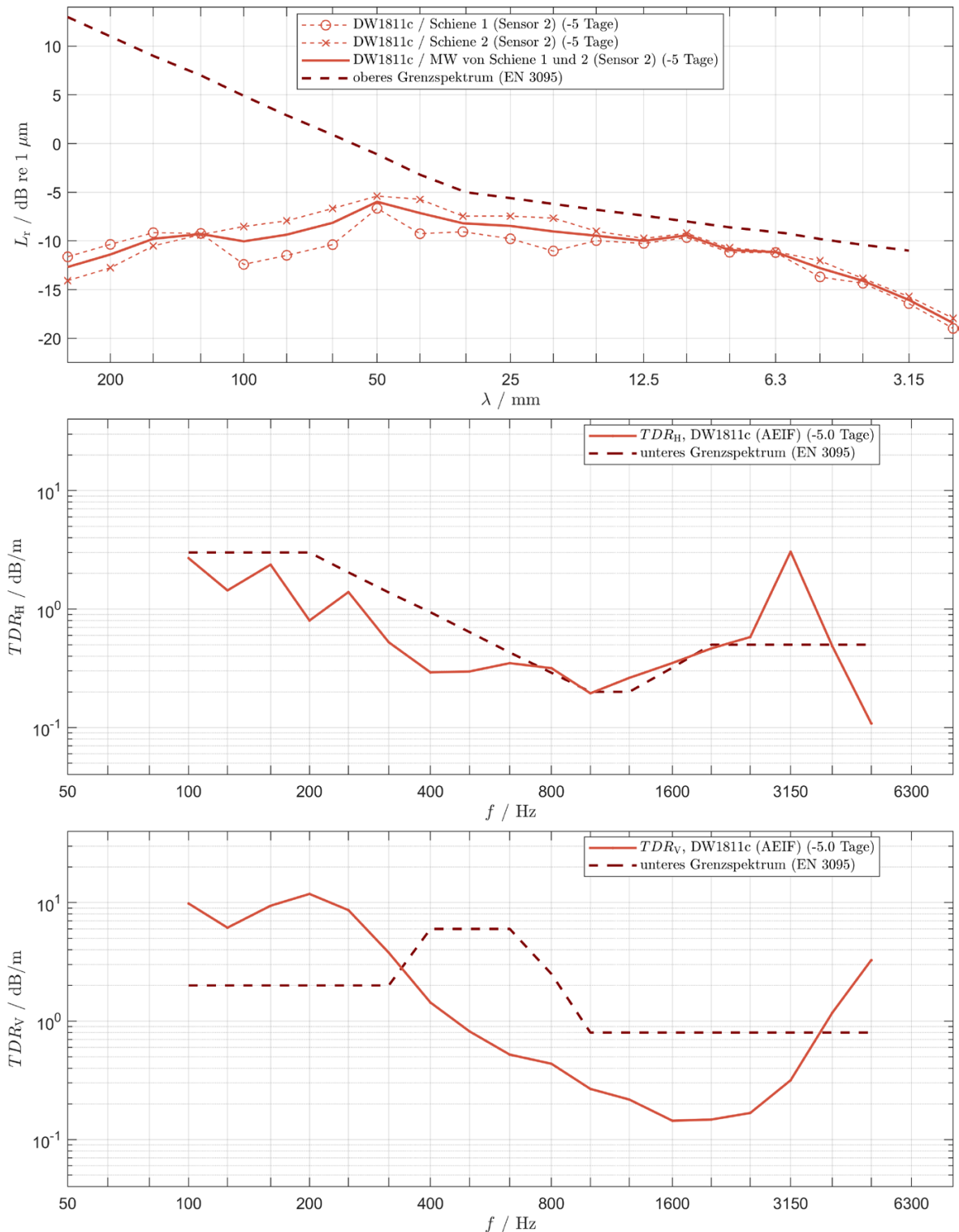


Abb. A-10: akustische Schienenrauheit (oben), horizontale Gleisabklingrate (Mitte) und vertikale Gleisabklingrate (unten) der Messungen DW1811c (Details siehe Tab. 4-1) inkl. jeweils zugehöriger Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 [4] und Angabe der Zeitabstände der Erhebung zum zeitlichen Mittelpunkt der akustischen Aufzeichnungen

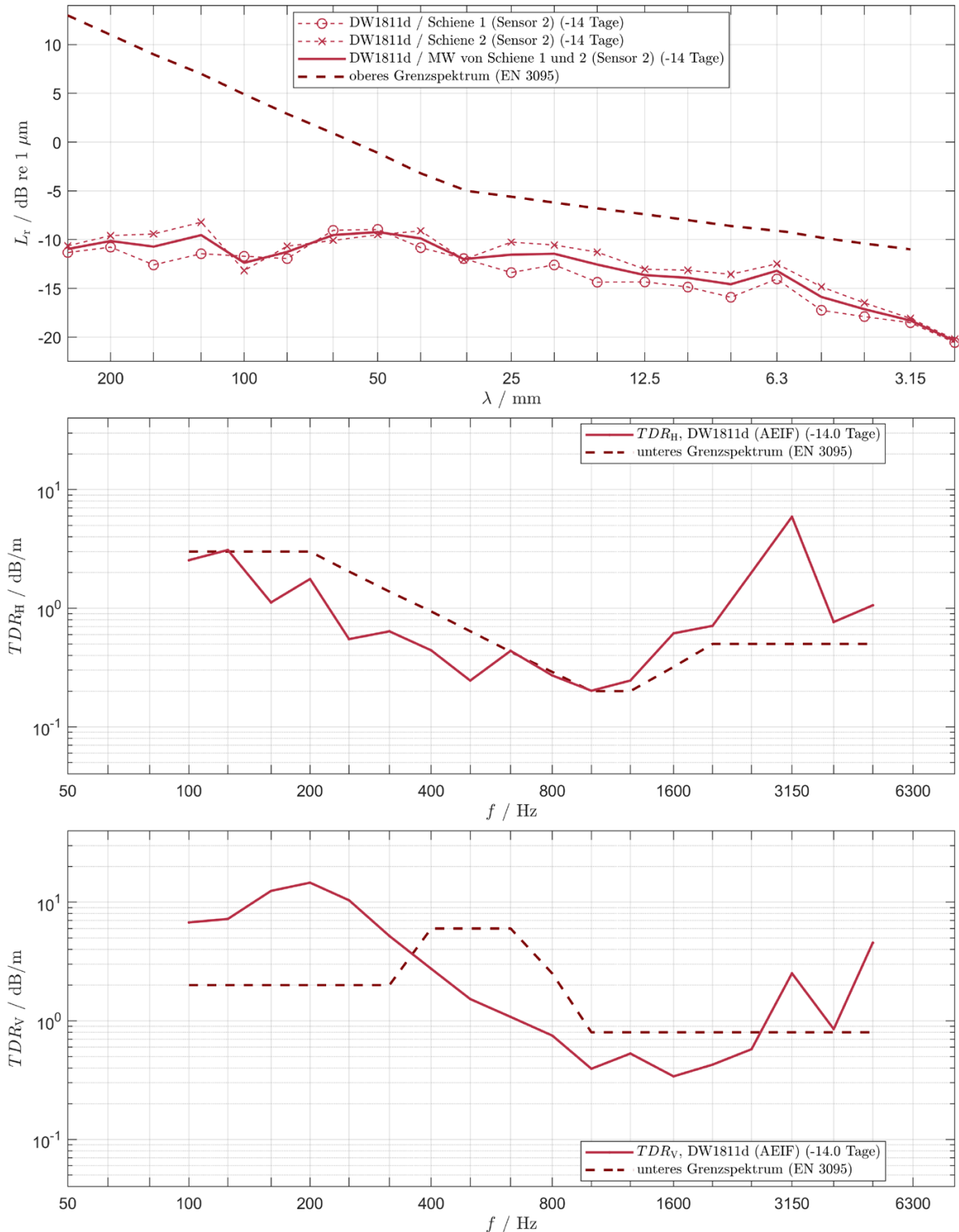


Abb. A-11: akustische Schienenrauheit (oben), horizontale Gleisabklingrate (Mitte) und vertikale Gleisabklingrate (unten) der Messungen DW1811d (Details siehe Tab. 4-1) inkl. jeweils zugehöriger Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 [4] und Angabe der Zeitabstände der Erhebung zum zeitlichen Mittelpunkt der akustischen Aufzeichnungen

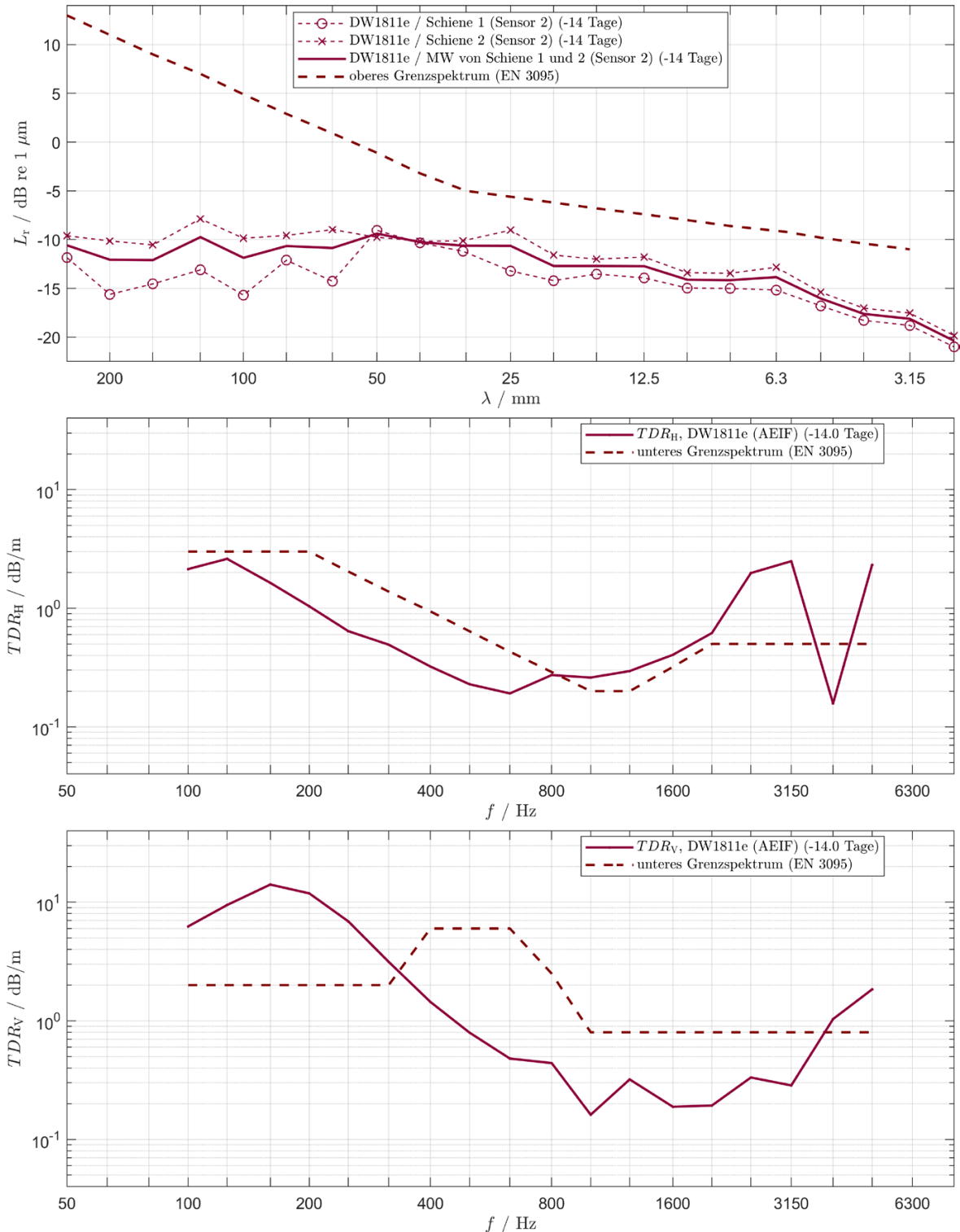


Abb. A-12: akustische Schienenrauheit (oben), horizontale Gleisabklingrate (Mitte) und vertikale Gleisabklingrate (unten) der Messungen DW1811e (Details siehe Tab. 4-1) inkl. jeweils zugehöriger Grenzspektren gemäß ÖNORM EN ISO 3095 [4] und Angabe der Zeitabstände der Erhebung zum zeitlichen Mittelpunkt der akustischen Aufzeichnungen

Anhang B Spektrale Unterschiede zwischen Messpunkten A1 und A2

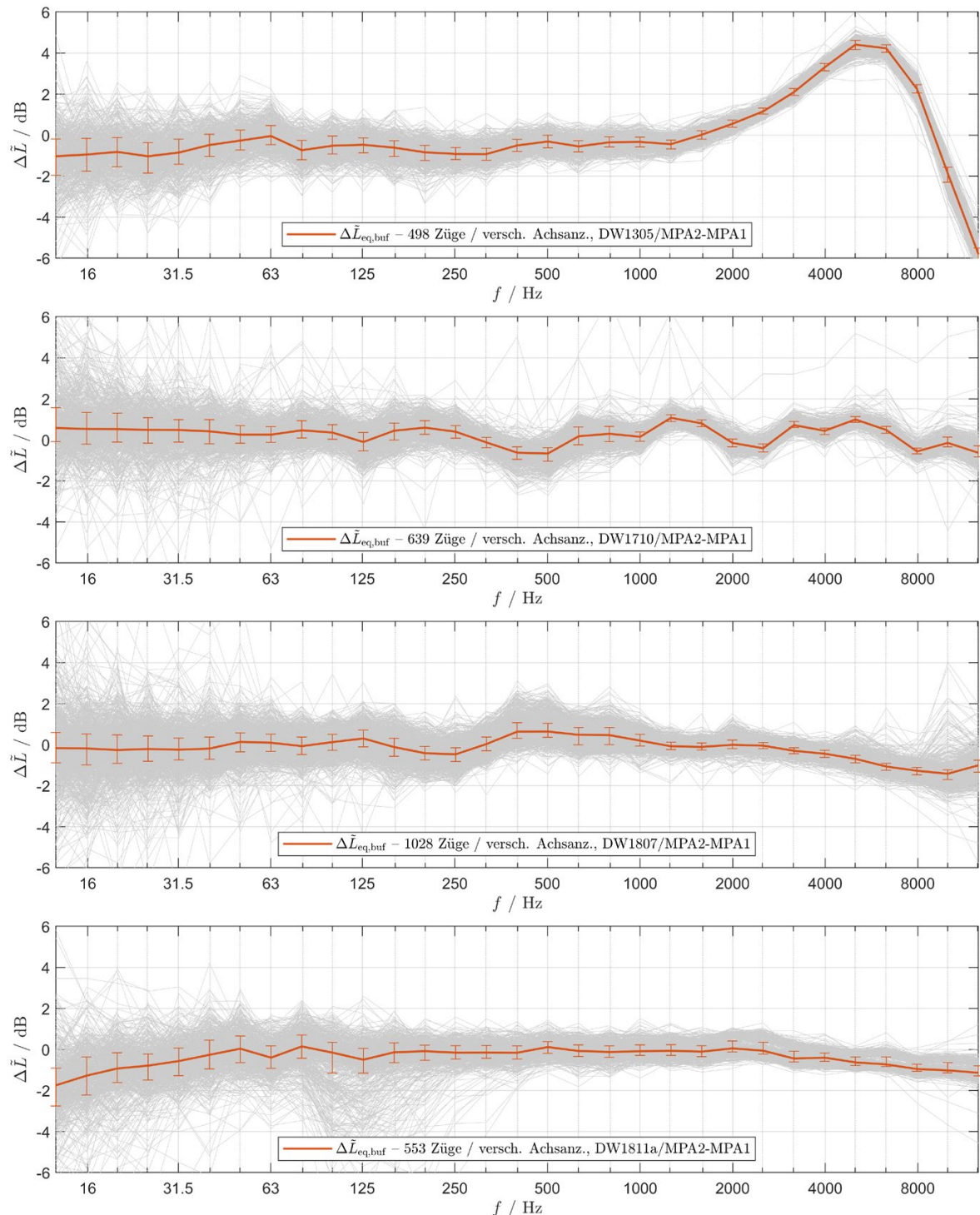


Abb. B-1: spektrale Unterschiede zwischen den von Puffer zu Puffer der passierenden Züge energetisch gemittelten Dauerschallpegeln $L_{eq,buf}$, welche in den Messpunkten A1 und A2 der Messserien DW1305, DW1710 DW1807 und DW1811a (von oben nach unten) erfasst wurden, inklusive Darstellung der Medianwerte $\tilde{L}_{eq,buf}$ und der Interquartilabstände in den Terzbändern

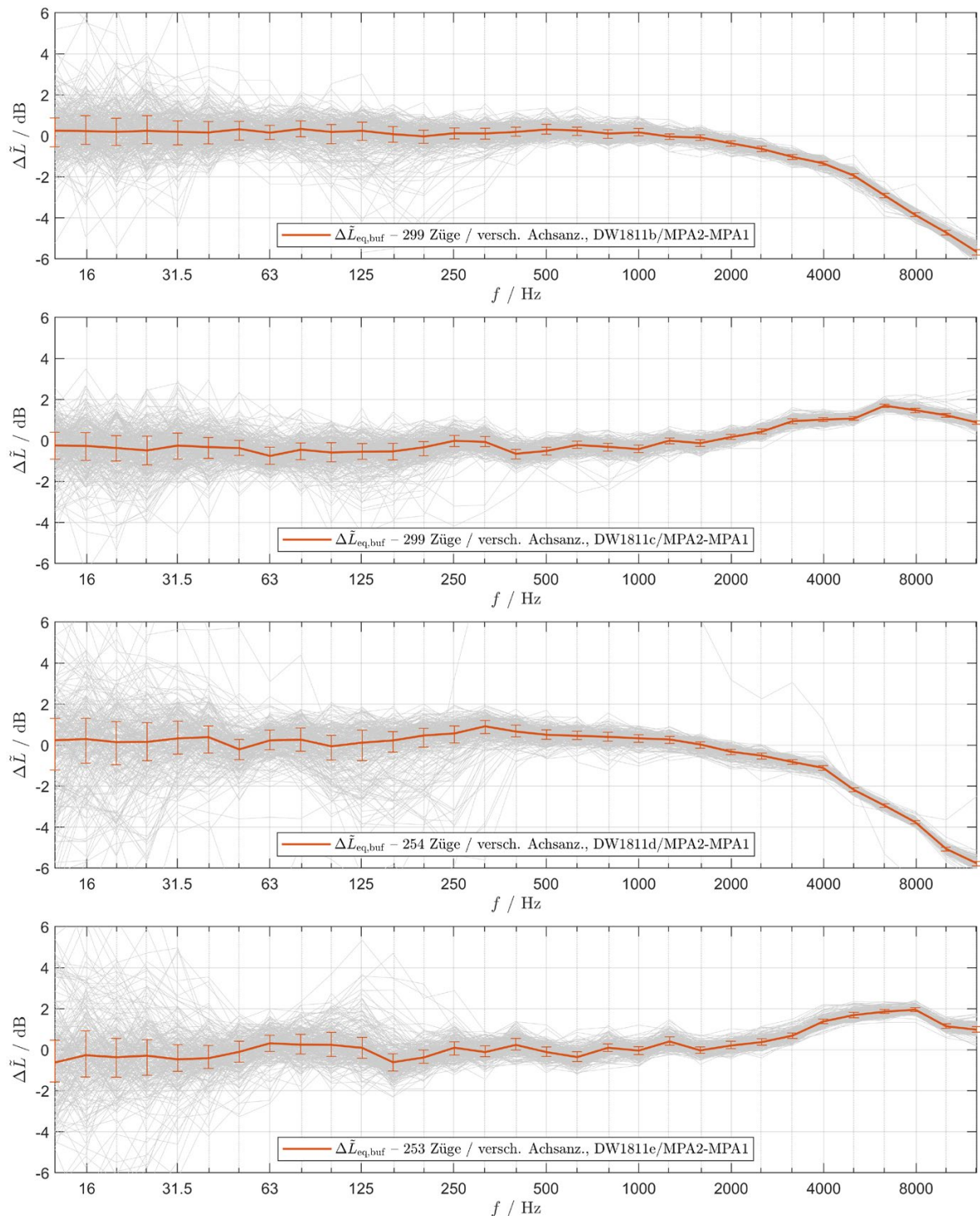


Abb. B-2: spektrale Unterschiede zwischen den von Puffer zu Puffer der passierenden Züge energetisch gemittelten Dauerschallpegeln $L_{eq,buf}$, welche in den Messpunkten A1 und A2 der Messserien DW1811b DW1811c, DW1811d und DW1811e (von oben nach unten) erfasst wurden, inklusive Darstellung der Medianwerte $\tilde{L}_{eq,buf}$ und der Interquartilabstände in den Terzbändern