TROMBIK INGENIEURE AG
Dipl. Ing. ETH/SIA/USIC
Limmattalstrasse 344
CH - 8049 Zürich

Kompetenzzentrum FAHR BAHN

Forschungsprojekt Eisenbahnlärm „Infrastruktur“ 2017
Schlupfwellen in engen Bögen

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Bundesamtes für Verkehr (BAV)

Akustische Messungen bei engen Bögen an der Strecke Leissigen – Därligen nach Oberbauerneuerung

Schienenrauheitsmessungen, Oberbauschwingungen und Schallemissionen

Schlussbericht Dezember 2019

Bericht Nr.: 17.03908.ADS.004.A

Druckdatum: 31.12.2019

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Lärm und NIS, CH-3003 Bern, und Bundesamt für Verkehr (BAV), Abteilung Infrastruktur, CH-3003 Bern.

Das BAFU und das BAV sind Ämter des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)

Auftragnehmer: Trombik AG, Limmattalstrasse 344, CH-8049 Zürich

Autor/Autorin: Ph. Huber (Trombik Ing.), St. Werner (KPZ Fahrbahn)

Begleitung BAFU: Sandro Ferrari, Fredy Fischer

Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Bundesamtes für Verkehr (BAV) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

INHALTSVERZEICHNIS

1. ZUSAMMENFASSUNG 5

2. EINLEITUNG 7

3. MESSKONZEPT 9

3.1. Einleitung 9
3.2. Schienenrauheitsmessungen 13
3.3. Messung Oberbauschwingungen und Schallemissionen 14
3.4. Termine 14

4. MESSRESULTATE 16

4.1. Schienenrauheitsmessungen 16
4.2. Messung Schallemissionen 20
4.3. Messung Oberbauschwingungen 22
4.4. Zusammenfassung und Vergleich der Messresultate der Schienenrauheiten, Schallemissionen und Oberbauschwingungen 23
4.5. Empfehlung Oberbautyp in engen Bögen aus akustischer Sicht 26

5. LITERATURVERZEICHNIS 27

ANHANG A: SCHIENENRAUHEITSSPEKTREN 28

ANHANG B: SCHALLEMISSIONEN 39

ANHANG C: SCHWINGUNGSMESSUNGEN OBERBAU 58

ANHANG D: PROTOKOLL ZUGSVORBEIFAHRTEN 63

ANHANG E: FOTOS SCHIENENKOPF UND FAHRSPIEGEL 71

ANHANG F: FOTOS SCHALLEMISSIONSMESSUNGEN 88

ANHANG G: SCHWINGUNGSMESSUNGEN OBERBAU 92

ANHANG H: MESSGERÄT APT RSA – RAIL SURFACE ANALYSER 94

ANHANG I: MESSGERÄT LUFTSCHALL 95

ANHANG J: MESSGERÄT OBERBAUSCHWINGUNGEN 96

1. ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Eisenbahnlärm-Forschungsprojekts „Schlupfwellen in engen Bögen“ wurden im BLS-Streckenabschnitt Leissigen – Därligen bei der Oberbauerneuerung vier unterschiedliche Oberbaukonfigurationen hinsichtlich Zwischenlagensteifigkeit und Schwellenbesohlung in engen Bögen mit Radien < 250 m eingebaut und mittels akustischer Messungen (Schienenrauheiten, Schallemissionen, Oberbauschwingungen) bis zu 400 Tage nach dem Schienenschleifen untersucht.

In den vier engen Bögen (zusätzlich ein kurzer Geradenabschnitt) wurden im Rahmen der Oberbauerneuerung folgende Zwischenlagen und Besohlungen eingebaut:

Abschnitt	**Länge [m]**	**km von**	**km bis**	**Radius [m]**	**Schiene Schwelle**	**Zwischenlage**	**Schwellenbesohlung**
Gleisabschnitt 0	29	20.897	20.926	Gerade	54E2 350HT B91	Zw 700-b AT C_{stat} 100 kN/mm	SLB 3007G C_{stat} 0.3 N/mm^3
Gleisabschnitt 1	141	19.462	19.603	242	54E2 350HT B91	Zw 700-b AT C_{stat} 100 kN/mm	keine
Gleisabschnitt 2	85	19.752	19.837	250	54E2 350HT B91	Zw 700-b AT C_{stat} 100 kN/mm	SLB 3007G C_{stat} 0.3 N/mm^3
Gleisabschnitt 3	129	21.167	21.296	237	54E2 350HT B91	Zw 686a C_{stat} 700 kN/mm	SLB 3007G C_{stat} 0.3 N/mm^3
Gleisabschnitt 4 (Referenz)	75	21.394	21.469	240	54E2 350HT B91	Zw 686a C_{stat} 700 kN/mm	keine

Tabelle 1-1: Parameter Oberbau nach Erneuerung, Strecke Leissigen - Därligen

Das Ziel des Projekts ist, mit mindestens einer der getesteten Oberbaukonfigurationen eine Lärmreduktion > 3 dB(A) des Fahrlärms zu erreichen, bezogen auf den Standardoberbau mit unbesohlten Schwellen und harten Zwischenlagen (Referenz Gleisabschnitt 4).

Die Schienenrauheitsmessungen, welche zu mehreren Zeitpunkten durchgeführt wurden, zeigten im Referenzabschnitt (unbesohlt, harte Zwischenlage) ab 200 Tage nach Schienenschleifen eine deutliche Schlupfwellenbildung. 400 Tage nach Schienenschleifen wurden im Referenzabschnitt 31 dB im Rauheitsspektrum bei 100 mm Wellenlänge gemessen. In den weiteren gemessenen Bögen mit weicher Zwischenlage oder Schwellenbesohlung wurde zum selben Zeitpunkt mit 23 dB respektive 21 dB eine gegenüber der Referenz um 8 - 10 dB reduzierte Schlupfwellenbildung festgestellt. Bei der Oberbaukonfiguration mit weicher Zwischenlage und Schwellenbesohlung wurden noch 10 dB gemessen und es war aufgrund der Schienenrauheitsmessungen keine Schlupfwellenbildung erkennbar.

Die Schallemissionsmessungen 200 Tage nach Schienenschleifen zeigten zudem, dass die Schlupfwellenbildung im Referenzabschnitt hinsichtlich Schallemissionen relevant ist, obschon auch fahrzeugbedingte Geräusche wie z.B. Kurvenquietschen die Ergebnisse beeinflussten. Diese sind allerdings hochfrequent (> 2 kHz) und tonal, womit sie im Spektrum gut zu identifizieren sind. Grundsätzlich ist bei leisen Zugstypen und -vorbeifahrten der Einfluss des Oberbautyps erkennbar und es zeigten sich in diesen Fällen die deutlichen höheren Schallemissionspegel im Referenzabschnitt gegenüber den anderen Abschnitten. Beim IC2000 (leiser Zugtyp) sind die Schallemissionspegel im Referenzabschnitt 200 Tage nach Schienenschleifen gut 3-7 dBA höher als in den anderen Bögen, beim ICE (lauter Zugtyp) ist hinsichtlich Schallemissionspegel kaum ein Unterschied zwischen den Abschnitten, trotz der gemessenen Unterschiede bei den Schienenrauheiten, festzustellen. Die Schallminderung der Oberbaukonfigurationen mit weicher Zwischenlage / Schwellenbesohlung gegenüber dem Referenzabschnitt ist daher abhängig vom Zugstyp und vom Zeitpunkt, da sich die Schienenrauheiten je nach Oberbaukonfiguration zeitlich unterschiedlich entwickeln.

Die Schwingungsmessungen am Oberbau zeigten in der Differenz zum Referenzabschnitt einen sehr ähnlichen frequenzabhängigen Verlauf wie die Schienenrauheiten und die Schallemissionen. Dies deutet darauf hin, dass die Oberbauschwingungen hauptsächlich durch die Schienenrauheiten (dominant gegenüber Radrauheiten) angeregt werden sowie die Schallemissionen massgeblich mitbestimmen und nicht andere Effekte die Unterschiede bei den Schallemissionen verursachen. Zudem zeigten die Oberbauschwingungsmessungen, dass die Schiene im engen Bogen aufgrund des Überhöhungsfehlbetrags im Gegensatz zur Geraden horizontal stärker schwingt als vertikal.

Für enge Bögen wird aufgrund der Messresultate aus akustischer Sicht die Oberbaukonfiguration mit weicher Zwischenlage und Schwellenbesohlung (Gleisabschnitt 2) empfohlen. In diesem Abschnitt sind im Gegensatz zu den anderen Abschnitten die Schienen auch 400 Tage nach dem Schienenschleifen noch glatt (entspricht Einzahlwert 80 km/h < 4 dB) und die Schallemissionspegel erreichten, abgesehen von witterungsbedingtem Kurvenquietschen des Regio Dosto an einem Messtag, die tiefsten Werte bei den Messungen 200 Tage nach dem Schienenschleifen. Aufgrund des Trends der zeitlichen Schienenrauheitsentwicklung in den verschiedenen Abschnitten werden die Schallemissionspegel zudem im Gleisabschnitt 2 zukünftig am wenigsten stark ansteigen.

2. EINLEITUNG

Schlupfwellen entstehen in engen Bögen verursacht durch die starren Achsen im Drehgestell, wenn die Rollradiendifferenz zwischen bogenäusserem und -innerem Rad durch Rad- und Schienenprofil nicht mehr ausgeglichen werden kann. Das bogeninnere Rad hat ab einem Bogenradius < 300 m einen kürzeren Weg als durch Drehzahl der starren Achse und Radumfang im Rad-Schiene Kontakt vorgegeben und beginnt somit auf der bogeninneren Schiene zu schlupfen. Dies führt zu einer optisch erkennbaren, regelmäßigen Wellenbildung auf dem Schienenkopf. Schlupfwellen sind plastische Verformungen. Die Erhebungen weisen aufgrund einer Gefügeumwandlung nach der Wärmeeinwirkung durch das leicht durchdrehende Rad eine höhere Festigkeit (Martensit) auf, als die benachbarten „Täler“ (Perlit). Beide verstärken sich daher weiter – sie fahren sich nicht wieder ab ([7]).
Eine weitere These zur Schlupfwellenbildung stammt von Stephanides, beschrieben in [6], wonach es sich um Schwebungseffekte im Rad-Schiene System handelt, d.h. Frequenznachbarschaften von Radsätzen und dem Gleisrost. Diese These führt zum Schluss, dass durch elastische Elemente im Oberbau wie Zwischenlagen und Schwellenbesohlungen die Schlupfwellenbildung gezielt beeinflusst werden kann.



Abbildung 2-1: Schlupfwellen in Därligen im Gleisabschnitt 4 Innenschiene am 03.9.2019

Im Radienbereich 250 – 300 m mit dem Schienenprofil 54E2 waren bisher nur Holzschwellen zulässig. Im Rahmen der Gruppe Fahrtechnik BAV/SBB/BLS/SOB wurde eine Arbeitsgruppe mit dem Titel „Erhöhte Fahrwegbeanspruchung Yqst und die Konsequenzen des Einsatzes höherwertiger Oberbaumaterialien“ gebildet. In deren Schlussdokumentation vom 04.03.2014 heisst es, dass die Einschränkung für Betonschwellen mit Schienenprofil 54E2

nicht durch mangelnde Gleisstabilität bedingt ist, sondern auf den Erfahrungen basiert, dass der im Gegensatz zum Holzschwellengleis steifere Gleisrost des Betonschwellengleises in den Radien kleiner 300 m zur Schlupfwellenbildung führt.
Prof. Eisenmann TU München ([5]) empfiehlt ein Verhältnis $\delta/y < 3\%$ (δ = sekundäre, y = primäre Biegung der Schiene) für die Reduzierung des Schienenrauheitswachstums. Dieses Verhältnis kann reduziert werden mit elastischen Elementen im Schienenoberbau wie weiche Zwischenlagen oder Schwellenbesohlung. Die Langzeiterfahrungen im Netz der ÖBB ([3], [6]) zeigten mit weichen Zwischenlagen und Schwellenbesohlungen eine reduzierte oder gar keine Schlupfwellenbildung z.B. in Scheifling (Strecke Wien – Villach). Im EU Projekt Quiet-Track (www.quiet-track.eu) basierend auf dem EU-Projekt Corrugation (www.corrugation.eu) wurden verschiedene neuartige Oberbauarten in Belgien experimentell untersucht ([4]). Die Schienenrauheitsspektren des bestehenden Oberbaus zeigten im Abschnitt S2 eine massive Schlupfwellenbildung mit Rauheitspegeln von knapp 35 dB bei 8 cm. Mit dem Einbau einer Schwellenbesohlung trat diese Schlupfwellenbildung danach nicht mehr auf, die Rauheitswerte lagen bei 8 cm noch bei 5 dB. Der Vorbeifahrtspegel (EMU Zugstypen) reduzierte sich von 88 dB(A) auf 76 dB(A), d.h. die Reduktion betrug 12 dB(A).

Basierend auf diesen Erfahrungen wurde im vorliegenden Projekt die Reduktion der Bildung von Schlupfwellen in engen Bögen ($R < 300$ m) mittels Einbau von elastischen Elementen im Schienenoberbau untersucht. Dabei wurden die bestehenden Holzschwellen durch unbesohlte oder steif besohlte Betonschwellen B91 mit weichen oder harten Zwischenlagen ersetzt. Als Teststrecke diente der BLS-Streckenabschnitt Leissigen – Därligen. Die zu untersuchenden Lösungen gegen die Bildung von Schlupfwellen wurden im Rahmen der von der BLS AG im Frühling 2018 ausgeführten Oberbauerneuerung in vier engen Bögen eingebaut. Das akustische Verhalten dieser vier Bögen im Betrieb wurde über 400 Tage mit Schienenrauheits-, Schall- und Schwingungsmessungen untersucht.
Mit diesem Projekt soll es möglich sein, den Oberbau so zu optimieren, dass die Bildung von Schlupfwellen in engen Bögen mit Anwendung von elastischen Elementen im Schienenoberbau minimiert oder gar vermieden werden kann. Gleichzeitig wird dank dem besseren Schienenzustand eine Lärmreduktion > 3 dB(A) des Fahrlärms erwartet, bezogen auf den Standardoberbau mit unbesohlten Schwellen und harten Zwischenlagen.

3. MESSKONZEPT

3.1. Einleitung

Die BLS AG führte 2018 auf der eingleisigen BLS Strecke Leissigen – Därligen eine Oberbauerneuerung durch. In diesem Streckenabschnitt hat es mehrere enge Bögen mit Radien < 250m und einen kurzen Geradenabschnitt.
Bis vor Oberbauerneuerung 2018 lag in diesem Abschnitt ein Schotteroberbau mit Holzschwellen, welcher im Rahmen der Oberbauerneuerung durch Betonschwellen B91 ersetzt wurde. In den Testabschnitten wurden im Rahmen der Oberbauerneuerung folgende Zwischenlagen und Besohlungen eingebaut:

Abschnitt	**Länge [m]**	**km von**	**km bis**	**Radius [m]**	**Schiene Schwelle**	**Zwischenlage**	**Schwellenbesohlung**
Gleisabschnitt 0	29	20.897	20.926	Gerade	54E2 350HT B91	Zw 700-b AT C_{stat} 100 kN/mm	SLB 3007G C_{stat} 0.3 N/mm^3
Gleisabschnitt 1	141	19.462	19.603	242	54E2 350HT B91	Zw 700-b AT C_{stat} 100 kN/mm	keine
Gleisabschnitt 2	85	19.752	19.837	250	54E2 350HT B91	Zw 700-b AT C_{stat} 100 kN/mm	SLB 3007G C_{stat} 0.3 N/mm^3
Gleisabschnitt 3	129	21.167	21.296	237	54E2 350HT B91	Zw 686a C_{stat} 700 kN/mm	SLB 3007G C_{stat} 0.3 N/mm^3
Gleisabschnitt 4 (Referenz)	75	21.394	21.469	240	54E2 350HT B91	Zw 686a C_{stat} 700 kN/mm	keine

Tabelle 3-1: Parameter Oberbau nach Erneuerung, Strecke Leissigen - Därligen

Da in engen Bögen, insbesondere bei Betonschwellen, Schlupfwellen entstehen können, soll eine allfällige Bildung von Schlupfwellen in den vier Abschnitten mit unterschiedlichem Oberbau messtechnisch überwacht werden. Zum Vergleich wurde auch ein kurzer Geradenabschnitt gemessen (nur Zeitpunkt T6). Mit der Reduktion von Schlupfwellen können die Instandhaltungskosten reduziert werden. Je nach Wellenlänge der Schlupfwellen und Fahrgeschwindigkeit reduzieren sich auch Lärm, Erschütterungen und abgestrahlter Körperschall. Zusätzlich wird der Fahrkomfort erhöht.

In den folgenden Abbildungen sind die Gerade und die vier engen Bögen nach Oberbauerneuerung planerisch dargestellt, inkl. gemessene Sektoren Schienenrauheit.

Sektor 1 Sektor 2 Sektor 3 Sektor 4

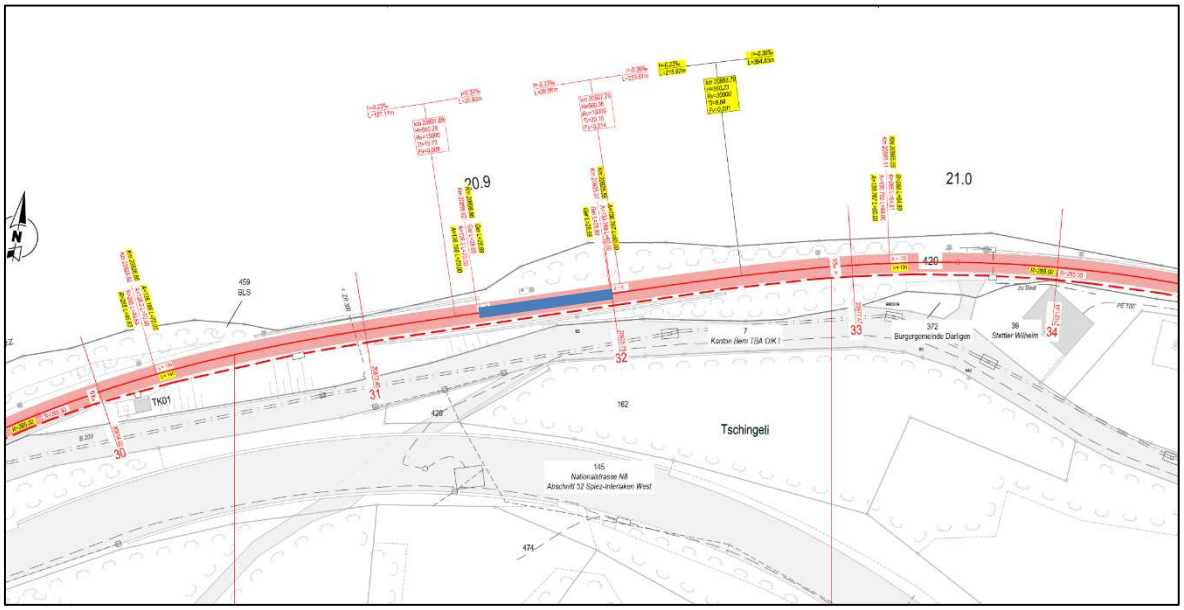


Abbildung 3-2: Gleisabschnitt 0 (Gerade) km 20.897 – 20.926

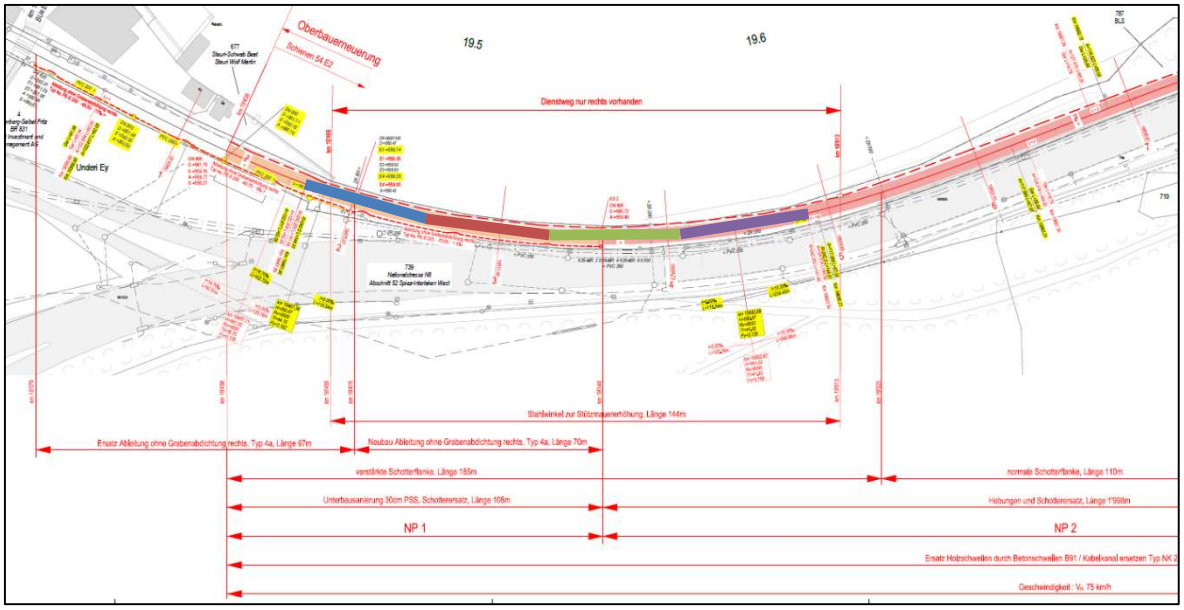


Abbildung 3-3: Gleisabschnitt 1 km 19.462 – 19.603

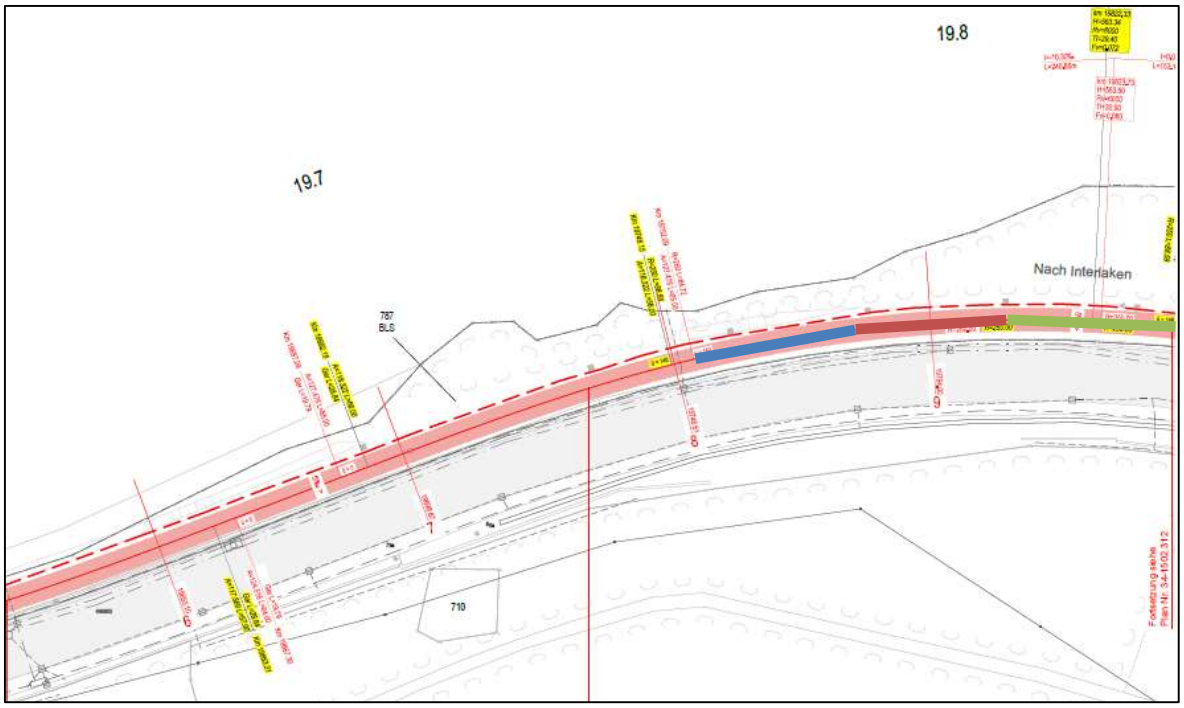


Abbildung 3-4: Gleisabschnitt 2 km 19.752 – 19.837

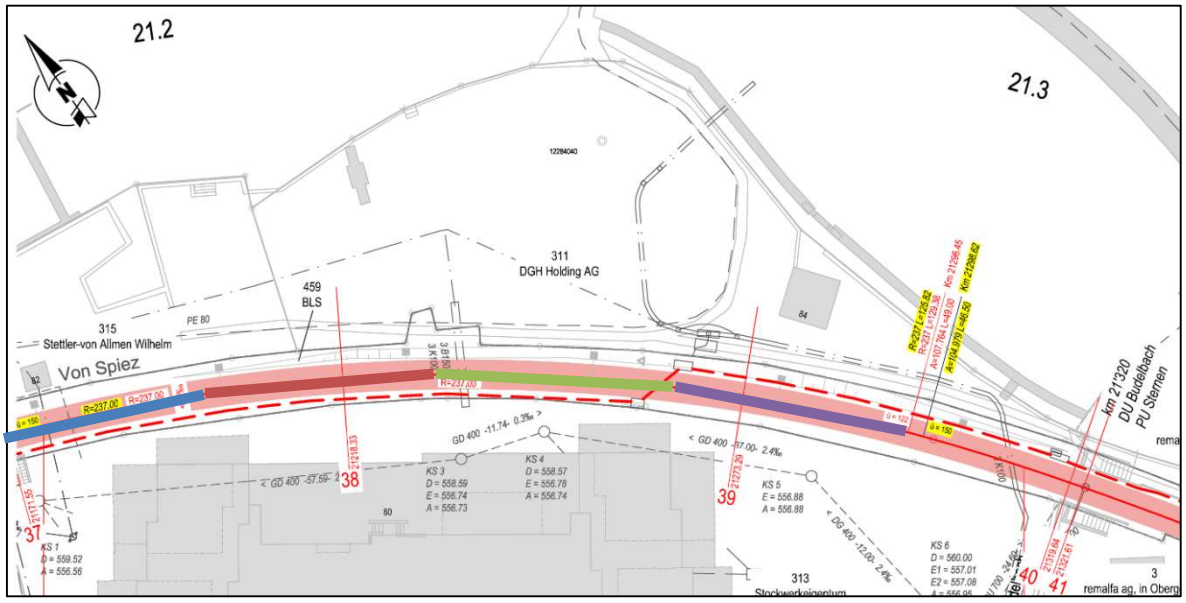


Abbildung 3-5: Gleisabschnitt 3 km 21.167 – 21.296

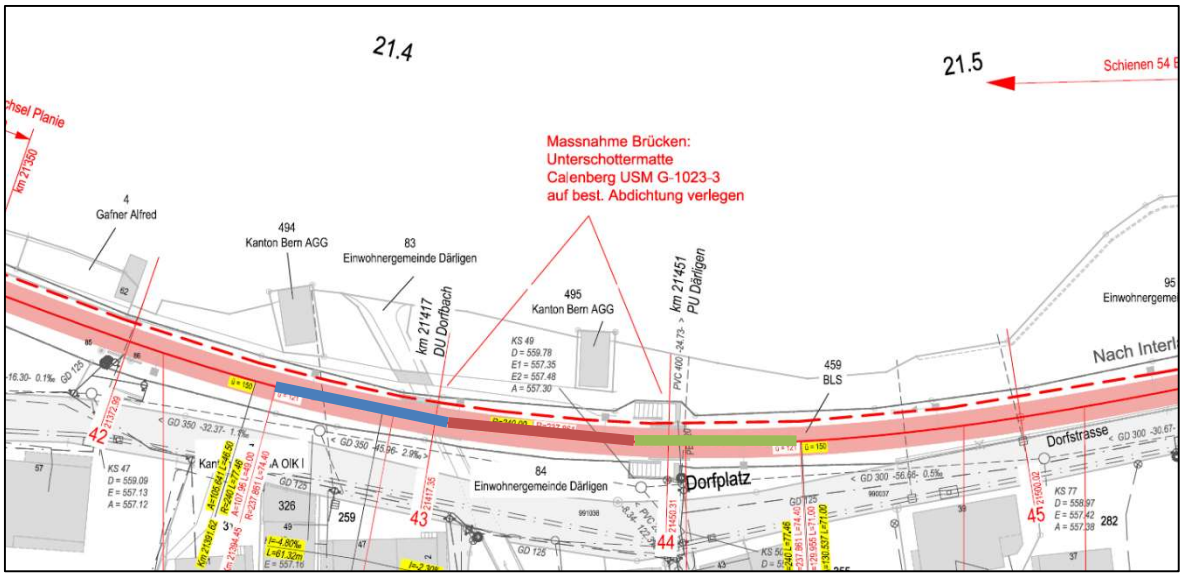


Abbildung 3-6: Referenz Gleisabschnitt 4 km 21.394 – 21.469

3.2. Schienenrauheitsmessungen

Als Messgerät wird ein Schienenrauheitsmessgerät verwendet, welches gem. EN 15610 die Ebenheit des Fahrspiegels mit hoher Genauigkeit abtastet und für einen Wellenlängenbereich von 0.25 – 40 cm geeignet ist. In diesem Wellenlängenbereich werden auch allfällige Schlupfwellen erwartet. Mit einem Messgerät, welches über die Schiene geschoben wird, wird mit drei Wegsensoren eine kontinuierliche Rauheitsmessung durchgeführt und auf einer Länge von 30 m die Rauheit des Fahrspiegels auf dem Schienenkopf ermittelt. Jeweils Innen- und Aussenschiene werden gemessen und separat ausgewertet, da die Schlupfwellenbildung auf Innen- und Aussenschiene im engen Bogen unterschiedlich verläuft. Da die Bögen zwischen 75m und 140m lang sind, werden pro Bogen drei bis vier Sektoren à 30 m ausgewertet.

Überblick Versuchsabschnitte Leissigen – Därligen:

Gleis-abschnitt	Radius	Geomtriedaten		Distanz	Sektor 1		Sektor 2		Sektor 3		Sektor 4	
		BA	BE		von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
1	243	19'462.0	19'604.0	142.0	19'462.0	19'497.9	19'497.9	19'533.8	19'533.8	19'569.7	19'569.7	19'604.0
2	250	19'752.1	19'836.8	84.7	19'752.1	19'780.3	19'780.3	19'808.6	19'808.6	19'836.8	-	
3	237	21'167.1	21'296.5	129.4	21'167.1	21'199.4	21'199.4	21'231.8	21'231.8	21'264.1	21'264.1	21'296.5
4	238	21'394.5	21'468.9	74.4	21'394.5	21'419.3	21'419.3	21'444.1	21'444.1	21'468.9	-	

Tabelle 3-7: Abschnitte und Sektoren Schienenrauheitsmessungen

Die Rauheitsmessungen in den 4 Bögen finden zu folgenden Zeitpunkten statt:

T0: Nullmessung Ausgangszustand Holzschwellen, Schienen im eingefahrenen Zustand (kein Schienenschleifen in den Monaten zuvor, Fahrspiegel gut erkennbar).

Nach Oberbauerneuerung und Schleifen der neuen Schienen, Zeitpunkt T1:

T2: 2 Tage nach T1
T3: 10 Tage nach T1
T4: 50 Tage nach T1
T5: 100 Tage nach T1
T6: 200 Tage nach T1
T7: 300 Tage nach T1
T8: 400 Tage nach T1

Auswertung:
Pro Messzeitpunkt und pro Schiene wird für jeweils eine Schienenlänge von 30 m ein mittleres Terzband-Schienenrauheitsspektrum in Funktion der Wellenlänge ermittelt, d.h. pro Bogen gibt es 3-4 Spektren pro Schiene. Pro Wellenlängenbereich wird der entsprechende Rauheitswert pro Abschnitt in Funktion der Zeit dargestellt. Damit ist erkennbar ob eine Schlupfwellenbildung stattfindet, d.h. wenn der Rauheitswert in einem bestimmten Wellenlängenbereich relativ zu anderen Wellenlängen stark ansteigt.

3.3. Messung Oberbauschwingungen und Schallemissionen

Ergänzend werden stichprobenartig zu zwei Zeitpunkten T3 und T6 bei mehreren Bögen weitere akustische Messungen durchgeführt.
Die Schallemissionen in 7,5 m Abstand und 1,2 m Höhe über SOK bogenaussenseitig (Gleisabschnitt 4 zusätzlich bogeninnenseitig) wurden zu den Zeitpunkten T3 (Gleisabschnitte 3 und 4) und T6 (alle Gleisabschnitte 0 bis 4) gemessen.
Die Schwingungsmessungen von Schiene und Schwelle (alle Gleisabschnitte 0 bis 4) wurden zum Zeitpunkt T6 durchgeführt. Die Anordnung der Sensoren am Oberbau ist im Anhang G dargestellt.
Pro Messquerschnitt wurden jeweils 20 – 30 Zugsvorbeifahrten gemessen.

Pro Bogen wurde in einem Messquerschnitt gemessen, in den Gleisabschnitten 1 und 3 wurde längs versetzt ein zweiter Schallpegelmesser positioniert.

Gleis-abschnitt	Datum Messung [1)]	Schwingungen	Schall Kanal 1	Schall Kanal 2
0	22.5.2019	Km 20‘932	Km 20‘932 Nord	
1	23./24.5.2019	Km 19‘494	Km 19‘484 Aussen	Km 19‘494 Aussen
2	23./24.5.2019	Km 19‘801	Km 19‘801 Aussen	
3	21./22.5.2019	Km 21‘229	Km 21‘229 Aussen	Km 21‘239 Aussen
4	21.5.2019	Km 21‘441	Km 21‘441 Aussen	Km 21‘441 Innen

Tabelle 3-8: Messpositionen Oberbauschwingungen und Schallemissionen, Zeitpunkt T6

[1)] Am 21.5.2019 ab Mittag wurden für einen direkten Vergleich der Gleisabschnitte 3 und 4 die Schallemissionen bei diesen zwei Gleisabschnitten simultan gemessen, ebenso am 23. und 24.5.2019 bei den Gleisabschnitten 1 und 2.

3.4. Termine

T0: Nullmessung Schienenrauheit Holzschwellenoberbau am 26.03.2018

Starttermin Umbau: 29.4.2018 - Fertigstellung Oberbauerneuerung: 15.6.2018
T1: Schienenschleifen am 06.11.2018

T2: Schienenrauheitsmessung 08.11.2018
T3: Schienenrauheitsmessung 15.11.2018, Schall 12.-13.11.2018
T4: Schienenrauheitsmessung 19.12.2018
T5: Schienenrauheitsmessung 15.02.2019
T6: Schienenrauheitsmessung 22.05.2019, Schall und Schwingungen 21.-24.05.2019
T7: Schienenrauheitsmessung 03.09.2019
T8: Schienenrauheitsmessung 10.12.2019

Fertigstellung Bericht und Projektende Ende Dezember 2019

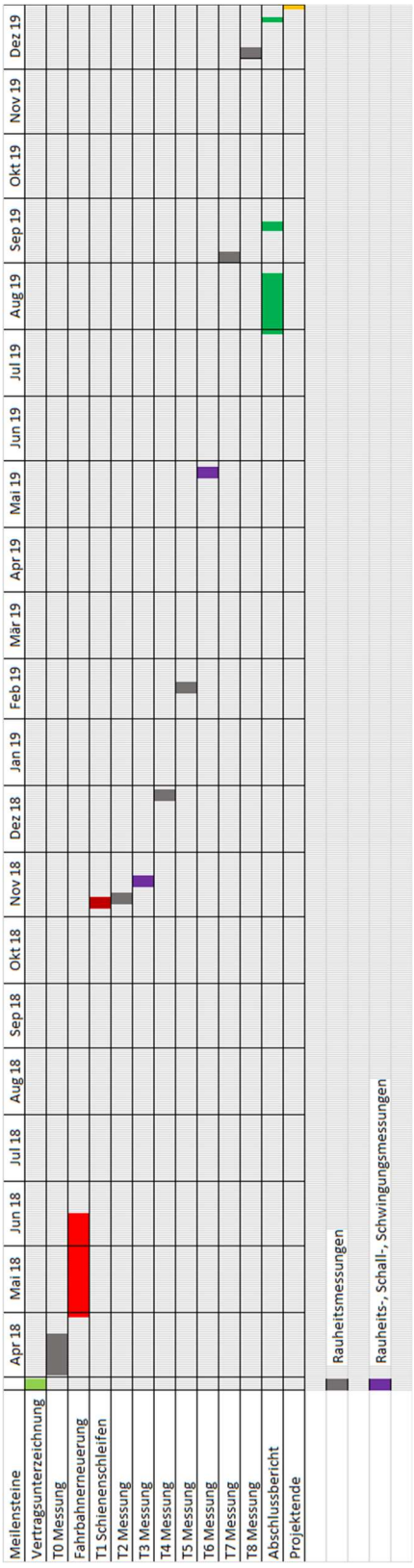


Abbildung 3-9: Terminplan

4. MESSRESULTATE

4.1. Schienenrauheitsmessungen

Die Spektren der Schienenrauheiten sind im Anhang A für den mittleren Wegsensor des Schienenrauheitsmessgeräts, welcher jeweils in der Mitte des Fahrspiegels positioniert wurde, dargestellt. Ein Diagramm zeigt jeweils pro Gleisabschnitt bzw. Bogen und Zeitpunkt T_x für Innen- resp. Aussenschiene die Rauheitsspektren der Sektoren, die jeweils 30m Länge im Bogen entsprechen. Im Anhang A5 sind die vier Bögen einander gegenübergestellt, dabei wurde jeweils das Spektrum in Bogenmitte (Sektor 2) dargestellt. Zudem zeigen *Abbildung 4-1* und *Abbildung 4-2* die Spektren Innen- und Aussenschiene der Gleisabschnitte Ga1 - Ga4 gemittelt über die Sektoren für den Zeitpunkt T8 (letzte Schienenrauheitsmessung).

Aufgrund der Schienenrauheitsmessungen in den vier Bögen zu den Zeitpunkten T0 und T2 – T8 kann folgendes festgestellt werden:

- Vor Oberbauerneuerung zum Zeitpunkt T0 (Holzschwellengleis) wurden bei allen vier Bögen hohe Schienenrauheiten registriert, insbesondere im langwelligen Bereich.
- Nach dem Schienenschleifen sind zum Zeitpunkt T2 in den Spektren die typischen Schleifriefen bei 8 mm, 16 mm und 25 mm (insbesondere Aussenschiene) erkennbar.
- Diese Spitzen infolge Schienenschleifen werden vom Zeitpunkt T2 zu T8 durch das Überrollen der Räder deutlich reduziert.
- Zu den Zeitpunkten T4 und T5 sind die Schienenrauheitsspektren aller Gleisabschnitte grösstenteils unterhalb der roten Bezugslinie der EN ISO 3095. Dies gilt auch für die Zeitpunkte T6 bis T8 für die Aussenschiene (siehe *Abbildung 4-2*), jedoch nicht für die Innenschiene (siehe *Abbildung 4-1*).
- Nach dem Zeitpunkt T4 steigen bei der Innenschiene die Spektralwerte bis T8 langwellig deutlich an, insbesondere im Referenzgleisabschnitt 4 mit Werten um 31 dB bei Wellenlänge 100 mm. Dies sind eindeutig Schlupfwellen.
- Der Gleisabschnitt 2 (weiche Zwischenlage und Schwellenbesohlung) hat bei der Innenschiene langwellig eindeutig die tiefsten Rauheitswerte zum Zeitpunkt T8.

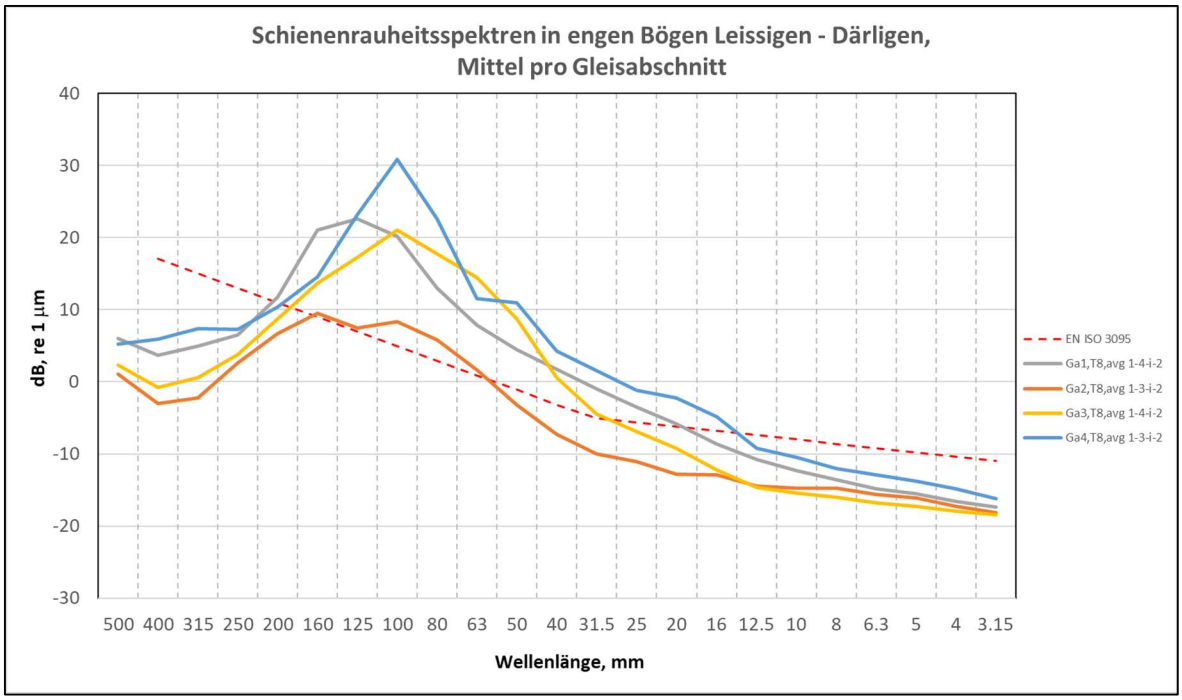


Abbildung 4-1: Schienenrauheitsspektren der vier Gleisabschnitte, Zeitpunkt T8, über die Sektoren gemittelt, Innenschiene, mittlerer Sensor 2

Erklärung Legende Diagramm:

Beispiel: Ga1,T8,avg 1-4-i-2 bedeutet Gleisabschnitt 1 (Ga1), zum Zeitpunkt T8, Mittel der Sektoren 1-4 (avg 1-4), Innenschiene (i), Sensor 2 (mittlerer Sensor im Fahrspiegel)

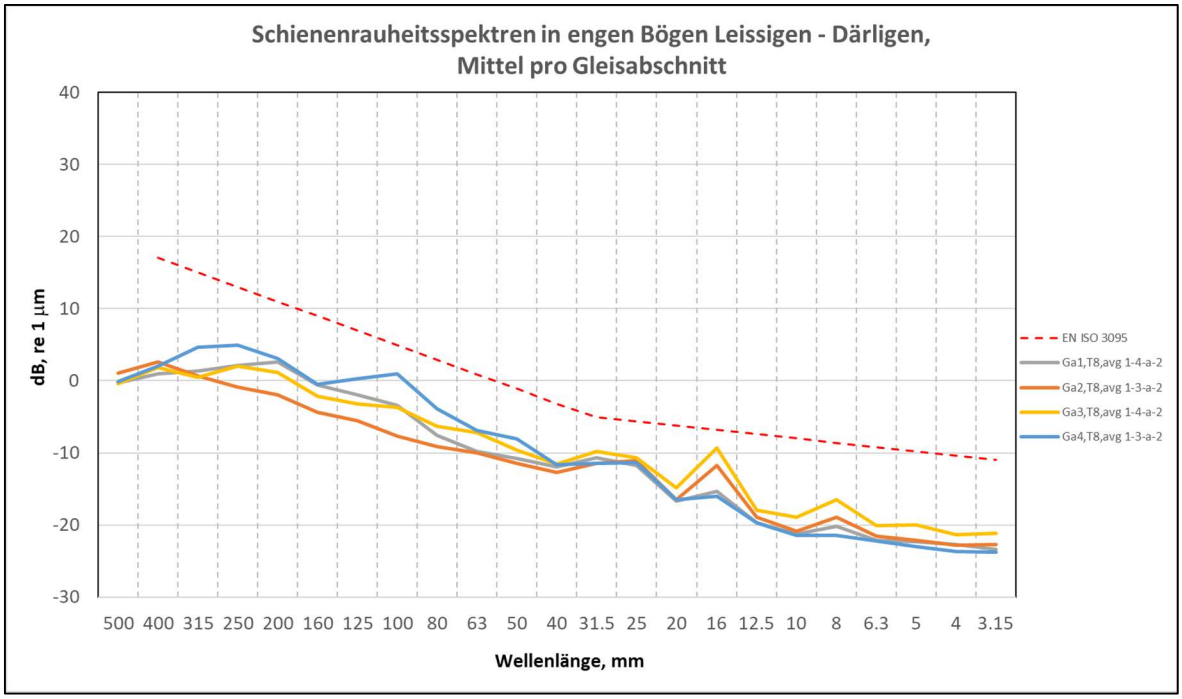


Abbildung 4-2: Schienenrauheitsspektren der vier Gleisabschnitte, Zeitpunkt T8, über die Sektoren gemittelt, Aussenschiene, mittlerer Sensor 2

In den folgenden zwei Diagrammen sind die gemessenen Einzahlwerte der Schienenrauheiten für 80 km/h für die Innen- und Aussenschiene zusammenfassend dargestellt. Werte im roten Diagrammbereich (> 10 dB) entsprechen dabei einer rauen Schiene, Werte im grünen Bereich (< 4 dB) dagegen einer glatten Schiene.

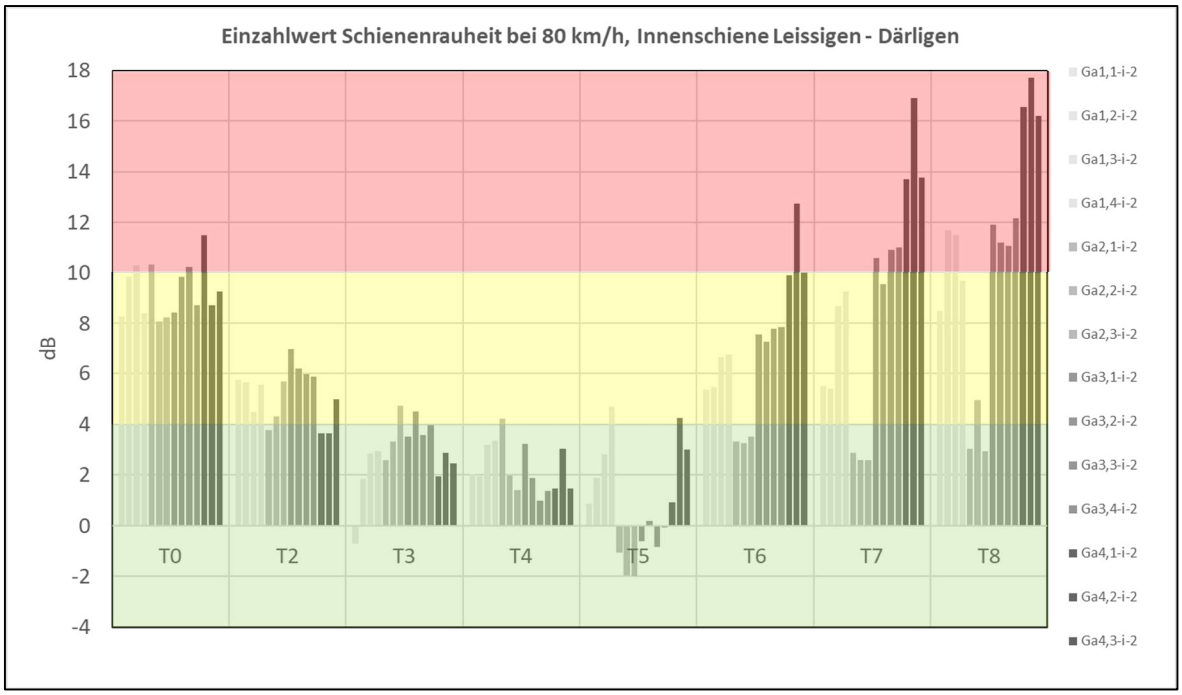


Abbildung 4-3: Einzahlwert Schienenrauheit Innenschiene

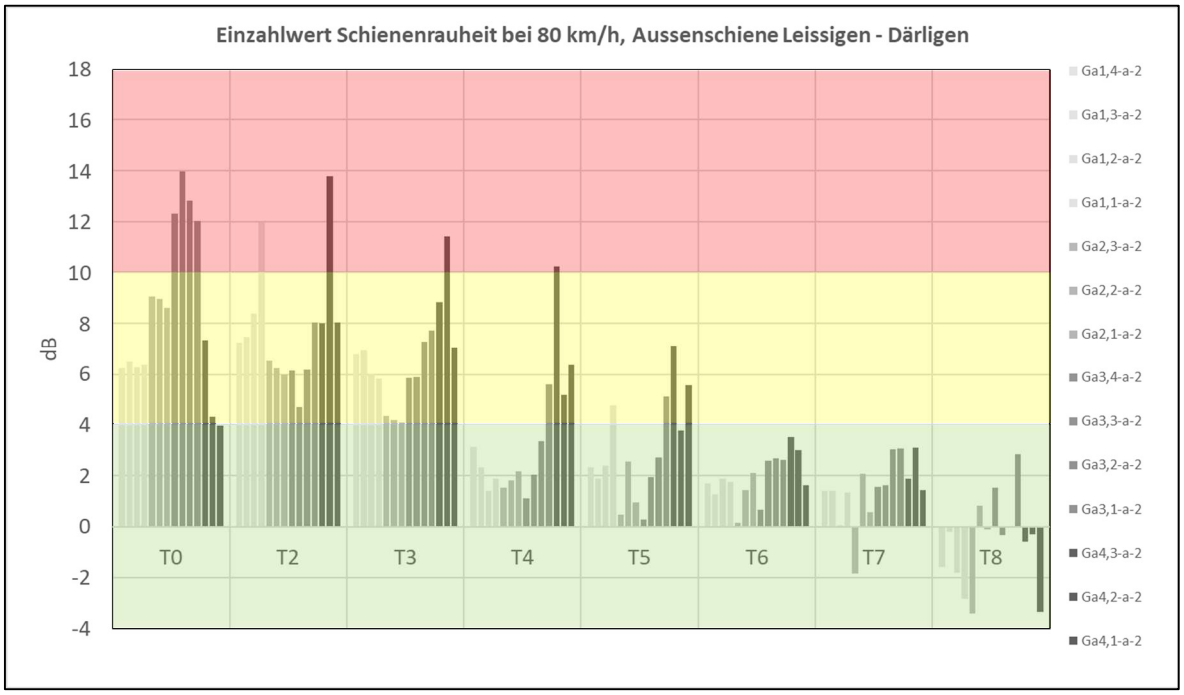


Abbildung 4-4: Einzahlwert Schienenrauheit Aussenschiene

Abbildung 4-3 und *Abbildung 4-4* zeigen hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung des Einzahlwertes für die Rauheit bei Innen- und Aussenschiene einen deutlich unterschiedlichen

Verlauf. Der Trend der Einzahlwerte bei der Aussenschiene geht mit der Zeit eindeutig in den grünen Bereich, wogegen dies bei der Innenschiene nur bis zu den Zeitpunkten T4/T5 der Fall ist, danach nehmen die Einzahlwerte jedoch deutlich zu. Zudem sind bei der Innenschiene bei T6 bis T8 die Einzahlwerte vom Gleisabschnitt bzw. vom Oberbautyp abhängig. Mit weicher Zwischenlage und Schwellenbesohlung (Ga2) ergibt sich immer noch eine glatte Schiene, bei harter Zwischenlage ohne Schwellenbesohlung (Ga4) eine raue Schiene. Die Gleisabschnitte mit weicher Zwischenlage ohne Besohlung (Ga1) und mit harter Zwischenlage mit Besohlung (Ga3) liegen dazwischen.

In den folgenden zwei Diagrammen sind die gemessenen Einzahlwerte der Schienenrauheiten für 80 km/h für die Innen- und Aussenschiene gruppiert nach Gleisabschnitten und Sektoren dargestellt. Wie bereits oben beschrieben ist auch bei dieser Darstellung in den meisten Fällen der zeitliche Trend mit der stetigen Abnahme der Schienenrauheit bei der Aussenschiene resp. die Trendumkehr und Zunahme bei der Innenschiene zu den Zeitpunkt T6 bis T8 erkennbar.

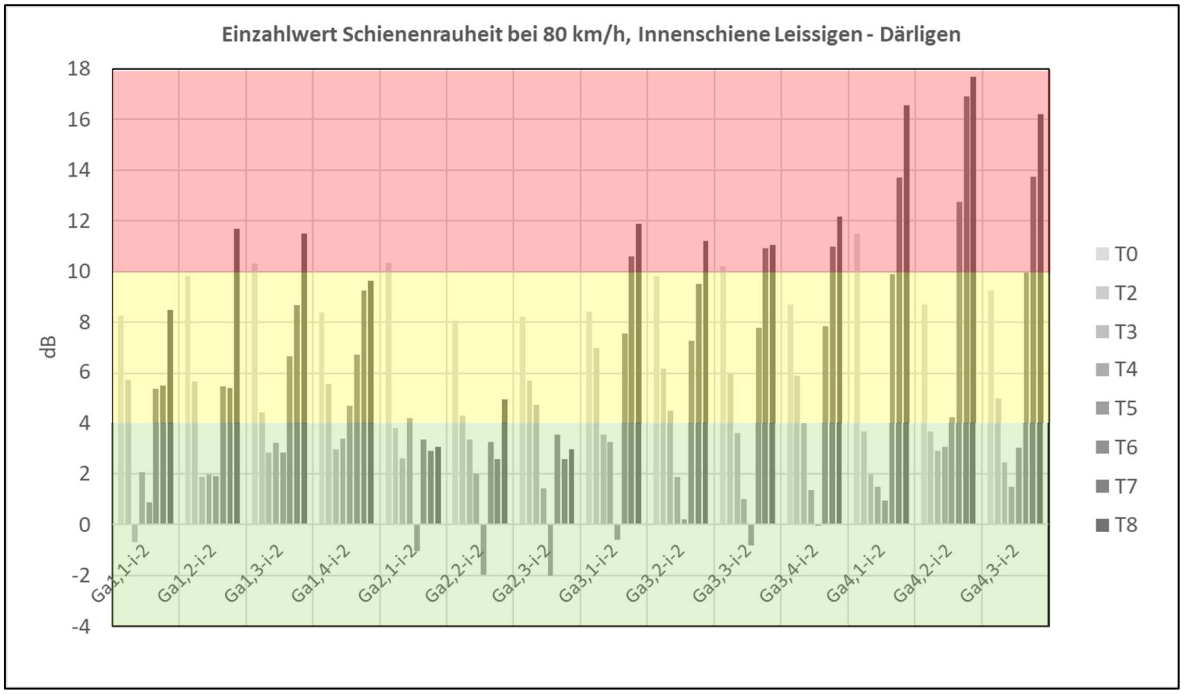


Abbildung 4-5: Einzahlwert Schienenrauheit Innenschiene

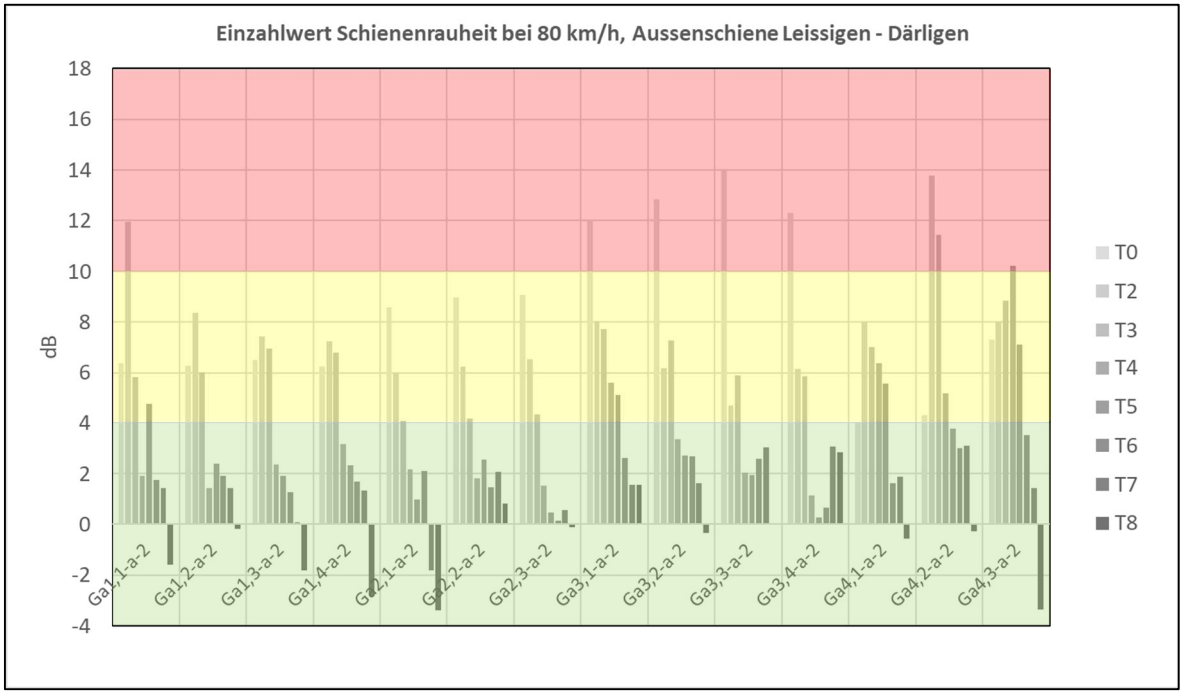


Abbildung 4-6: Einzahlwert Schienenrauheit Aussenschiene

4.2. Messung Schallemissionen

Zum Zeitpunkt T6 im Mai 2019 konnten die Schallemissionen von ca. 20 – 30 Zugsvorbeifahrten pro Bogen bei allen vier Bögen sowie auch in einem kurzen Geradenabschnitt erfasst werden. Abgesehen von Gleisabschnitt 4 konnte jeweils nur bogenaussenseitig gemessen werden, da bogeninnenseitig eine Schallmessung in 7,5 m Distanz wegen Stützmauern, See oder Bewuchs unmöglich war. Der schalltechnische Vergleich bezieht sich daher primär auf die Bogenaussenseite.

Ausgewertet und dargestellt in *Abbildung 4-7* und *Abbildung 4-8* sowie im Anhang B sind die auf 80 km/h hochgerechneten energieäquivalenten Dauerschallpegel LAeq, 80 km/h über die Vorbeifahrtszeit sowie die Terzspektren, wobei diese nicht geschwindigkeitsnormiert sind. Die pro Zugtyp dargestellten Werte sind energetisch gemittelt.

Die Züge verkehrten meist mit Geschwindigkeiten zwischen 65 und 70 km/h und wurden gruppiert in Intercity- (IC), Intercity-Doppelstock- (IC DS), ICE- (ICE), Regio- (RZ1, RZ2) und Regio-Doppelstockzüge (RZ DS). Es verkehrten nur vereinzelt Güterzüge während den Messungen. Die Personenzüge setzten sich im Detail wie folgt zusammen:

- IC: Re 460, 8-12 EW IV Personenwagen
- IC DS: Re 460, 8 IC 2000 Doppelstockwagen
- ICE: Lok vorne und hinten, 12 Wagen dazwischen
- RZ DS: Regio DOSTO / MUTZ, 4-teiliger Doppelstocktriebzug
- RZ1: Pendelzug mit Triebwagen und 3-4 Personenwagen
- RZ2: Pendelzug mit Lok Re 420 und 6 Personenwagen

Die in *Abbildung 4-7* und *Abbildung 4-8* sowie im Anhang B dargestellten Resultate der Schallemissionsmessungen lassen sich für den Zeitpunkt T6 wie folgt zusammenfassen:

- *Abbildung 4-7* zeigt, abgesehen von einzelnen Ausreissern aufgrund extremen Kurvenquietschens, dass Ga4 (Referenz) die höchsten Werte aufweist, wobei die Werte bogeninnenseitig noch etwas höher liegen als aussenseitig. Wie zu erwarten war wurden die tiefsten Werte im kurzen Geradenabschnitt Ga0 registriert.
- Die Simultanmessung Ga1 – Ga2 in *Abbildung 4-8* zeigt, dass in diesen zwei Abschnitten praktisch gleich hohe Schallemissionen gemessen wurden. Die Simultanmessung Ga3 – Ga4 zeigt bei den leiseren Zügen IC DS und RZ DS, bei denen der Oberbau schallemissionsmässig mehr zum Tragen kommt als bei lauten Zügen, für Ga3 mit Schwellenbesohlung eine Schallminderung von 4-5 dBA gegenüber der Referenz Ga4.
- Aufgrund der Resultate in *Abbildung 4-8* sind die Abschnitte Ga1 und Ga2 etwas leiser als Ga3.
- Die leisesten Züge sind der IC DS und RZ DS, sehr laut ist dagegen der ICE. Der generell leise RZ DS zeigt am 24.5.2019 im Ga2 extremes Kurvenquietschen bei 2,5 kHz (siehe Anhang B4), welches am Tag davor während der Simultanmessung Ga1 – Ga2 nicht auftrat.
- Vergleicht man die Gleisabschnitte im Frequenzbereich (Anhang B7), erkennt man die aufgrund der Schlupfwellen in Ga4 hohen Schallpegel in den tiefen Frequenzen. Die Wellenlänge der Schlupfwellen von 100 mm entspricht bei 70 km/h einer Frequenz von ca. 200 Hz.
- Anhang B13 zeigt, wie sich die Schallemissionen im Frequenzbereich bei Ga4 aufgrund der Schlupfwellenbildung zeitlich von T3 (Nov 2018) zu T6 (Mai 2019) für die Zugtypen IC DS und RZ DS entwickelt haben.
- Die Differenzen in den Schienenrauheiten bei Wellenlänge 100 mm betragen für Ga2 zu Ga4 ca. 20 dB, bei Ga1 und Ga3 zu Ga4 ca. 10 dB (siehe *Abbildung 4-1)*. Diese Differenz findet sich auch in den Schalldifferenzspektren zu Ga4 im 200 Hz-Terzband (Anhang B8) wieder.

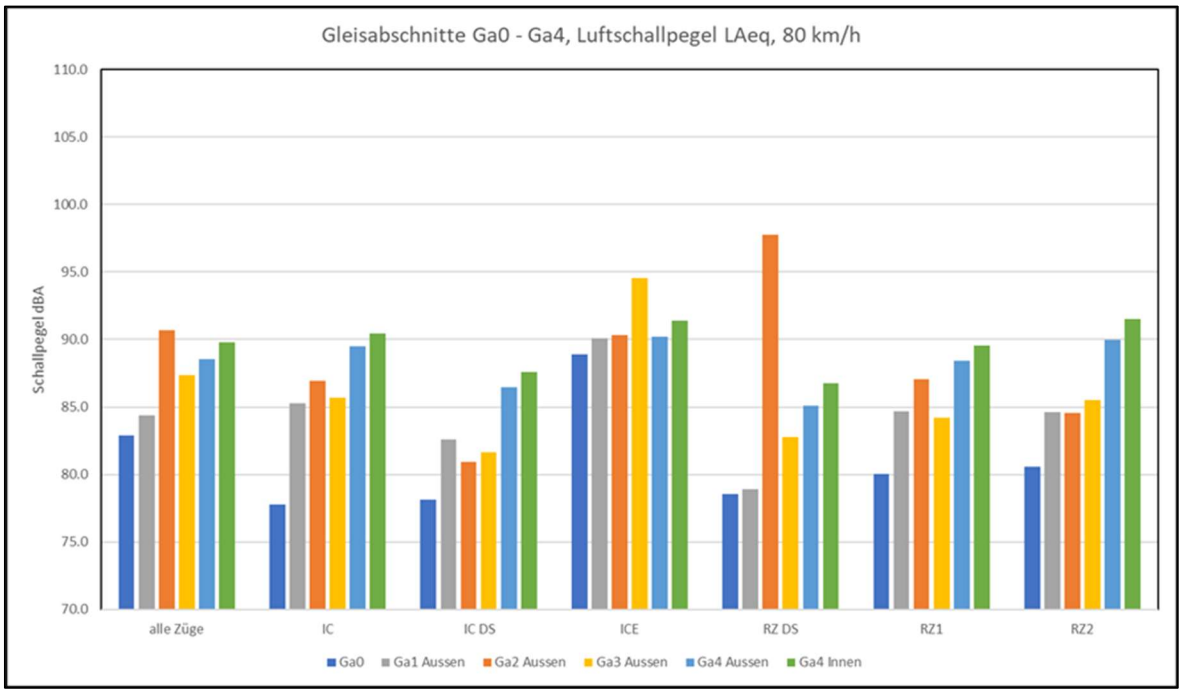


Abbildung 4-7: Schallemissionen LAeq der Zugsvorbeifahrten normiert auf 80 km/h

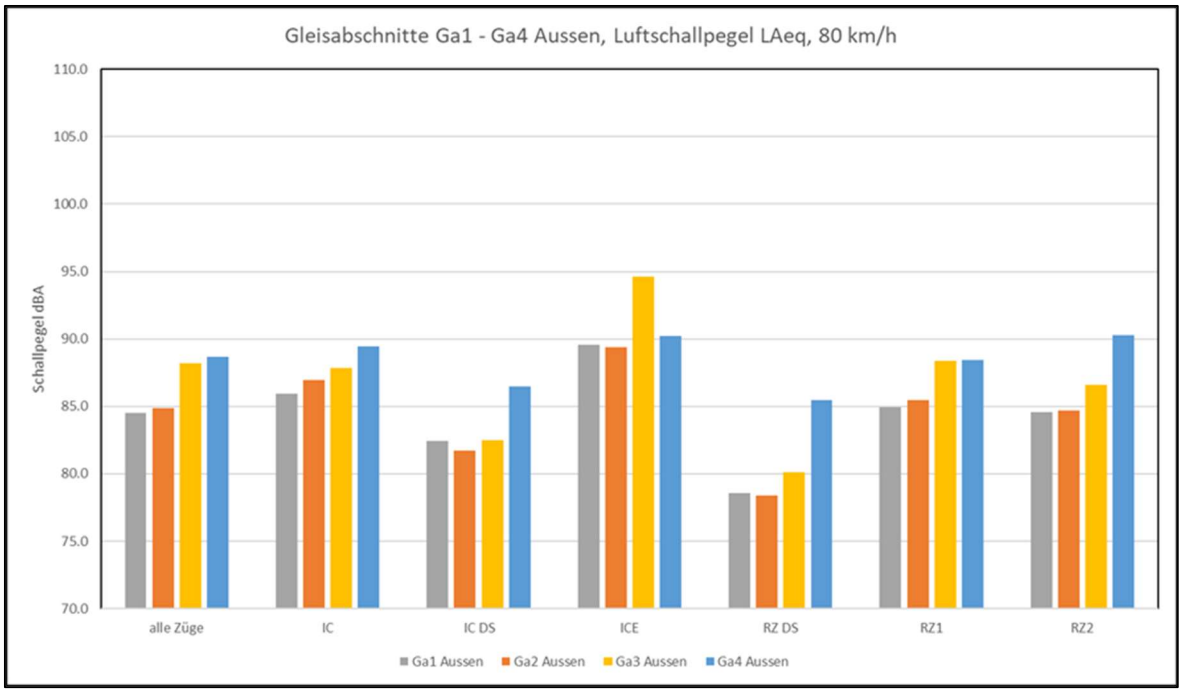


Abbildung 4-8: Schallemissionen LAeq der Zugsvorbeifahrten normiert auf 80 km/h, Simultanmessung Ga1 – Ga2 und Ga3 – Ga4

4.3. Messung Oberbauschwingungen

Zum Zeitpunkt T6 im Mai 2019 konnten gleichzeitig mit den Schallemissionen auch die Oberbauschwingungen von ca. 20 – 30 Zugsvorbeifahrten pro Bogen bei allen vier Bögen sowie auch in einem kurzen Geradenabschnitt erfasst werden. Pro Gleisabschnitt wurden die Schwingungen am Oberbau an 8 Messpunkten, 4 an der Schiene im Schwellenfach (2 horizontal, 2 vertikal) und 4 an der Schwelle (1 horizontal, 3 vertikal) mit Beschleunigungssensoren simultan aufgezeichnet. Im Anhang G ist die Anordnung der Schwingungssensoren dargestellt.

Ausgewertet und dargestellt im Anhang C sind die über alle Zugsvorbeifahrten gemittelten Terzbandspektren der Schwinggeschwindigkeit v_{rms} für die 8 Messpunkte pro Gleisabschnitt sowie die Differenzspektren zur Referenz Gleisabschnitt 4.

Die im Anhang C dargestellten Resultate der Oberbauschwingungsmessungen lassen sich für den Zeitpunkt T6 wie folgt zusammenfassen:

Anhang C1 (MP Schiene) zeigt,

- dass die Schienenschwingungen in den Bögen Ga1 – Ga4 horizontal stärker sind als vertikal.
- Umgekehrt sind in der Geraden Ga0 die Schienenschwingungen vertikal etwas stärker als horizontal.
- Bogeninnenseitig sind aufgrund der erhöhten Schienenrauheit der Innenschiene gegenüber der Aussenschiene die Schienenschwingungen deutlich stärker, nicht nur vertikal, sondern auch horizontal. Die Spitze bei Ga4 bei 200 Hz aufgrund der Schlupfwellen auf der Innenschiene zeigt sich allerdings auch auf der Aussenschiene, wird also über die Schwelle (und evtl. über den Radsatz) von Innen nach Aussen übertragen.

- Andererseits zeigt sich das hochfrequente Kurvenquietschen bei 2,5 kHz beim Doppelstock-Regionalzug im Ga2 deutlich bei der Innenschiene, jedoch nicht bei der Aussenschiene.

Im Anhang C2 (MP Schwelle)

- ist dieses Kurvenquietschen bei Ga2 auch bei allen Schwellenmesspunkten mit einer Spitze bei 2,5 kHz zu erkennen.
- Die Schwelle schwingt bogeninnenseitig (MP8z) am stärksten, tieffrequent ähnlich stark wie die Schiene.
- Mit weicher Zwischenlage unbesohlt (Ga1) schwingt die Schwelle oberhalb 200 Hz am schwächsten (schwächer als besohlte Schwelle in Gerade Ga0), dagegen die besohlte Schwelle mit harter Zwischenlage (Ga3) deutlich stärker.
- Im Ga4 wird die Schwellenschwingung, auch horizontal, von der Schlupfwellenanregung um 200 Hz dominiert.
- Die Schwellenschwingungen nehmen spätestens ab 630 Hz deutlich ab.

Anhang C3 (MP Schiene) zeigt als Differenz zur Referenz Ga4,

- dass die Schienenschwingungen horizontal in den Bögen Ga1 – Ga4 stärker sind als in der Geraden.
- Die Schienenschwingungen sind wegen den Schlupfwellen bei Ga4 in den anderen Abschnitten im Terzband 200 Hz deutlich schwächer.
- Die weichen Zwischenlagen in Ga0, Ga1 und Ga2 führen z.B. bei MP2z zu stärkeren Schienenschwingungen als die harten Zwischenlagen in Ga3 und Ga4.

Anhang C4 (MP Schwelle) zeigt

- wiederum die geringen Schwingungen bei Ga1 oberhalb 200 Hz bzw. die im Vergleich dazu verstärkten Schwingungen der besohlten Schwellen in Ga0, Ga2 und Ga3 im Frequenzbereich 250 Hz – 1,6 kHz.
- Auch die Schwellenschwingungen sind wegen den Schlupfwellen bei Ga4 in den anderen Abschnitten im Terzband 200 Hz deutlich reduziert.

4.4. Zusammenfassung und Vergleich der Messresultate der Schienenrauheiten, Schallemissionen und Oberbauschwingungen

Vergleicht man die Verläufe der Differenzen der Gleisabschnitte Ga0 bis Ga3 zur Referenz Ga4 (in dB im Frequenzbereich) der Schienenrauheits-, Schall- und Schwingungsmessungen, so erkennt man, dass sich der Verlauf der Minderung der Schienenrauheit durch elastische Elemente wie weiche Zwischenlagen und besohlte Schwellen sich grösstenteils in einem ähnlichen Verlauf der Schall- und Schwingungsminderung wiederspiegelt (siehe *Abbildung 4-9* und *Abbildung 4-10*). Dies bedeutet, dass im vorliegenden Fall die Schienenrauheit ein dominanter Einflussparameter bzw. eine dominante Anregungsquelle für Schall und Schwingungen ist. Dort wo die Kurven anders verlaufen, sind andere Einflüsse wie Gleisabklingrate oder fahrzeugbedingte Einflüsse massgebend, z.B. Kurvenquietschen bei Ga2 bei 2,5 kHz, wo die Schienenrauheit keinen Einfluss auf Schall- und Schwingungen hat. Wäre die Radrauheit die dominante Anregungsquelle, wären aufgrund der elastischen Elemente respektive der reduzierten Gleisabklingraten bei Ga0 – Ga3 die Schallemissionen und Oberbauschwingungen erhöht gegenüber Ga4.

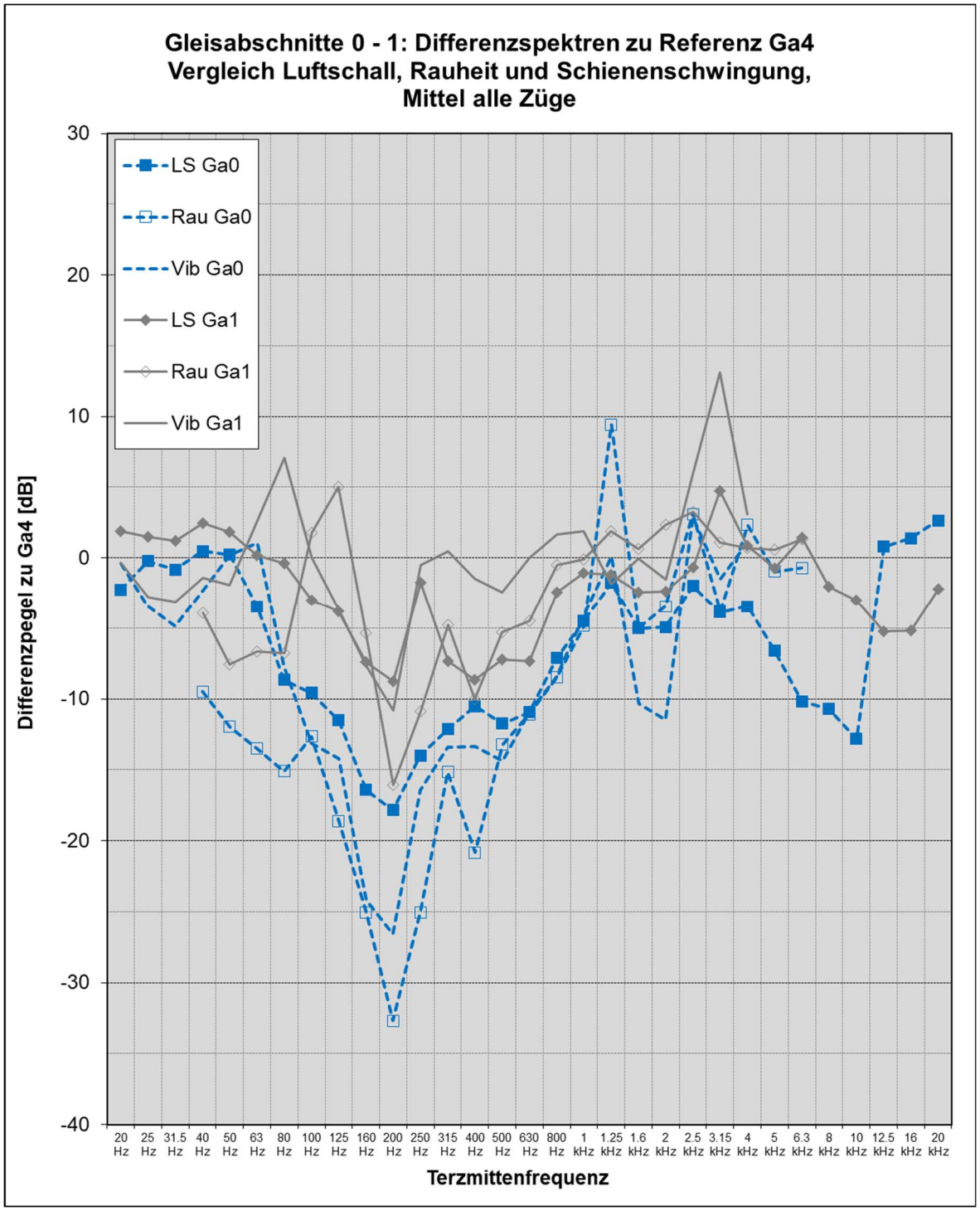


Abbildung 4-9: Vergleich der Differenzspektren der Schienenrauheit (Rau), Schallemission (LS) und Schwingungen (Vib) der Gleisabschnitte Ga0, Ga1 zur Referenz Ga4

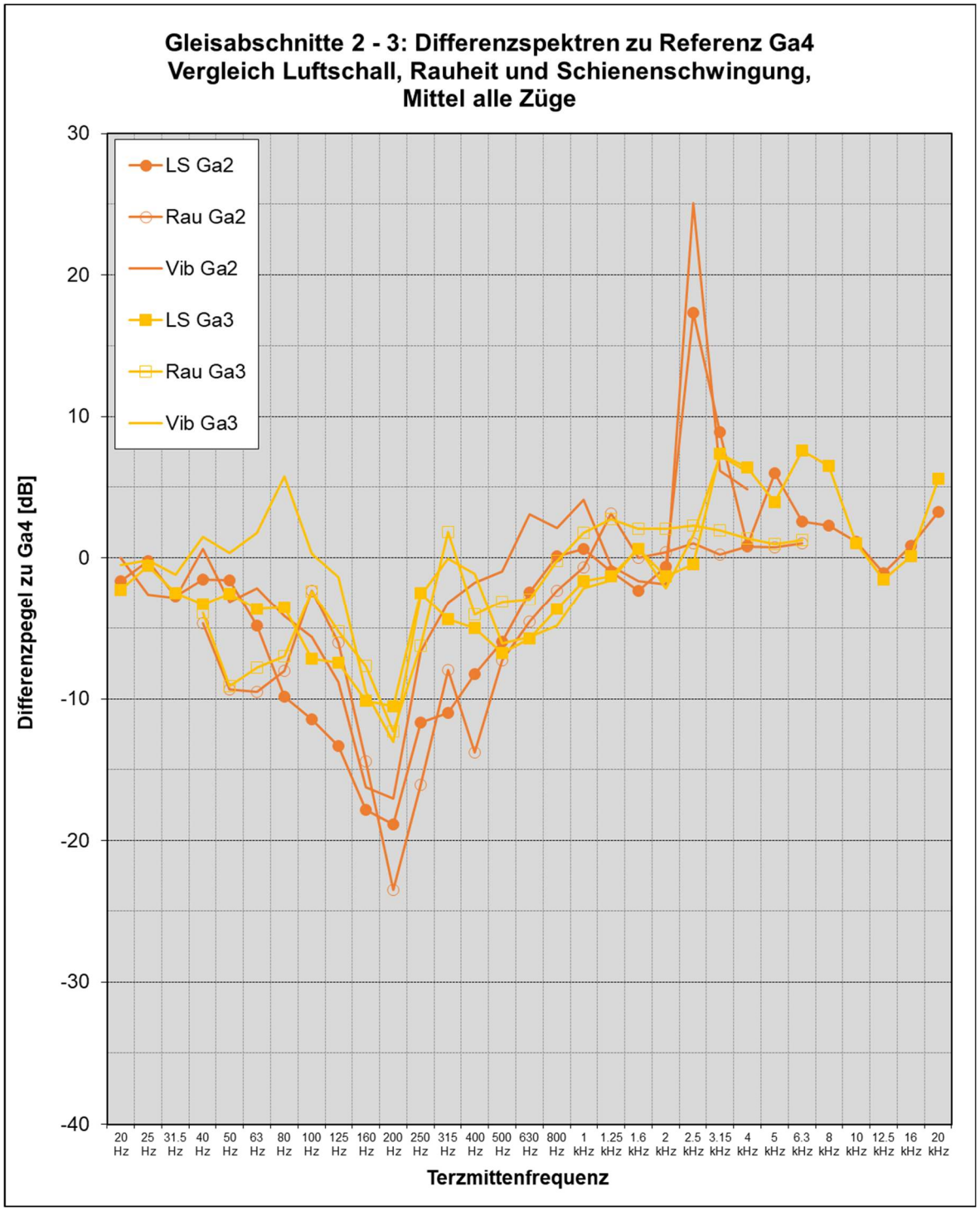


Abbildung 4-10: Vergleich der Differenzspektren der Schienenrauheit (Rau), Schallemission (LS) und Schwingungen (Vib) der Gleisabschnitte Ga2, Ga3 (rechts) zur Referenz Ga4

4.5. Empfehlung Oberbautyp in engen Bögen aus akustischer Sicht

Aufgrund der akustischen Messungen (Schienenrauheit, Schallemission, Oberbauschwingungen) 200 und 400 Tage nach Schienenschleifen (T6, T8) kann festgestellt werden, dass der Betonschwellenoberbau unbesohlt mit harten Zwischenlagen (Referenzgleisabschnitt Ga4) wegen der verstärkten Schlupfwellenbildung in engen Bögen mit Radien < 250m akustisch ungeeignet ist. Deutlich besser eignet sich der Gleisabschnitt Ga2 mit weichen Zwischenlagen (im vorliegenden Fall Typ Zw 700-b AT, Cstat ~ 100 kN/mm) und steifer Schwellenbesohlung (im vorliegenden Fall Typ SLB 3007G, Cstat ~ 0.3 N/mm^3), bei dem im beobachteten Zeitraum keine Schlupfwellenbildung auftrat. In diesem Abschnitt sind im Gegensatz zu den anderen Abschnitten die Schienen auch 400 Tage nach dem Schienenschleifen noch glatt (Einzahlwert 80 km/h < 4 dB). Aufgefallen ist in diesem Abschnitt Ga2 allerdings ein extremes Kurvenquietschen beim Regio DOSTO, welches am vorhergehenden Messtag (Simultanmessung Ga1 – Ga2) nicht festgestellt wurde und daher der Witterung als Verursacher zugeordnet wird. Abgesehen von diesem Extremfall zeigt dieser Gleisabschnitt, insbesondere bei den leisen Zugtypen die tiefsten Schallemissionspegel aller gemessenen engen Bögen. Für die leisen Züge ergibt sich eine Schallminderung von 4 - 7 dBA gegenüber dem Referenzabschnitt Ga4. Aufgrund der Simultanmessung Ga1 – Ga2 ist der Gleisabschnitt Ga1 unbesohlt mit weicher Zwischenlage zum Zeitpunkt T6 akustisch annähernd gleichwertig, wobei in diesem Gleisabschnitt eine gewisse Schlupfwellenbildung zu erkennen ist, welche sich, wie die Messung T7 bestätigt, weiterentwickelt und sich im Laufe der Zeit akustisch nachteilig gegenüber Gleisabschnitt Ga2 auswirken wird. Ähnliches gilt für den Gleisabschnitt Ga3 mit unbesohlten Betonschwellen und harter Zwischenlage, welcher eine Schlupfwellenbildung ähnlicher Grössenordnung wie bei Gleisabschnitt Ga1 zeigt.

Für enge Bögen wird daher aufgrund der Messresultate aus akustischer Sicht die Oberbaukonfiguration mit weicher Zwischenlage und steifer Schwellenbesohlung (Gleisabschnitt 2) empfohlen.

5. LITERATURVERZEICHNIS

[1] EN 15610, Bahnanwendungen – Geräuschemission – Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräusch, Comite Europeen de Normalisation, Mai 2009

[2] EN ISO 3095, Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen (ISO 3095:2013), Comite Europeen de Normalisation, August 2013

[3] Technische und wirtschaftliche Aspekte zum Thema Schwellenbesohlung – Teil 1: Langzeiterfahrungen im Netz der ÖBB, DI Florian Auer, DI Dr. Rudolf Schilder, Wien, ZEVrail 133 (2009), 4. April 2009

[4] Rolling noise and corrugation in curves: modelling and solutions, B. Stallaert, P. Vanhonacker, IWRN12, Terrigal Australia, September 2016

[5] Die Schiene als Tragbalken, Prof. Eisenmann TU München, Eisenbahningenieur, 55(5), 22-25, 2004

[6] Zur Reduktion der Schlupfwellenbildung, DI Florian Auer, EI-Eisenbahningenieur, März 2012

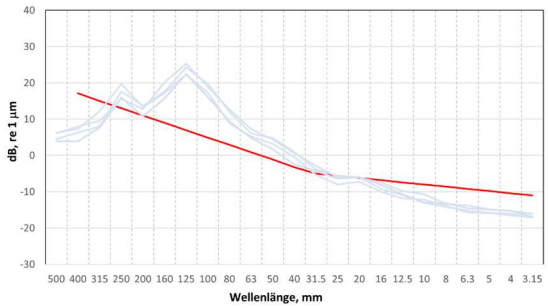
[7] https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/oberbau/schiene/verschleiss-und-schienenfehler/

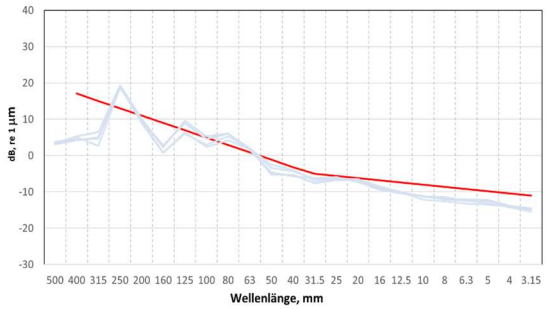
ANHANG A: SCHIENENRAUHEITSSPEKTREN

A1: Gleisabschnitt 1, mittlerer Sensor

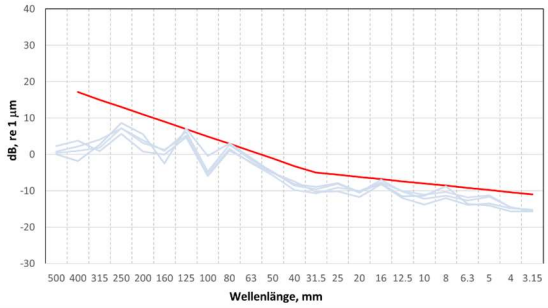
Innenschiene: Aussenschiene:

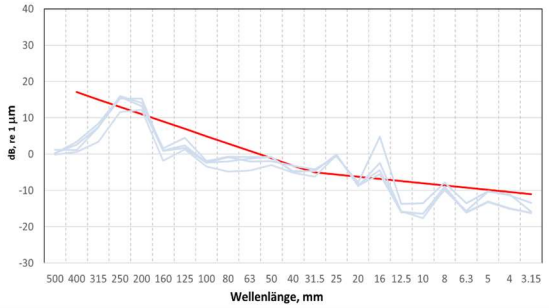
T0



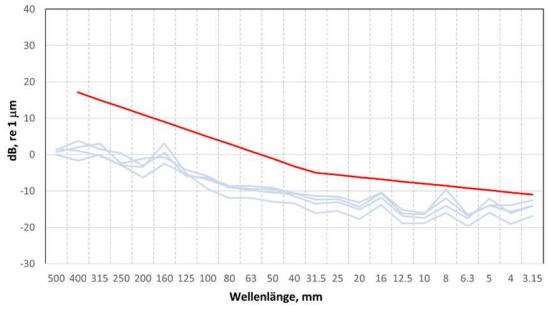


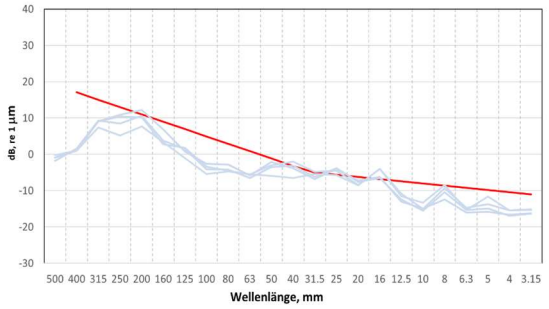
T2



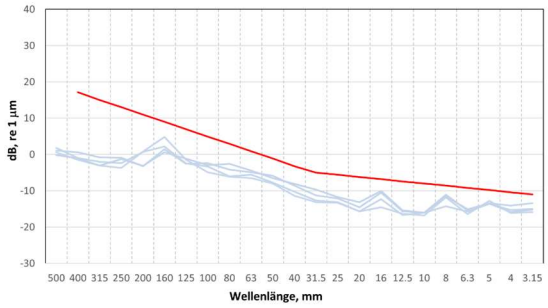


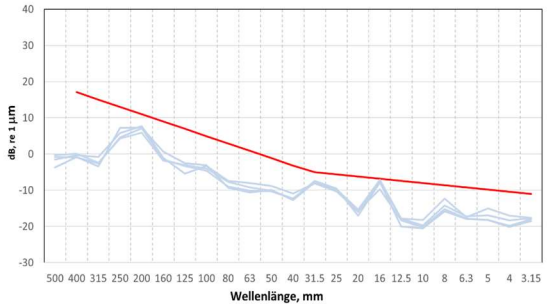
T3



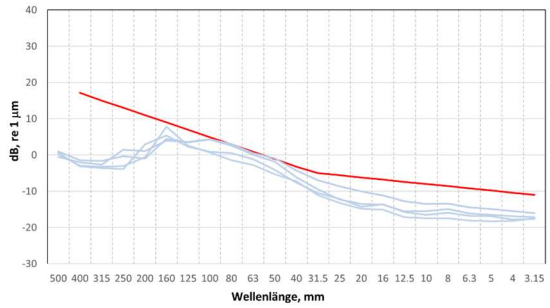


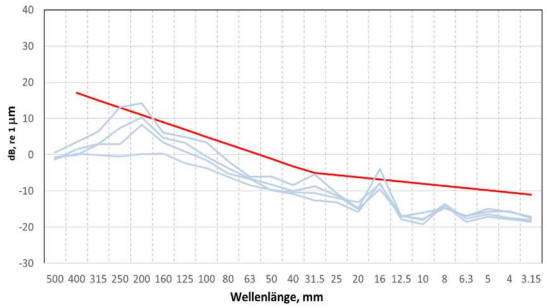
T4



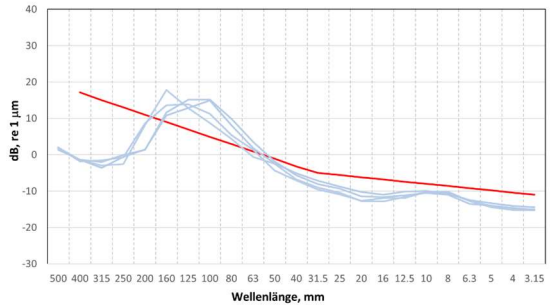


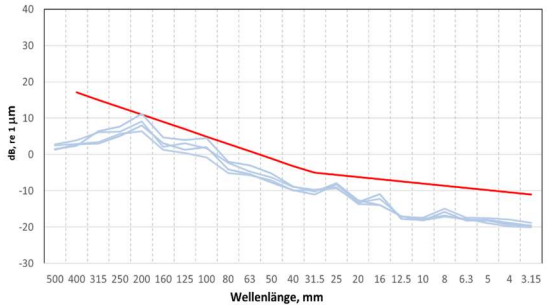
T5


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

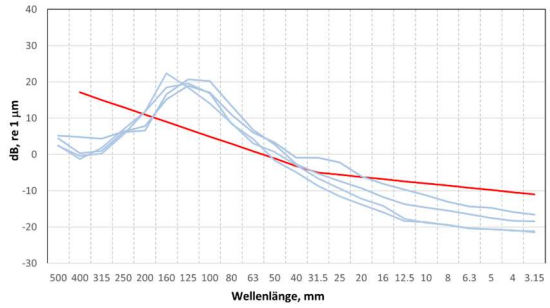

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

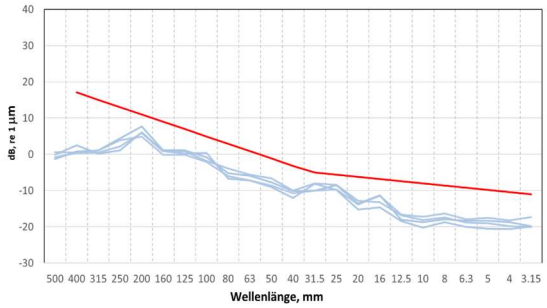
T6


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

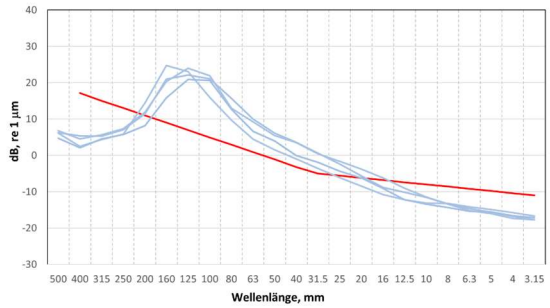

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

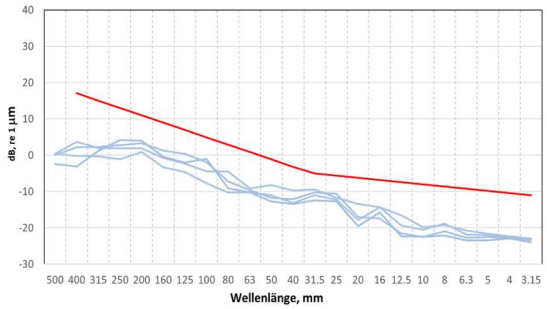
T7


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

T8

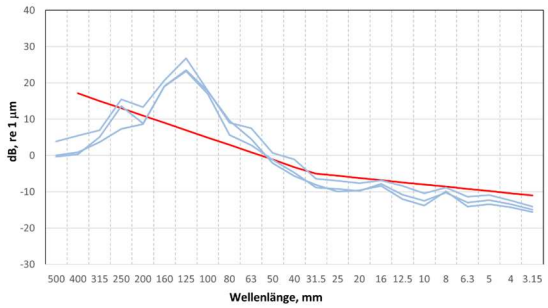

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

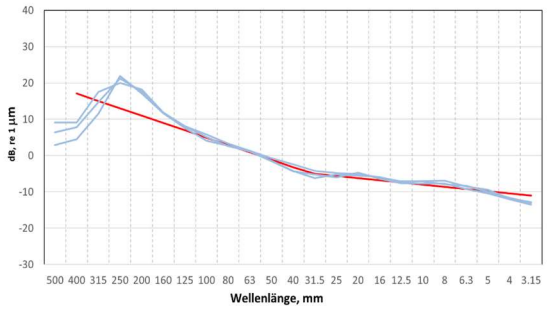

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

A2: Gleisabschnitt 2, mittlerer Sensor

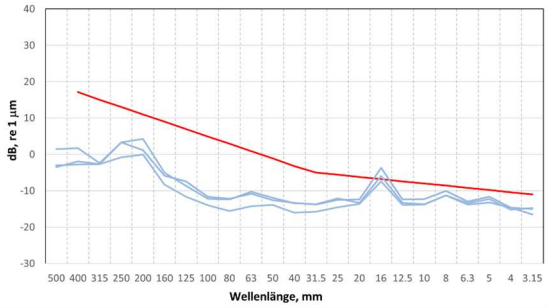
Innenschiene: Aussenschiene:

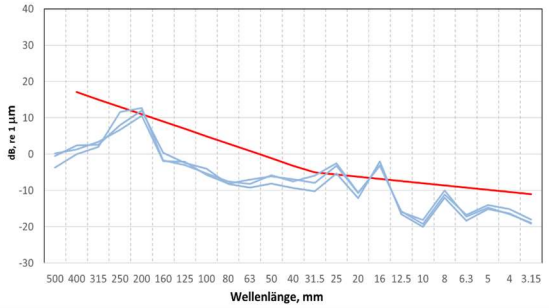
T0



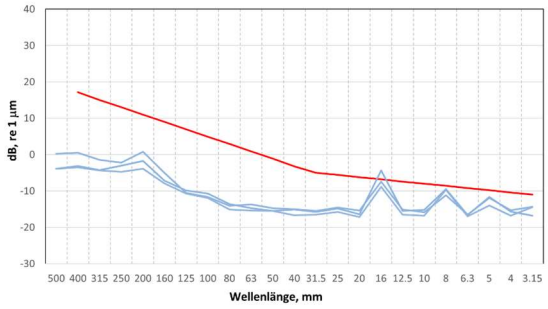


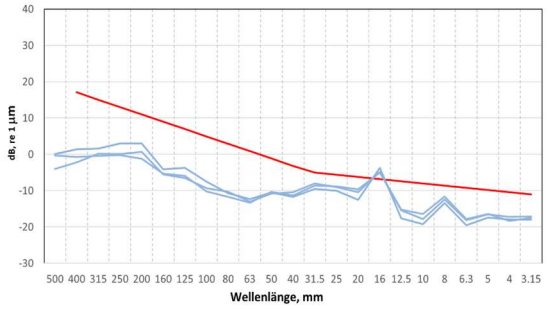
T2



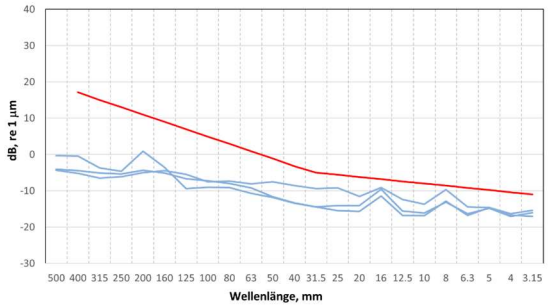


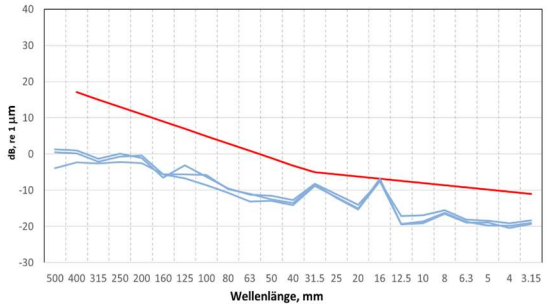
T3



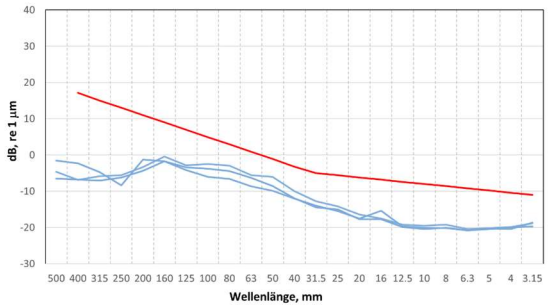


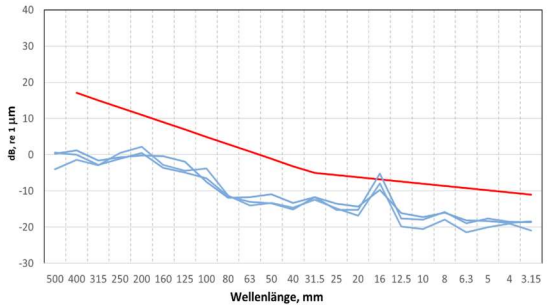
T4



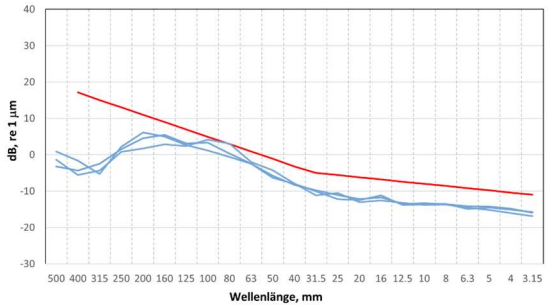


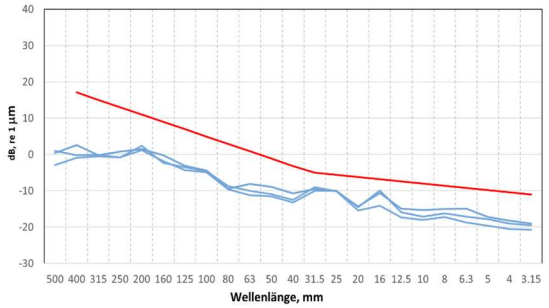
T5


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

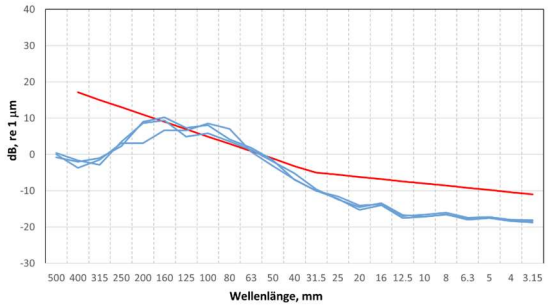

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

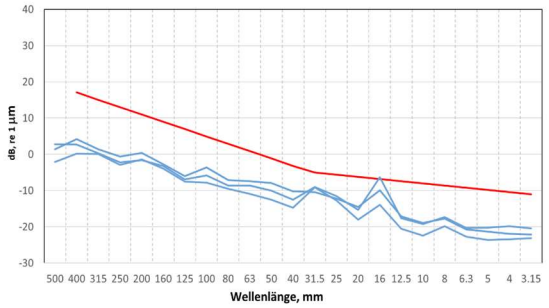
T6


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

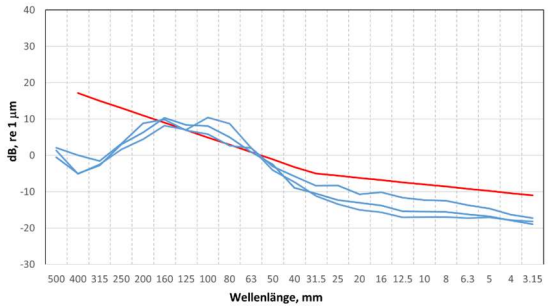

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

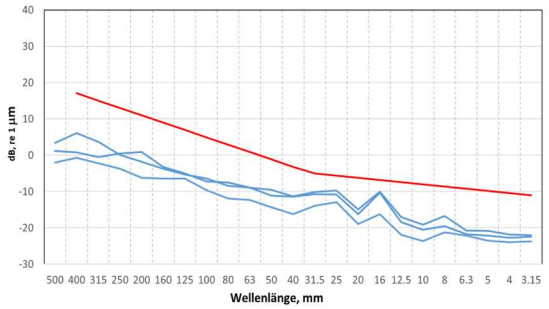
T7


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

T8

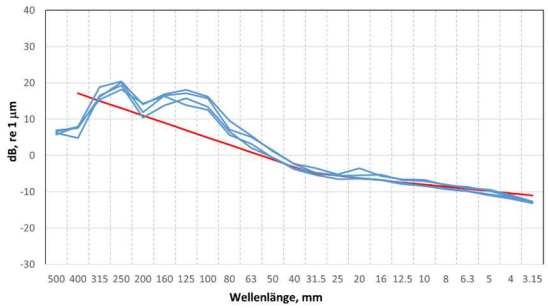

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

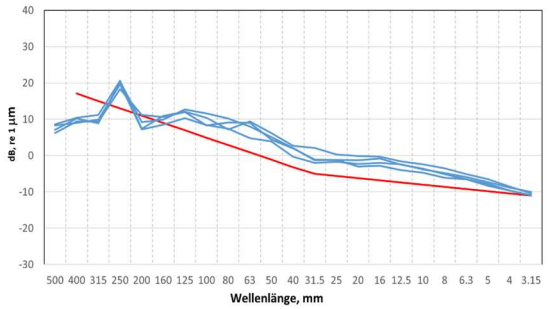

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

A3: Gleisabschnitt 3, mittlerer Sensor

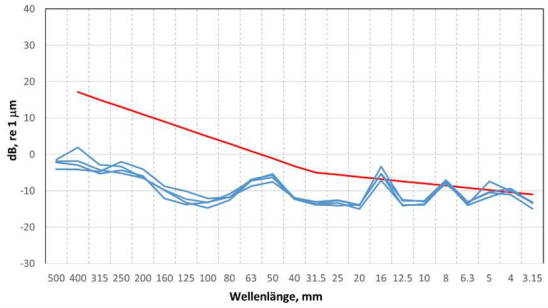
Innenschiene: Aussenschiene:

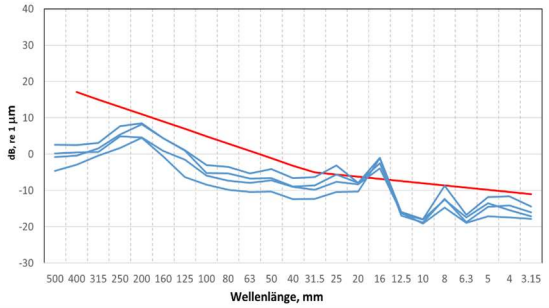
T0



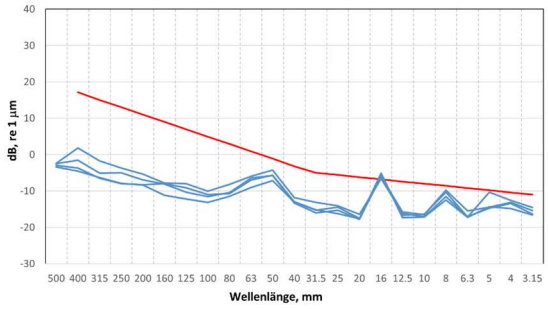


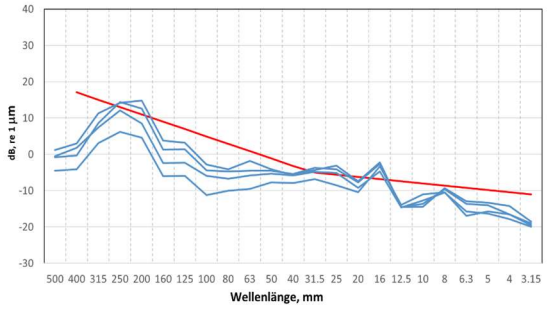
T2



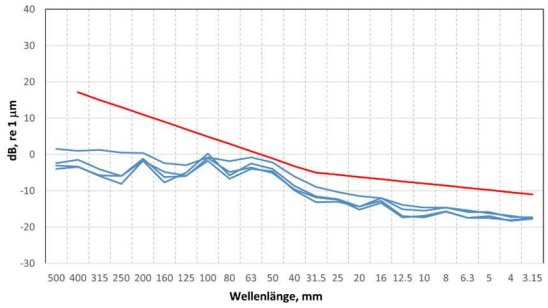


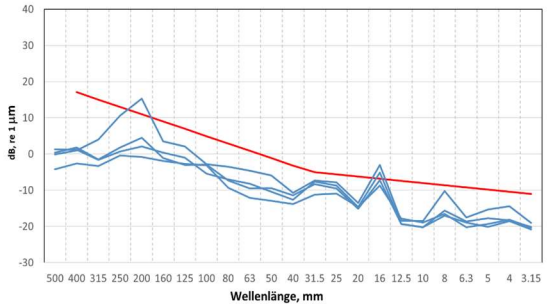
T3



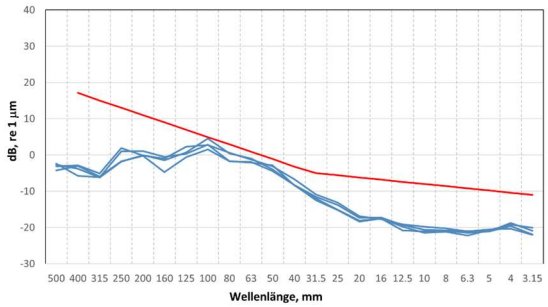


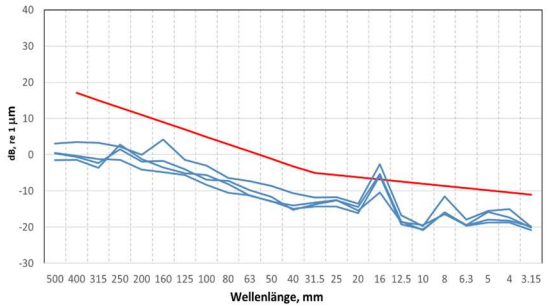
T4



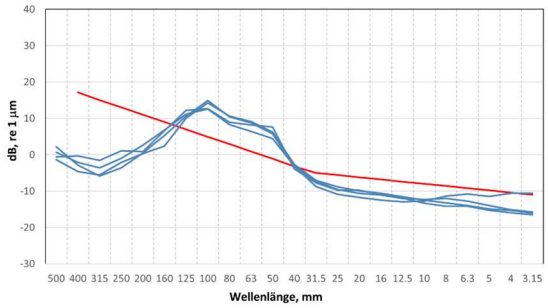


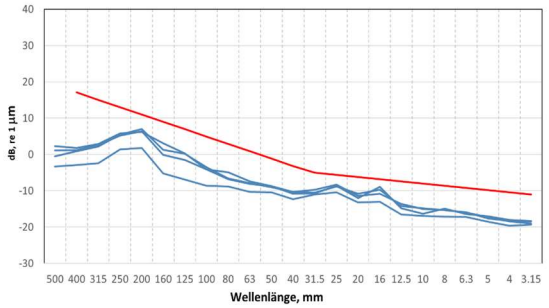
T5


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

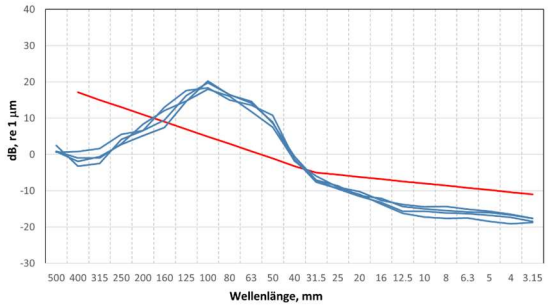

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

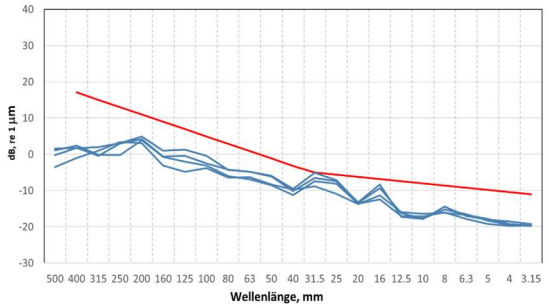
T6


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

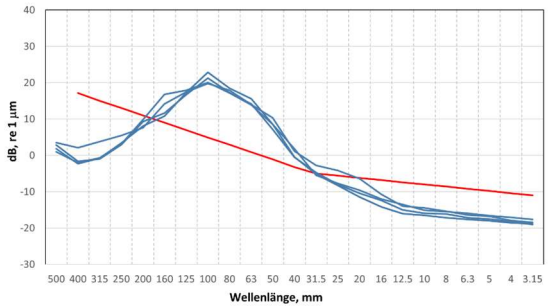

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

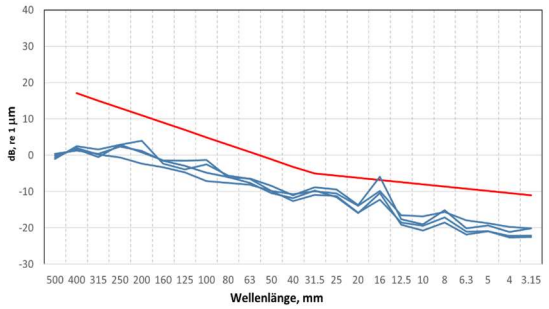
T7


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

T8

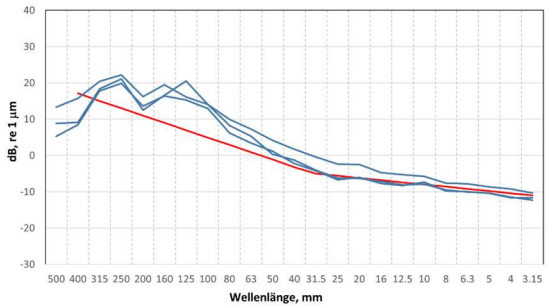

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

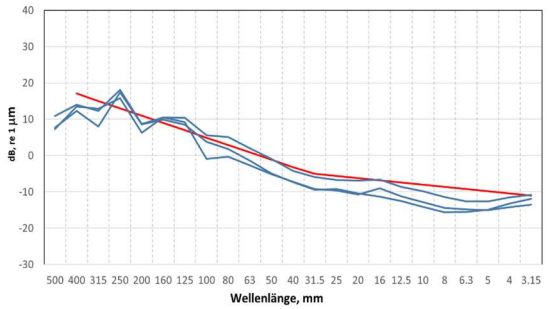

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

A4: Gleisabschnitt 4, mittlerer Sensor

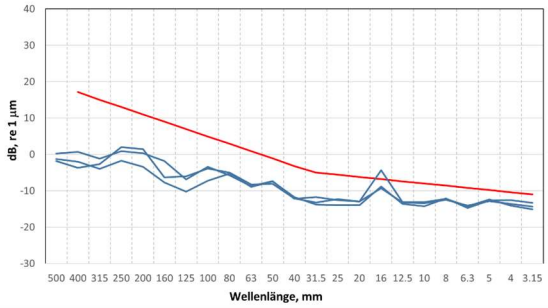
Innenschiene: Aussenschiene:

T0



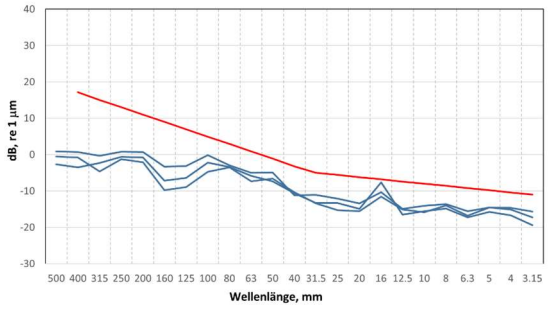


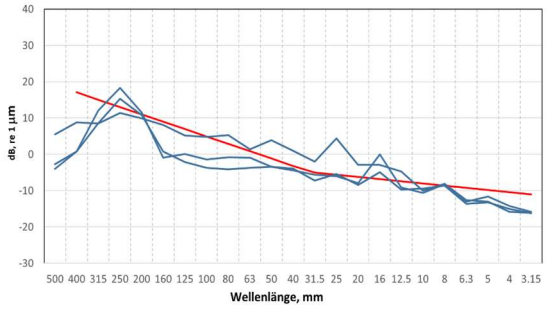
T2



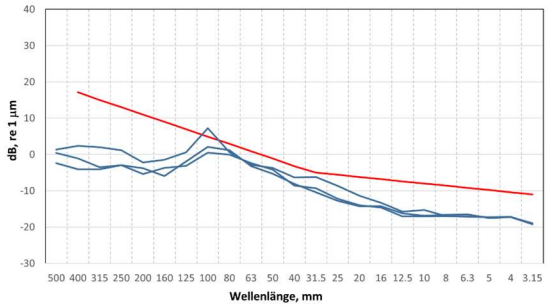


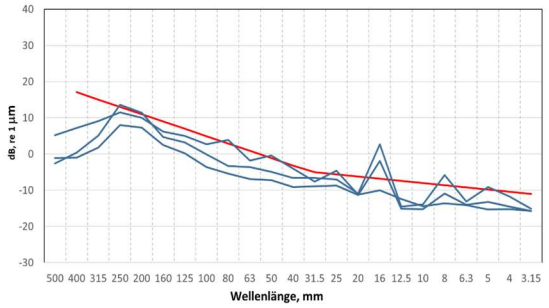
T3



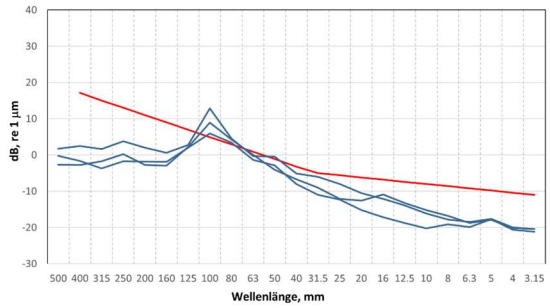


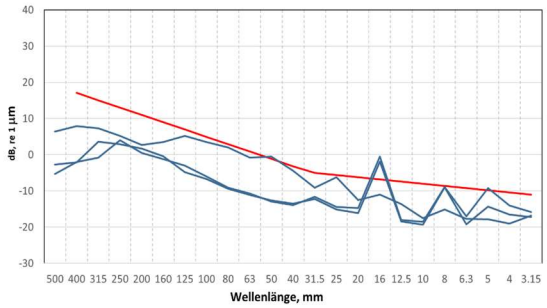
T4



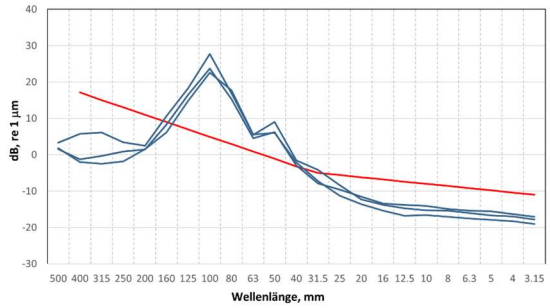


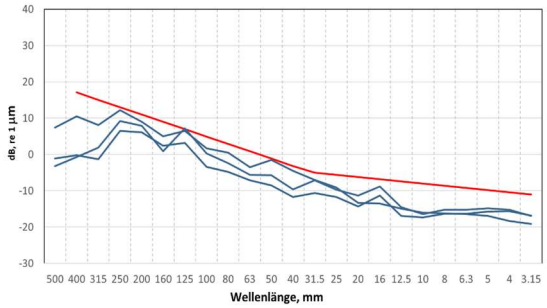
T5


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

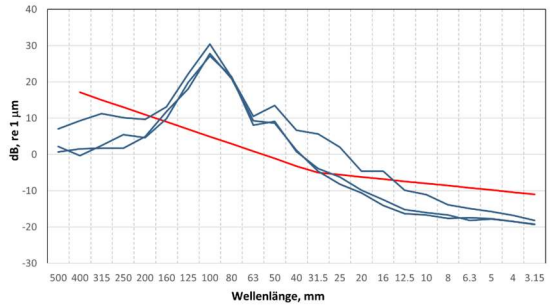

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

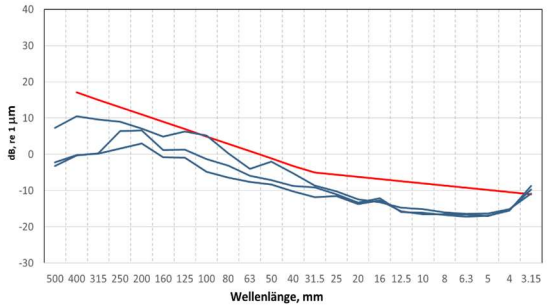
T6


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

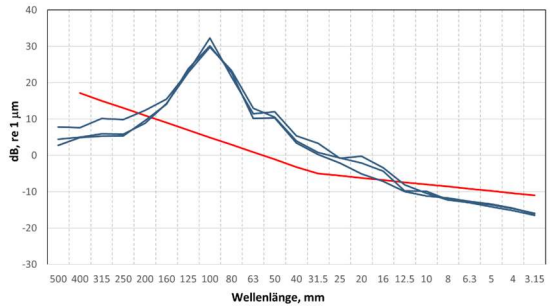

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

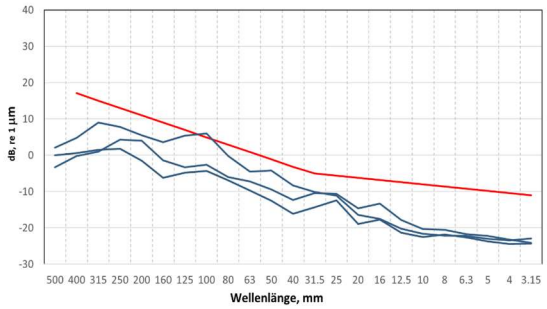
T7


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm


dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

T8

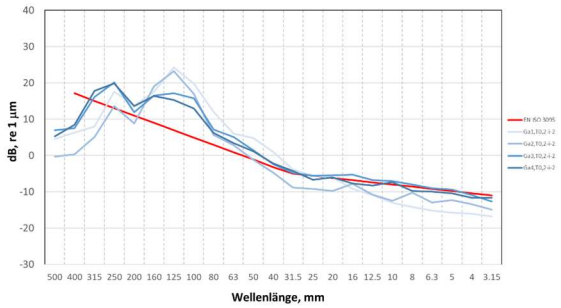

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

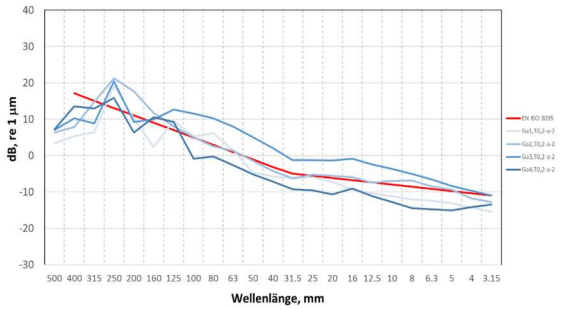

dB, re 1 µm
40 30 20 10 0 -10 -20 -30
500 400 315 250 200 160 125 100 80 63 50 40 31.5 25 20 16 12.5 10 8 6.3 5 4 3.15
Wellenlänge, mm

A5: Vergleich der Gleisabschnitte, Bogenmitte, mittlerer Sensor

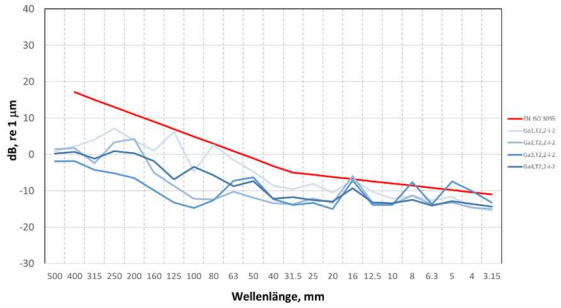
Innenschiene: Aussenschiene:

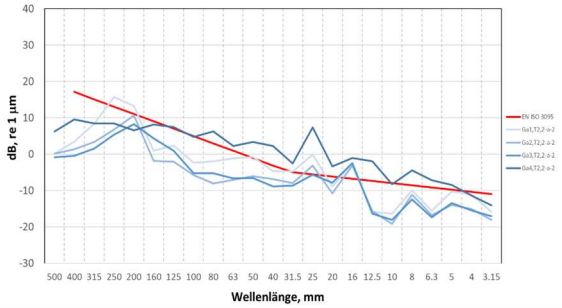
T0



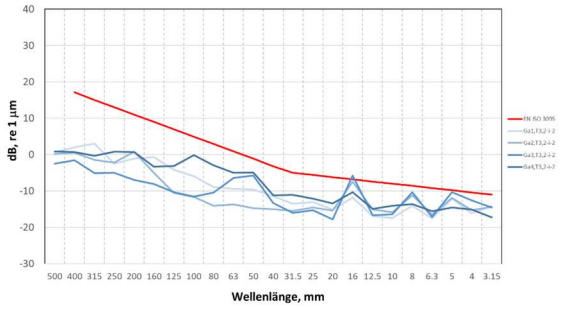


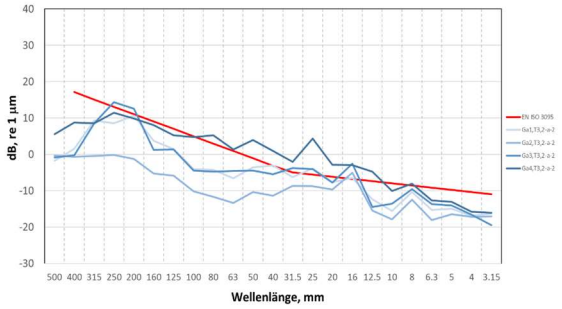
T2



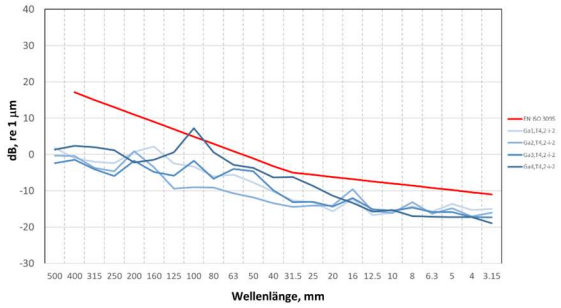


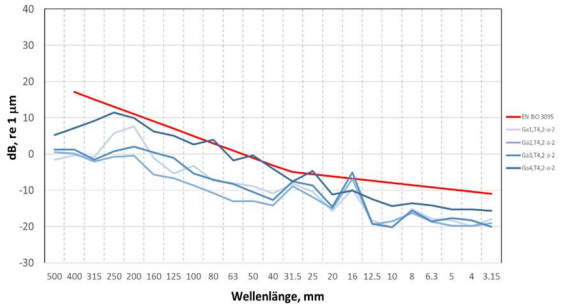
T3



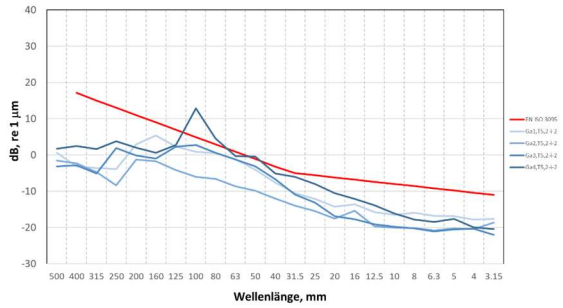


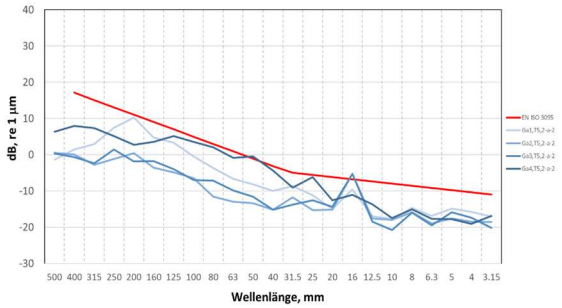
T4



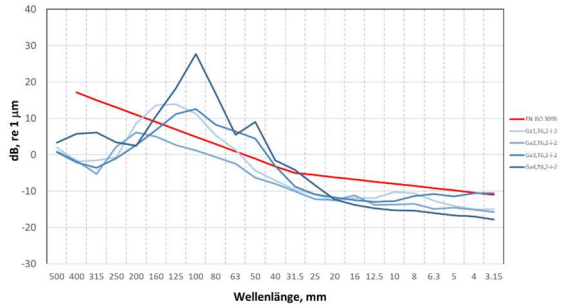


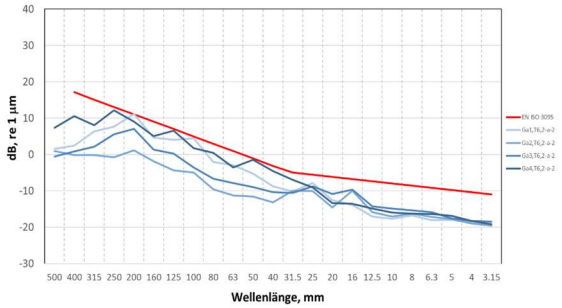
T5


dB, re 1 µm
Wellenlänge, mm

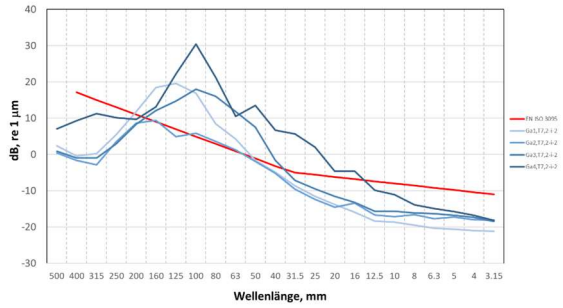

dB, re 1 µm
Wellenlänge, mm

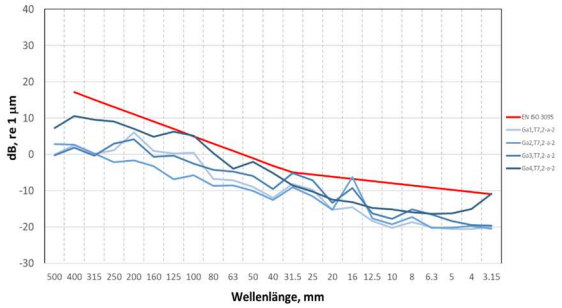
T6


dB, re 1 µm
Wellenlänge, mm

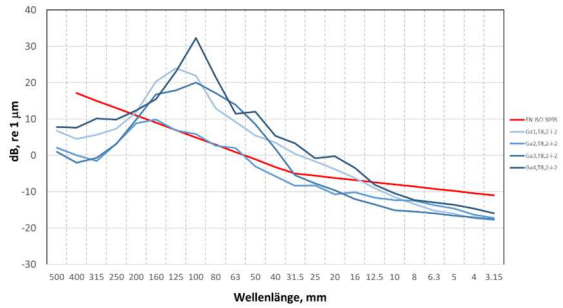

dB, re 1 µm
Wellenlänge, mm

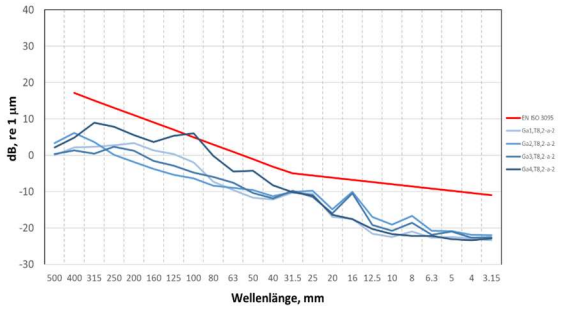
T7


dB, re 1 µm
Wellenlänge, mm


dB, re 1 µm
Wellenlänge, mm

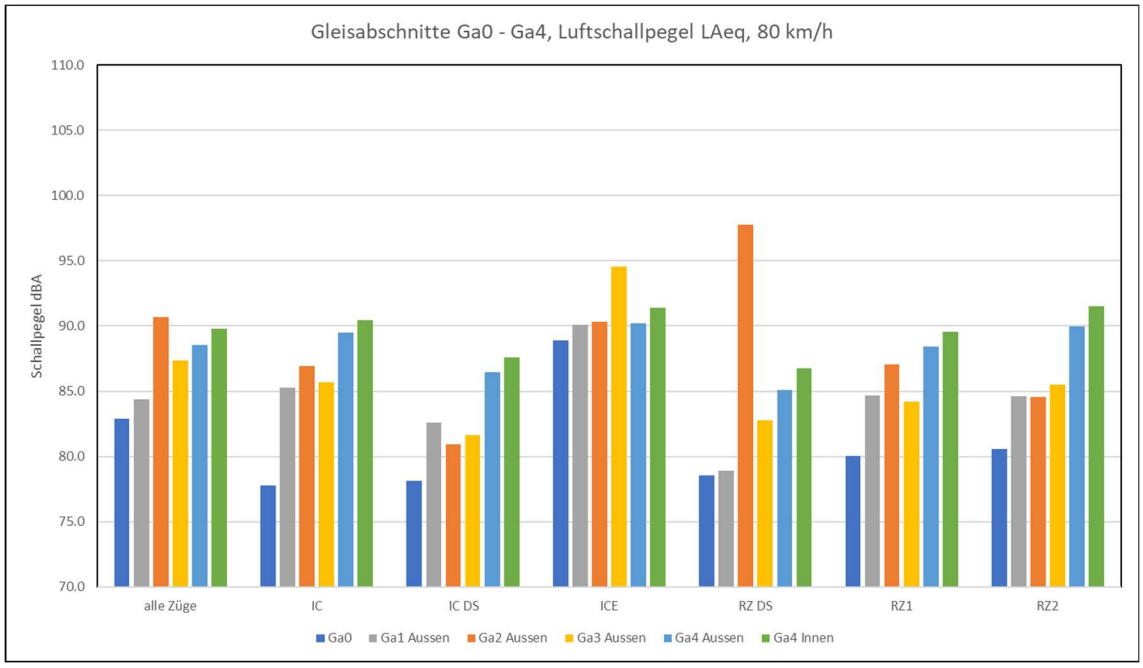
T8

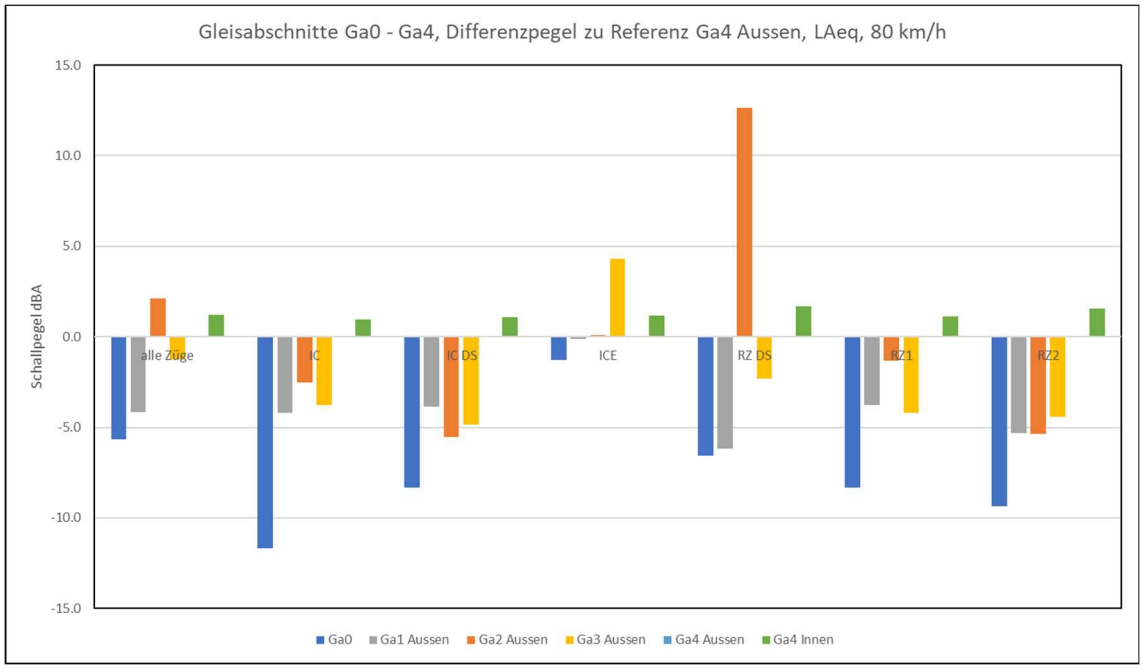

dB, re 1 µm
Wellenlänge, mm


dB, re 1 µm
Wellenlänge, mm

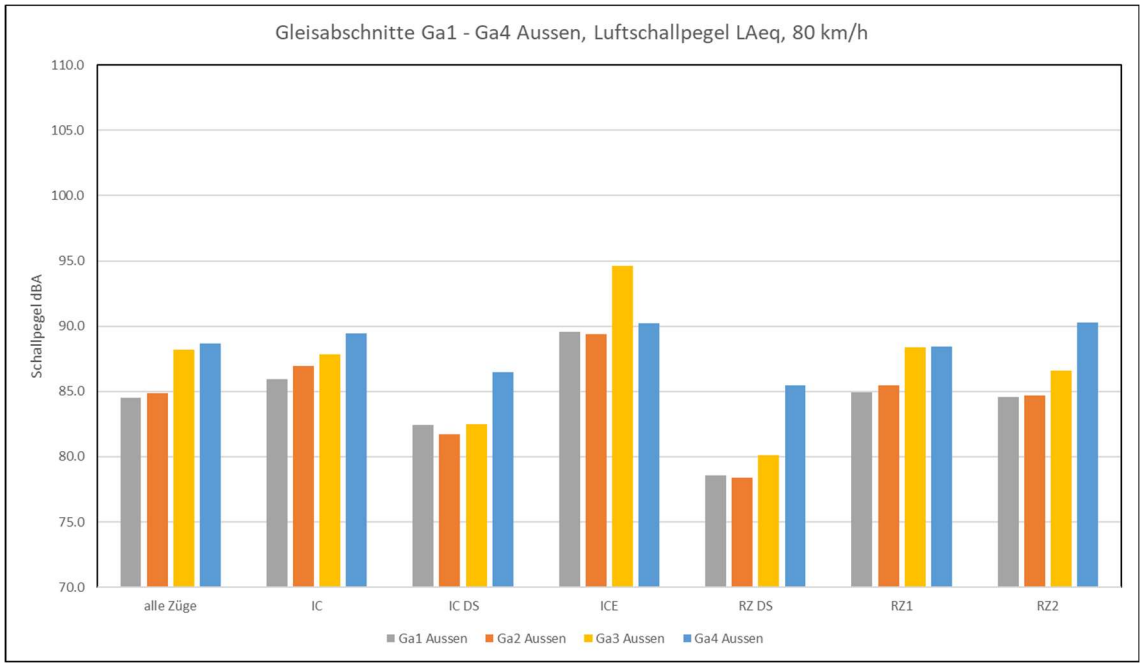
ANHANG B: SCHALLEMISSIONEN

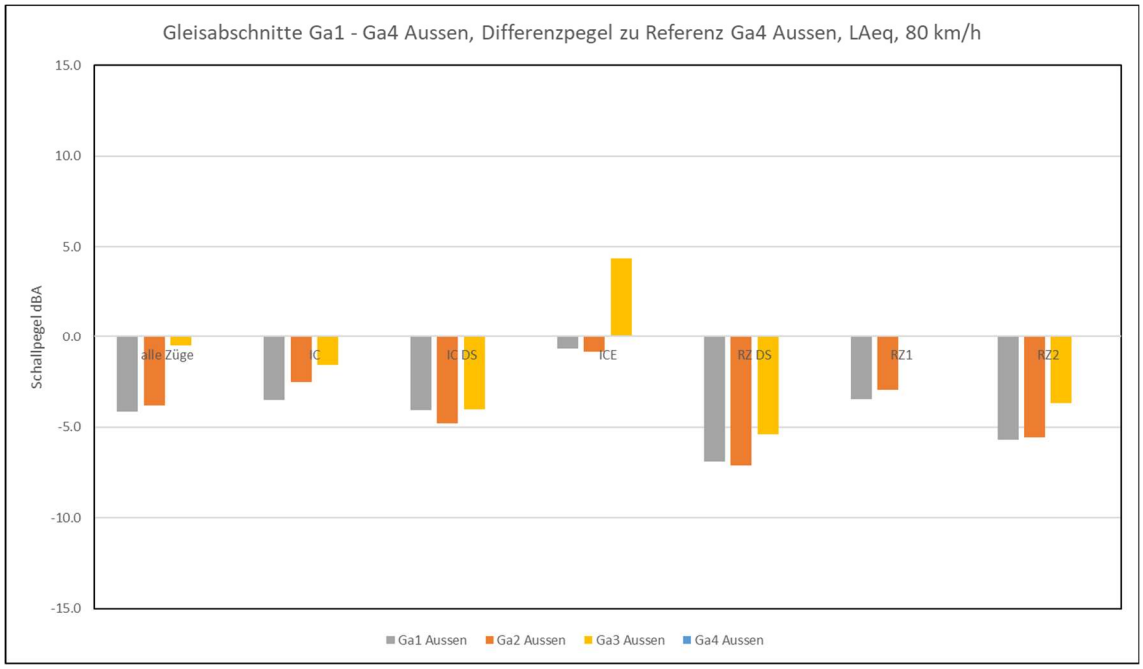
B0: Vergleich Gleisabschnitte LAeq, 80 km/h, T6



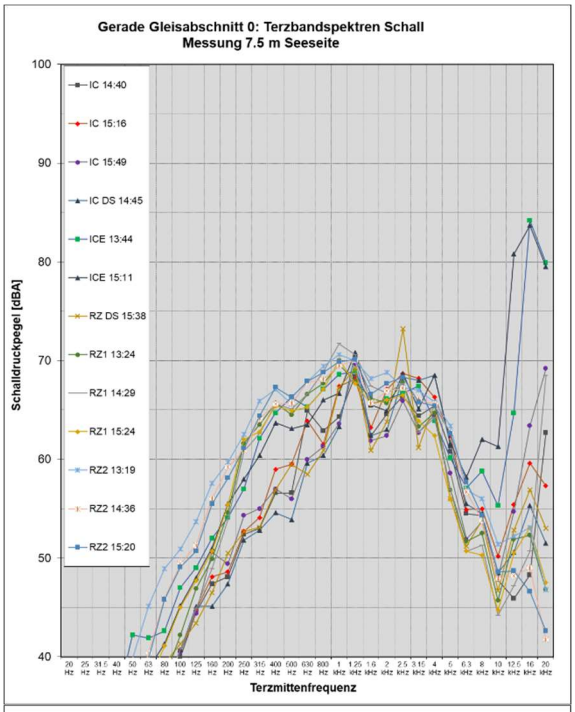


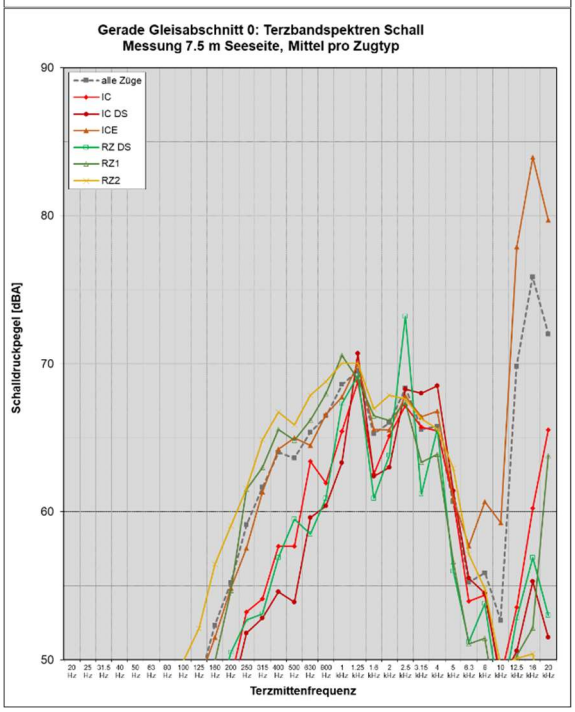
B1: Vergleich Gleisabschnitte LAeq, 80 km/h, Simultanmessungen, T6



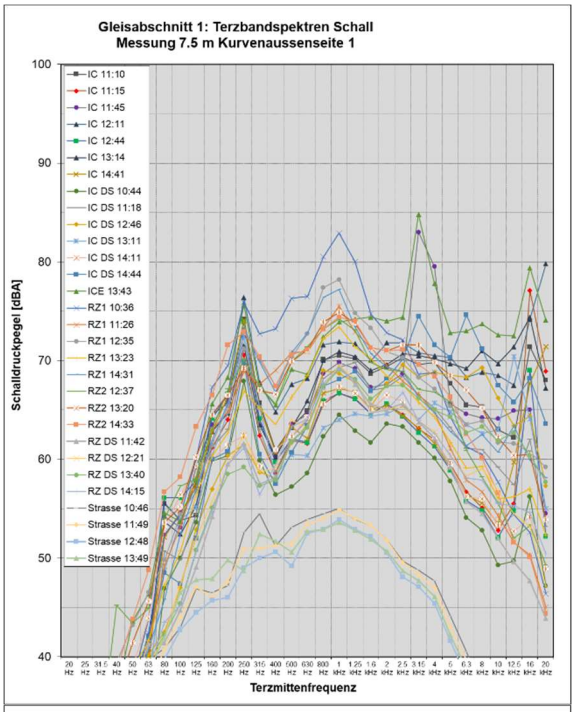


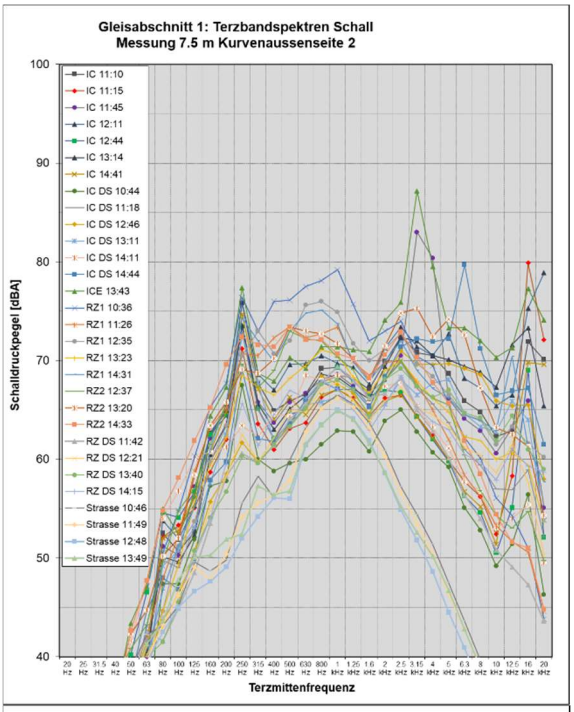
B2: Schallemissionsspektren, Gleisabschnitt 0, T6

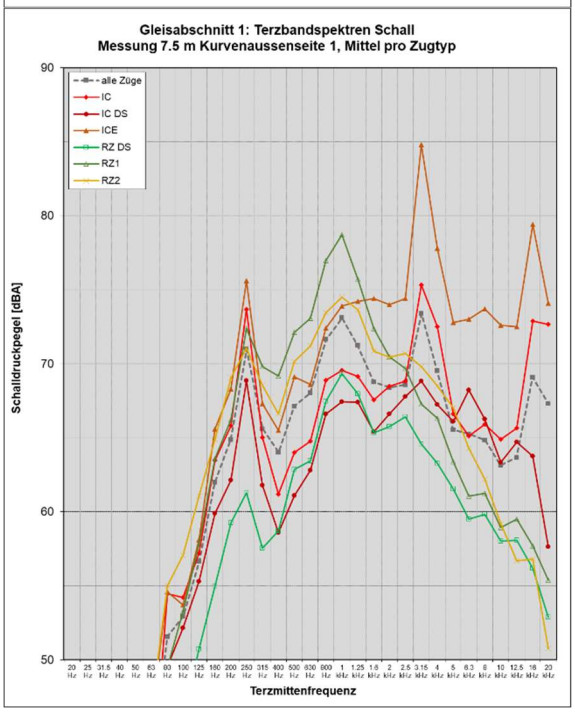




B3: Schallemissionsspektren, Gleisabschnitt 1, T6

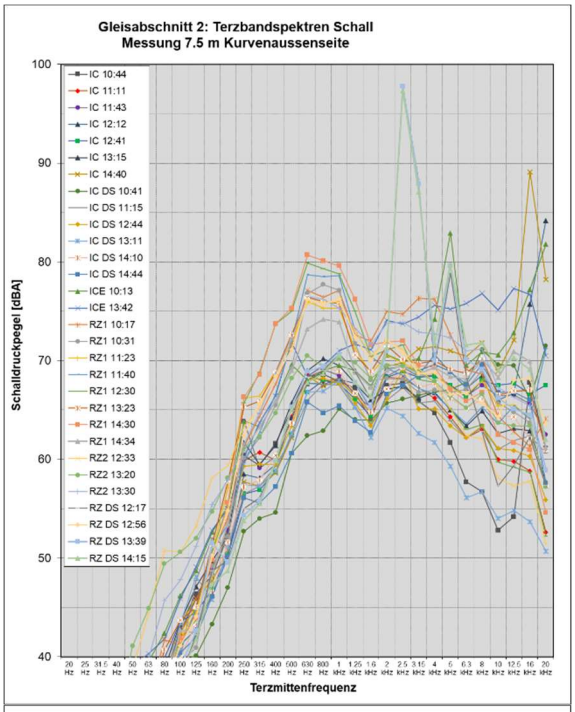


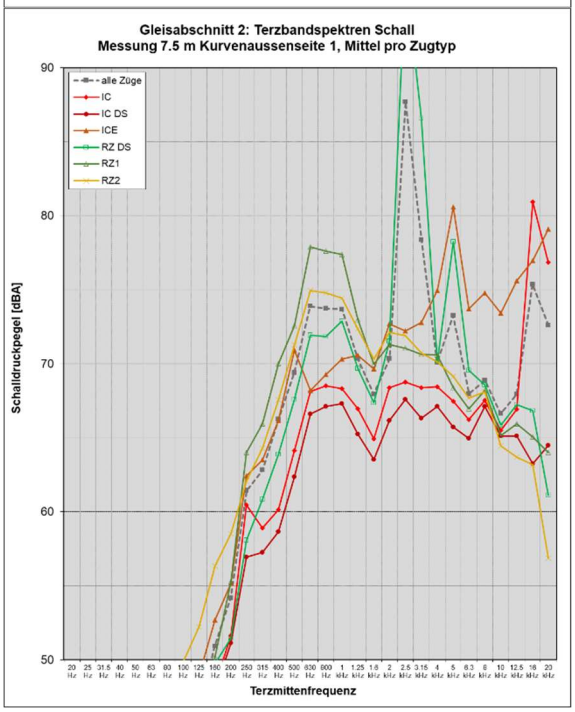




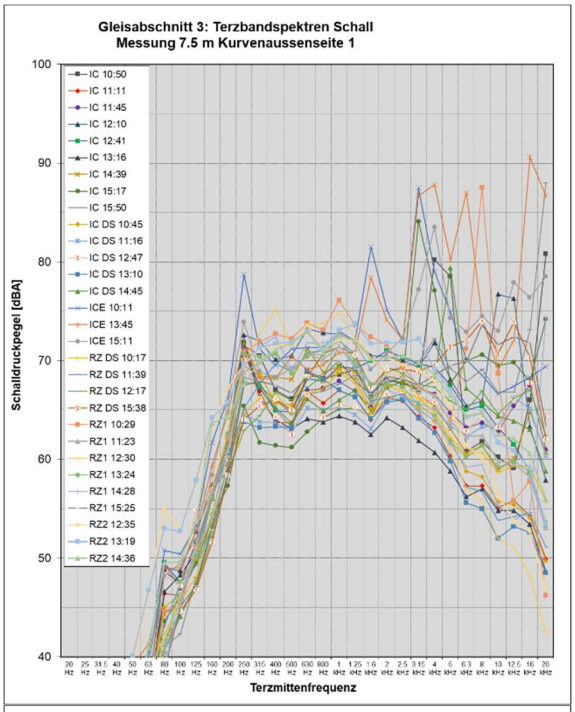


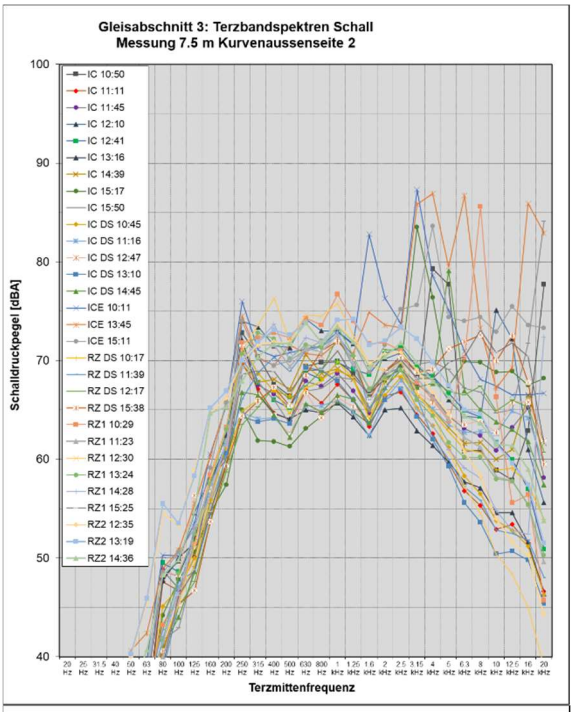
B4: Schallemissionsspektren, Gleisabschnitt 2, T6

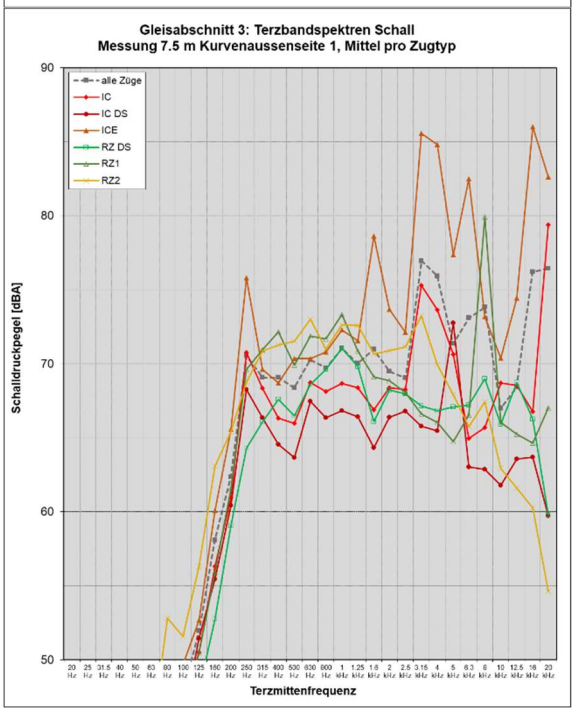


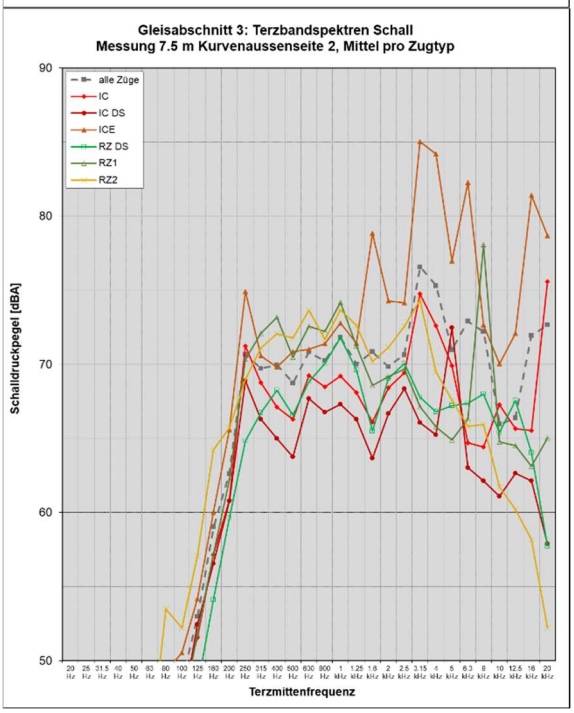


B5: Schallemissionsspektren, Gleisabschnitt 3, T6

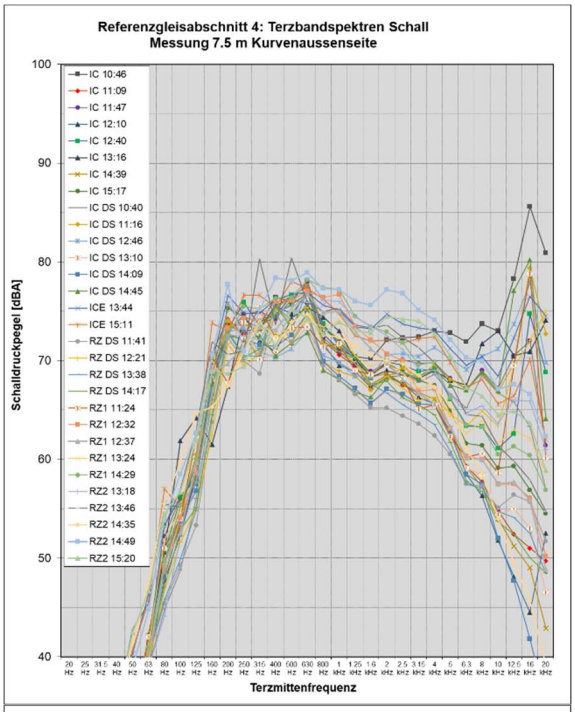


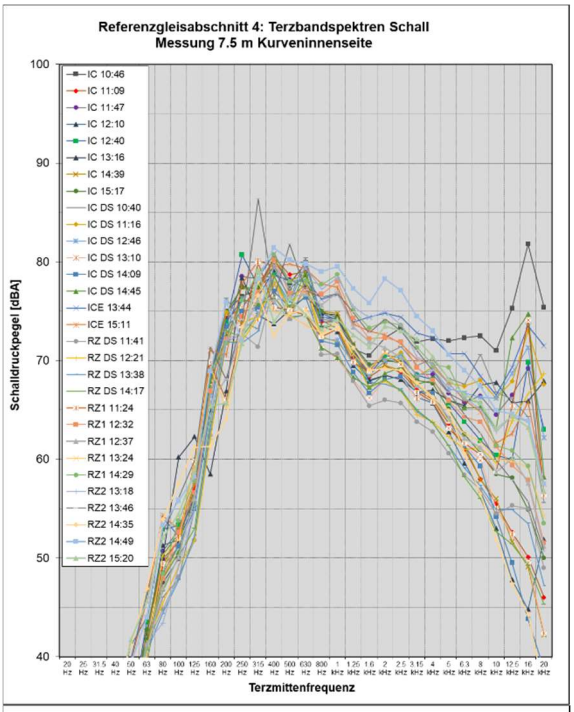


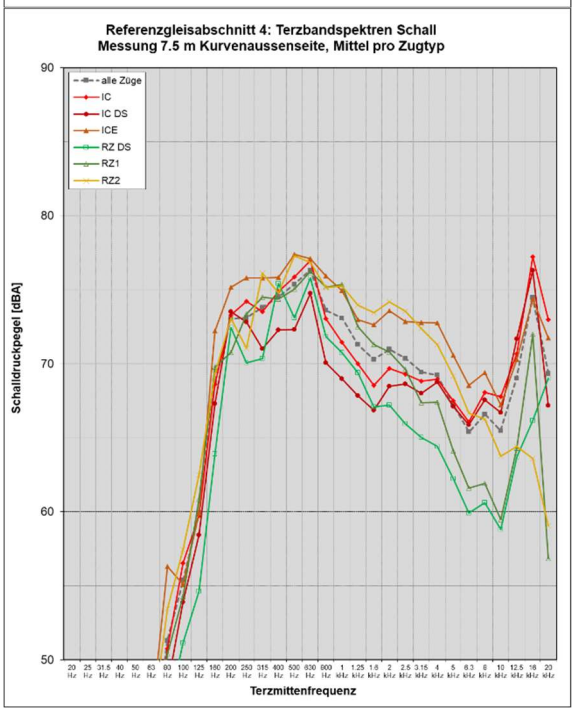


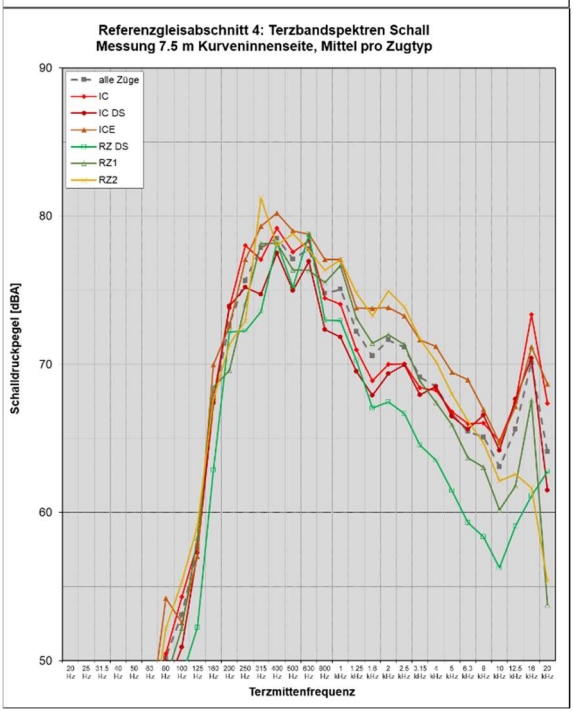


B6: Schallemissionsspektren, Gleisabschnitt 4, T6

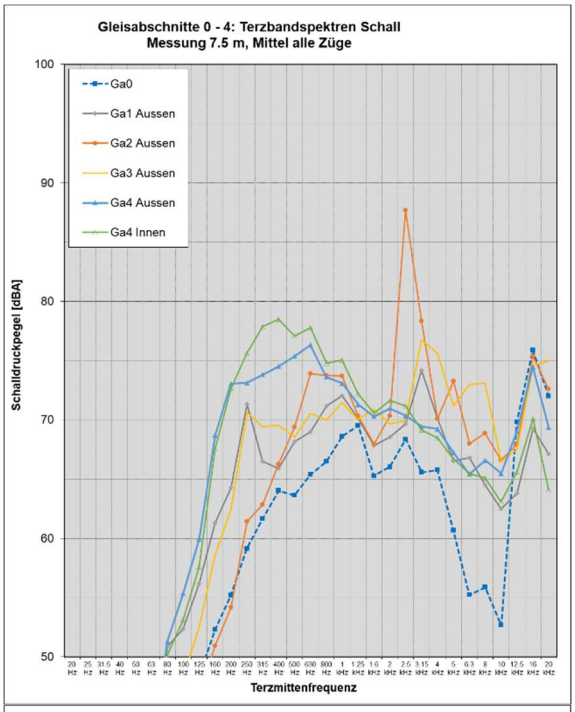


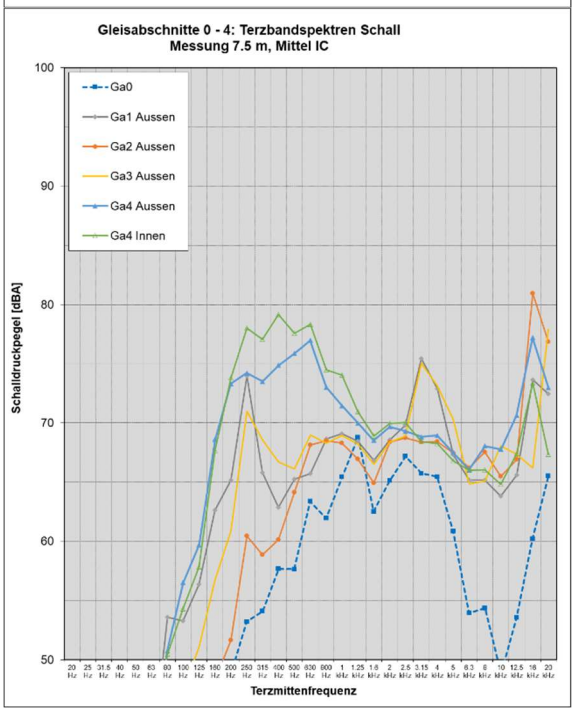


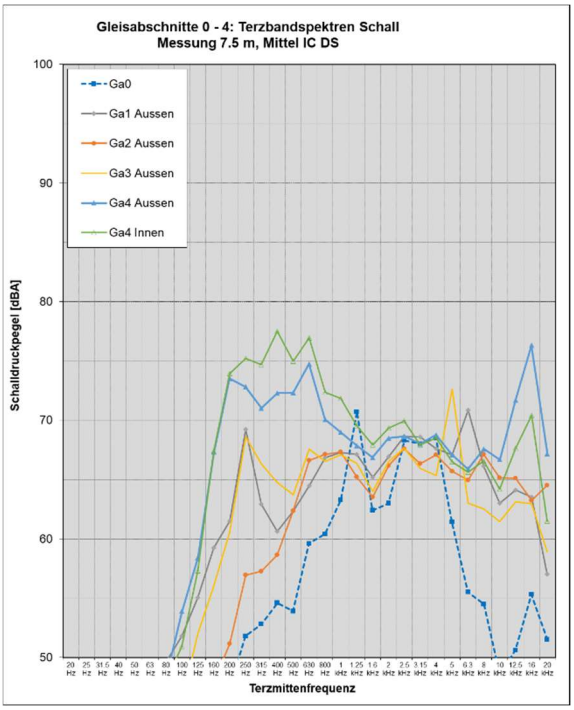


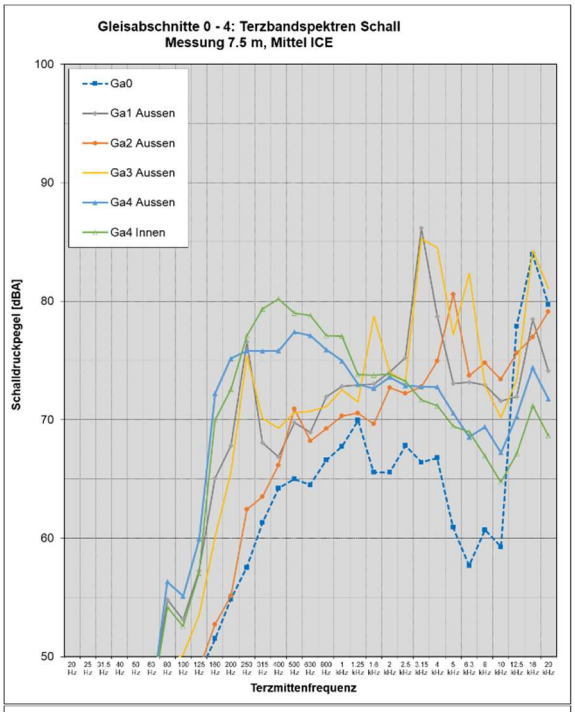


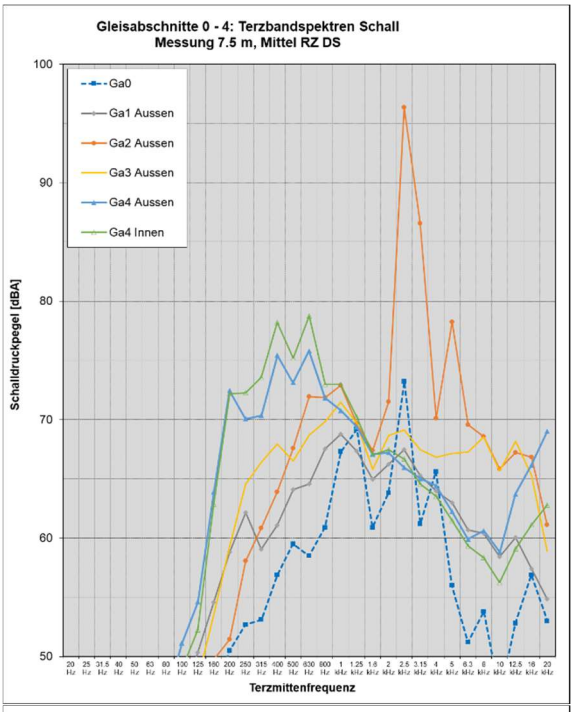
B7: Vergleich Schallemissionsspektren Gleisabschnitte, T6

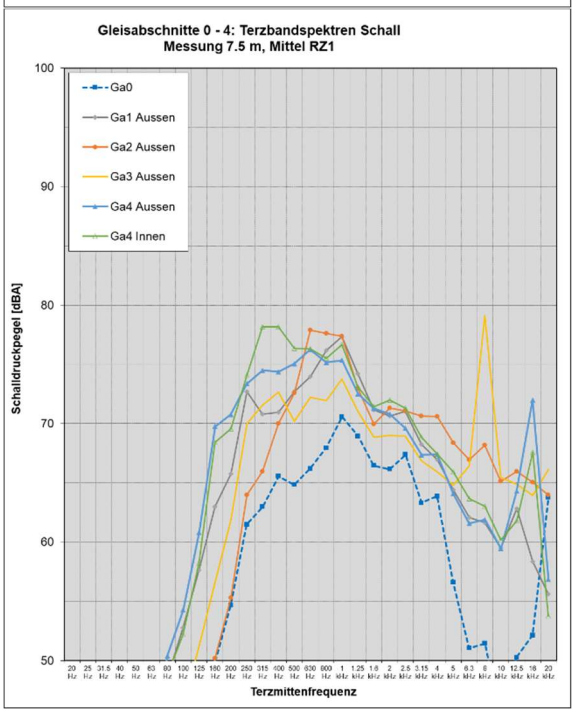


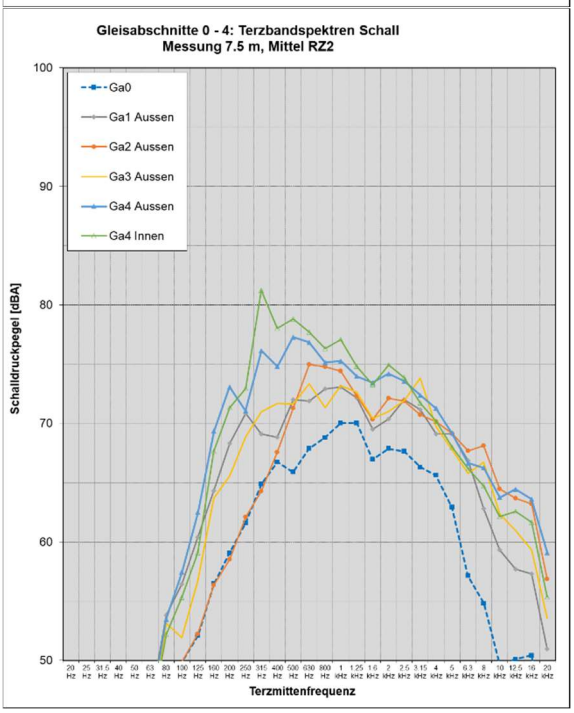




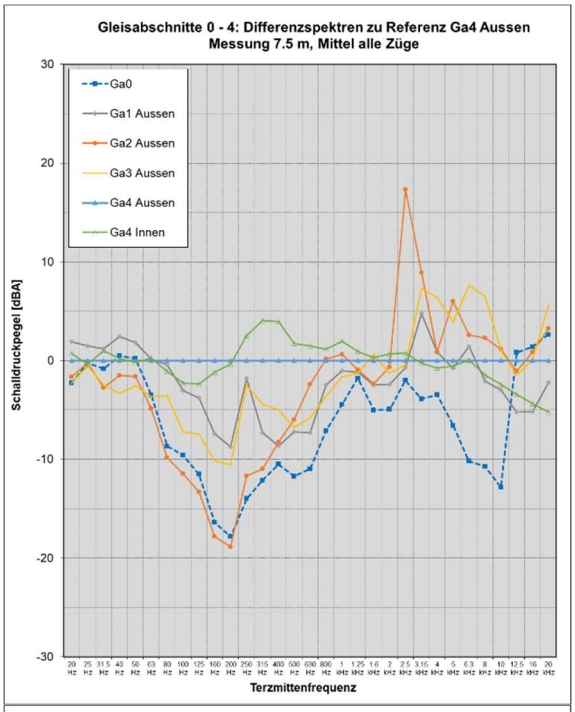

Gleisabschnitte 0 - 4: Terzbandspektren Schall
Messung 7.5 m, Mittel ICE
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

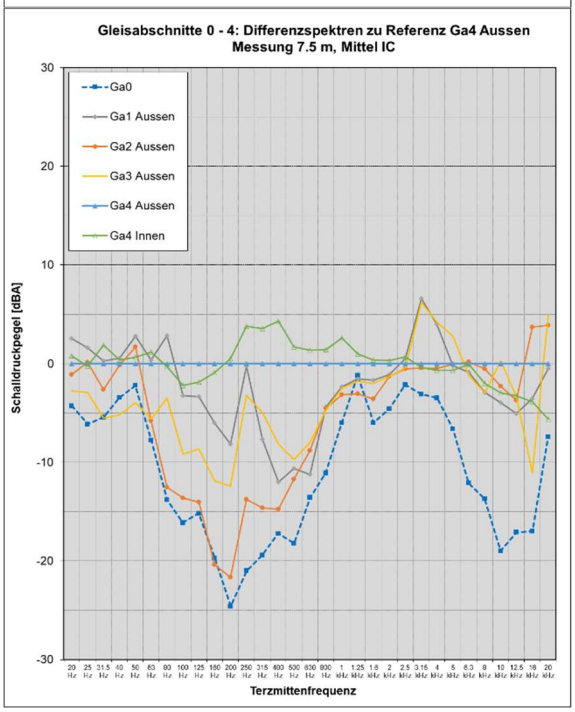

Gleisabschnitte 0 - 4: Terzbandspektren Schall
Messung 7.5 m, Mittel RZ DS
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

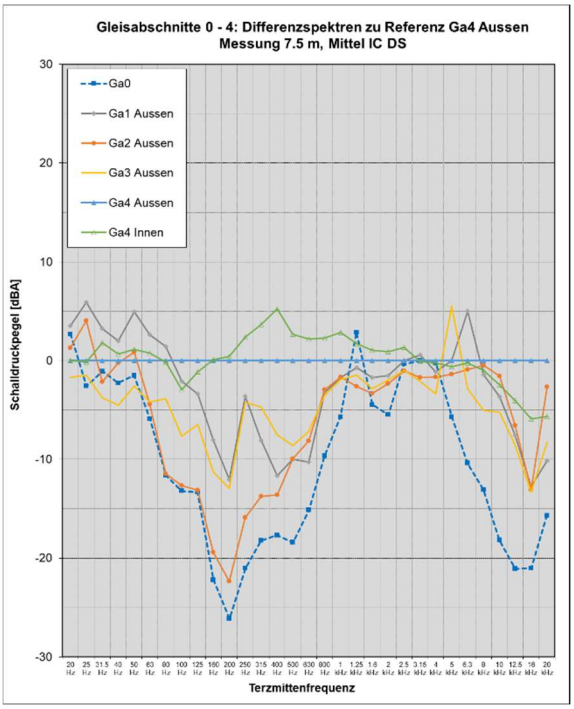

Gleisabschnitte 0 - 4: Terzbandspektren Schall
Messung 7.5 m, Mittel RZ1
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

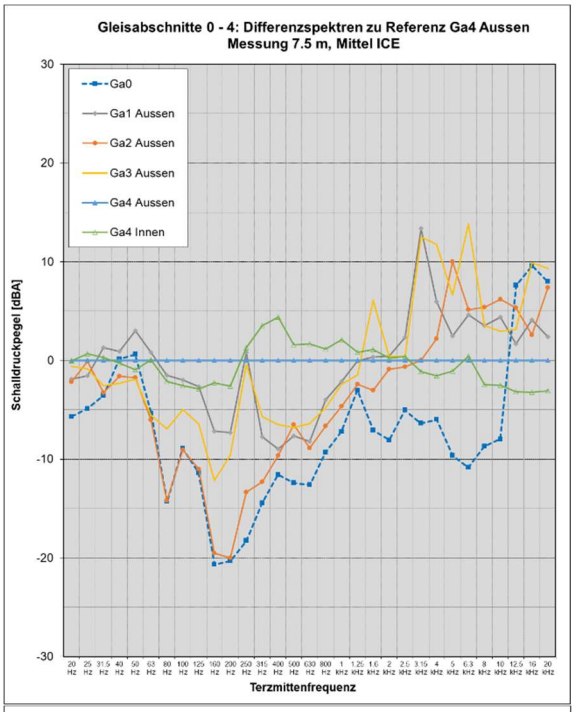

Gleisabschnitte 0 - 4: Terzbandspektren Schall
Messung 7.5 m, Mittel RZ2
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

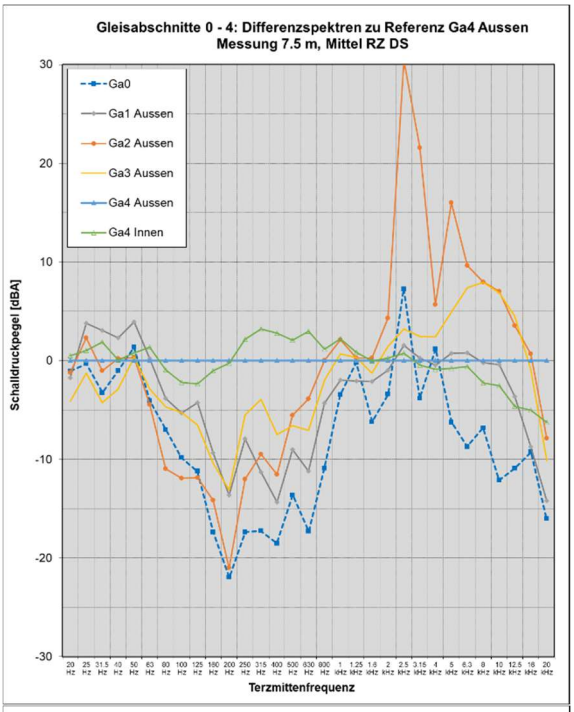
B8: Differenzspektren Gleisabschnitte zu Referenz Ga4 Aussen, T6

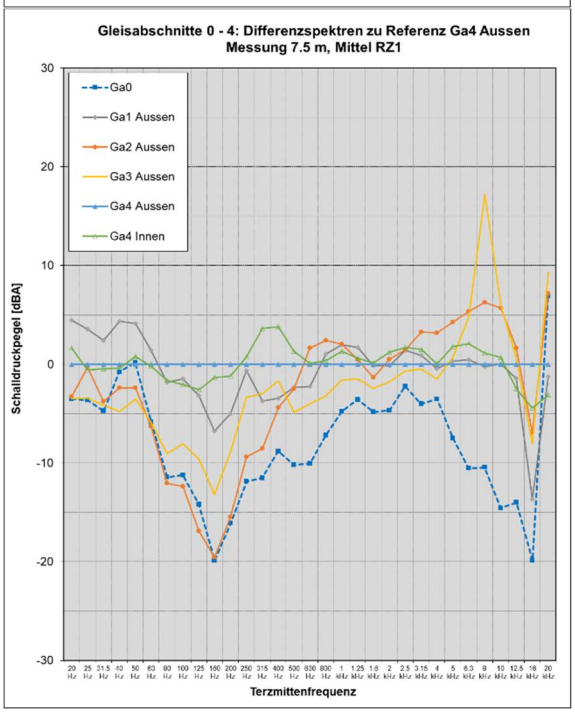


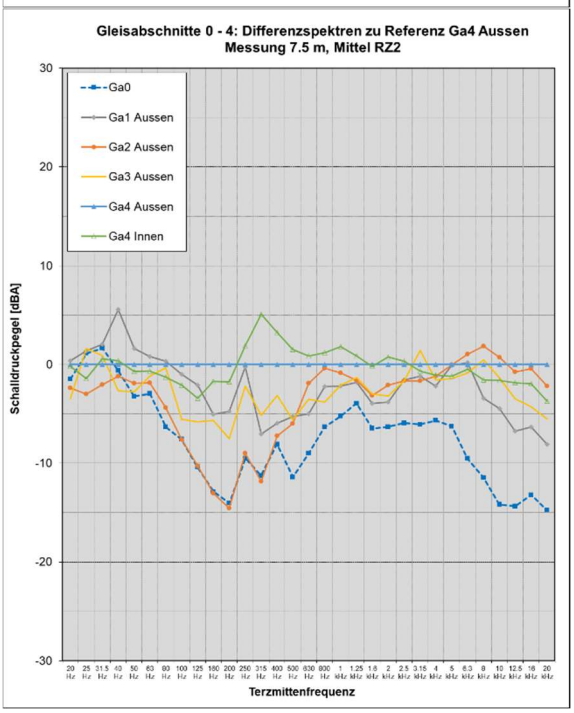




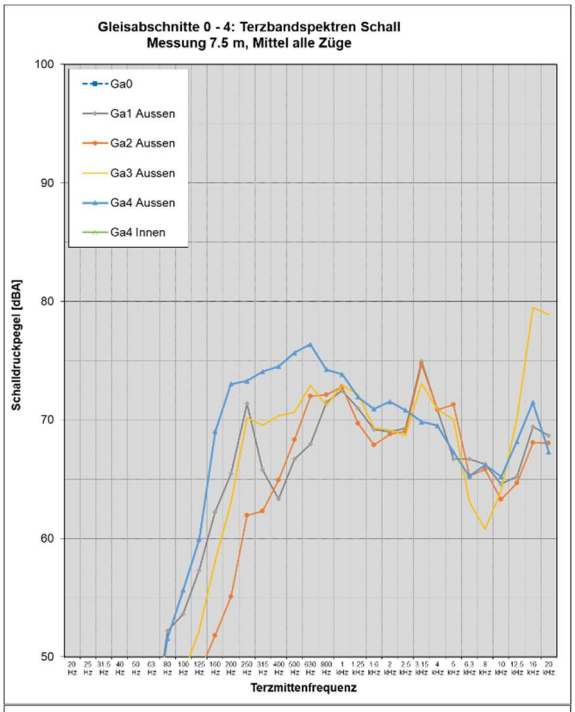

Gleisabschnitte 0 - 4: Differenzspektren zu Referenz Ga4 Aussen
Messung 7.5 m, Mittel ICE
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

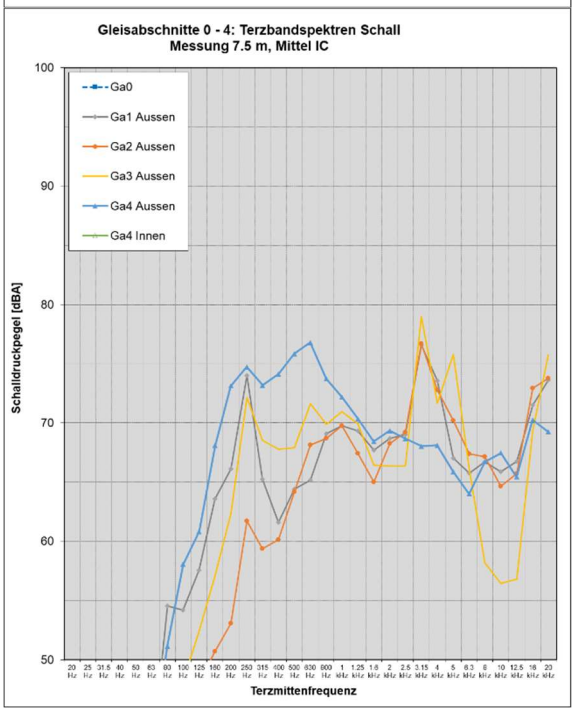

Gleisabschnitte 0 - 4: Differenzspektren zu Referenz Ga4 Aussen
Messung 7.5 m, Mittel RZ DS
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

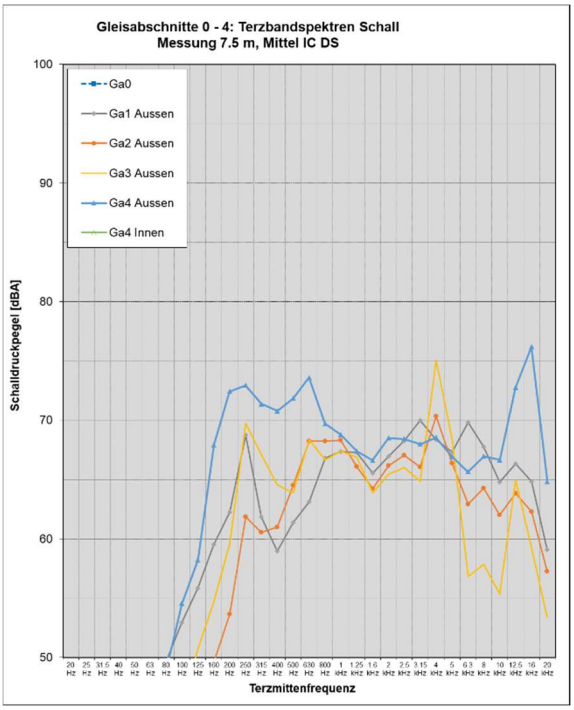

Gleisabschnitte 0 - 4: Differenzspektren zu Referenz Ga4 Aussen
Messung 7.5 m, Mittel RZ1
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

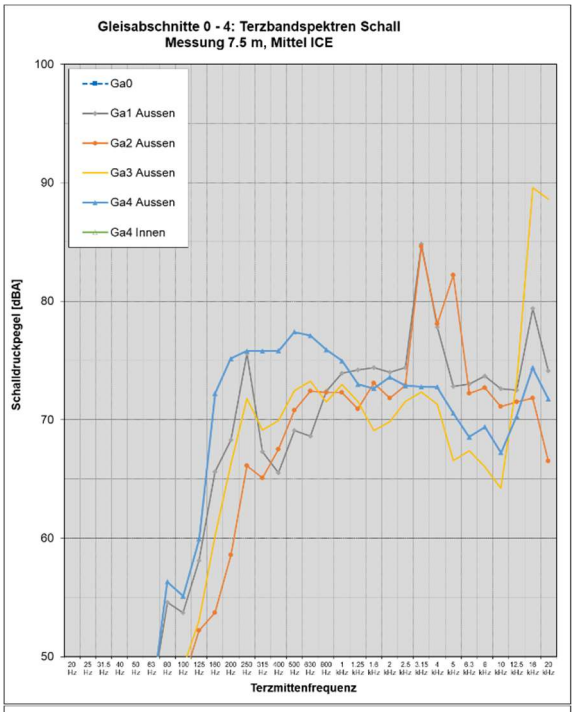

Gleisabschnitte 0 - 4: Differenzspektren zu Referenz Ga4 Aussen
Messung 7.5 m, Mittel RZ2
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

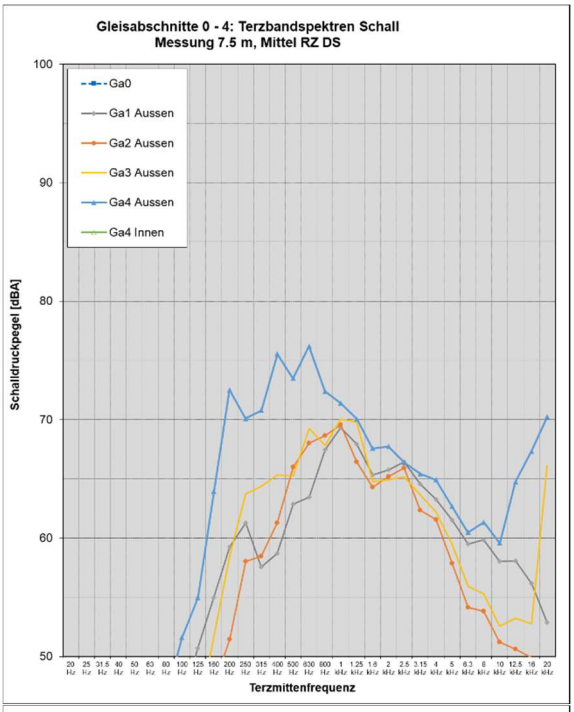
B9: Vergleich Gleisabschnitte Simultanmessungen Ga3-Ga4; Ga1-Ga2, T6

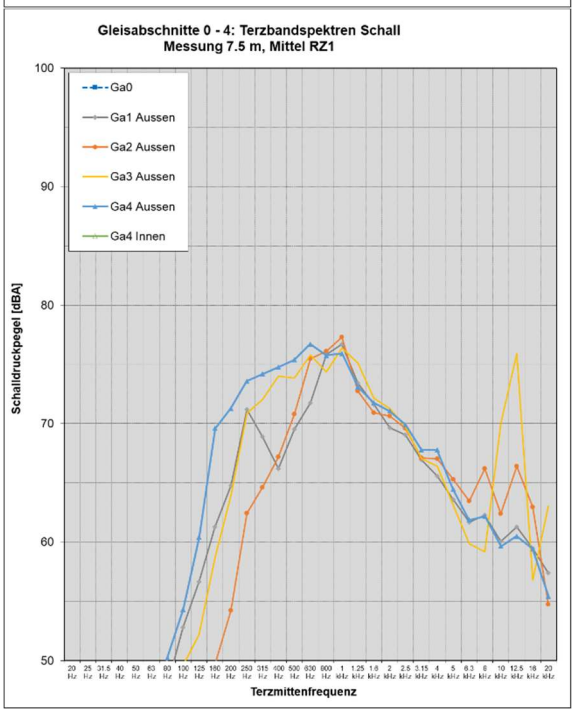


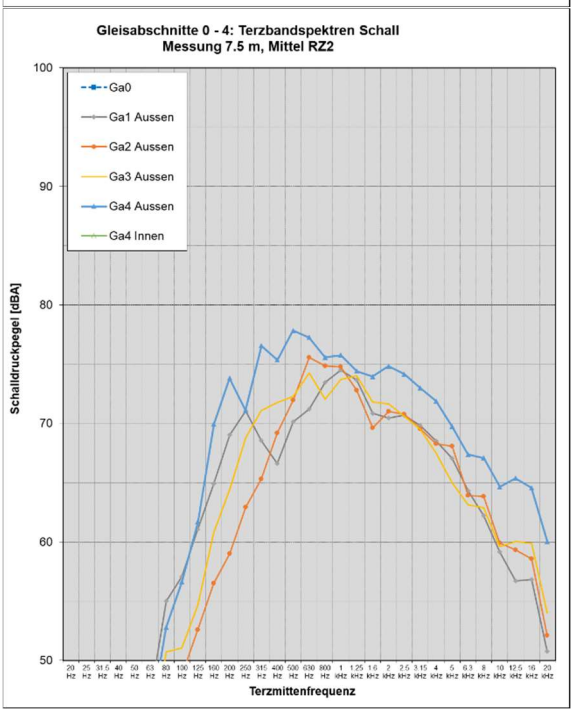




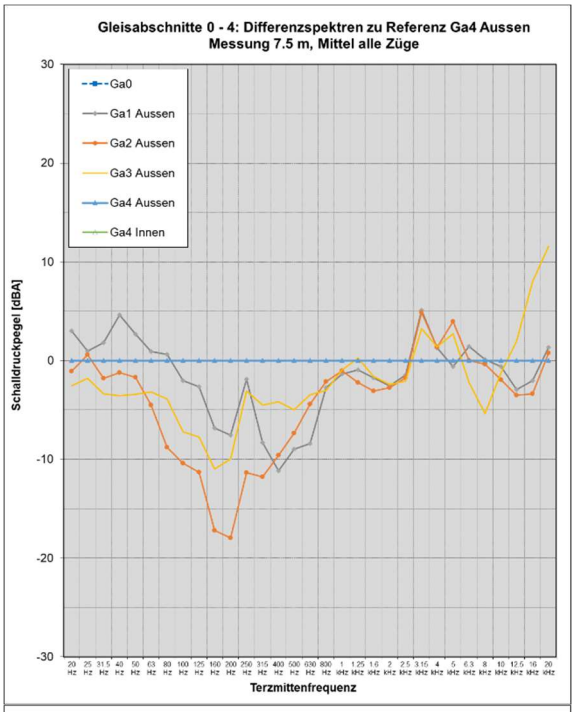

Gleisabschnitte 0 - 4: Terzbandspektren Schall
Messung 7.5 m, Mittel ICE
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

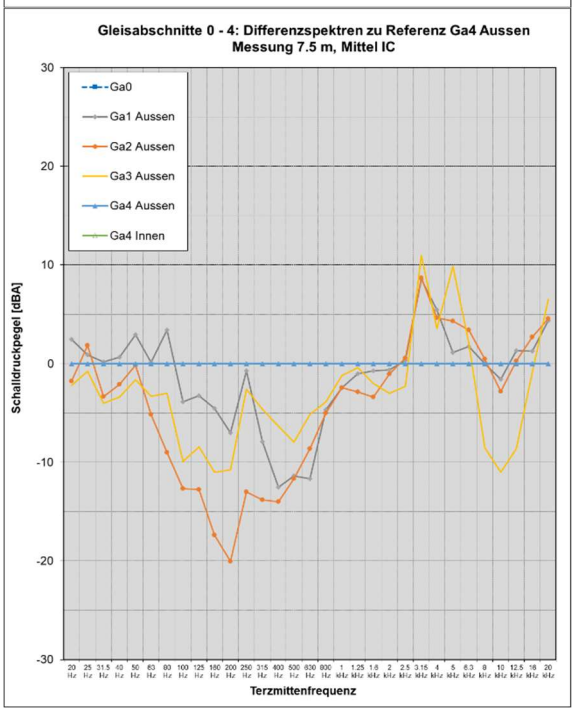

Gleisabschnitte 0 - 4: Terzbandspektren Schall
Messung 7.5 m, Mittel RZ DS
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

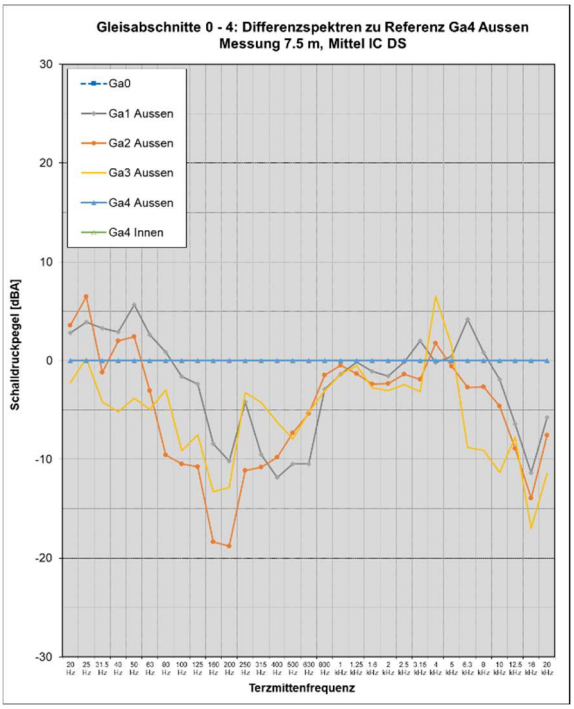

Gleisabschnitte 0 - 4: Terzbandspektren Schall
Messung 7.5 m, Mittel RZ1
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

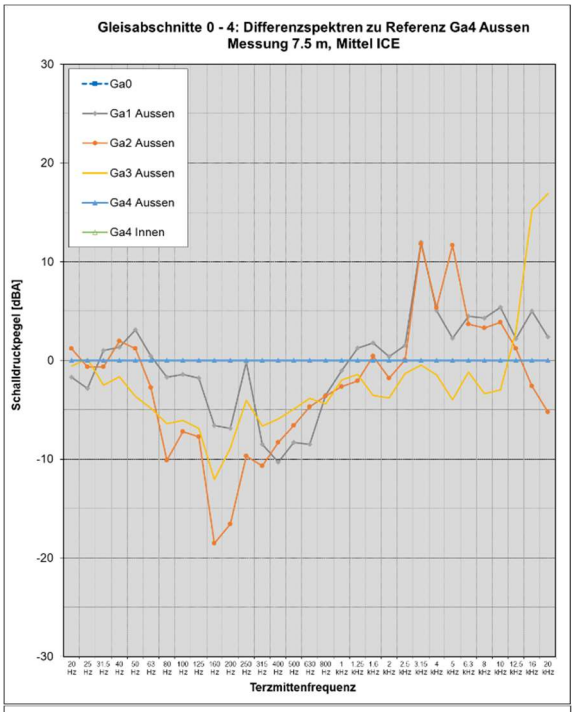

Gleisabschnitte 0 - 4: Terzbandspektren Schall
Messung 7.5 m, Mittel RZ2
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

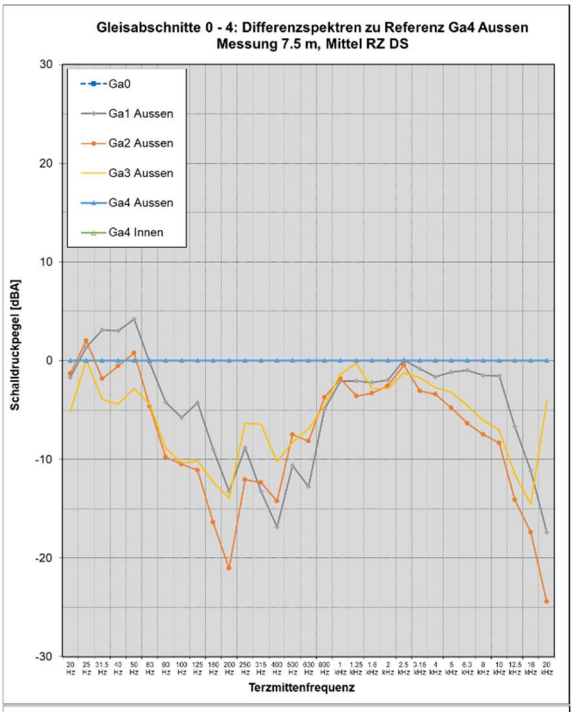
B10: Differenzspektren Gleisabschnitte Simultanmessungen zu Ga4 Aussen, T6

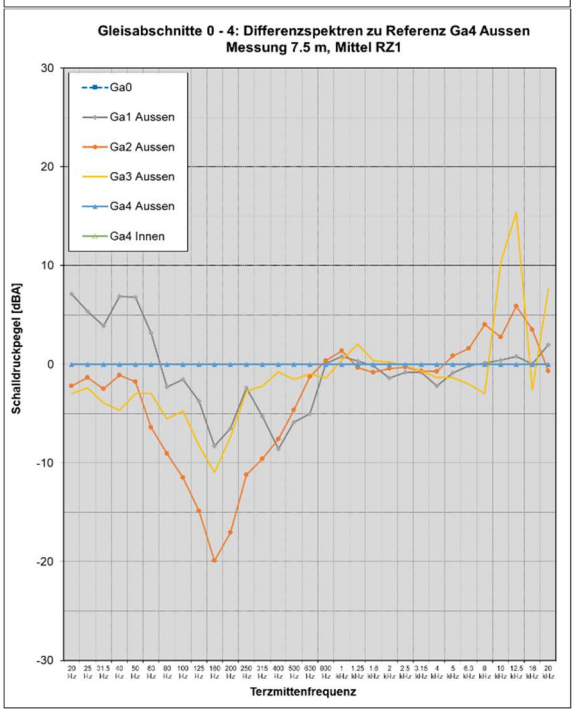


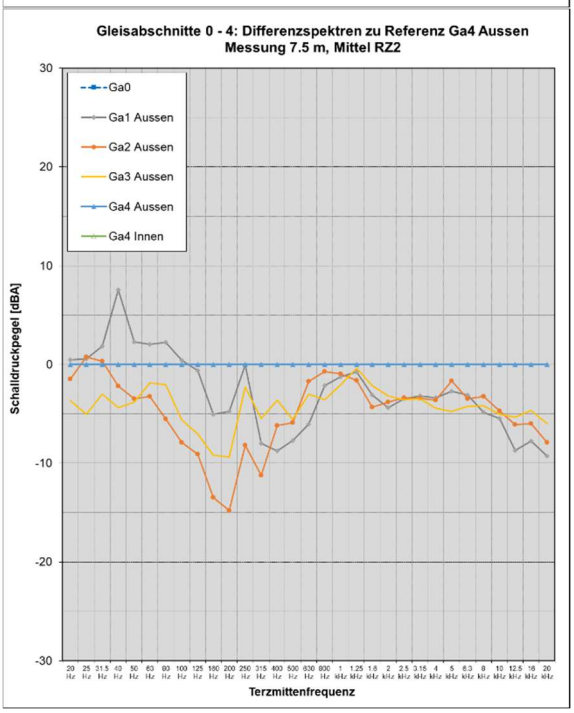




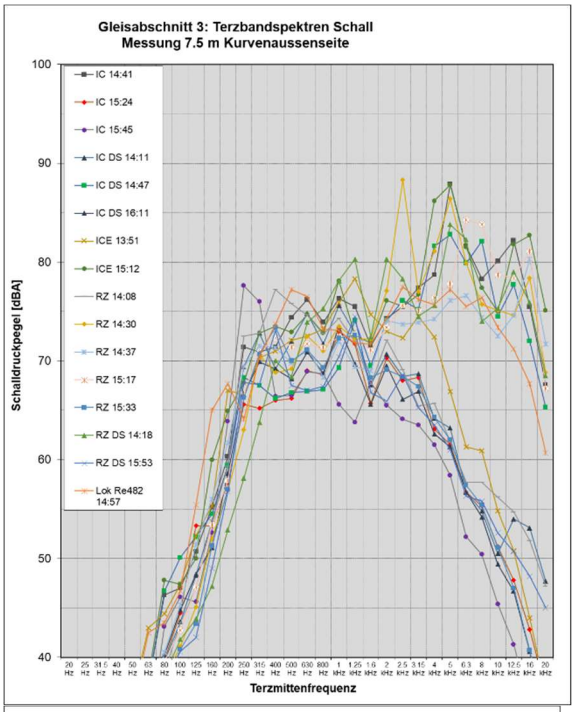

Gleisabschnitte 0 - 4: Differenzspektren zu Referenz Ga4 Aussen
Messung 7.5 m, Mittel ICE
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

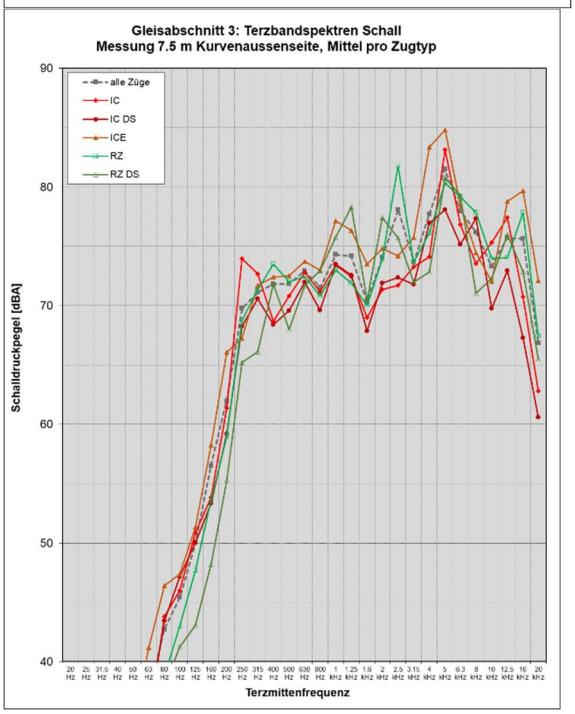

Gleisabschnitte 0 - 4: Differenzspektren zu Referenz Ga4 Aussen
Messung 7.5 m, Mittel RZ DS
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz


Gleisabschnitte 0 - 4: Differenzspektren zu Referenz Ga4 Aussen
Messung 7.5 m, Mittel RZ1
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

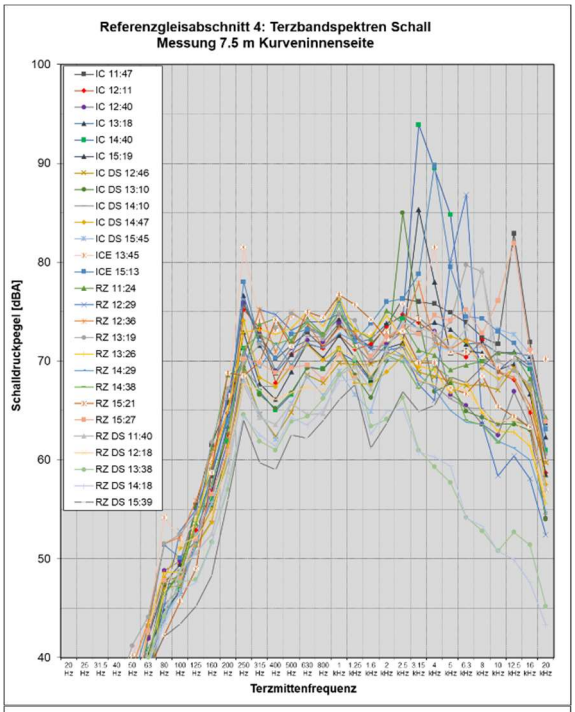

Gleisabschnitte 0 - 4: Differenzspektren zu Referenz Ga4 Aussen
Messung 7.5 m, Mittel RZ2
Ga0
Ga1 Aussen
Ga2 Aussen
Ga3 Aussen
Ga4 Aussen
Ga4 Innen
Schalldruckpegel [dBA]
Terzmittenfrequenz

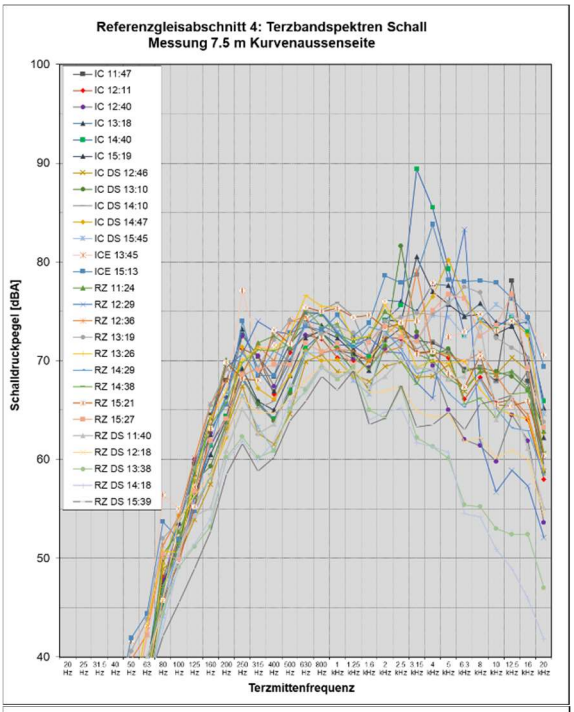
B11: Schallemissionsspektren, Gleisabschnitt 3, T3

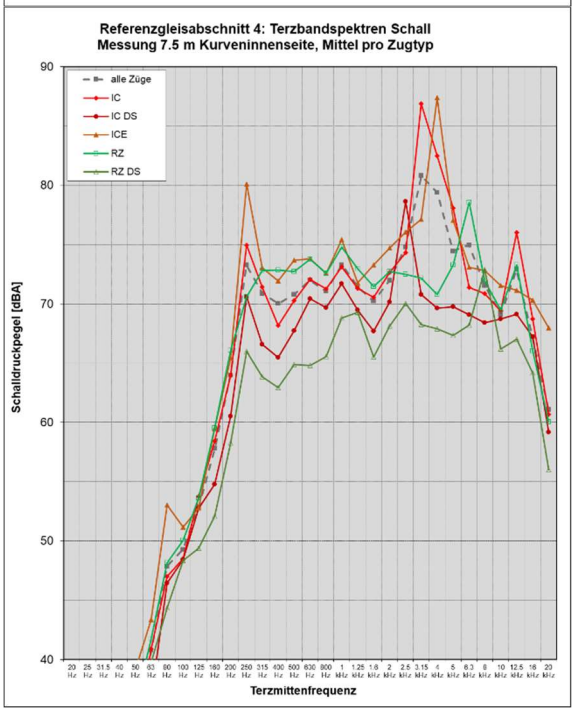


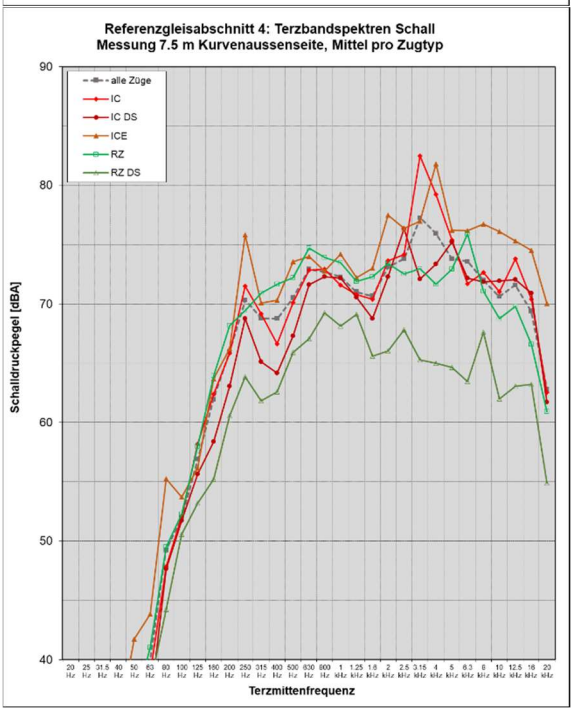


B12: Schallemissionsspektren, Gleisabschnitt 4, T3

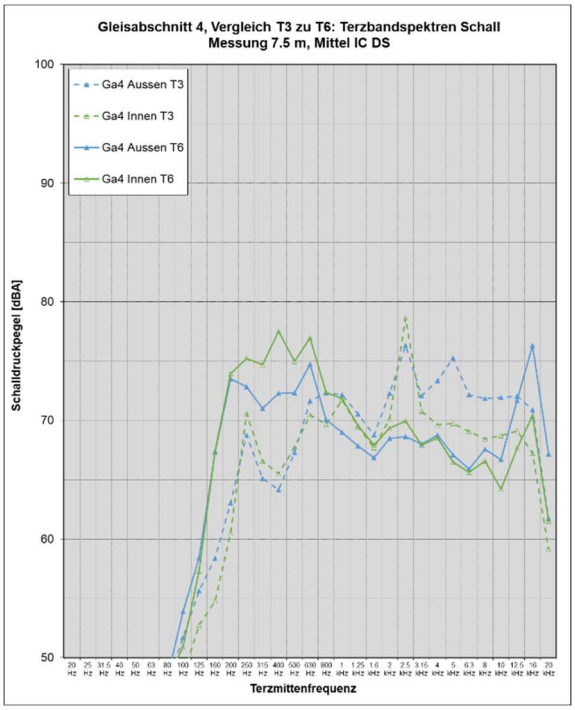


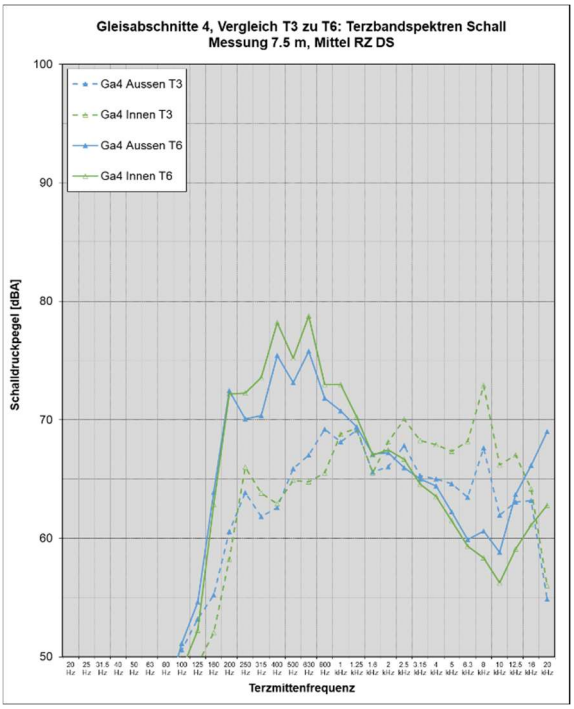






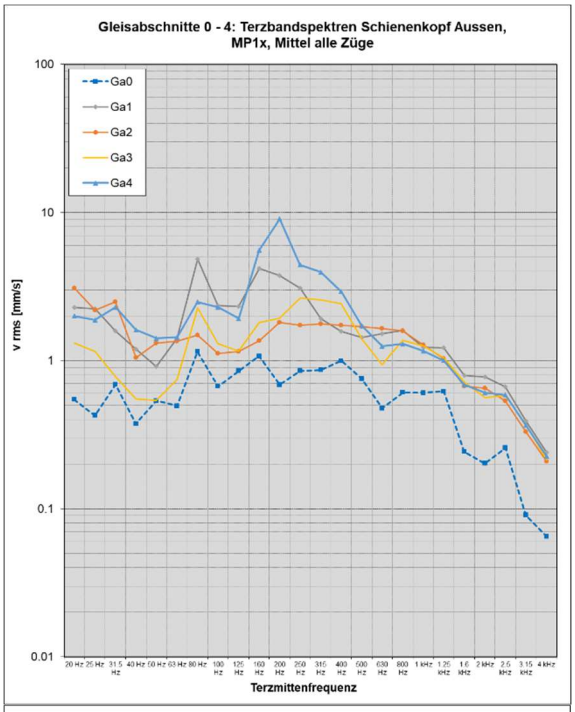
B13: Schallemissionsspektren, Gleisabschnitt 4, Vergleich T6 zu T3

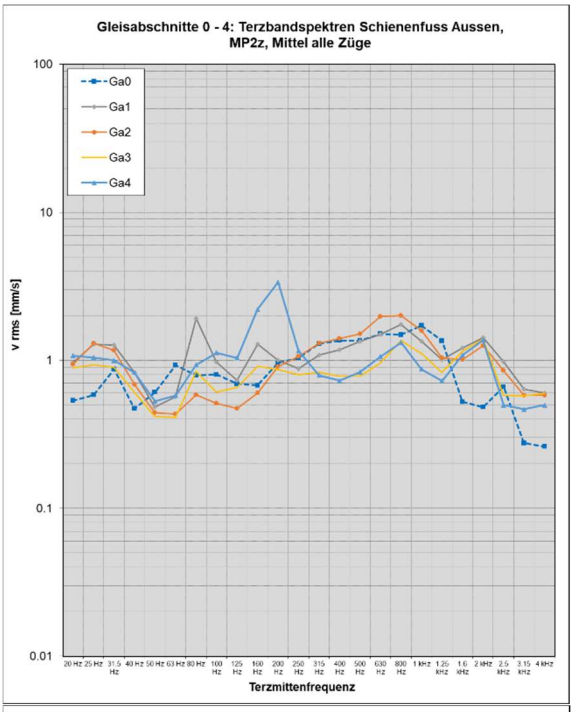


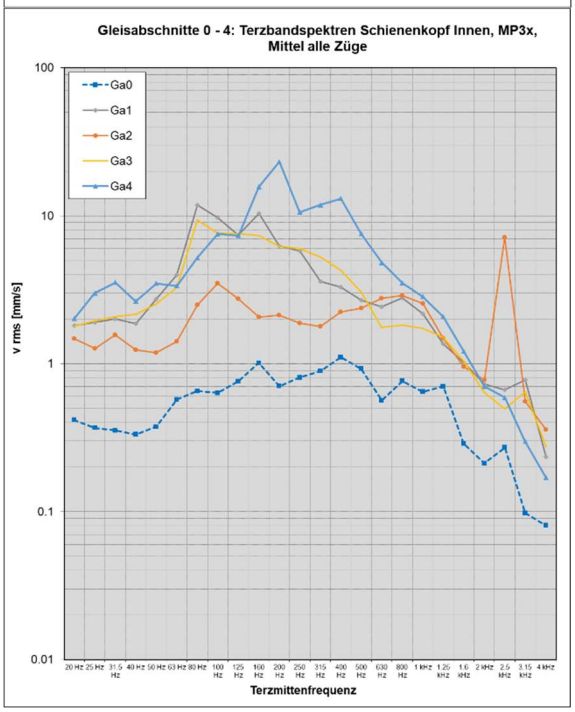


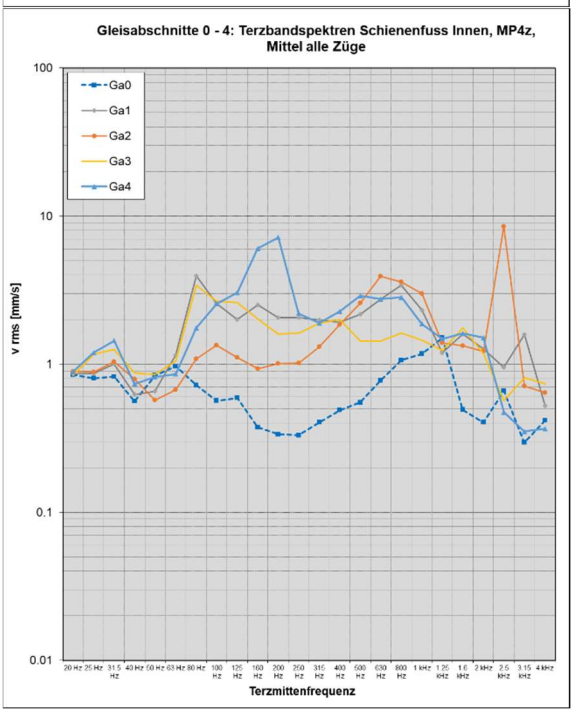
ANHANG C: SCHWINGUNGSMESSUNGEN OBERBAU

C1: Schwingungsspektren MP 1 – 4 (Schiene), Mittel alle Züge, T6

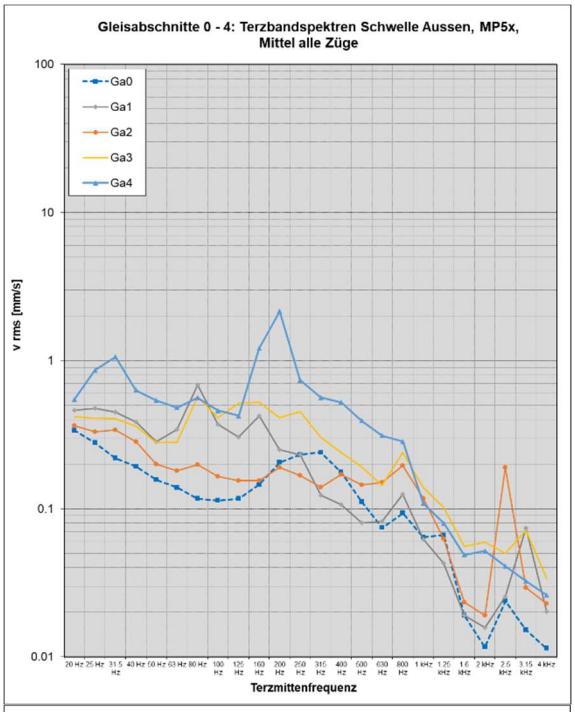


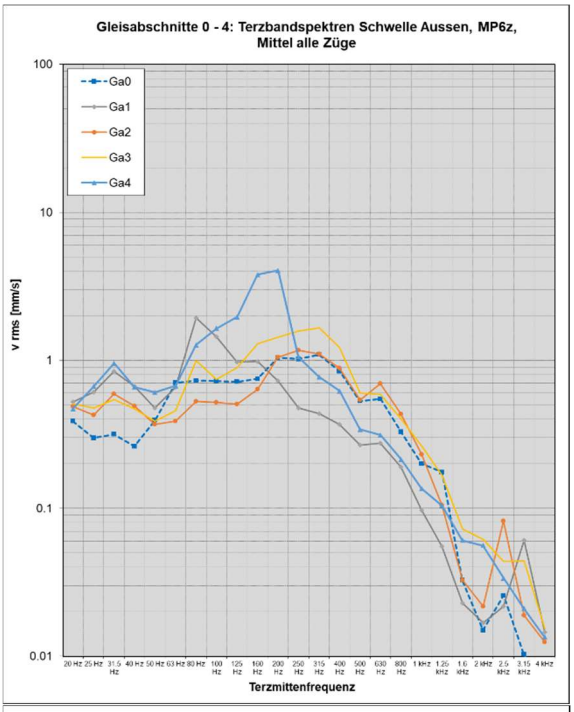


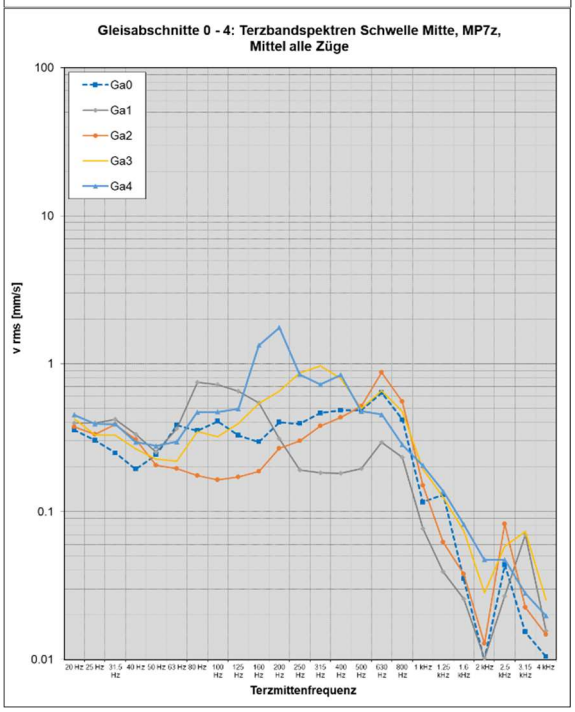


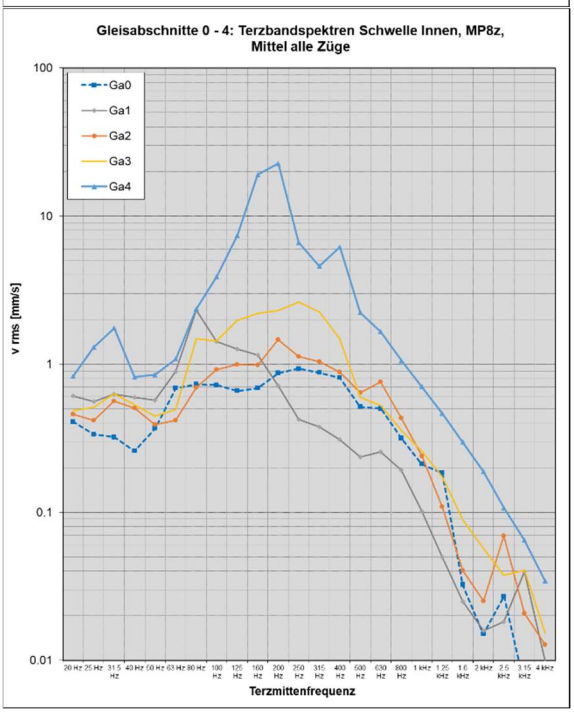


C2: Schwingungsspektren MP 5 – 8 (Schwelle), Mittel alle Züge, T6

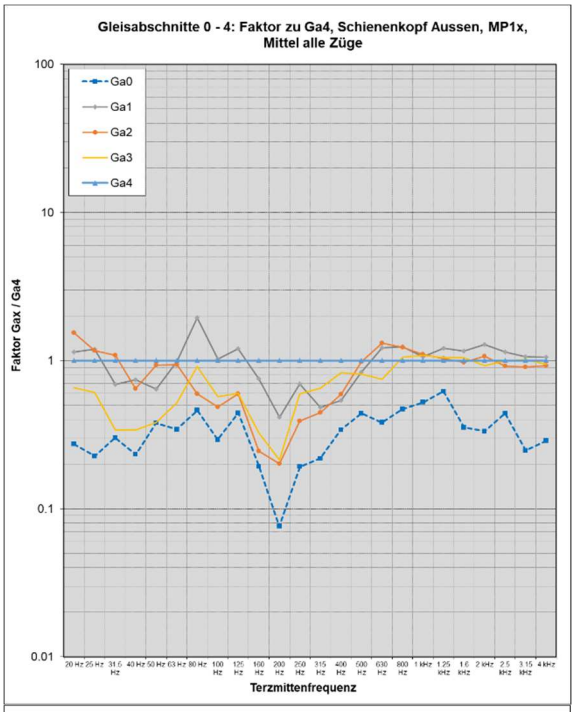


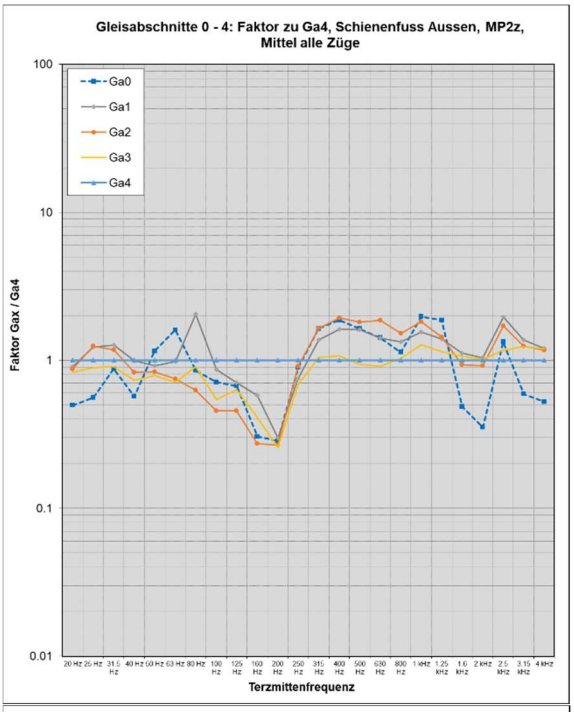


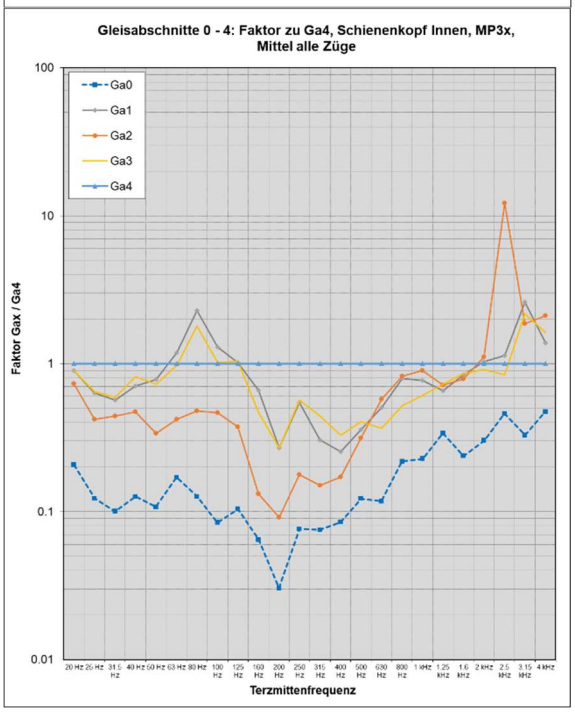


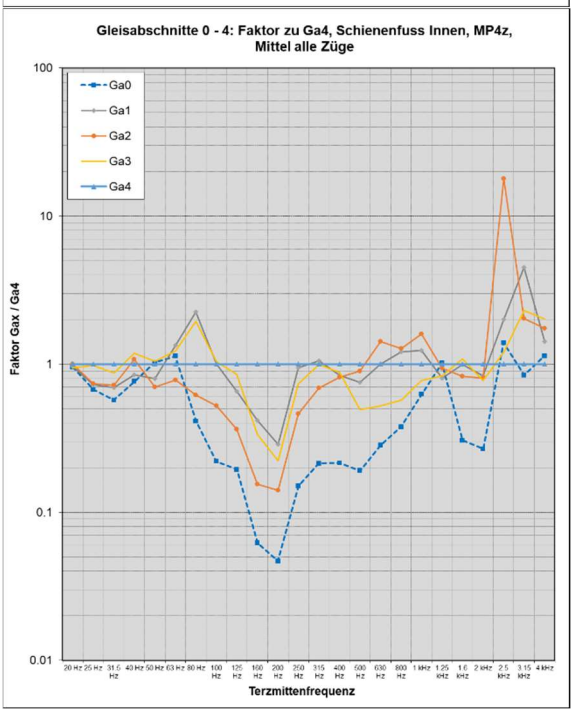


C3: Differenzspektren MP 1 – 4 (Schiene), Mittel alle Züge, T6

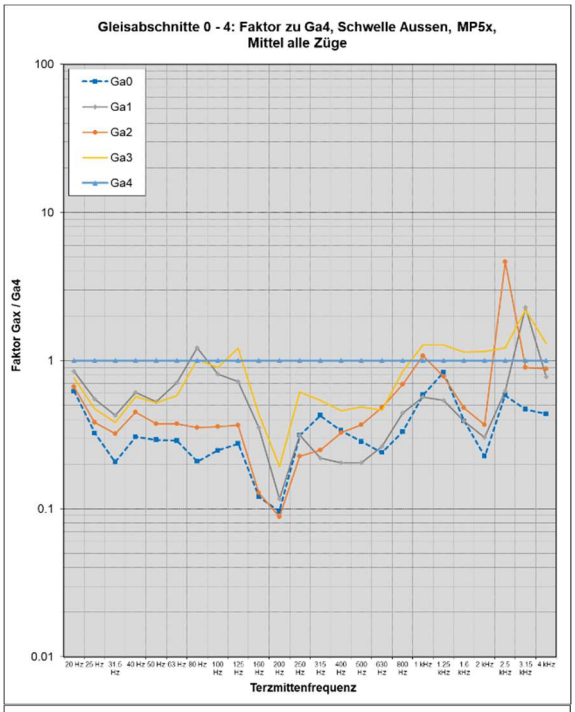


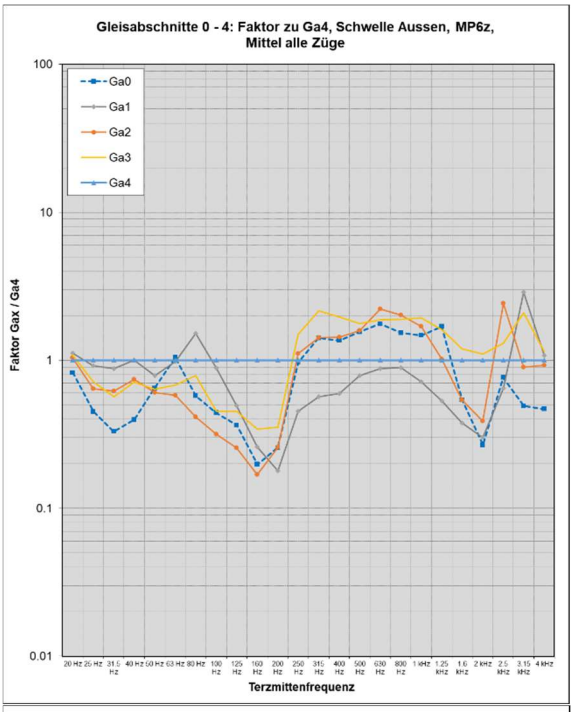


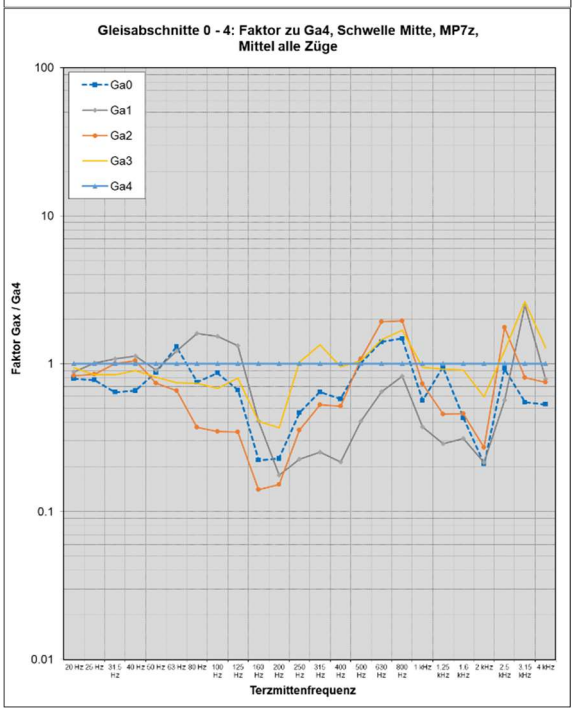


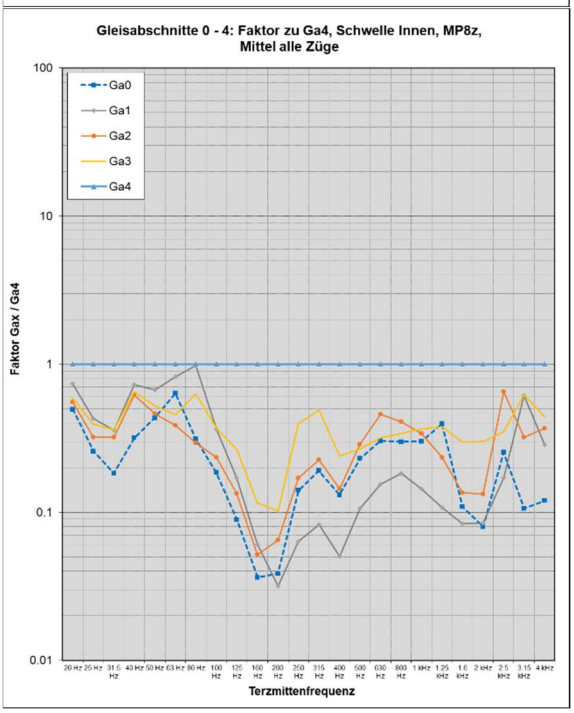


C4: Differenzspektren MP 5 – 8 (Schwelle), Mittel alle Züge, T6









ANHANG D: PROTOKOLL ZUGSVORBEIFAHRTEN

D0: Gleisabschnitt 0, T6

Projektname	Auftrag N° 17.03908	Trombik Ingenieure AG
BAFU Forschungsprojekt Schlupfwellen		Limmattalstrasse 344
Eisenbahnlärm		CH - 8049 Zürich

Luftschall-Messungen

MESSPROTOKOLL VOM 22.5.2019 — **Name: Ph. Huber** — **Seite 1**

km 20.9

Zug Nr.	Uhr-zeit	Video File Nr.	Zug Richtung Ost Interlaken	Zug Richtung West Thun	Gleis Nr. (1-gleisig)	Geschw. keit km/h	Zugs-typ	Bemerkungen (Zug, Anz. Wagen, etc.)
1	14:29			x		69	RZ1	Lok, 3 W
2	14:36		x			72	RZ2	Re 420, 6 W
3	14:40			x		69	IC	Re 460, 9W
4	14:45	MOV00E	x			70	IC DS	8 W, Re 460
5	15:12	MOV00F		x		69	ICE	Lok, 12 W, Lok
6	15:17	MOV010	x			69	IC	9 W, Re 460
7	15:20	MOV011		x		69	RZ2	6 W, Re 420
8	15:25	MOV012	x			70	RZ1	3 W, Lok
9	15:39	MOV013		x		70	RZ DS	4 W
10	15:50	MOV014	x			73	IC	12 W, Lok
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								
21								
22								
23								
24								
25								
26								
27								
28								
29								
30								
31								
32								
						70.0	km/h	mittlere Geschwindigkeit
								RZ = Regionalzug
								IC = Intercity-Zug
								DZ = Dienstzug
								DS = Doppelstock-Wagen

D1: Gleisabschnitt 1, T6

Projektname	Auftrag N° 17.03908	Trombik Ingenieure AG
BAFU Forschungsprojekt Schlupfwellen		Limmattalstrasse 344
Eisenbahnlärm		CH - 8049 Zürich

Luftschall-Messungen

MESSPROTOKOLL VOM 23.5.2019 **Name: Ph. Huber** **Seite 1**

km 19.5

Zug Nr.	Uhr-zeit	Video File Nr.	Zug Richtung Ost Interlaken	Zug Richtung West Thun	Gleis Nr. (1-gleisig)	Geschw. keit km/h	Zugs-typ	Bemerkungen (Zug, Anz. Wagen, etc.)
1	10:23		x			75	RZ DS	4 W, SCB Mutz
2	10:37	MOV015		x			RZ1	Lok, 3 W
3	10:44	MOV016		x			IC DS	Re 460, 8 W
4	11:11	MOV017	x			74	IC	12 W, Re 460
5	11:16	MOV018		x		62	IC	Re 460, 9 W, bremst
6	11:19	MOV019	x			71	IC DS	8 W, Re 460
7	11:26	MOV01A	x			71	RZ1	3 W, Lok
8	11:42	MOV01B		x		75	RZ DS	4 W, SCB Mutz
9	11:45	MOV01C	x			69	IC	10 W, Re 460
10	12:12	MOV01D		x		71	IC	Re 460, 12 W
11	12:22	MOV01E	x			70	RZ DS	4 W, SCB Mutz
12	12:35	MOV01F		x		71	RZ1	Lok, 3 W
13	12:38	MOV020	x			71	RZ2	Re 420, 6 W
14	12:44	MOV021		x		55	IC	Re 460, 10 W
15	12:46	MOV022	x			75	IC DS	8 W, Re 460
16	13:12	MOV023		x		52	IC DS	Re 460, 8 W
17	13:15	MOV024	x			70	IC	9 W, Re 460
18	13:21	MOV025		x		75	RZ2	6 W, Re 420
19	13:23	MOV026	x			68	RZ1	3 W, Lok
20	13:41	MOV027		x		67	RZ DS	4 W, SCB Mutz
21	13:43	MOV028	x			76	ICE	Lok, 12 W, Lok
22	14:11	MOV029		x		68	IC DS	Lok, 8 W
23	14:15	MOV02A	x			75	RZ DS	4 W, SCB Mutz
24	14:31	MOV02B		x		70	RZ1	Lok, 3 W
25	14:34	MOV02C	x			67	RZ2	Re 420, 6 W
26	14:42	MOV02D		x		50	IC	Re 460, 9 W
27	14:45	MOV02E	x			70	IC DS	8 W, Re 460
						68.7	km/h	mittlere Geschwindigkeit
								RZ = Regionalzug
								IC = Intercity-Zug
								DZ = Dienstzug
								DS = Doppelstock-Wagen

D2: Gleisabschnitt 2, T6

Projektname	Auftrag N° 17.03908	Trombik Ingenieure AG
BAFU Forschungsprojekt Schlupfwellen		Limmattalstrasse 344
Eisenbahnlärm		CH - 8049 Zürich

Luftschall-Messungen

MESSPROTOKOLL VOM 24.5.2019 **Name: Ph. Huber** **Seite 1**

km 19.8

Zug Nr.	Uhr-zeit	Video File Nr.	Zug Richtung Ost Interlaken	Zug Richtung West Thun	Gleis Nr. (1-gleisig)	Geschw. keit km/h	Zugs-typ	Bemerkungen (Zug, Anz. Wagen, etc.)
1	10:14	MOV02F		x		62	ICE	Lok, 12 W, Lok
2	10:17	MOV030	x			72	RZ1	Lok, 4 W
3	10:22	MOV031		x		64	DZ	Lok, 1 W
4	10:31	MOV032		x			RZ1	Lok, 3 W
5	10:41	MOV033		x			IC DS	Re 460, 8 W
6	10:45	MOV034	x				IC	12 W, Re 460
7	10:59	MOV035		x			GZ	Lok, 5 W
8	11:12	MOV036		x		67	IC	Re 460, 9 W
9	11:15	MOV037	x				IC DS	8 W, Re 460
10	11:23	MOV038	x			70	RZ1	3 W, Lok
11	11:40	MOV039		x			RZ1	4 W, Lok
12	11:44	MOV03A	x			69	IC	10 W, Re 460
13	12:13			x		58	IC	Re 460, 12 W
14	12:17	20190524_121727	x				RZ DS	4 W
15	12:30	20190524_123022		x		71	RZ1	Lok, 3 W
16	12:34		x			75	RZ2	Re 420, 6 W
17	12:41	20190524_124114		x		67	IC	Re 460, 10 W
18	12:45	20190524_124430	x			70	IC DS	8 W, Re 460
19	12:56			x		70	RZ DS	4 W
20	13:11	20190524_131114				64	IC DS	Re 460, 8 W
21	13:16	20190524_131505	x				IC	9 W, Re 460
22	13:20	20190524_132032		x		70	RZ2	6 W, Re 420
23	13:24	20190524_132342	x			66	RZ1	3 W, Lok
24	13:30	20190524_133021	x				RZ2	Re 420, 6 W
25	13:39	20190524_133942		x		75	RZ DS	4 W
26	13:43	20190524_134256	x			63	ICE	Lok, 12 W, Lok
27	14:10	20190524_141056		x		71	IC DS	Re 460, 8 W
28	14:15	20190524_141527	x			75	RZ DS	4 W
29	14:30	20190524_143036		x		72	RZ1	Lok, 3 W
30	14:34		x			68	RZ1	Lok, 3 W
31	14:40	20190524_144043		x		65	IC	Re 460, 9 W
32	14:44	20190524_144417	x			64	IC DS	8 W, Re 460
						68.2	km/h	mittlere Geschwindigkeit
								RZ = Regionalzug
								IC = Intercity-Zug
								DZ = Dienstzug
								DS = Doppelstock-Wagen

D3: Gleisabschnitt 3, T6

Projektname	Auftrag N° 17.03908	Trombik Ingenieure AG
BAFU Forschungsprojekt Schlupfwellen		Limmattalstrasse 344
Eisenbahnlärm		CH - 8049 Zürich

Luftschall-Messungen

MESSPROTOKOLL VOM 22.5.2019 **Name: Ph. Huber** **Seite 1**

km 21.2

Zug Nr.	Uhr-zeit	Video File Nr.	Zug Richtung Ost Interlaken	Zug Richtung West Thun	Gleis Nr. (1-gleisig)	Geschw. keit km/h	Zugs-typ	Bemerkungen (Zug, Anz. Wagen, etc.)
1	10:12	MOV1E3		x			ICE	Lok, 12 W, Lok
2	10:18	MOV1E4	x				RZ DS	4 W
3	10:30	MOV1E5		x			RZ1	Lok, 3 W
4	10:36	MOV1E6	x				GZ	Rangierlok, 5 Kesselwagen
5	10:45	MOV1E7		x		69	IC DS	Re 460, 8 W
6	10:51	MOV1E8	x			67	IC	12 W, Re 460
7	11:11	MOV1E9		x		60	IC	Re 460, 9 W
8	11:17	MOV1EA	x			68	IC DS	8 W, Re 460
9	11:24	MOV1EB	x				RZ1	3 W, Lok
10	11:39	MOV1EC		x		68	RZ DS	4 W
11	11:46	MOV001	x			66	IC	10 W, Re 460
12	11:48	MOV002		x			DZ	Rangierlok
13	12:10	MOV003		x			IC	Re 460, 12 W
14	12:18	MOV004	x			67	RZ DS	4 W
15	12:30	MOV005		x		70	RZ1	Lok, 3 W
16	12:35	MOV006	x			63	RZ2	Re 420, 6 W
17	12:42	MOV007		x		61	IC	Re 460, 10 W
18	12:47	MOV008	x			65	IC DS	8 W, Re 460
19	13:10	MOV009		x		65	IC DS	Re 460, 8 W
20	13:16	MOV00A	x			48	IC	9 W, Re 460
21	13:19	MOV00B		x		69	RZ2	6 W, Re 420
22	13:24	MOV00C	x				RZ1	3 W, Lok
23	13:45	MOV00D	x				ICE	Lok, 12 W, Lok
						64.7	km/h	mittlere Geschwindigkeit
								RZ = Regionalzug
								IC = Intercity-Zug
								DZ = Dienstzug
								DS = Doppelstock-Wagen

D4: Gleisabschnitt 4, T6

Projektname	Auftrag N° 17.03908	Trombik Ingenieure AG
BAFU Forschungsprojekt Schlupfwellen		Limmattalstrasse 344
Eisenbahnlärm		CH - 8049 Zürich

Luftschall-Messungen

MESSPROTOKOLL VOM 21.5.2019 — **Name: Ph. Huber** — **Seite 1**

km 21.4

Zug Nr.	Uhr-zeit	Video File Nr.	Zug Richtung Ost Interlaken	Zug Richtung West Thun	Gleis Nr. (1-gleisig)	Geschw. keit km/h	Zugs-typ	Bemerkungen (Zug, Anz. Wagen, etc.)
1	10:40			x		70	IC DS	Re 460, 8 W
2	10:46	MOV1C5	x			63	IC	12 W, Re 460
3	11:10	MOV1C6		x		65	IC	Re 460, 9 W
4	11:17		x			70	IC DS	8 W, Re 460
5	11:24	MOV1C8	x			60	RZ1	3 W, Lok
6	11:41			x		69	RZ DS	4 W
7	11:47	MOV1CA	x			66	IC	10 W, Re 460
8	12:11			x		66	IC	Re 460, 12 W
9	12:22	MOV1CC	x			70	RZ DS	4 W
10	12:32			x		65	RZ1	Lok, 3 W
11	12:38	MOV1CE	x			64	RZ1	Lok, 4 W
12	12:42	MOV1CF		x		64	IC	Re 460, 12 W
13	12:47	MOV1D0	x			65	IC DS	8 W, Re 460
14	13:10	MOV1D1		x		66	IC DS	Re 460, 8 W
15	13:16	MOV1D2	x			45	IC	9 W, Re 460
16	13:18			x		67	RZ2	6 W, Re 420
17	13:24	MOV1D4	x			60	RZ1	3 W, Lok
18	13:38	MOV1D5		x		69	RZ DS	4 W
19	13:45	MOV1D7	x			69	ICE	Lok, 12 W, Lok
20	13:47	MOV1D8		x		56	RZ2	2 W, Re 420
21	14:10	MOV1D9		x		65	IC DS	Re 460, 8 W
22	14:17	MOV1DA	x			69	RZ DS	4 W
23	14:29	MOV1DB		x		63	RZ1	Lok, 3 W
24	14:36	MOV1DC	x			55	RZ2	Re 420, 6 W
25	14:39	MOV1DD		x		66	IC	Re 460, 9 W
26	14:45	MOV1DE	x			67	IC DS	8 W, Re 460
27	14:50	MOV1DF	x			67	RZ2	Re 420, 2W
28	15:11	MOV1E0		x		60	ICE	Lok, 12 W, Lok
29	15:18	MOV1E1	x			68	IC	9 W, Re 460
30	15:20	MOV1E2		x		57	RZ2	6 W, Re 420
						64.2	km/h	mittlere Geschwindigkeit
								RZ = Regionalzug
								IC = Intercity-Zug
								DZ = Dienstzug
								DS = Doppelstock-Wagen

D5: Gleisabschnitt 3, T3

Projektname	Auftrag N° 17.03908	Trombik Ingenieure AG
BAFU Forschungsprojekt Schlupfwellen		Limmattalstrasse 344
Eisenbahnlärm		CH - 8049 Zürich

Luftschall-Messungen

MESSPROTOKOLL VOM 13.11.2018 **Name: Ph. Huber** **Seite 1**
km 21.2

Zug Nr.	Uhr-zeit	Video File Nr.	Zug Richtung Ost Interlaken	Zug Richtung West Thun	Gleis Nr. (1-gleisig)	Geschw. keit km/h	Zugs-typ	Bemerkungen (Zug, Anz. Wagen, etc.)
1	13:51	MOV1A7	x			64	ICE	Lok, 11W, Lok
2	14:08	MOV1A8	x			65	RZ	2W
3	14:11	MOV1A9		x		63	IC DS	Re460, 8W DS
4	14:18	MOV1AA	x			70	RZ DS	4W DS
5	14:29	MOV1AB		x		66	RZ	5W
6	14:36	MOV1AC	x			63	RZ	4W
7	14:40	MOV1AD		x		66	IC	Re460, 9W
8	14:46	MOV1AE	x			70	IC DS	8W DS, Re460
9	14:56	MOV1AF		x		66	Lok	Re482
10	15:12	MOV1B0		x		55	ICE	Lok, 11W, Lok
11	15:17	MOV1B1		x		69	RZ	4W
12	15:24	MOV1B2	x			65	IC	9W, Re460, Regen
13	15:33	MOV1B3	x			68	RZ	5W, Regen
14	15:45	MOV1B4	x			55-40	IC	12W, Re460
15	15:53	MOV1B5		x		70	RZ DS	4W DS
16	16:11	MOV1B6		x		70	IC DS	Re460, 12W teilweise DS, Regen
						66.0	km/h	mittlere Geschwindigkeit
								RZ = Regionalzug
								IC = Intercity-Zug
								DZ = Dienstzug
								DS = Doppelstock-Wagen

D6: Gleisabschnitt 4, T3

Projektname	Auftrag N° 17.03908	Trombik Ingenieure AG
BAFU Forschungsprojekt Schlupfwellen		Limmattalstrasse 344
Eisenbahnlärm		CH - 8049 Zürich

Luftschall-Messungen

MESSPROTOKOLL VOM 12.11.2018 **Name: Ph. Huber** **Seite 1**
km 21.4

Zug Nr.	Uhr-zeit	Video File Nr.	Zug Richtung Ost Interlaken	Zug Richtung West Thun	Gleis Nr. (1-gleisig)	Geschw. keit km/h	Zugs-typ	Bemerkungen (Zug, Anz. Wagen, etc.)
1	11:24	MOV18B	x			70	RZ	4W
2	11:39	MOV18C		x			RZ DS	4W DS
3	11:46	MOV18D	x			69	IC	9W, Re460
4	12:11	MOV18E		x		63	IC	Re460, 12W
5	12:18	MOV18F	x			69	RZ DS	4W DS
6	12:29	MOV190		x		66	RZ	4W
7	12:36	MOV191	x			50	RZ	Re425, 6W
8	12:40	MOV192		x		65	IC	Re460, 9W
9	12:46	MOV193	x			66	IC DS	8W DS, Re460
10	13:10	MOV194		x		65	IC DS	Re460, 8W DS
11	13:17	MOV195	x			65	IC	9W, 2 Re460
12	13:19	MOV196		x		62	RZ	6W, Re425
13	13:25	MOV197	x			63	RZ	5W
14	13:38	MOV198		x		70	RZ DS	4W DS
15	13:45	MOV199	x			59	ICE	Lok, 12W, Lok
16	14:10	MOV19A		x		65	IC DS	Re460, 8W DS
17	14:18	MOV19B	x			69	RZ DS	4W DS
18	14:29	MOV19C		x		69	RZ	5W
19	14:38	MOV19D	x			58	RZ	5W
20	14:40	MOV19E		x		66	IC	2 Re460, 9W
21	14:46	MOV19F	x			50-40	IC DS	8W DS, Re460
22	14:49	MOV1A0		x		56	DZ	1 D-Lok, 2W
23	15:13			x		62	ICE	Lok, 12W, Lok
24	15:19	MOV1A3	x			65	IC	9W, Re460
25	15:21	MOV1A3		x		70	RZ	5W
26	15:27	MOV1A4	x			55	RZ	5W
27	15:39	MOV1A5		x		69	RZ DS	4W DS
28	15:45	MOV1A6	x			64	IC DS	8W DS, Re460
						64.2	km/h	mittlere Geschwindigkeit
								RZ = Regionalzug
								IC = Intercity-Zug
								DZ = Dienstzug
								DS = Doppelstock-Wagen

ANHANG E: FOTOS SCHIENENKOPF UND FAHRSPIEGEL

E1: Gleisabschnitt 1

Innenschiene:

Aussenschiene:

T0





T2





T3





T4





T5





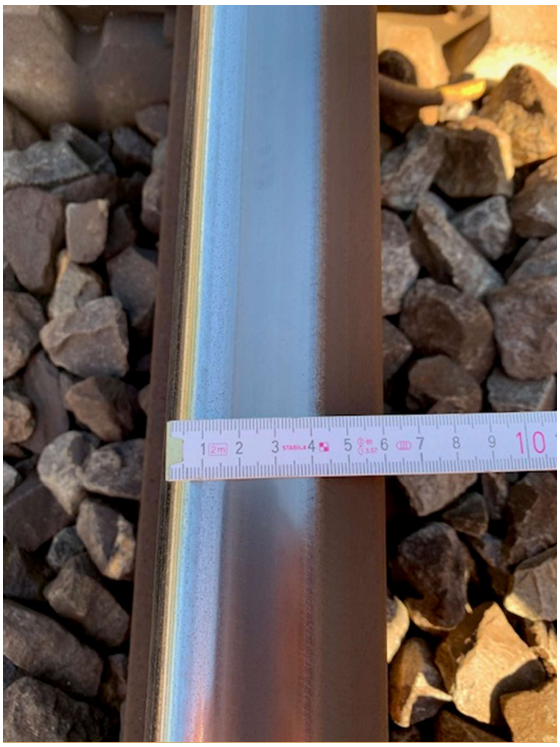
T6





T7





T8





E2: Gleisabschnitt 2

Innenschiene:

Aussenschiene:

T0





T2





T3





T4



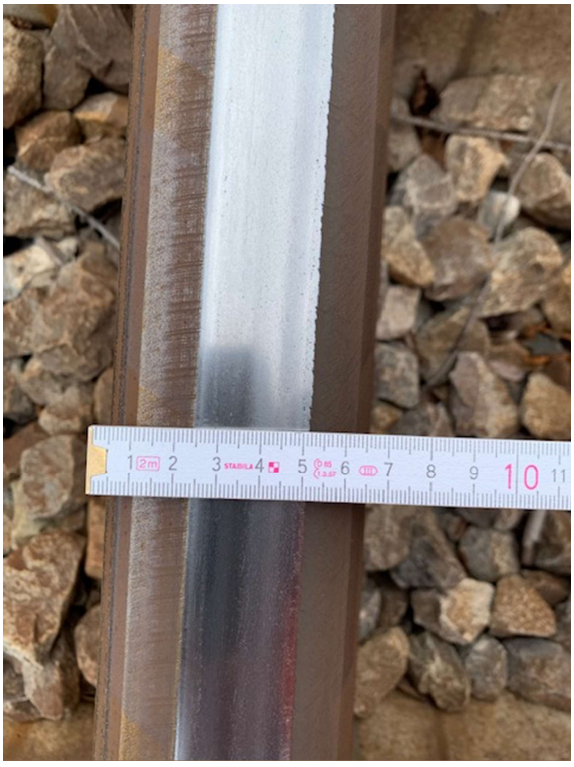


T5





T6





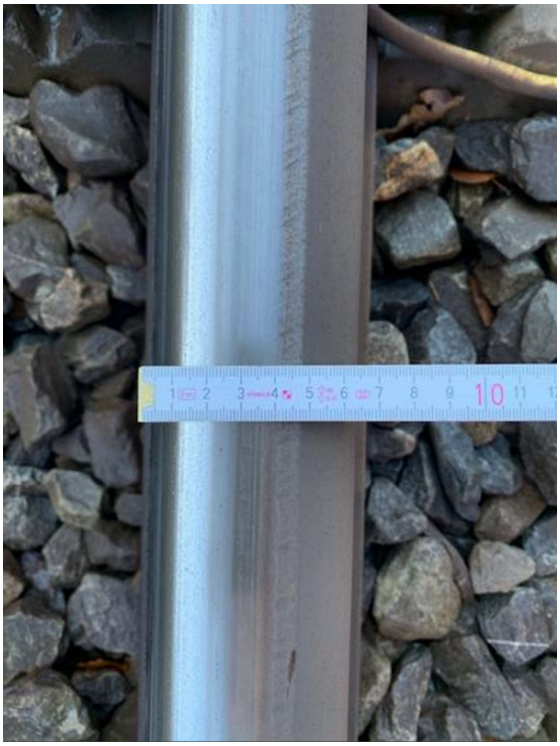
T7





T8





E3: Gleisabschnitt 3

Innenschiene:

Aussenschiene:

T0





T2





T3





T4





T5





T6





T7





T8





E4: Gleisabschnitt 4

Innenschiene:

Aussenschiene:

T0





T2





T3





T4





T5





T6



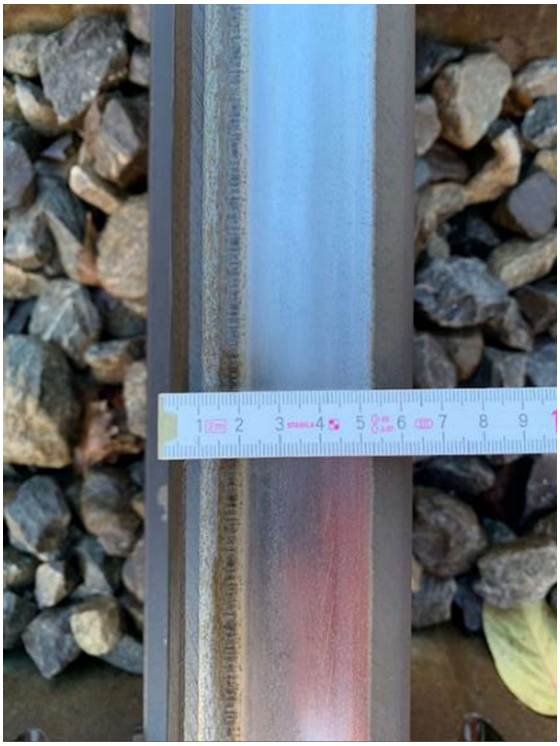


T7





T8





ANHANG F: FOTOS SCHALLEMISSIONSMESSUNGEN

F0: Gleisabschnitt 0, T6



Messpunkt Nord

F1: Gleisabschnitt 1, T6



Messpunkt 1 Bogenaussenseite



Messpunkt 2 Bogenaussenseite

F2: Gleisabschnitt 2, T6



Messpunkt Bogenaussenseite



Messpunkt Bogenaussenseite

F3: Gleisabschnitt 3, T6


Messpunkt 1 Bogenaussenseite


Messpunkt 2 Bogenaussenseite

F4: Gleisabschnitt 4, T6


Messpunkt Bogenaussenseite


Messpunkt Bogeninnenseite

F5: Gleisabschnitt 3, T3


Messpunkt Bogenaussenseite


Messpunkt Bogenaussenseite

F6: Gleisabschnitt 4, T3



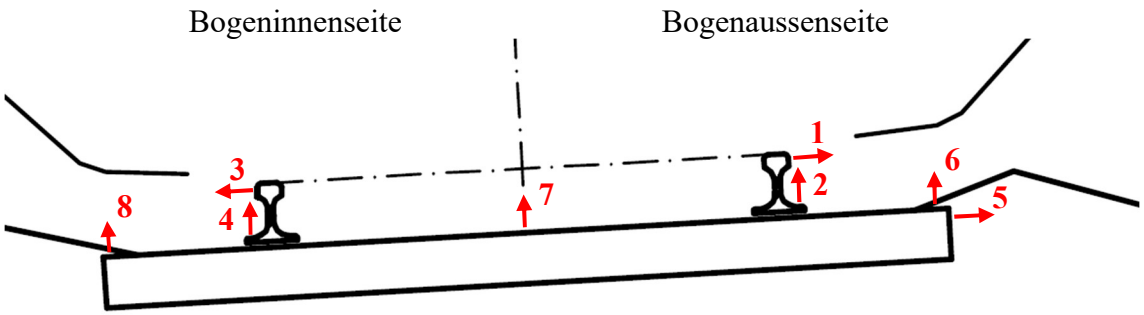
Messpunkt Bogenaussenseite



Messpunkt Bogeninnenseite

ANHANG G: SCHWINGUNGSMESSUNGEN OBERBAU

G1: Messpunkte Schwingungsmessungen Oberbau



Messpunkte 1 – 4 an der Schiene im Schwellenfach

Messpunkte 5 – 8 an der Schwelle

G2: Fotos Messpunkte, T6



Messpunkte 1, 2, 5, 6 Bogenaussenseite

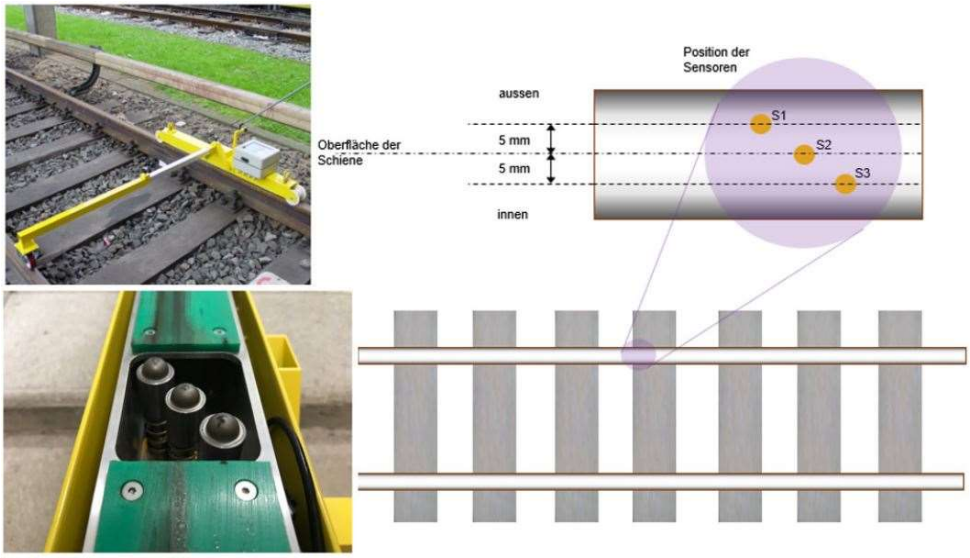


Messpunkte 3, 4, 8 Bogeninnenseite



Messpunkt 7 Schwellenmitte

ANHANG H: MESSGERÄT APT RSA – RAIL SURFACE ANALYSER



Anwendungen
- Quantifizierung der Schienenrauheit und Schlupfwellen
- Beurteilung der Schienenschleifqualität
- Als Grundlage für Lärmmessungen und -prognosen

Messmöglichkeiten
- Misst die vertikale Schienenkopfvariation relativ zu einer gleitenden Referenz mit einer Länge von 1 m als Funktion der Distanz
- Messung gemäss ISO 3095: 2005 (E)
- Unlimitierte Messlänge
- Leichte und handliche Führung auf dem Gleis

Messaufnehmer
- Dynamischer Messbereich : ± 5000 µm
- Aufnehmertyp: Wegsensor (LVDT)
- Anzahl Aufnehmer: 3 (unabhängig positioniert auf dem Schienenkopf)
- Grundrauschen Sensor: 0.1 µm
- Geber für Positionsbestimmung 128 Pulse pro Umdrehung

Datenaufnahme
- Aufnahmegerät: 4-kanalig simultan– 16 bit A/D Converter
- Resampling post-processing bei 1000 samples pro Meter
- Speicherkapazität: 1 Gigabyte memory
- 6 Stunden Messung
- Download Daten auf Labtop: USB-1

Data Processing
- Flexible Software für Daten Output in verschiedener Form
- Rauheitsspektren in: 1/3 Oktavband, Schmalband, PSD
- Farbkarten
- RMS level versus Distanz

ANHANG I: MESSGERÄT LUFTSCHALL

Norsonic Nor150 (Umweltanalysatoren mit parallelen A-, C- und Flat-Netzwerken und den Zeitkonstanten F,S,I)



- 1 oder 2 Mikrophone Klasse 1
- Akustischer Kalibrator NOR 1251
- Abspeicherung von Leq, Spitzenpegel, Lmax und Lmin in Zeitintervallen 100 ms bis mehreren Sekunden, Abspeicherung des Spektrums (i.d.R. 1“-Leq)
- Aufzeichnung von Audiosignalen (manuell oder mittels Triggerung)
- Datenträger: Interne Harddisk (> 4 GB)
- Signalauswertung mit Softwarepaket Norsonic NorReview für die Nachverarbeitung und die Präsentation von Lärmmessdaten

ANHANG J: MESSGERÄT OBERBAUSCHWINGUNGEN

System MEDA RedSens (drahtloses Übertragungssystem):

- Schwingungsmesser 8x Beschleunigungsaufnehmer PCB M350C24
  Empfindlichkeit 1 mV/g
  Frequenzbereich 0.4 Hz bis 10 kHz
  Messbereich +/- 5000g

- Datenträger Laptop mit Software MEDA zur direkten Signalaufzeichnung auf Harddisk, 9-kanalig für Schwingungs- und Schallmessungen verwendete Aufnahmebandbreite 10 - 5000 Hz, Aufnahmezeitfenster 30 s

- Signalauswertung MEDA (von Wölfel Meßsysteme • Software GmbH, Höchberg, Deutschland)
  umfassende Software mit verschiedenen Zusatzprogrammen zur digitalen Signalauswertung von Schall- und Schwingungsmessungen auf Laptop oder PC