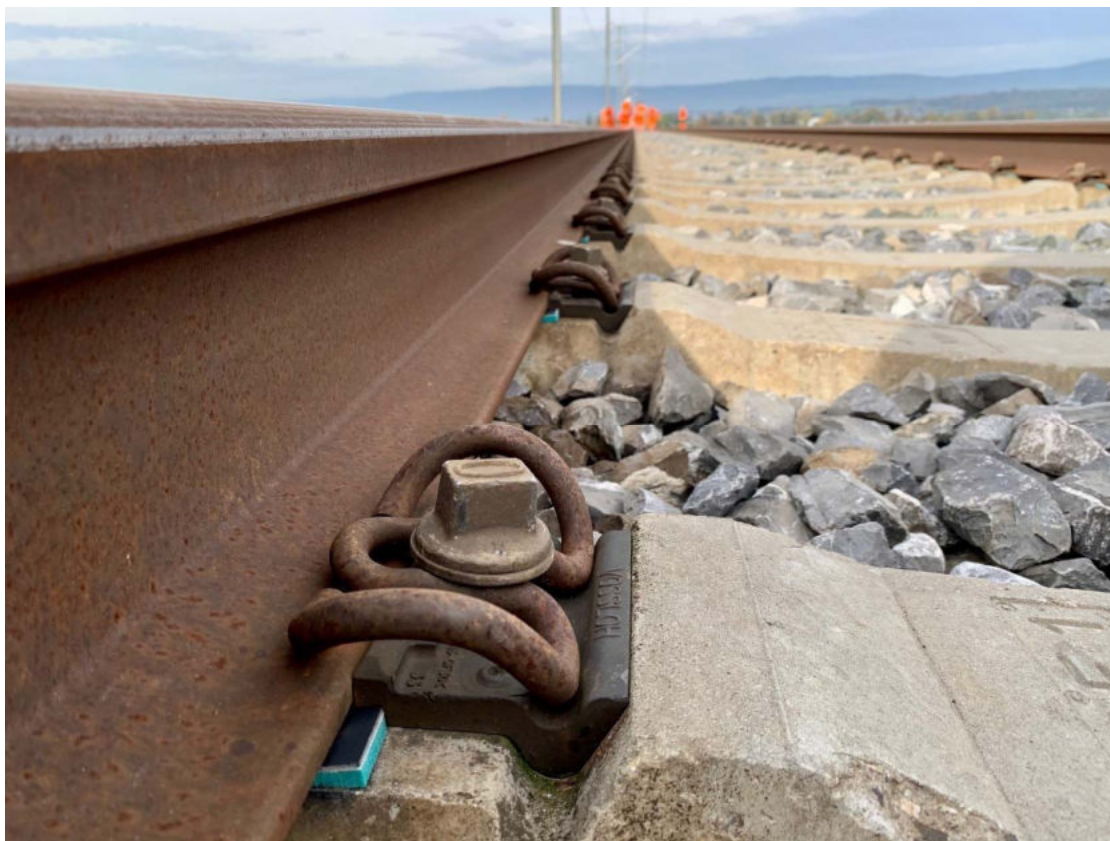


Forschungsprojekt hochdämpfende Zwischenlage Schlussbericht

Im Auftrag der Schweizerischen Eidgenossenschaft



Quelle: KPZ Fahrbahn

Version	Datum	Ersteller	Bemerkungen / Änderungen
1.0	18.11.2020	Ph. Huber, St. Werner	Erstausgabe
1.1	30.11.2020	Ph. Huber, St. Werner	Schall-Differenzspektren ergänzt

Philipp Huber / Stefan Werner

Direkt +41 79 571 31 15 / +41 79 963 23 09

E-Mail philipp.huber@kpz-fahrbahn.ch

stefan.werner@kpz-fahrbahn.ch

Homepage www.kpz-fahrbahn.ch

Impressum

Auftraggeberin:	Schweizerische Eidgenossenschaft; Bundesämter für Umwelt (BAFU) und Verkehr (BAV), CH-3003 Bern. Das BAFU und das BAV sind Ämter des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)
Auftragnehmerin	KPZ Fahrbahn AG
Projektleitung	Stefan Werner
Autor/Autorin:	Philipp Huber, Stefan Werner
Begleitung:	BAFU: Franz Kuster, Fredy Fischer BAV: Robert Attinger, Christoph Dürig
Hinweis:	Dieser Bericht wurde im Auftrag der Bundesämter für Umwelt (BAFU) und Verkehr (BAV) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	5
2. Ziel und Zweck des Forschungsprojektes	7
3. Beschreibung der getesteten Zwischenlage	8
3.1. Werkstoff und Abmessungen	8
3.2. Statische und dynamische Steifigkeit	8
3.3. Dauerstandsverhalten	9
4. Messkonzept.....	11
4.1. Teststrecke, Gleisabschnitte und Messquerschnitte	11
4.2. Messungen Schallemissionen	11
4.3. Messungen Schienenrauheit	12
4.4. Messungen Gleisabklingrate	12
4.5. Messungen Schwellenschwingungen.....	13
5. Messergebnisse	14
5.1. Messungen Schallemissionen	14
5.1.1. Daten zur Messung	14
5.1.2. Ergebnisse Nullmessung.....	14
5.1.3. Ergebnisse Effektmessung.....	17
5.2. Messungen Schienenrauheit	22
5.2.1. Daten zur Messung	22
5.2.2. Ergebnisse Schienerauheitsmessung	22
5.3. Messungen Gleisabklingrate	25
5.3.1. Daten zur Messung	25
5.3.2. Ergebnisse Gleisabklingratenmessung	25
5.4. Messungen Schwellenschwingungen.....	27
5.4.1. Daten zur Messung	27
5.4.2. Ergebnisse Messung Schwellenschwingungen.....	27
6. Zusammenfassung und Interpretation der Messergebnisse.....	29
6.1. Schallemissionen.....	29
6.2. LCC Oberbau	30
7. Weiterer Forschungsbedarf	31
8. Literaturverzeichnis	32
Anhang.....	33
Anhang 1: Schallemissionen	34
Anhang 2: Gleisabklingraten.....	47
Anhang 3: Schwellenschwingungen	49
Anhang 4: Fotos Messungen Schallemissionen.....	54
Anhang 5: Fotos Messungen Schienenrauheit.....	57

Anhang 6: Fotos Messungen Schwellenschwingungen	64
Anhang 7: Protokoll Zugsvorbeifahrten Nullmessung 14.10.2020.....	67
Anhang 8: Protokoll Zugsvorbeifahrten Effektmessung 04.11.2020.....	68
Anhang 9: Messgerät Schallemissionen: NOR140.....	69
Anhang 10: Messgerät Schienenrauheiten: APT RSA – Rail Surface Analyser.....	70
Anhang 11: Messgerät Schwellenschwingungen: Syscom MR 2002.....	71
Anhang 12: Wetterdaten während Null- und Effektmessung.....	72

1. Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt hochdämpfende Zwischenlage wurde wie geplant abgewickelt und zeigt erfreuliche Resultate. Die getestete hochdämpfende Zwischenlage ist zwar erst seit einem Monat auf einem 120 m langen BLS-Testabschnitt im Einsatz, die Resultate der messtechnischen Untersuchungen lassen aber bereits vermuten, dass die Ziele des Forschungsprojektes erreicht werden können.

Sowohl die Gleisabklingraten- wie auch die Schallemissionsmessungen zeigen, dass die hochdämpfende Zwischenlage akustisch sehr ähnlich wirkt wie eine harte Zwischenlage, obwohl sie statisch fast zehnmal weicher ist.

Mit den Schallemissionsmessungen wird gegenüber dem Referenzoberbau mit weicher Zwischenlage eine Schallminderung von 3.6 dBA beim Zugtyp EWIII und 3.8 dBA beim Zugtyp Nina ausgewiesen.

Die Labortests ergaben eine statische Steifigkeit der hochdämpfenden Zwischenlage von 68.9 kN/mm. Damit ist sie weicher als die bei der BLS verwendeten weichen Zwischenlagen (Typ Zw 700b-100-SF150) mit nomineller statischer Steifigkeit von 100 kN/mm. Damit kann sie die quasistatischen Radlasten mindestens so gut auf mehrere Stützpunkte verteilen wie eine weiche Zwischenlage. Ein Nachweis unter Betrieb z.B. mittels Schieneneinsenkungsmessungen relativ zur Schwelle wurde bislang allerdings noch nicht erbracht und wäre aus unserer Sicht zu empfehlen.

Die Gleisabklingrate im Abschnitt mit der hochdämpfenden Zwischenlage, welche im akustisch relevanten Frequenzbereich fast deckungsgleich zur harten Zwischenlage verläuft, tendiert tieffrequent zur weichen Zwischenlage. Auch diese ist hinsichtlich LCC Oberbau ein positives Zeichen.

Betrachtet man andererseits die Schwellenschwingungen, zeigt sich ein anderes Bild mit höheren Schwellenschwingungen im Bereich der hochdämpfenden Zwischenlagen, was nicht auf ein oberbauschonendes Verhalten hindeutet. Es gibt allerdings noch weitere Faktoren, die diese grossen Unterschiede bei den tieffrequenten Schwellenschwingungen erklären könnten. Einerseits wären das Unterschiede zwischen den Messquerschnitten bei den langwelligen Gleisunebenheiten, die mit dem Schienenrauheitsmessgerät nicht mehr erfasst werden (> 500 mm) und andererseits die Unterbauimpedanz (Schwingungswiderstand), welche aufgrund der sehr unterschiedlichen Dammhöhen (ca. 1.5 – 2.5 m) bei den Messquerschnitten möglicherweise stark variiert. Es gibt also vermutlich mehrere Faktoren neben dem Unterschied bei den Zwischenlagen, welche die Schwellenschwingungen beeinflussen. Um diesen Widerspruch zwischen Labortests, Gleisabklingrate tieffrequent und Schwellenschwingungen zu klären, empfehlen wir, wie bereits erwähnt, ergänzend Schieneneinsenkungsmessungen (Einsenkung Schiene relativ zur Schwelle) unter Betriebslasten (Regelverkehr) bei den drei Messquerschnitten.

Weiteres akustisches Potential und Forschungsbedarf sehen wir für die Test-Zwischenlage in engen Bögen (inkl. Schlupfwellenbildung), u.U. auch in Weichen. Da in diesen Fällen (Bögen, Weichen) insbesondere die impulsartigen Anregungen (Zischen, Quietschen in engen Bögen und im Zungenbereich von Weichen, Schläge beim Herzstück) zu Störungen der Anwohner führen und hohe Dämpfung bei Impulsen sehr effektiv ist, besteht für solche Fälle noch viel Potential gegenüber den heutigen, hochelastischen Zwischenlagen mit wenig Dämpfung.

Hinsichtlich Lebensdauer und Dauerstandsverhalten unter Betrieb ist die eingebaute Test-Zwischenlage weiter zu beobachten, allenfalls in 1-2 Jahren ein paar Zwischenlagen für Labor-tests (statische und dynamische Steifigkeit) zu entnehmen und die verbleibende Dicke der Zwischenlage zu bestimmen.

2. Ziel und Zweck des Forschungsprojektes

Das Ziel des Forschungsprojekts ist eine Zwischenlage zu finden und zu testen, welche einerseits akustisch ähnlich gut wirkt wie die heute auf dem CH-Normalspurnetz eingesetzten harten Zwischenlagen, andererseits aber auch den Oberbau schont wie weiche Zwischenlagen. Ein möglicher Weg, um diese Anforderungen unter einen Hut zu bringen, ist eine hochdämpfende Zwischenlage.

Die Getzner Werkstoffe GmbH ist Spezialist für Schwingungsisolierung im Bahnbereich und verfügt über Werkstoffe, mit denen sie eine grosse Bandbreite an Dämpfung vom hochelastischen bis zum hochdämpfenden Produkt anbieten können. Bisher wurden für den Bahnbereich mit Fokus auf die Schwingungsisolierung allerdings hauptsächlich die hochelastischen Werkstoffe eingesetzt. Die Idee mit diesem Forschungsprojekt ist nun, den hochdämpfenden Werkstoff, welcher primär für impulsartige Belastungen in der Industrie entwickelt wurde (z.B. Stanzen, Pressen) im Schienenoberbau in der Zwischenlage einzusetzen, um das im vorhergehenden Abschnitt formulierte Ziel zu erreichen.

Basierend auf dieser Idee wurde von Getzner eine hochdämpfende Test-Zwischenlage entwickelt, im Labor getestet, produziert und dann auf der BLS Strecke Kerzers - Müntschemier in der Geraden am 20. Oktober 2020 auf 120 m Länge eingebaut, um diese dort akustisch zu testen. Der Abschnitt eignet sich sehr gut hinsichtlich Lärmemissionsmessung (freie Schallausbreitung, tiefer Grundgeräuschpegel, leichte Dammlage) und erlaubt auch einen direkten Vergleich zu benachbarten Abschnitten mit weicher und harter Zwischenlage.

3. Beschreibung der getesteten Zwischenlage

3.1. Werkstoff und Abmessungen

Die Untersuchungen wurden an einer Zwischenlage vom Typ Zw700a durchgeführt. Die Zwischenlage besteht aus einem hochdämpfenden Werkstoff des Typs Sylodamp® SP 1000. Der Werkstoff Sylodamp® kann folgendermassen charakterisiert werden:

- Ausgeprägte Dämpfungseigenschaften
- Elastischer Polyurethan Werkstoff
- Gemischtzellige Porenstruktur
- Hohe Energieaufnahmekapazität

Gängige Zwischenlagen besitzen mechanische Verlustfaktoren zwischen ca. 0.08 und 0.15, der hochdämpfende Werkstoff Sylodamp® weist einen mechanischen Verlustfaktor von knapp über 0.4 auf.

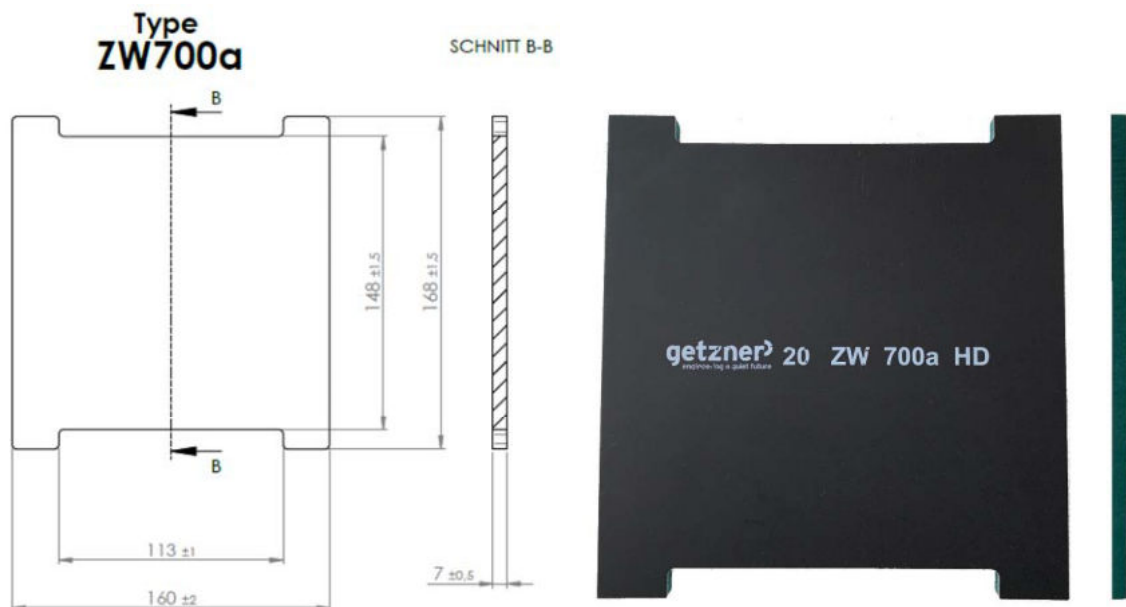


Abbildung 1: Abmessungen Zwischenlage

Zum Schutz vor Streustrom und mechanischer Einwirkung besteht die Zwischenlage aus einer 1 mm dicken Schutzschicht aus HDPE, welche an der Oberseite der Zwischenlage angebracht wurde.

3.2. Statische und dynamische Steifigkeit

Die Steifigkeit der zu untersuchenden Zwischenlage wurde gemäss EN 13146 "Prüfverfahren für Befestigungssysteme" bestimmt. Die Befestigungskategorie wurde nach EN 13481 mit der Kategorie D festgelegt, was einer maximalen Auslegungsachslast von 260 kN und einem Mindest-Gleisbogenhalbmesser von 400 m entspricht. Zur Bestimmung der statischen Steifigkeit wurde die statische Sekantensteifigkeit während des dritten Belastungszyklus zwischen $F_{SP1} = 18$ kN und $F_{SP2} = 68$ kN, alternativ zwischen $F_{SP1} = 18$ kN und $F_{SP2} = 53$ kN ermittelt.

Folgend sind die Werte tabellarisch zusammengefasst:

Bezeichnung	Steifigkeit	Dynamische Versteifung bezogen auf c_{stat} 18-53 kN / 18-68 kN	Mechanischer Verlustfaktor
Statische Steifigkeit zw. 18 und 53 kN	59.5 kN/mm	-	-
Statische Steifigkeit zw. 18 und 68 kN	68.9 kN/mm	-	-
Dynamische Kennwerte bei 5 Hz	166 kN/mm	2.8 / 2.4	0.405
Dynamische Kennwerte bei 10 Hz	185 kN/mm	3.1 / 2.7	0.425
Dynamische Kennwerte bei 20 Hz	199 kN/mm	3.3 / 2.9	0.433

Tabelle 1: Mechanische Kennwerte vor Dauerschwingversuch, Quelle: Lieferant

3.3. Dauerstandsverhalten

Um den Prüfaufwand für den Dauerschwingversuch zu reduzieren, wurde der Versuch mit einer vertikalen Krafteinleitung durchgeführt. Nachfolgende Tabelle zeigt die zu den Normen prEN 13146 (Teil 4: Dauerschwingversuch) und EN 13481-2 abweichenden Prüfparameter, welche bei der vorliegenden Prüfung zur Anwendung kamen.

Bezeichnung	Dauerschwingversuch	Dauerschwingversuch nach prEN 13146-4 / EN 13481-2
Unterlast	18 kN	5 kN
Oberlast	53 kN	70 kN
Frequenz	10 Hz	4 ± 1 Hz
Lastwechsel	3 Mio.	3 Mio.
Dynamische Kennwerte bei 20 Hz	0° (vertikal)	15° (schräg)

Tabelle 2: Prüfparameter für den Schauerschwingversuch, Quelle: Lieferant

Nach Beendigung des Dauerschwingversuches wurde die Steifigkeiten der Zwischenlage unter vertikaler Belastung analog 3.2 ermittelt.

Bezeichnung	Steifigkeit	Dynamische Versteifung bezogen auf c_{stat} 18-53 kN / 18-68 kN	Mechanischer Verlustfaktor
Statische Steifigkeit zw. 18 und 53 kN	67.3 kN/mm	-	-
Statische Steifigkeit zw. 18 und 68 kN	79.3 kN/mm	-	-
Dynamische Kennwerte bei 5 Hz	205 kN/mm	3.0 / 2.6	0.405
Dynamische Kennwerte bei 10 Hz	233 kN/mm	3.5 / 2.9	0.425
Dynamische Kennwerte bei 20 Hz	260 kN/mm	3.9 / 3.3	0.433

Tabelle 3: Mechanische Kennwerte nach Dauerschwingversuch, Quelle: Lieferant

Die statische Steifigkeit liegt je nach gewähltem Auswertebereich zwischen 67 kN/mm und 80 kN/mm. Die niederfrequente dynamische Steifigkeit zwischen 5 Hz bis 20 Hz ist aufgrund der

hohen inneren Dämpfung je nach Auswertebereich um den Versteifungsfaktor 2.6 bis 3.9 höher. Der mechanische Verlustfaktor liegt knapp über 0.4.

Eine Gegenüberstellung der Messwerte vor und nach dem Dauerschwingversuch ergibt folgende Ergebnisse:

Bezeichnung	Vor Dauerschwingversuch	Nach Dauerschwingversuch	Veränderung
Statische Steifigkeit zw. 18 und 53 kN	59.5 kN/mm	67.3 kN/mm	13%
Statische Steifigkeit zw. 18 und 68 kN	68.9 kN/mm	79.3 kN/mm	15%
Dynamische Steifigkeit bei 5 Hz	166 kN/mm	205 kN/mm	23%
Dynamische Steifigkeit bei 10 Hz	185 kN/mm	233 kN/mm	26%
Dynamische Steifigkeit bei 20 Hz	199 kN/mm	260 kN/mm	30%

Tabelle 4: Veränderung mechanischer Kennwerte nach dem Dauerschwingversuch, Quelle: Lieferant

4. Messkonzept

4.1. Teststrecke, Gleisabschnitte und Messquerschnitte

Die Teststrecke ist ein eingleisiger, gerader Abschnitt auf einem Damm und liegt zwischen Kerzers (FR) und Müntschemier (BE).

Oberbau: Es handelt sich um einen Schotteroberbau mit Betonschwellen B91, Schienenprofil 60E1 und W14 Befestigung. Der Oberbau wurde 2014 abgesehen vom Bereich km 24.476 bis km 24.638 erneuert und die harten Zwischenlagen (Zw) durch weiche Zwischenlagen (Typ Zw 700b-100-SF150) ersetzt. Der 162 m lange, nicht erneuerte Bereich ist weiterhin mit harten Zwischenlagen (Typ Zw 661-6) ausgestattet.

Einbau Test-Zwischenlage: Vom 20.-21. Oktober 2020 wurden östlich direkt anschliessend an den Bereich mit harten Zwischenlagen auf 120 m die weichen Zwischenlagen durch die hochdämpfenden Test-Zwischenlagen von Getzner ersetzt (km 24.356 – 24.476). Als Referenzoberbau, welcher während den messtechnischen Untersuchungen unverändert blieb, wurde der mit weichen Zwischenlagen ausgestattete Abschnitt westlich vom Bereich der harten Zwischenlagen gewählt.

Die messtechnisch zu untersuchenden Abschnitte / Messquerschnitte wurden wie folgt definiert:

- Abschnitt 0 (Referenz): weiche Zw, km 24.66
- Abschnitt 1: weiche Zw (Nullmessung), dann Umbau auf hochdämpfende Zw, km 24.42
- Abschnitt 2: harte Zw, km 24.54

Das Messkonzept sieht zuerst eine Nullmessung der Schallemission in den Abschnitten 0 und 1 (beide Abschnitte gleicher Oberbau mit weicher Zw) vor, um einen allfälligen Unterschied infolge Ausbreitungsbedingungen (Dammhöhe etc.) festhalten zu können. Dann wird in Abschnitt 1 auf 120 m Länge auf die hochdämpfende Test-Zw umgebaut. Danach erfolgt die eigentliche Messkampagne (Effektmessung) mit möglichst gleichzeitiger Messung von Rauheit, Gleisabklingrate und Schallemission (Regelbetrieb 1 Tag) in allen drei Abschnitten. Zusätzlich werden auch die Schwellenschwingungen in den drei Abschnitten gemessen, um beurteilen zu können, ob es aufgrund der Zwischenlagensteifigkeiten relevante Unterschiede in den Schwellenschwingungen gibt, die hinsichtlich Lärmemission tieffrequent (Schallabstrahlung der Schwellen) und Instandhaltung wichtig sind.

4.2. Messungen Schallemissionen

Die Schallemissionsmessungen werden einseitig in 7.5 m Abstand zum Gleis und in 1.2 m Höhe über SOK durchgeführt. Pro Abschnitt wird in einem Messquerschnitt mit einem Microphon gemessen. Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben wird vor dem Einbau der Test-Zw eine Nullmessungen durchgeführt, nach dem Umbau erfolgt die Effektmessung. Es wird während mehrerer Stunden der Regelbetrieb gemessen, um mindestens 15-20 Züge auswerten zu können.

	Abschnitt 0 (Referenz)	Abschnitt 1	Abschnitt 2
Gleis km	24.638 –	24.356 – 24.476	24.476 – 24.638
Messung Schall km	24.660	24.420	24.540
Nullmessung 14.10.	MQ0a (weiche Zw)	MQ1a (weiche Zw)	
Effektmessung 4.11.	MQ0b (weiche Zw)	MQ1b (Test-Zw)	MQ2b (harte Zw)
Dammhöhe	ca. 1.5 m	ca. 2.5 m	ca. 2.0 m

Tabelle 5: Position, Ablauf und Bezeichnung der Schallemissionsmessungen

4.3. Messungen Schienenrauheit

Die Schienenrauheitsmessungen werden in den drei Abschnitten mit unterschiedlichen Zwischenlagen im Einflussbereich der Schallemissionsmessungen durchgeführt. Sie erfolgen gleichentags wie die Effektmessungen der Schallemissionen. Auf eine Schienenrauheitsmessung vor dem Umbau wird verzichtet, da angenommen wird, dass sich die Schienenrauheit in den drei Wochen zwischen Null- und Effektmessung nicht massgebend verändert.

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. Indem das Messgerät über die Schiene geschoben wird, wird mit drei Wegsensoren eine kontinuierliche Rauheitsmessung durchgeführt und die Rauheit des Fahrspiegels auf dem Schienenkopf ermittelt. Um den Fahrspiegel mit allen drei Sensoren erfassen zu können, wurde der Abstand der Sensoren zueinander auf jeweils 5 mm eingestellt. Es werden jeweils die südliche und nördliche Schiene gemessen und separat ausgewertet.

In jedem der drei Abschnitte wird pro Schiene und pro Sensor jeweils für eine Schienenlänge von 60 m (30 m vor und nach dem Messpunkt Schallemission) ein mittleres Terzband-Schienenrauheitsspektrum in Funktion der Wellenlänge ermittelt, d.h. pro Abschnitt gibt es ein Spektrum pro Schiene mit jeweils drei Kurven. Insgesamt wurden zwei Messdurchgänge entsprechend ausgewertet.

4.4. Messungen Gleisabklingrate

Neben der Schienenrauheit ist die Gleisabklingrate ein aussagekräftiger Parameter, um die Schallabstrahlung der Schiene zu bewerten. Je kleiner der Wert der Abklingrate ist, desto mehr Schienenfläche strahlt Schall während einer Zugüberfahrt ab. Demzufolge strahlt ein Gleis mit einer hohen Abklingrate gegenüber einem Gleis mit niedriger Abklingrate bei gleicher Schienenrauheit weniger Schall ab.

Die Messung der Schienenabklingraten nach EN 15461 und TSI Noise wird in der Nacht vor der Effektmessung der Schallemissionen an den definierten drei Abschnitten mit unterschiedlichen Zwischenlagen durchgeführt. Diese Messung liefert unabhängig von Schienenrauheit und Zugbetrieb eine Aussage zur akustischen Dämpfung der Schienen in Gleislängsrichtung in Abhängigkeit der unterschiedlichen Zwischenlagen. Da die Zwischenlagensteifigkeit und damit die Gleisabklingrate temperaturabhängig ist, ist eine Nachtmessung von Vorteil.

Als Ergebnis wird die Abklingrate in dB/m pro Schiene im jeweiligen Abschnitt ermittelt und der Grenzkurve aus [2] gegenübergestellt.

4.5. Messungen Schwellenschwingungen

Während den Effektmessungen der Schallemission in den drei Messquerschnitten werden pro Messquerschnitt auch die Schwellenschwingungen vertikal aufgezeichnet. Pro Messquerschnitt werden drei uniaxiale Schwingungssensoren im jeweiligen Abstand von 2.4 m einseitig auf den Schwellenköpfen positioniert.

5. Messergebnisse

5.1. Messungen Schallemissionen

5.1.1. Daten zur Messung

	<u>Nullmessung</u>	<u>Effektmessung</u>
Datum:	14.10.2020	04.11.2020
Messzeit:	09:30 – 15:00	09:30 – 15:00
Temperatur:	8-12°C	7-8°C
Luftfeuchtigkeit:	80-50%	80-85%
Wind:	5-20 km/h	10-20 km/h
Niederschlag	0 mm	0.1 mm
Anzahl Züge:	11 EWIII, 11 Nina	8 EWIII, 11 Nina
Messquerschnitte	MQ0a, MQ1a	MQ0b, MQ1b, MQ2b
Messgeräte	NOR140 (NB 306, NB310)	NOR140 (NB 306, NB310, NB301)
Abstand Mic zu Gleis	7.5 m, südlich	7.5 m, südlich
Höhe Mic	1.2 m über SOK	1.2 m über SOK

5.1.2. Ergebnisse Nullmessung

Das folgende Diagramm zeigt die Werte L_{Aeq} [dBA] für 80 km/h (Auswertezeit T_p) der gemessenen Zugvorbeifahrten bei den Messquerschnitten MQ0a (Referenz) und MQ1a. Im Bereich dieser zwei Messquerschnitte liegt derselbe Oberbau W14 mit Betonschwellen B91 und weichen Zwischenlagen vor.

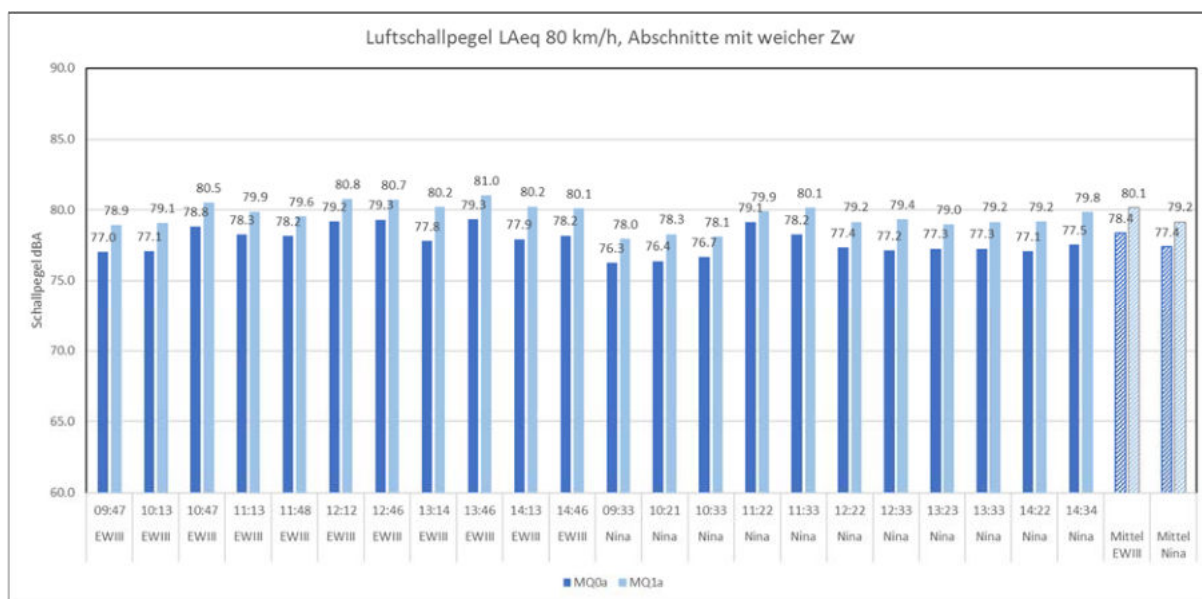


Abbildung 2: Nullmessung L_{Aeq} für MQ0a und MQ1a, Zugtypen EWIII und Nina

Die Werte L_{Aeq} sind bei allen Zugsvorbeifahrten bei MQ1a höher als bei MQ0a. Im Mittel beträgt die Differenz zwischen MQ1a und MQ0a 1.8 dBA (gerundet) bei beiden Zugtypen. Diese Differenz lässt sich zu einem grossen Teil bereits mit den unterschiedlichen Schienenrauheiten erklären, welche bei der Effektmessung gemessen wurden. Gemäss Abbildung 13 ist der Einzahlwert der Schienenrauheit bei 80 km/h bei MQ1 2.0 dB höher als bei MQ0. Zudem wurde bei MQ0 gegenüber MQ1 seitlich eine deutlich höhere Schotterflanke festgestellt, womit bei MQ0 mehr Schall absorbiert wird.

Im Terzspektrum zeigen sich die Unterschiede zwischen MQ0a und MQ1a breitbandig im masgebenden Frequenzbereich zwischen 630 Hz und 2.5 kHz.

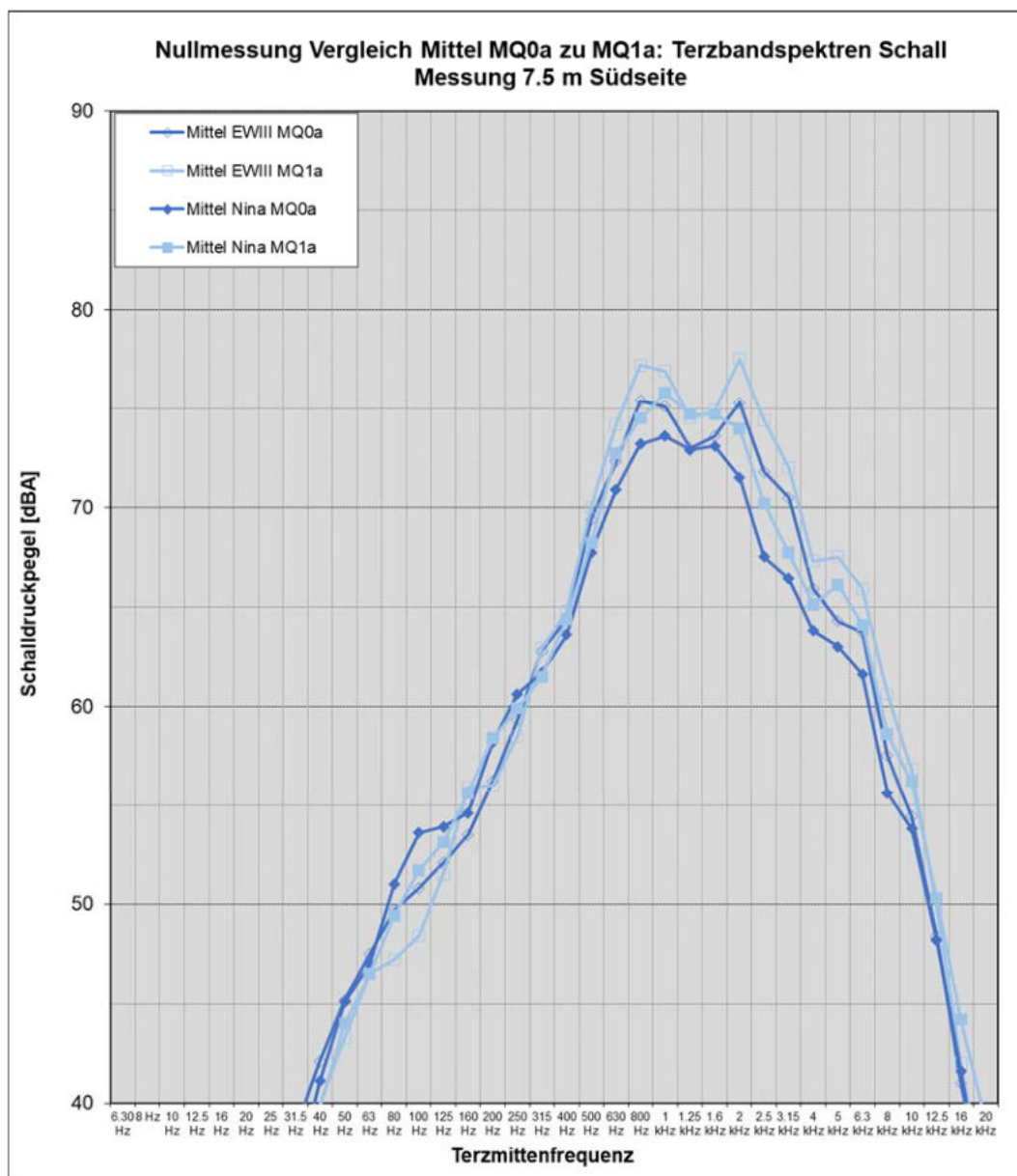


Abbildung 3: Nullmessung Terzspektren für MQ0a und MQ1a, Zugtypen EWII und Nina

Die Differenzspektren MQ1a – MQ0a für die einzelnen Vorbeifahrten zeigen für alle Vorbeifahrten spektral einen ähnlichen Verlauf mit erhöhten Schallpegeln bei MQ1a ab 160 Hz.

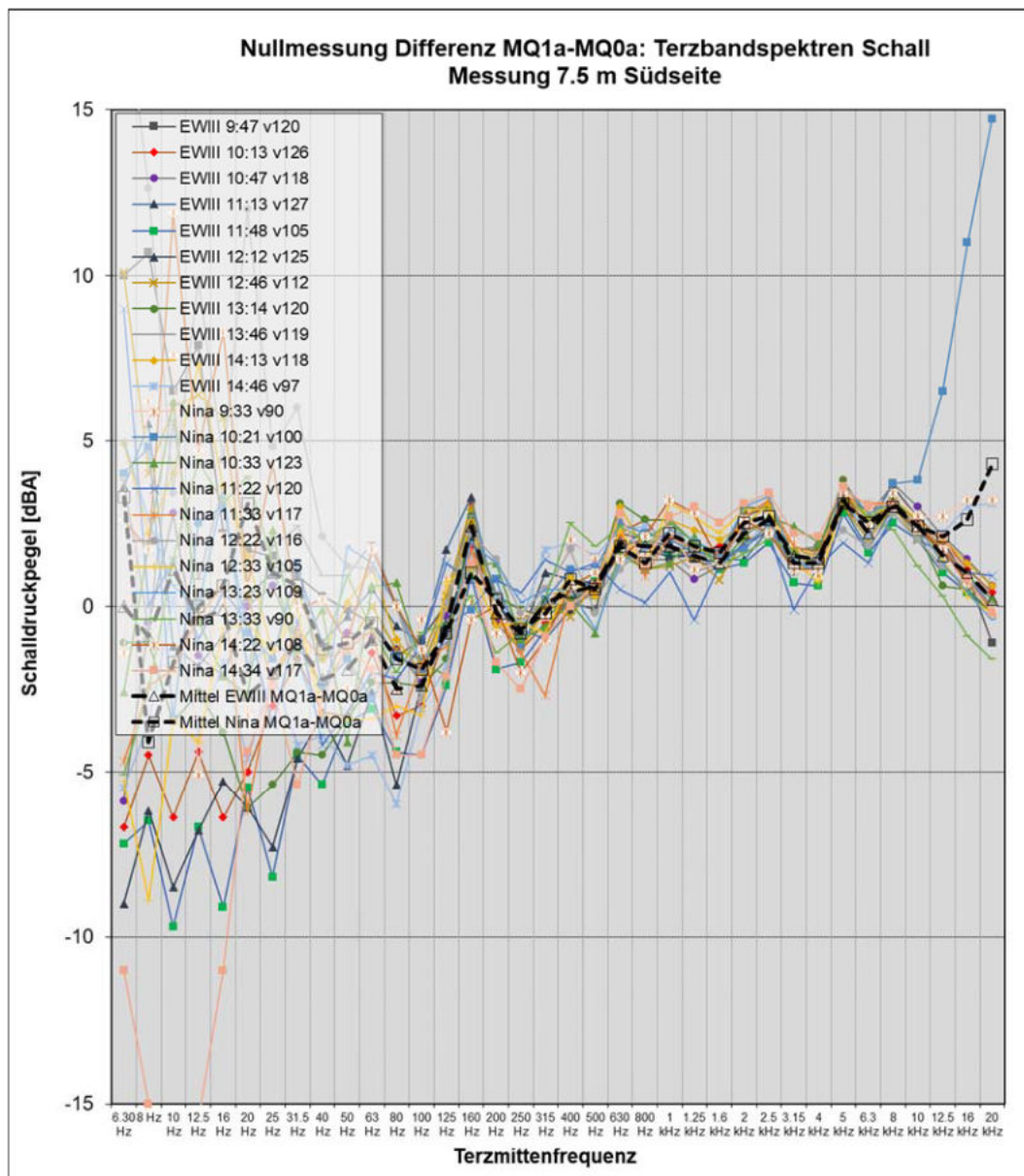


Abbildung 4: Nullmessung Differenzspektren MQ1a – MQ0a für alle Zugvorbeifahrten

5.1.3. Ergebnisse Effektmessung

Das folgende Diagramm zeigt die Werte L_{Aeq} [dBA] für 80 km/h (Auswertezeit T_p) der gemessenen Zugsvorbeifahrten bei den Messquerschnitten MQ0b (weiche Zw), MQ1b (Test Zw) und MQ2b (harte Zw). Im Bereich dieser drei Messquerschnitte liegt derselbe Oberbau W14 mit Betonschwellen B91, allerdings mit unterschiedlichen Zwischenlagen.

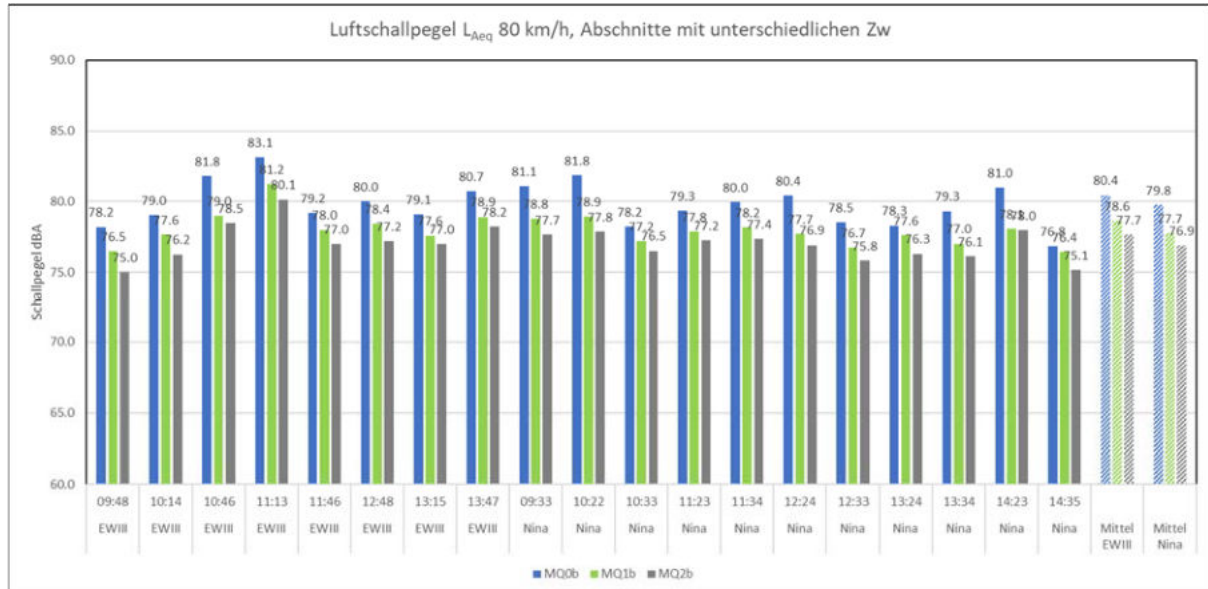


Abbildung 5: Effektmessung L_{Aeq} für MQ0b, MQ1b und MQ2b, Zugtypen EWIII und Nina

Die Werte L_{Aeq} sind im Gegensatz zur Nullmessung nun bei allen Zugsvorbeifahrten bei MQ1b tiefer als bei MQ0b. Die Werte bei MQ2b liegen noch etwas tiefer als bei MQ1b. Im Mittel beträgt die Differenz zwischen MQ1b und MQ0b 1.8 dBA (EWIII) bis 2.0 dBA (Nina). Die Werte bei MQ2b liegen im Mittel 0.9 dBA tiefer als bei MQ1b.

Vergleicht man die gemessenen Schallpegel MQ0a und MQ0b (Referenz unverändert), so erkennt man eine Zunahme der Schallpegel von 2.0 dBA (EWIII) bis 2.4 dBA (Nina). Verantwortlich für diese Zunahme gleichenorts innerhalb von drei Wochen dürfte entweder das Rollmaterial oder die Wetterbedingungen sein. Vergleicht man die entsprechenden Terzspektren MQ0a und MQ0b (Abbildung 3 und Abbildung 6), so erkennt man insbesondere einen um ca. 4-5 dBA zunehmenden Peak bei 2.0 kHz. Dies entspricht bei 120 km/h einer Wellenlänge von 1.67 cm. Bei den Schienenrauheitsspektren bei MQ0 wurde in diesem Wellenlängenbereich nichts Auffälliges festgestellt. Eine Ursache bzw. Veränderung infrastrukturseitig lokal bei MQ0 zwischen Nullmessung und Effektmessung wird daher als unwahrscheinlich erachtet. Dies bedeutet, dass der bei der Nullmessung festgestellt Unterschied von 1.8 dBA zwischen MQ1 und MQ0 (zum grossen Teil durch die erhöhte Schienenrauheit bei MQ1 gegenüber MQ0 verursacht) auch bei der Effektmessung aufgetreten wäre, wenn man dort die Zwischenlage nicht getauscht hätte.

Aufgrund dieser Überlegungen muss zu der gemäss Abbildung 5 bei der Effektmessung ausgewiesenen Schallpegelminderung von 1.8 dBA (EWIII) bis 2.0 dBA (Nina) von MQ1 gegenüber MQ0 der bei der Nullmessung festgestellte Unterschied von 1.8 dBA addiert werden. Somit ergibt sich eine Schalleinfügedämmung infolge Getzner Test-Zwischenlage von 3.6 dBA (EWIII) bis 3.8 dBA (Nina) gegenüber dem Referenzoberbau mit weicher Zwischenlage.

Im Terzspektrum zeigen sich die Unterschiede zwischen MQ0b und MQ1b im massgebenden Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 2.0 kHz.

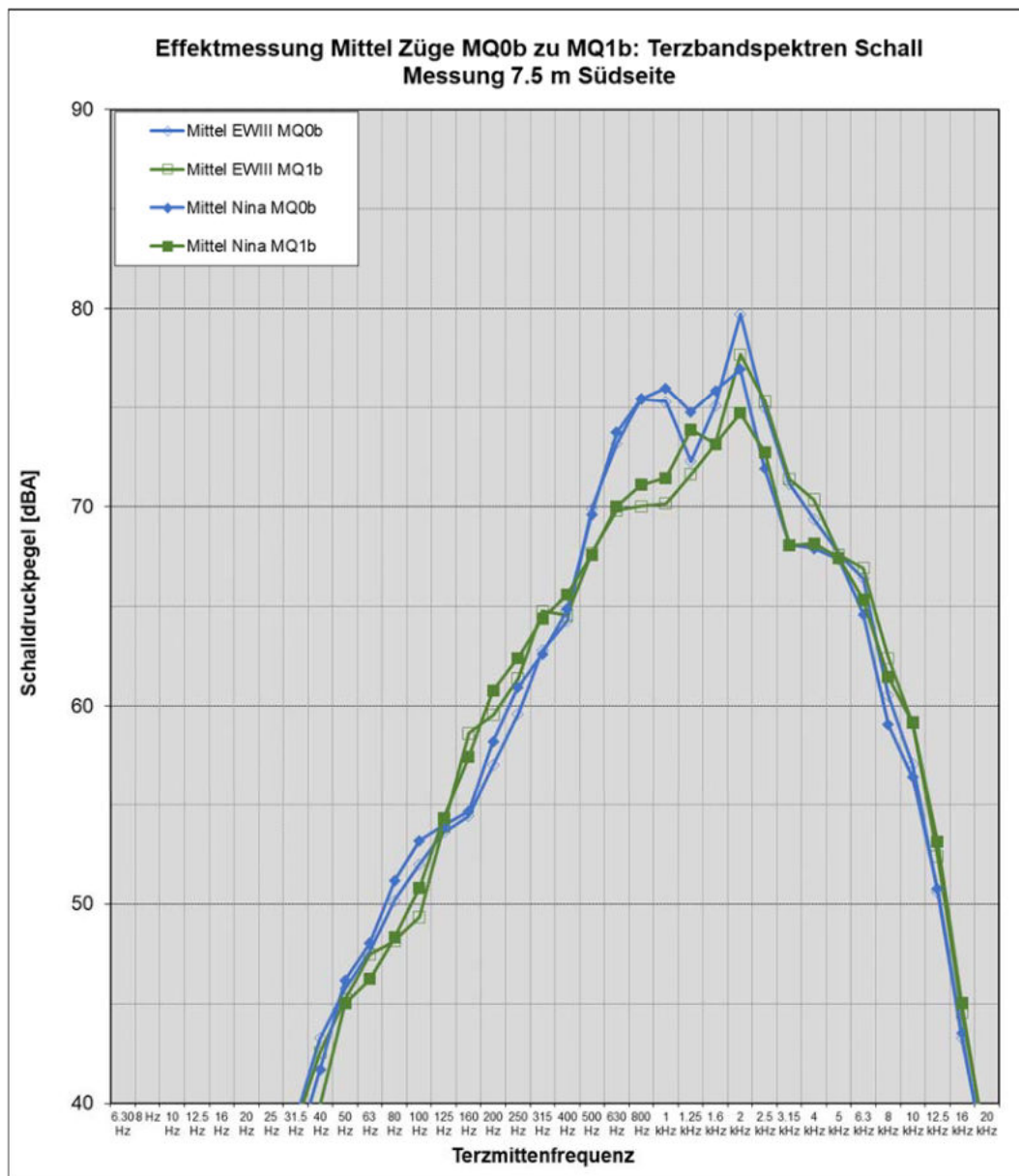


Abbildung 6: Effektmessung Terzspektren für MQ0b und MQ1b, Zugtypen EWII und Nina

Die Differenzspektren MQ1b – MQ0b für die einzelnen Vorbeifahrten zeigen für alle Vorbeifahrten spektral einen ähnlichen Verlauf mit erhöhten Schallpegeln bei MQ1b bis 315 Hz und danach deutlich reduzierten Schallpegeln ab 500 Hz bis 2.0 kHz.

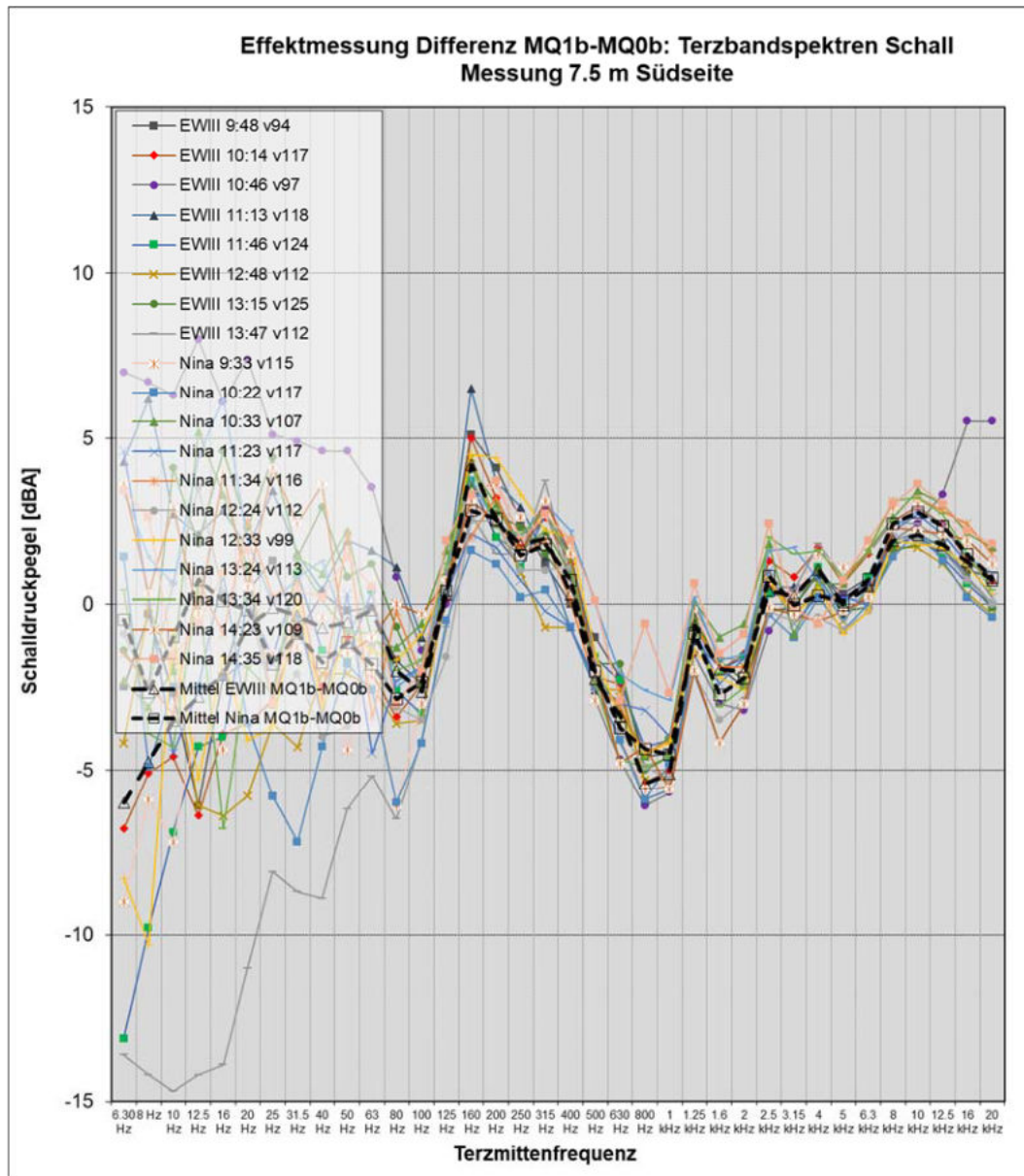


Abbildung 7: Effektmessung Differenzspektren MQ1b – MQ0b für alle Zugvorbeifahrten

In *Abbildung 8* sind die Mittel pro Zugtyp der Differenzspektren MQ1 – MQ0 aus Null- und Effektmessung gegenübergestellt. Die deutliche Veränderung des Verlaufs der Differenzspektren von der Null- zur Effektmessung ist auf die Test-Zwischenlage zurückzuführen.

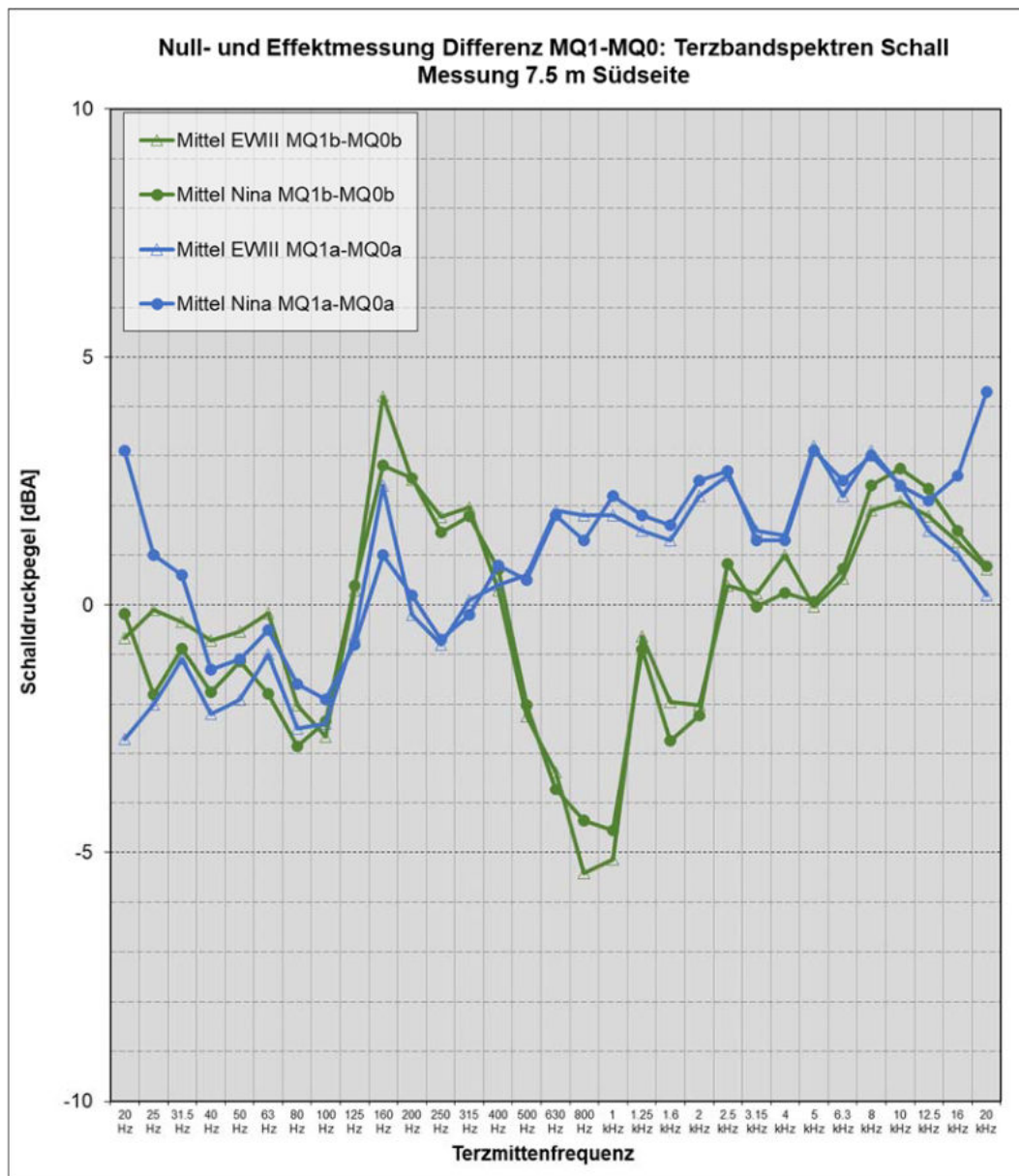


Abbildung 8: Null- und Effektmessung Differenzspektren MQ1 – MQ0 für alle Zugvorbeifahrten

Der in *Abbildung 8* erkennbare, frequenzabhängige Unterschied zwischen Null- und Effektmessung ist in *Abbildung 9* dargestellt. Diese zwei Kurven für die zwei Zugtypen EWIII und Nina entsprechen der frequenzabhängigen Schalleinfügedämmung der Test-Zwischenlage gegenüber der weichen Zwischenlage.

Um 200 Hz zeigen sich erhöhte Schallpegel, welche vermutlich auf erhöhte Schwellenschwingungen zurückzuführen sind (siehe Kapitel 5.4.2). Ab 500 Hz beginnt dann die Test-Zw zu dämmen mit Maximalwerten von -7 dB in den Terzbändern von 800 Hz und 1 kHz. In den höheren Frequenzen nimmt die Dämmung dann allmählich ab, weil dort der Radschall die Schallemission zu dominieren beginnt. Die Werte unterhalb 100 Hz sind nicht zu beachten, da in diesem Bereich das Signal der Schallemission des Zuges im Grundnoise verschwindet.

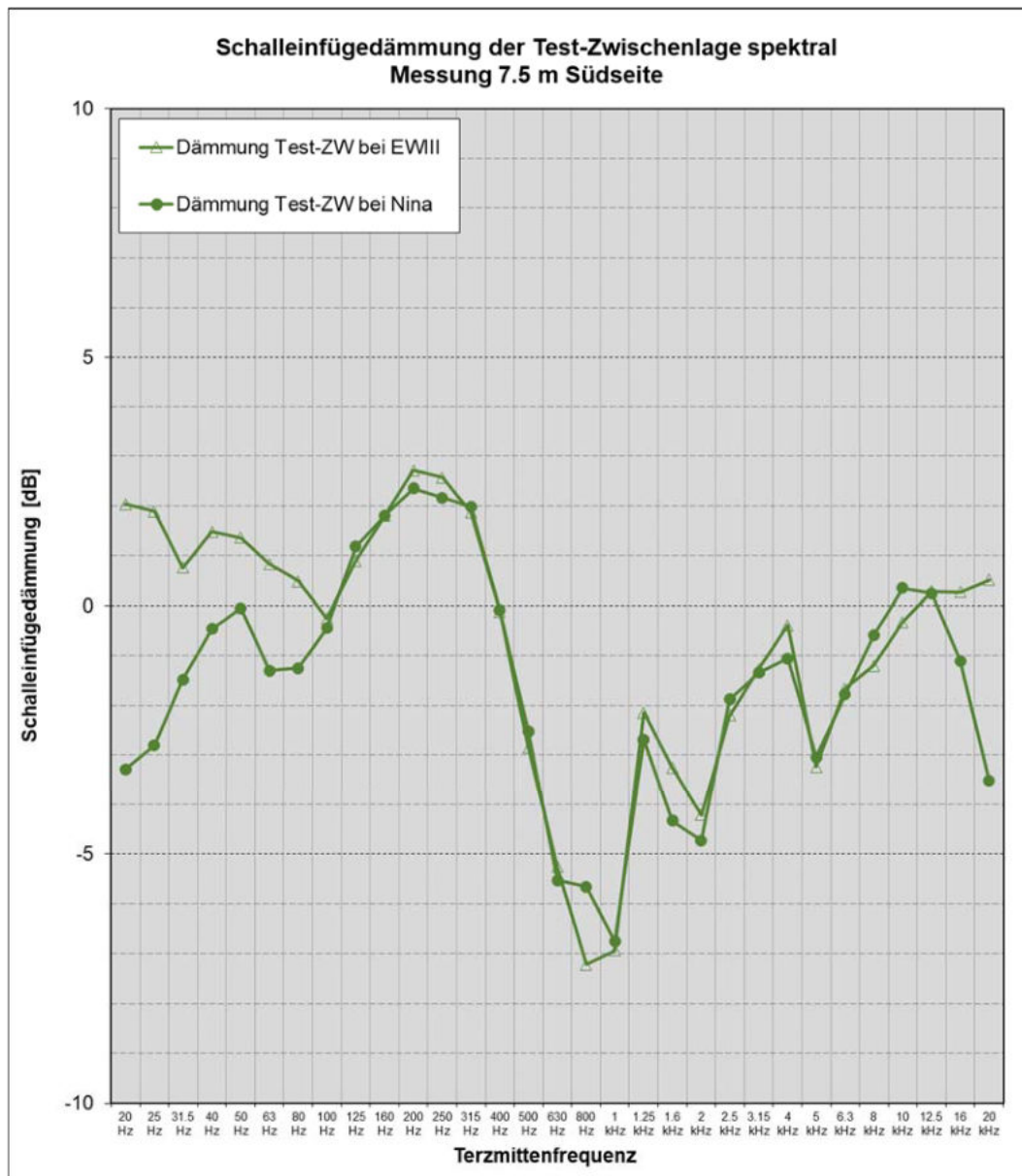


Abbildung 9: Schall-Einfügedämmung der Test-Zw aus Differenzspektren MQ1 – MQ0

5.2. Messungen Schienenrauheit

5.2.1. Daten zur Messung

Datum:	04.11.2020
Messzeit:	10:30 – 12:30
Temperatur:	7-8°C
Niederschlag	0.1 mm
Messbereich	MQ0 ± 30 m, MQ1 ± 30 m, MQ2 ± 30 m
Messgerät	APT Rail Surface Analyser
Position Sensoren	Mitte Fahrspiegel ± 5 mm

5.2.2. Ergebnisse Schienerauheitsmessung

Die Spektren der Schienenrauheit sind nachfolgend für alle Wegsensoren des Schienerauheitsmessgeräts, welche jeweils in der Mitte des Fahrspiegels positioniert wurden, dargestellt. Ein Diagramm zeigt jeweils pro Gleisabschnitt für die südliche (rote Kurven) resp. nördliche (blaue Kurven) Schiene die Rauheitsspektren.

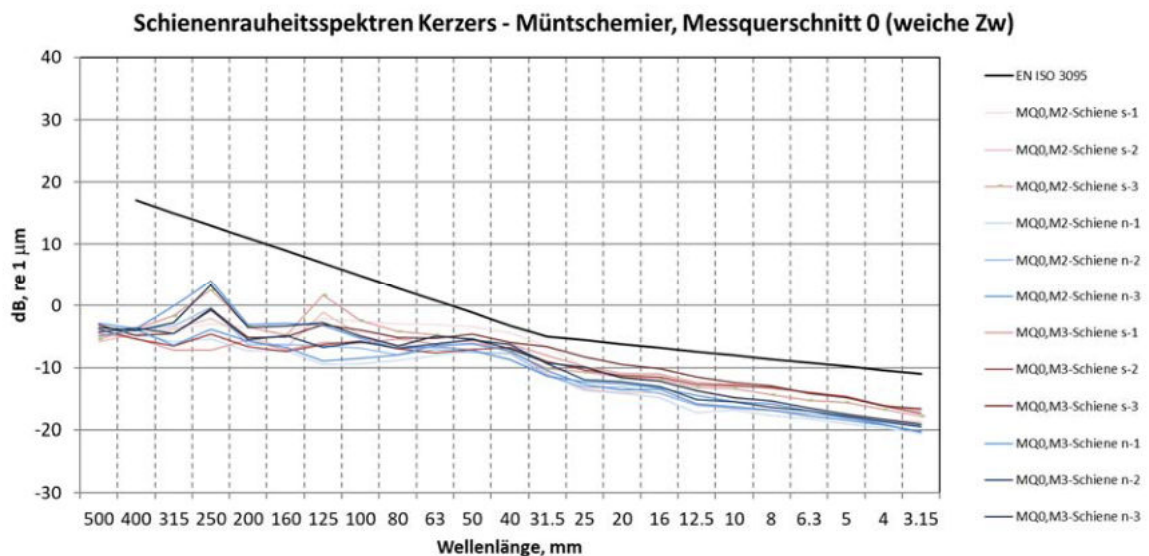


Abbildung 10: Schienenrauheitsspektren des Abschnittes mit weicher Zwischenlage, südliche Schiene (rot), nördliche Schiene (blau), Anzahl der Messungen: 2

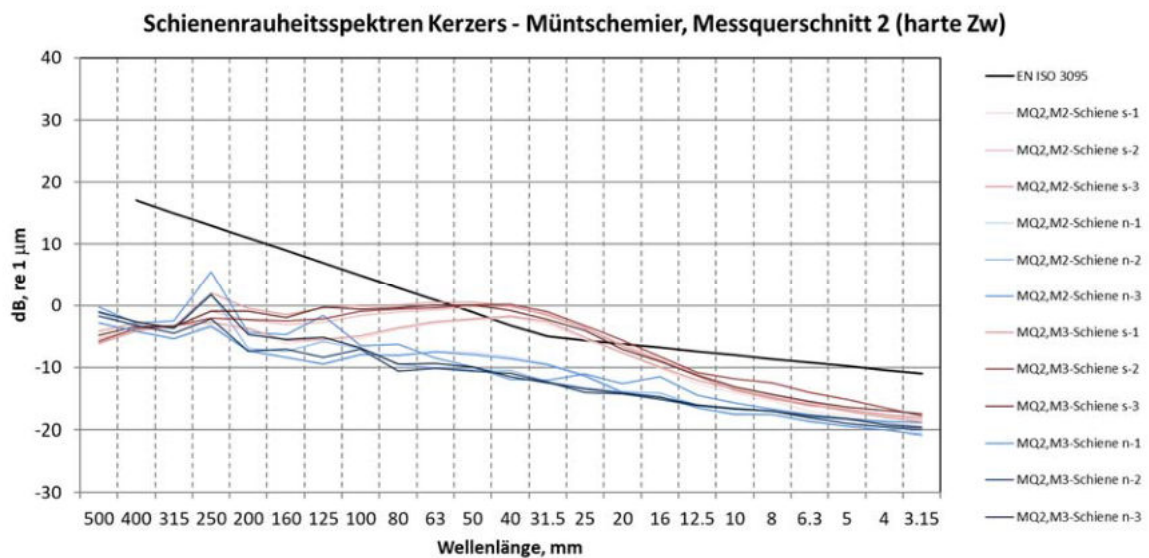


Abbildung 11: Schienenrauheitsspektren des Abschnittes mit harter Zwischenlage, südliche Schiene (rot), nördliche Schiene (blau), Anzahl der Messungen: 2

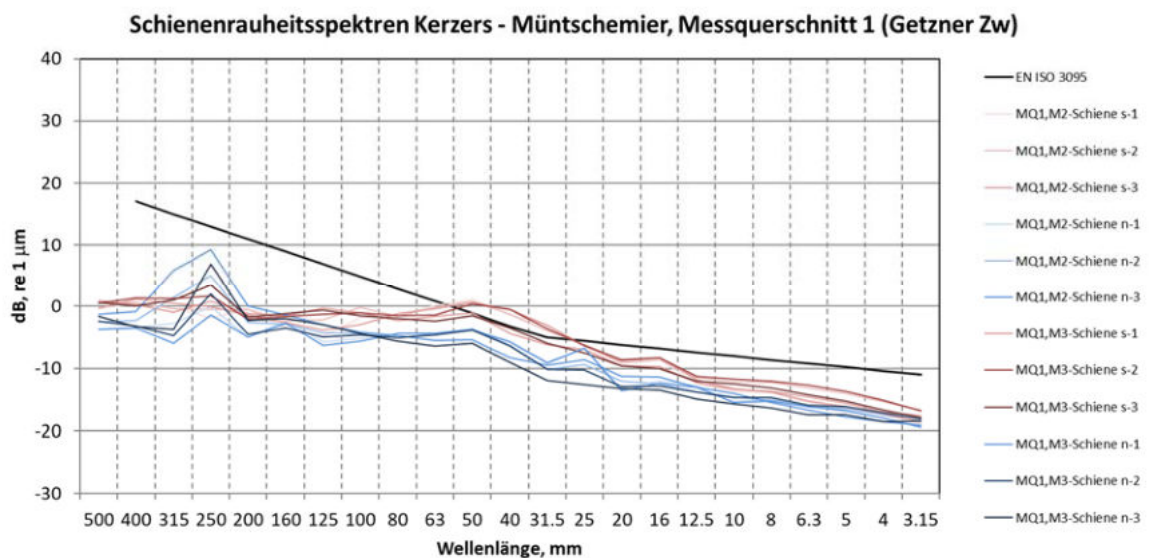


Abbildung 12: Schienenrauheitsspektren des Abschnittes mit hochdämpfender Zwischenlage, südliche Schiene (rot), nördliche Schiene (blau), Anzahl der Messungen: 2

Aufgrund der Schienenrauheitsmessungen in den drei Abschnitten kann folgendes festgestellt werden:

- Im Abschnitt mit weicher Zwischenlage liegen sämtliche Messwerte beider Schienen unterhalb der Grenzkurve gemäss EN ISO 3095.
- Im Abschnitt mit harter Zwischenlage liegen sämtliche Messwerte der nördlichen Schienen unterhalb der Grenzkurve gemäss EN ISO 3095. Im Wellenlängenbereich zwischen 25 und 60 mm liegen die Messwerte der südlichen Schiene leicht über der Grenzkurve.
- Die Schienen des Abschnittes mit den Test-Zwischenlagen weisen im Vergleich zum Abschnitt mit harten Zwischenlagen eine sehr ähnliche Rauheit auf.

Im folgenden Diagramm ist der gemessene Einzahlwerte der Schienenrauheit für 80 km/h für jeden Abschnitt zusammenfassend dargestellt. Dabei wurden sämtliche Einzahlwerte der südlichen und nördlichen Schiene gemittelt. Werte im Diagrammbereich (> 10 dB) entsprechen dabei einer rauen Schiene, Werte im grünen Bereich (< 4 dB) dagegen einer glatten Schiene.

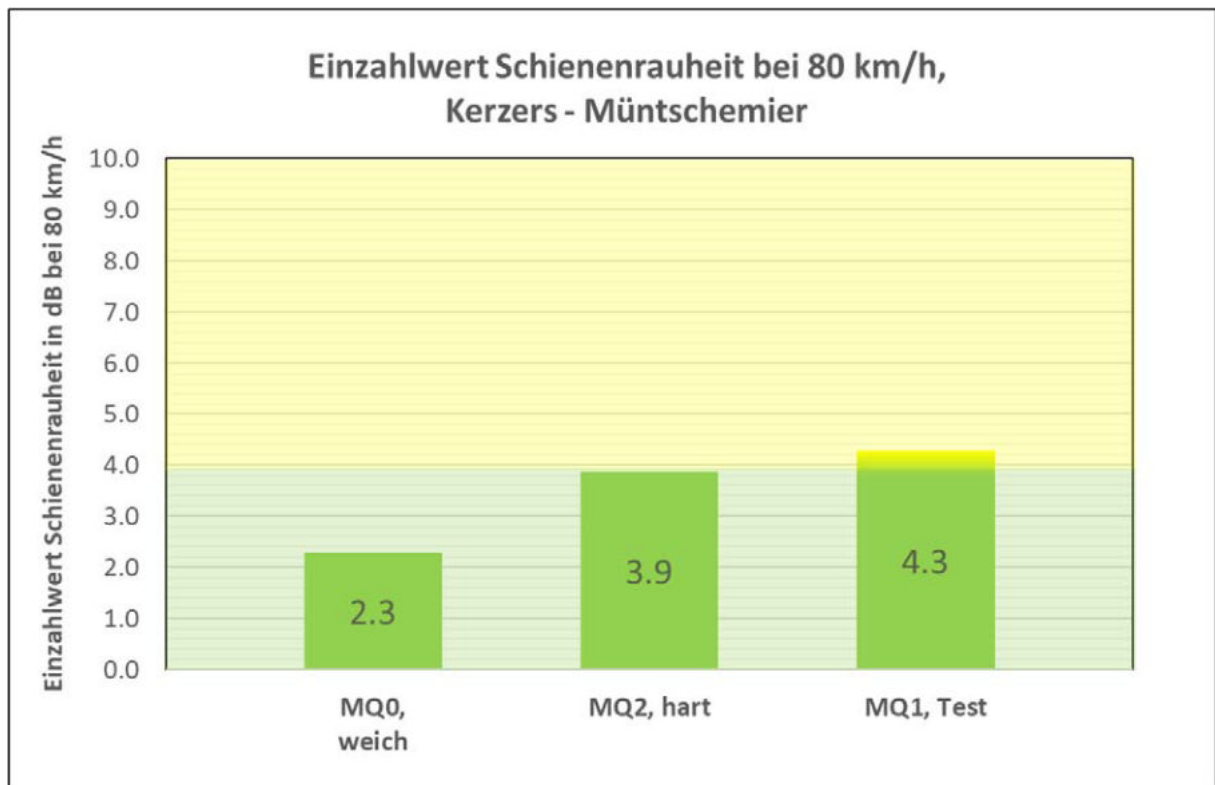


Abbildung 13: Einzahlwert Schienenrauheit je Abschnitt, gemittelt über beide Schienen

Gemäss obigem Diagramm kann der Streckenabschnitt mit weichen Zwischenlagen als glatt bezeichnet werden. Die beiden anderen Abschnitte weisen eine sehr ähnliche Rauheit auf und können als gerade noch glatt eingestuft werden. Die bei der Nullmessung festgestellten, um 1.8 dBA erhöhten Schallpegel bei MQ1 gegenüber MQ0 können, zumindest zum Teil, mit dem um 2 dB höheren Einzahlwert der Schienenrauheit bei MQ1 erklärt werden.

5.3. Messungen Gleisabklingrate

5.3.1. Daten zur Messung

Datum:	Nacht vom 3. auf 4.11.2020
Messzeit:	21:30 – 02:30
Schientemperatur:	6-5°C
Lufttemperatur:	9-8°C
Luftfeuchtigkeit:	hoch
Niederschlag	teilweise leichter Regen

Abschnitt	Streckenkilometer	Messpunkt	Hammerpunktschlag
MQ0 mit weicher Zwischenlage	24.800 – 24.638	24.660	24.700 - 24.660
MQ2 mit harter Zwischenlage	24.638 – 24.476	24.540	24.540 – 24.500
MQ1 mit Test-Zwischenlage	24.476 – 24.356	24.420	24.420 – 24.380

Tabelle 6: Messung Gleisabklingrate, Positionen Messung und Anregung

Die Messungen wurden von der Firma Müller-BBM Schweiz AG durchgeführt. Weitere Details zum Messaufbau und der Durchführung können dem Bericht [7] entnommen werden.

5.3.2. Ergebnisse Gleisabklingratenmessung

Die Abbildung 14 zeigt zusammenfassend die Terzspektren der Abklingraten in vertikaler und horizontaler Richtung für alle drei Abschnitte. Im Anhang 2 sind die gemessenen Abklingraten für jede Schiene einzeln als Diagramm dargestellt.

Bei Abschnitt MQ0 mit weichen Zwischenlagen liegen die vertikalen Abklingraten überwiegend oberhalb der Grenzkurven, wobei im Terzbereich 500 Hz bis 800 Hz die Grenzkurve unterschritten wird. Die horizontalen Abklingraten erfüllen im tieffrequenten Bereich < 630 Hz die Anforderungen der Grenzkurve nicht. Im höheren Frequenzbereich liegen die Abklingraten meist knapp oberhalb der Kurven mit einem lokalen Maximum bei der 3150 Hz Terz. Betrachtet man die Schienen einzeln, weisen beide Schienen ein sehr ähnliches Abklingverhalten auf.

Die harten Zwischenlagen auf dem Streckenabschnitt MQ2 zeigen fast über das gesamte Frequenzband hohe Abklingraten oberhalb der TSI-Grenzkurve. Einzig die vertikale Abklingrate der nördlichen Schiene liegt in den Terzen 500 Hz und 630 Hz darunter. Die Unterschiede zwischen beiden Schienen sind moderat. Bei den Vertikalabklingraten bewegen sich beide Schienen unterhalb von 800 Hz allerdings auseinander. Um 630 Hz ist die Dämpfung der Horizontalschwingungen besonders hoch.

Im Abschnitt MQ1 sind die hochdämpfenden Test-Zwischenlagen verbaut. Die Schienenabklingraten liegen durchgängig meist deutlich oberhalb der Grenzkurve. Die Abklingraten beider Schienen liegen eng beieinander. Zwischen 250Hz und 400 Hz differieren die vertikalen Abklingraten signifikant. Die horizontalen Abklingraten weisen Maxima bei 630 Hz und 4000 Hz auf.

Aus dem Diagramm unten wird ersichtlich, wie ähnlich die Abklingraten für MQ2 und MQ1 oberhalb von ca. 400 Hz sind. Hier weisen die harten und hoch dämpfenden Zwischenlagen ein sehr ähnliches Verhalten auf. Im tieffrequenten Bereich < 400 Hz ähneln sich wiederum die Abschnitte MQ0 und MQ1 in vertikaler Richtung. Dies scheint plausibel, da sowohl die weichen Zwischenlagen als auch die hochdämpfenden bzgl. ihrer statischen Steifigkeit sehr ähnlich sind und somit im tieffrequenten Bereich eine geringere Abklingrate aufweisen.

Insgesamt kann noch festgehalten werden: Der Messquerschnitt MQ0 erfüllt die Vorgaben der TSI-Referenzkurve nicht, die beiden anderen Querschnitte MQ2 und MQ1 erfüllen sie. Die vertikalen Abklingraten haben auf allen drei Prüfabschnitten Minima im Bereich 2000 Hz bis 2500 Hz. Bei horizontalen Abklingraten weisen alle drei Abschnitte ein Minimum um 1250 Hz auf. Zudem ist die vertikale pinned-pinned Frequenz mit einem Einbruch der Abklingrate bei 1 kHz zu erkennen. Horizontal liegt diese bei 500 Hz, der Einbruch ist zumindest bei MQ1 und MQ2 gut zu erkennen.

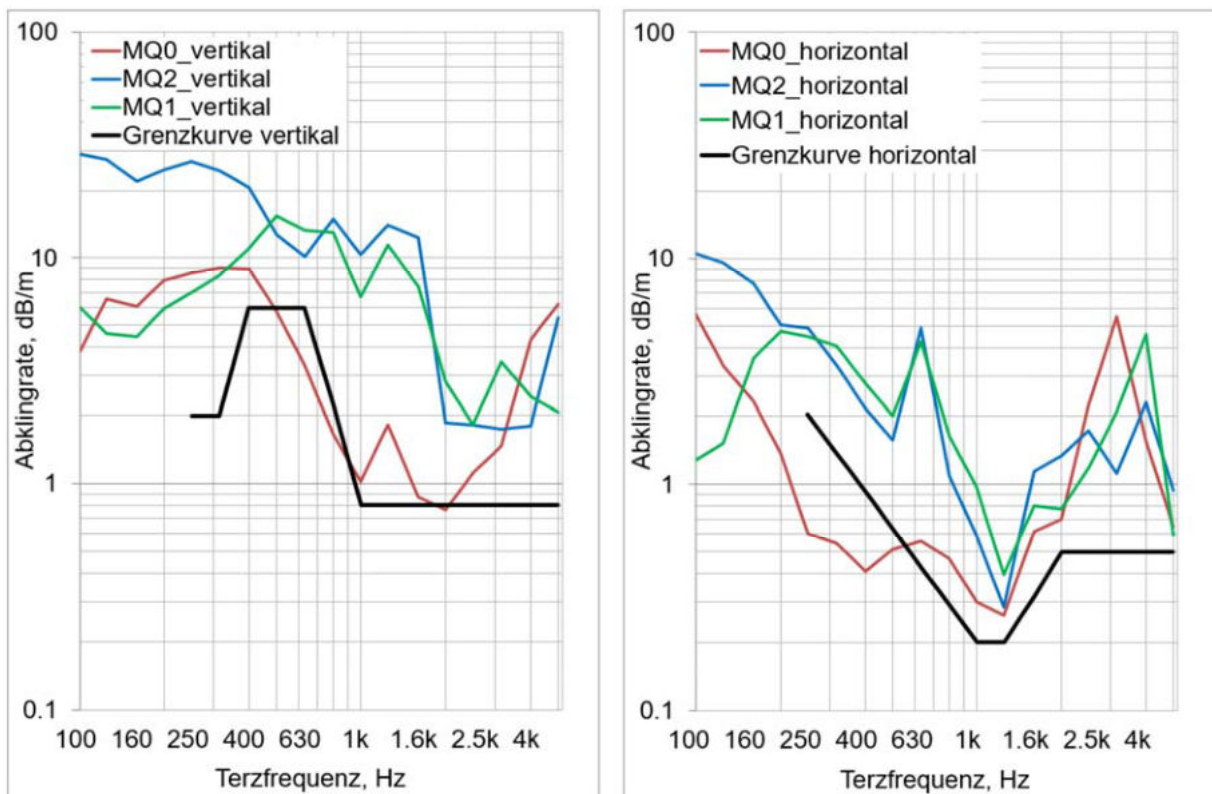


Abbildung 14: Gleisabklingraten vertikal (links) und horizontal (rechts) für MQ0, MQ1 und MQ2, Quelle: [7]

5.4. Messungen Schwellenschwingungen

5.4.1. Daten zur Messung

Datum:	04.11.2020
Messzeit:	10:00 – 15:00
Anzahl Züge:	8 EWIII, 9 Nina
Messquerschnitte	MQ0b, MQ1b, MQ2b
Messgeräte	MR2002 (ZC 278, ZC 627, ZC 607), 800 sps, Trigger 1.0 mm/s
Sensoren	je 3 Schwinggeschwindigkeitssensoren MS uniaxial vertikal
Messpunkte	auf Schwellenkopf, im jeweiligen Abstand von 2.4 m

5.4.2. Ergebnisse Messung Schwellenschwingungen

Das folgende Diagramm zeigt die gemittelten Schwinggeschwindigkeiten v_{rms} [mm/s] der gemessenen Zugsvorbeifahrten bei den Messquerschnitten MQ0b (weiche Zw), MQ1b (Test Zw) und MQ2b (harte Zw). Im Bereich dieser drei Messquerschnitte liegt derselbe Oberbau W14 mit Betonschwellen B91, allerdings mit unterschiedlichen Zwischenlagen.

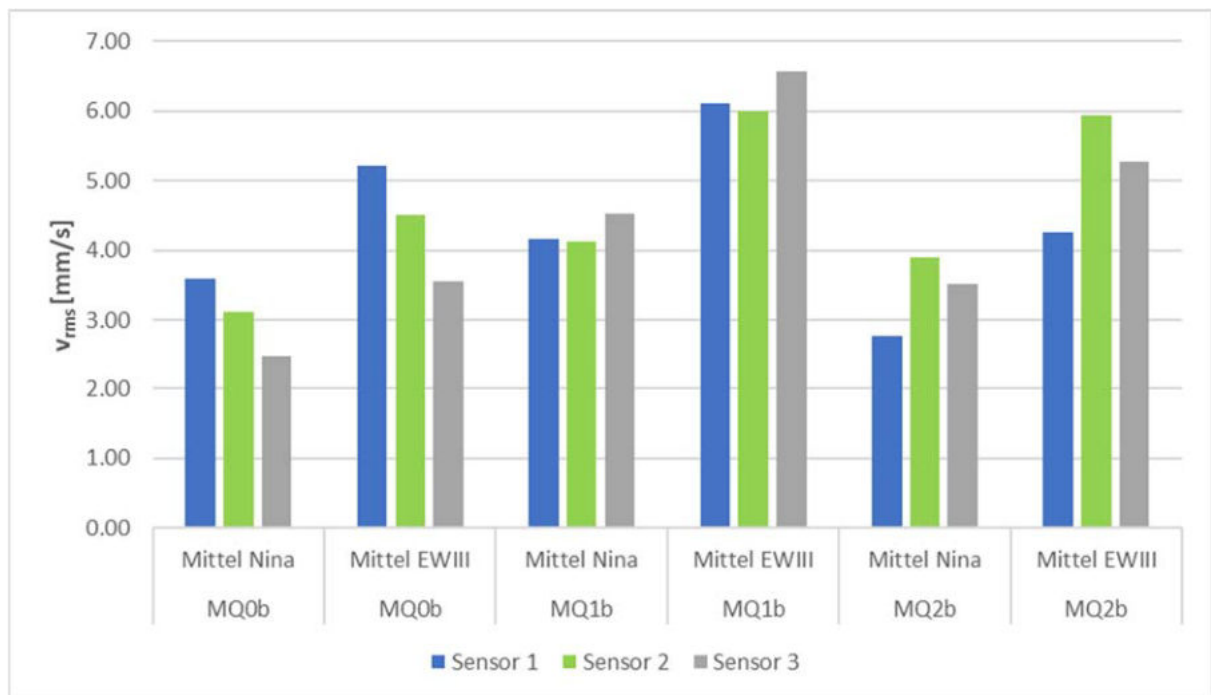


Abbildung 15: Schwellenschwingungen v_{rms} für MQ0b, MQ1b und MQ2b, Zugtypen EWII und Nina

Die Werte v_{rms} sind bei MQ0b tiefer als bei MQ1b. Die Werte bei MQ2b liegen ebenfalls tiefer als bei MQ1b.

Im Terzspektrum zeigen sich die Unterschiede zwischen MQ0b und MQ1b / MQ2b insbesondere im Frequenzbereich ab 16 Hz. Die Werte bei MQ1b liegen im gesamten Frequenzbereich etwas oberhalb von MQ2b.

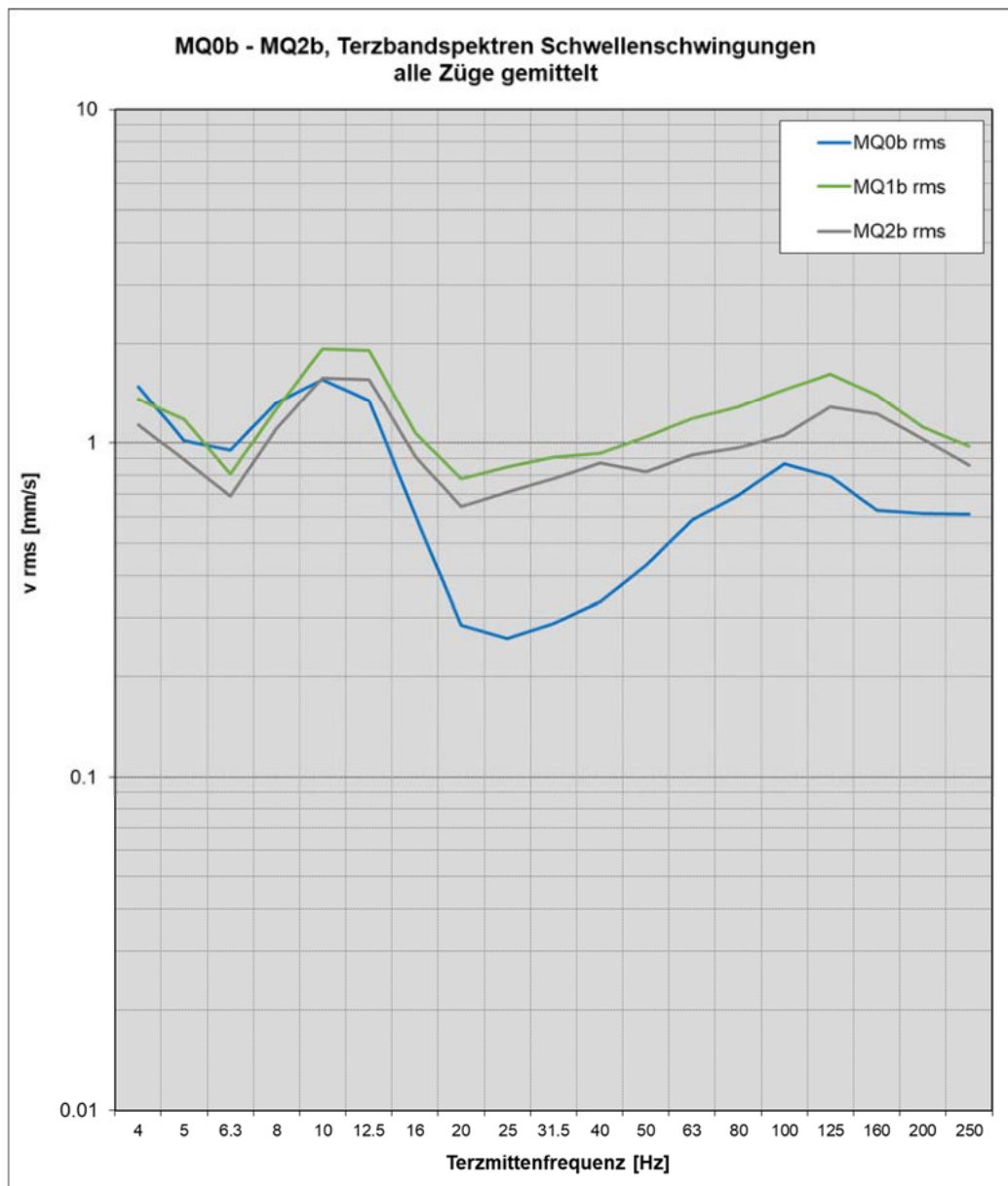


Abbildung 16: Terzspektren Schwellenschwingungen MQ0b, MQ1b und MQ2b, Mittel über alle Züge

6. Zusammenfassung und Interpretation der Messergebnisse

6.1. Schallemissionen

In folgender *Abbildung 17* sind die gemessenen Schallemissionspegel L_{Aeq} bei 80 km/h und die ermittelten Differenzen zur Referenz MQ0 übersichtlich dargestellt.

Wie in Kapitel 5.1.3 erläutert, ergibt sich daraus eine Schalleinfügedämmung infolge Getzner Test-Zwischenlage von 3.6 dBA (EWIII) bis 3.8 dBA (Nina) gegenüber dem Referenzoberbau mit weicher Zwischenlage.

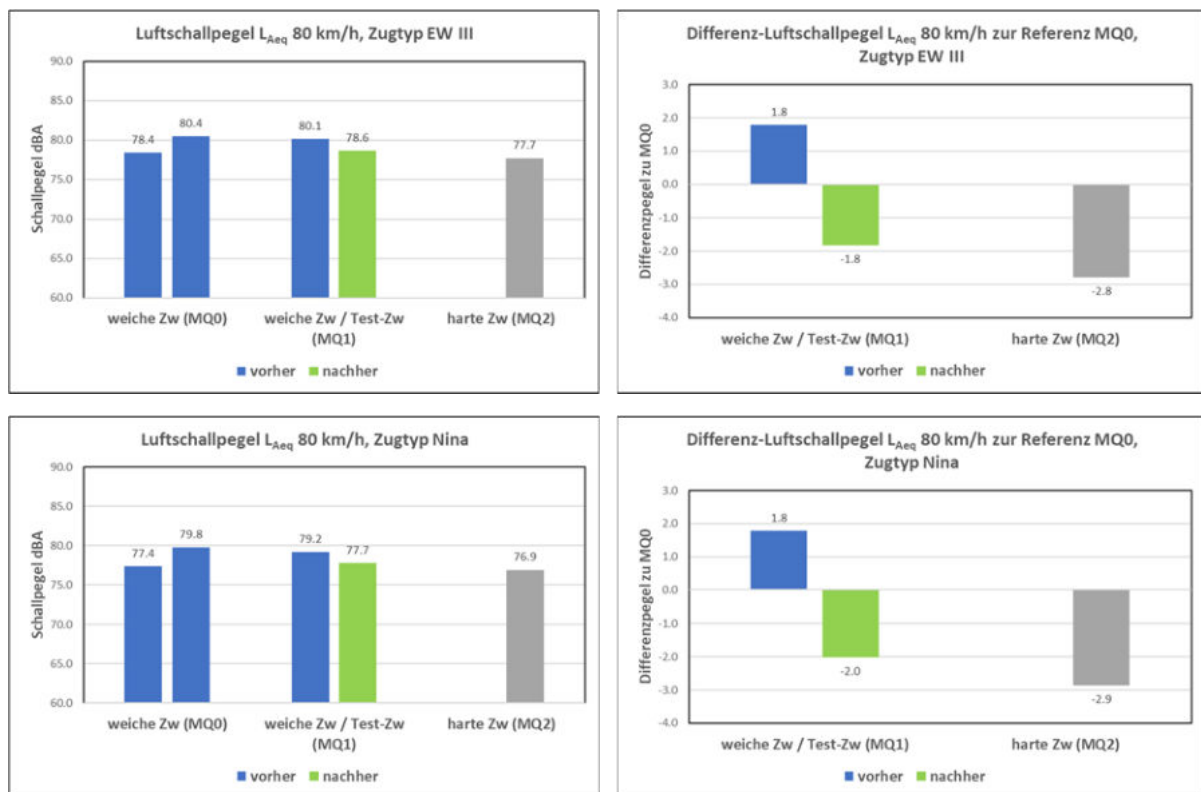


Abbildung 17: L_{Aeq} (Mittel pro Zugtyp) und Differenzen MQ1 und MQ2 zur Referenz MQ0

Die Getzner Test-Zwischenlage verhält sich akustisch sehr ähnlich wie die harte Zwischenlage, wenn man auch die gemessenen Schienenrauheiten und insbesondere die Gleisabklingraten berücksichtigt. Die Schallemissionspegel sind bei der harten Zwischenlage zwar nochmals 0.9 dBA tiefer, aber auch die Schienenrauheit ist dort 0.4 dB tiefer. Die Gleisabklingraten sind im akustisch relevanten Frequenzbereich praktisch deckungsgleich.

Obwohl die Getzner Zwischenlage gegenüber einer harten Zwischenlage statisch ca. zehnmal weicher ist, ist sie akustisch dank hoher Dämpfung praktisch gleichwertig.

Vergleicht man die Unterschiede zwischen MQ0 und MQ1 bei den Schall- und Gleisabklingratenmessungen vertikal im Frequenzbereich (*Abbildung 8* und *Abbildung 14*), so beginnt das Auseinanderdriften der zwei Kurven bei beiden Messungen bei ca. 400 Hz, und bei 2.5 kHz beginnen sich die Kurven wieder anzugleichen.

6.2. LCC Oberbau

Harte Zwischenlagen wurden in den letzten Jahren bei der SOB und BLS bei Oberbauerneuerungen vielfach durch weiche Zwischenlagen ersetzt, um die Instandhaltungskosten zu senken. Die weiche Zwischenlage mit einer nominellen statischen Steifigkeit von 100 kN/mm hat den Vorteil, dass sie die quasistatischen Radlasten besser auf mehrere Stützpunkte verteilen und die Schwingungen der Schiene von der Schwelle isolieren kann. Zudem kann mit weichen Zwischenlagen in engen Bögen die Schlupfwellenbildung reduziert werden.

Aufgrund der Labortests (Kapitel 3) mit der Test-Zwischenlage von Getzner ergeben sich quasistatisch und dynamisch niederfrequent ähnliche, teilweise tiefere Zwischenlagensteifigkeiten als bei der weichen Zwischenlage. Von daher müsste das gegenüber der harten Zwischenlage verbesserte, oberbauschonende Verhalten von weichen Zwischenlagen auch mit der Test-Zwischenlage erreicht werden können. Auch die Gleisabklingraten in Abbildung 14 zeigen, dass sich die Test-Zwischenlage tieffrequent der weichen Zwischenlage angleicht. Betrachtet man andererseits die Schwellenschwingungen, zeigt sich ein ganz anderes Bild. Im Abschnitt MQ1 mit den eingebauten Test-Zwischenlagen wurden im Vergleich zu den Abschnitten mit weichen und harten Zwischenlagen höhere Schwellenschwingungen gemessen, was nicht auf ein oberbauschonendes Verhalten hindeutet. Es gibt allerdings noch weitere Faktoren, die diese grossen Unterschiede bei den tieffrequenten Schwellenschwingungen erklären könnten. Einerseits wären das Unterschiede zwischen den Messquerschnitten bei den langwelligen Gleisunebenheiten, die mit dem Schienenrauheitsmessgerät nicht mehr erfasst werden (> 500 mm) und andererseits die Unterbauimpedanz (Schwingungswiderstand), welche aufgrund der sehr unterschiedlichen Dammhöhen (ca. 1.5 – 2.5 m) bei den Messquerschnitten möglicherweise stark variiert. Es gibt also vermutlich mehrere Faktoren neben dem Unterschied bei den Zwischenlagen, welche die Schwellenschwingungen beeinflussen. Um diesen Widerspruch zwischen Labortests, Gleisabklingrate tieffrequent und Schwellenschwingungen zu klären, empfehlen wir ergänzend Schieneneinsenkungsmessungen (Einsenkung Schiene relativ zur Schwelle) unter Betriebslasten (Regelverkehr) bei den drei Messquerschnitten. Die Test-Zwischenlage müsste dabei ähnlich einsinken wie eine weiche Zwischenlage, um ein vergleichbares, oberbauschonendes Verhalten zu erreichen.

Hinsichtlich Lebensdauer der Test-Zwischenlage wurde ein adaptierter Dauerschwingversuch durchgeführt, der den Anforderungen im geraden Gleis entspricht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Die statische Steifigkeit der Test-Zwischenlage nimmt nach dem Dauerschwingversuch 15% zu (maximal 25% Zunahme gem. EN13481-2). Diese Anforderung wird eingehalten. Für die Anwendung in engen Bögen muss die Zwischenlage allerdings sämtliche Anforderungen gemäss EN 13481-5 erfüllen (Durchschubwiderstand, statische Steifigkeit und Spannkraft) und einem Dauerschwingversuch gemäss EN 13146-4 unterzogen werden. Eine entsprechend weiterentwickelte Zwischenlage wurde vom Hersteller bereits zugesagt und sollte in den kommenden Monaten zur Verfügung stehen.

7. Weiterer Forschungsbedarf

Wie in Kapitel 6.2 erläutert, gibt es hinsichtlich quasistatischem Verhalten noch gewisse Widersprüche zwischen Labortests, Gleisabklingrate tieffrequent und Schwellenschwingungen. Um diesen Widerspruch zwischen Labortests, Gleisabklingrate tieffrequent und Schwellenschwingungen zu klären, empfehlen wir ergänzend noch Schieneneinsenkungsmessungen (Einsenkung Schiene relativ zur Schwelle) unter Betriebslasten (Regelverkehr) bei den drei Messquerschnitten durchzuführen. Die Test-Zwischenlage müsste dabei ähnlich einsinken wie eine weiche Zwischenlage, um ein vergleichbares, oberbauschonendes Verhalten zu erreichen.

Neben der akustischen Wirkung der Test-Zwischenlage in einem Geradenabschnitt ist auch die Wirkung in engen Bögen (inkl. Schlupfwellenbildung), u.U. auch in Weichen für Bahninfrastrukturbetreiber von Interesse. Da in diesen Fällen (Bögen, Weichen) insbesondere die impulsartigen Anregungen (Zischen, Quietschen in engen Bögen und im Zungenbereich von Weichen, Schläge beim Herzstück) zu Störungen der Anwohner führen und hohe Dämpfung bei Impulsen sehr effektiv ist, besteht für solche Fälle noch viel Potential gegenüber den heutigen, hochelastischen Zwischenlagen mit wenig Dämpfung.

Hinsichtlich Lebensdauer und Dauerstandsverhalten unter Betrieb ist die eingebaute Test-Zwischenlage weiter zu beobachten, allenfalls in 1-2 Jahren ein paar Zwischenlagen für Labortests (statische und dynamische Steifigkeit) zu entnehmen und die verbleibende Dicke der Zwischenlage zu bestimmen.

8. Literaturverzeichnis

- [1] EN ISO 3095 (2013): Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen (ISO 3095:2013), Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, August 2013
- [2] EN 15461:2008+A1 (2010): Railway applications – Noise emission – Characterisation of the dynamic properties of track sections for pass by noise measurements, European Committee for Standardization, Brüssel, November 2010
- [3] EN 15610 (2009): Bahnanwendungen – Geräuschemission – Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräusch, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, Mai 2009
- [4] Czolbe, C. (2020): Akustisch optimierte Schienenzwischenlage, Bericht Nr. 04-03-02153, PROSE AG, Winterthur
- [5] Gramowski, Christoph (2013): Gleisseitige Schallemission – Experimentelle Quantifizierung und Bewertung konstruktiver Massnahmen, Dissertation, TU Berlin, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, Berlin
- [6] Huber, P. / Liengme J.-D. / Koller G. (2016): Rail shielding – influence on noise emission and rail vibration, 12th International Workshop on Railway Noise, Terrigal Australia
- [7] Kneib, Guido (2020): Bestimmung der Schienenabklingrate zwischen Kerzers und Müntschemier, Bericht Nr. C90649/01, Müller-BBM Schweiz AG, MuttENZ, 06. November 2020
- [8] Maes, J. / Sol, H. / Guillaume P. (2006): Measurements of the dynamic railpad properties, Vrije Universiteit Brussel, Elsevier, Journal of Sound and Vibration 293 (2006) 557 - 565
- [9] Thompson, David (2009): Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modelling and Means of Control, Elsevier
- [10] Venghaus, Helmut (2015): Erprobung Schienendämpfer – Bestimmung Faktor X – Stardamp Tool. Eine Studie über die Einflussfaktoren aus dem Trassenaufbau auf die Wirkung von Schienendämpfern, Bericht Nr. ACB-1015-6374/6, Accon GmbH, Greifenberg
- [11] Venghaus, Helmut (2018): Ageing cuts down the track homogeneity causing differences between calculations and measurements of railway noise, Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Proceedings of the 12th International Workshop on Railway Noise, D. Anderson et al., Springer International Publishing AG, Terrigal Australia
- [12] Wolfgang Fengler / Ulf Gerber (2014): Auslegung elastischer Zwischenlagen, Beeinflussung der Schleif- und Stopfzyklen durch elastische Zwischenlagen – Auswahl der Zwischenlagendicke in Abhängigkeit vom Material, EI – Eisenbahningenieur

Anhang

Anhang 1: Schallemissionen

Anhang 2: Gleisabklingraten

Anhang 3: Schwellenschwingungen

Anhang 4: Fotos Messungen Schallemissionen

Anhang 5: Fotos Messungen Schienenrauheit

Anhang 6: Fotos Messungen Schwellenschwingungen

Anhang 7: Protokoll Zugsvorbeifahrten Nullmessung 14.10.2020

Anhang 8: Protokoll Zugsvorbeifahrten Effektmessung 04.11.2020

Anhang 9: Messgerät Schallemissionen: NOR140

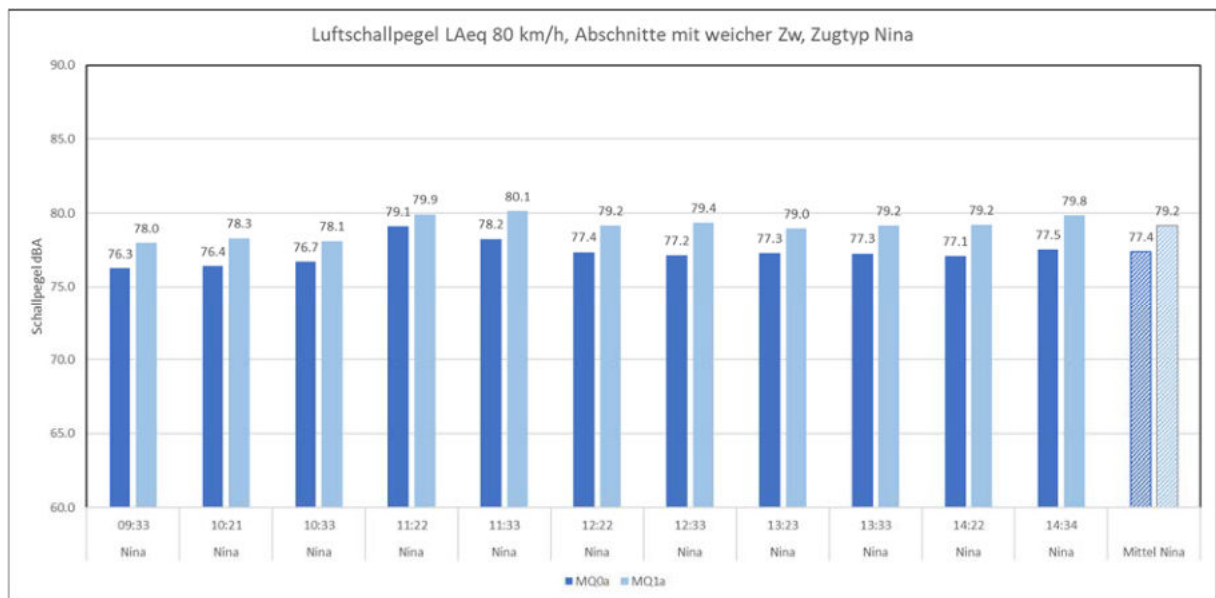
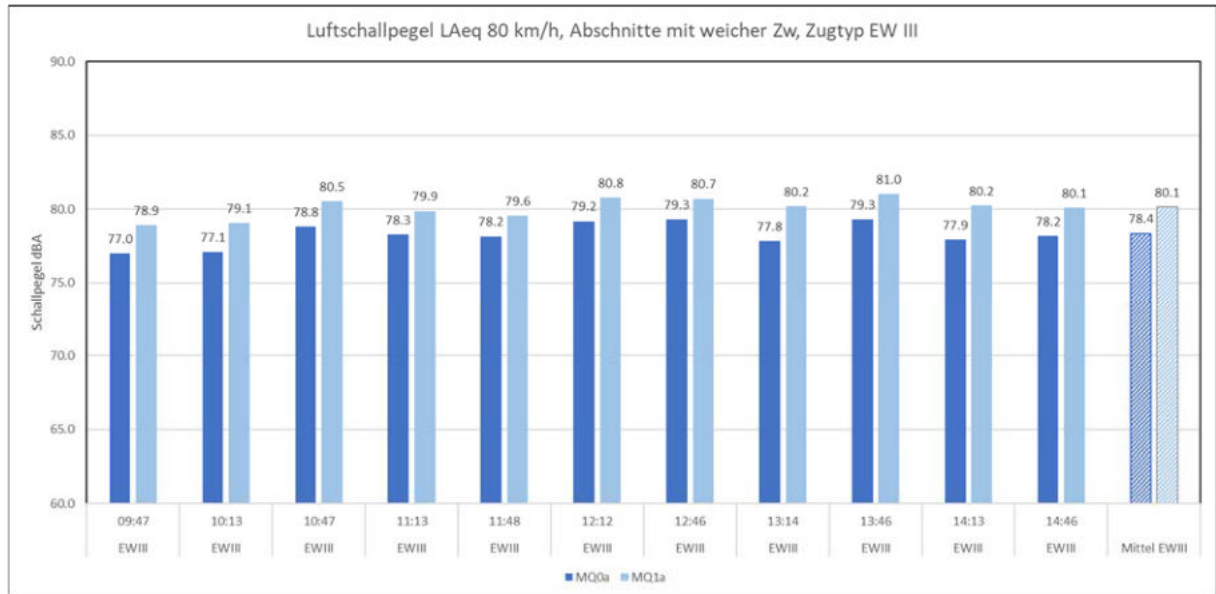
Anhang 10: Messgerät Schienenrauheit: APT RSA – Rail Surface Analyser

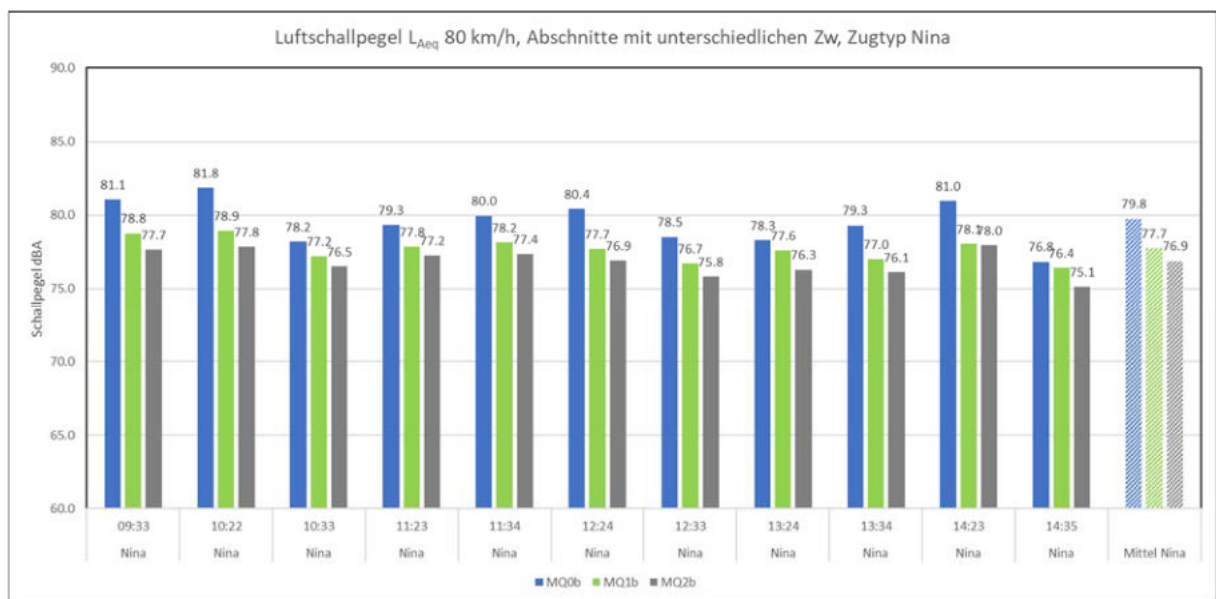
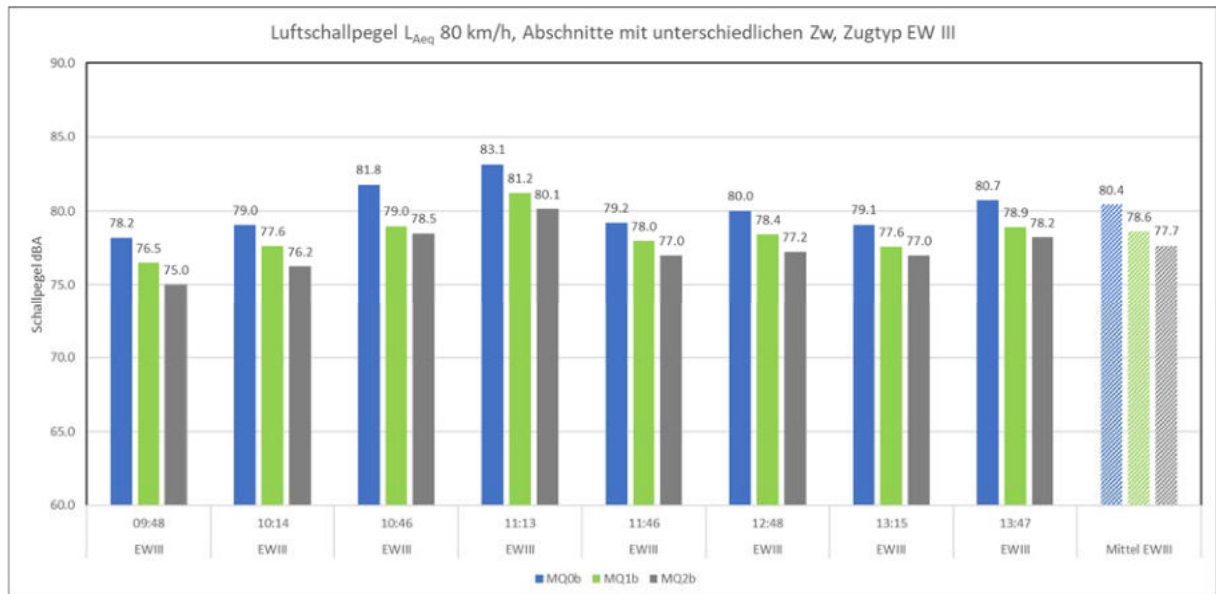
Anhang 11: Messgerät Schwellenschwingungen: Syscom MR 2002

Anhang 12: Wetterdaten während Null- und Effektmessung

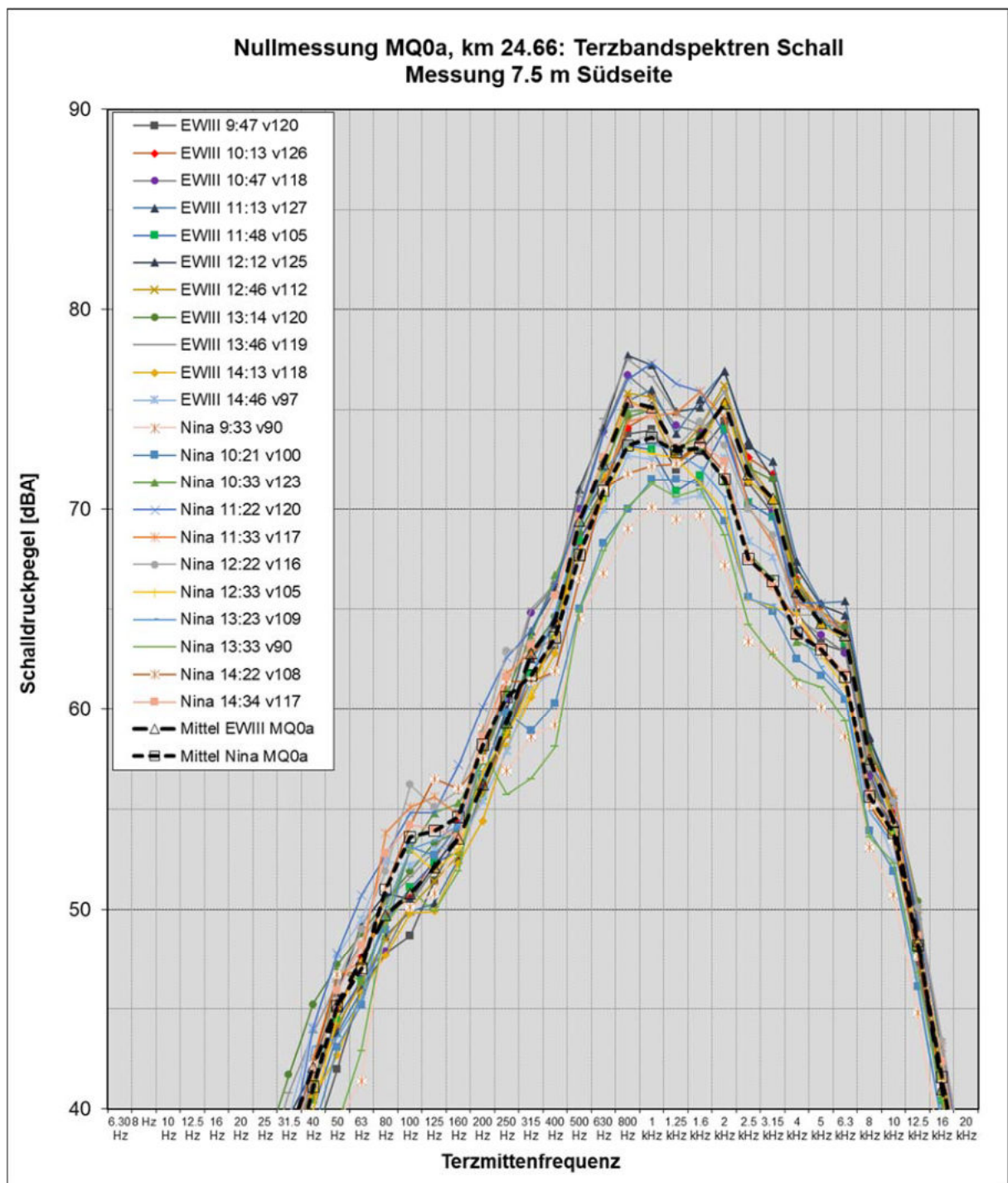
Anhang 1: Schallemissionen

Nullmessung, L_{Aeq} 80 km/h

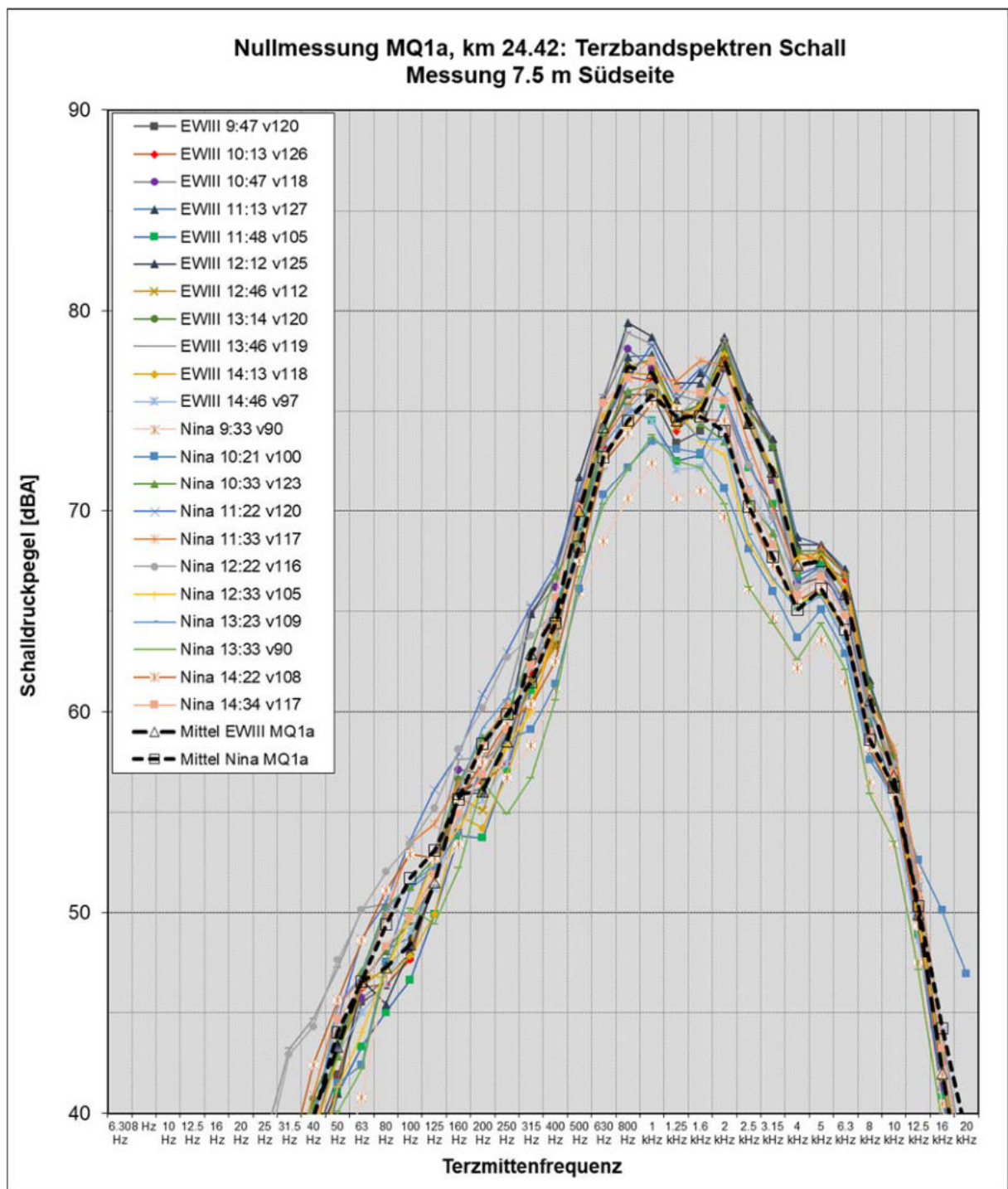


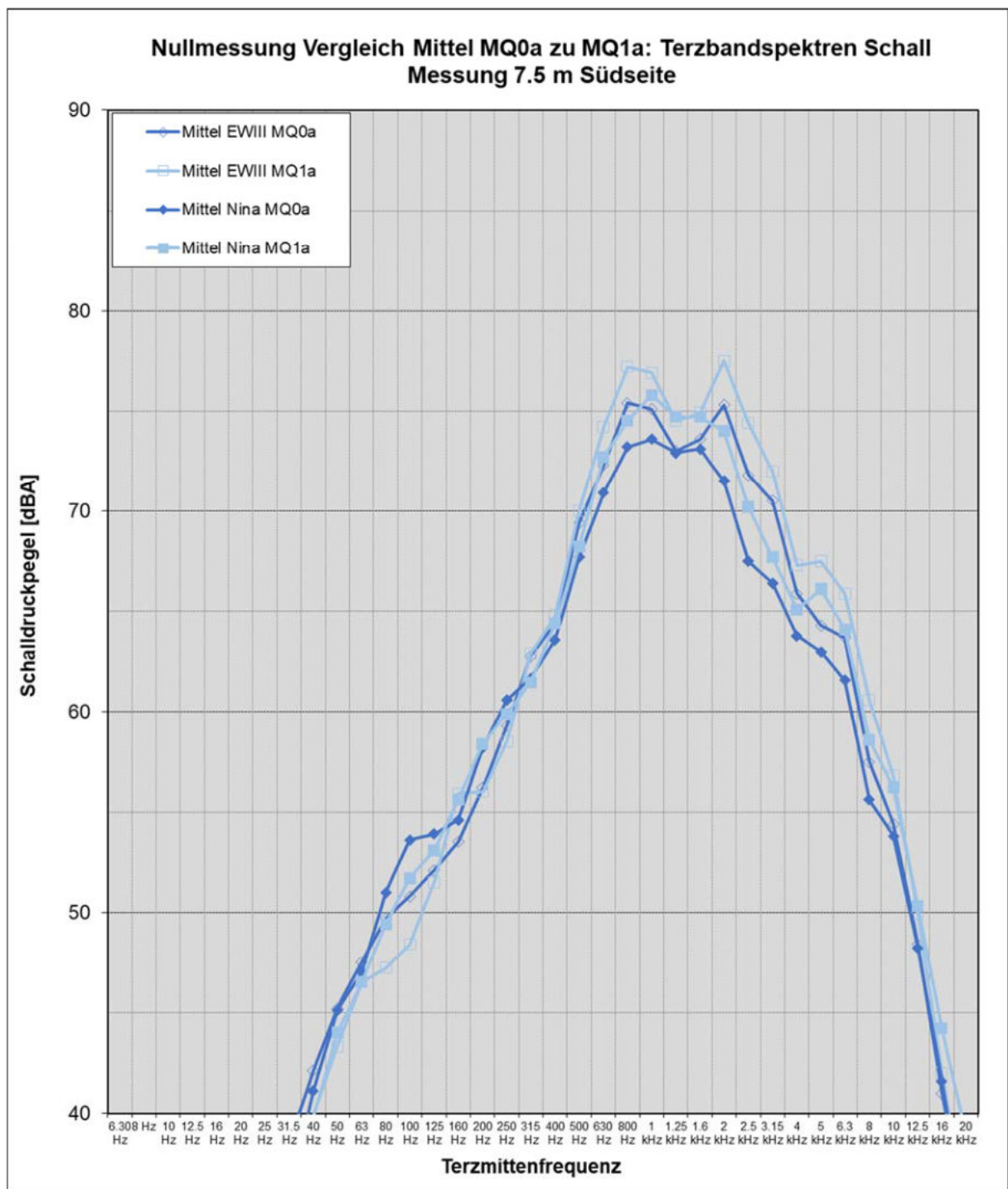
Effektmessung, L_{Aeq} 80 km/h

Nullmessung, Terzspektren MQ0a

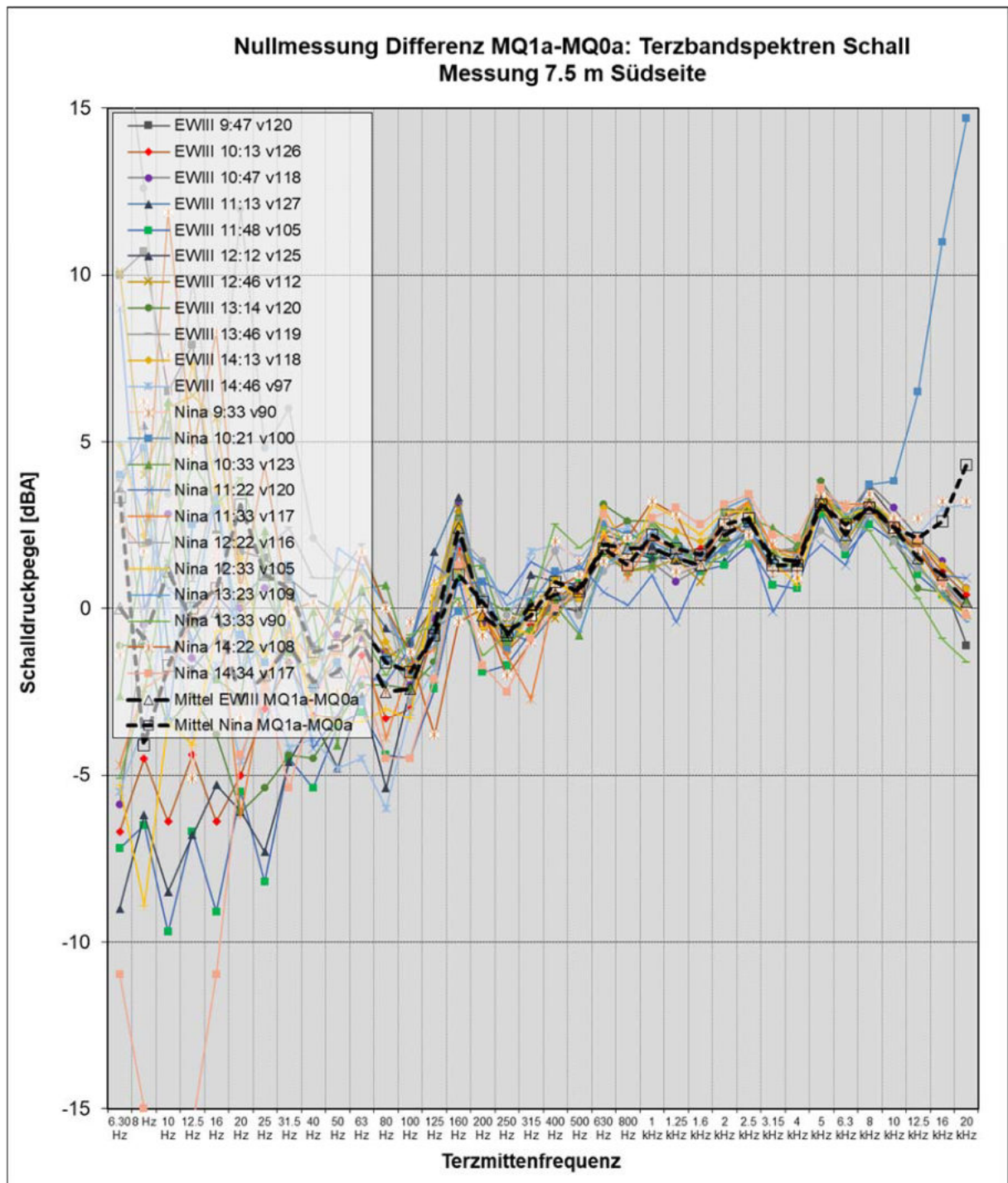


Nullmessung, Terzspektren MQ1a

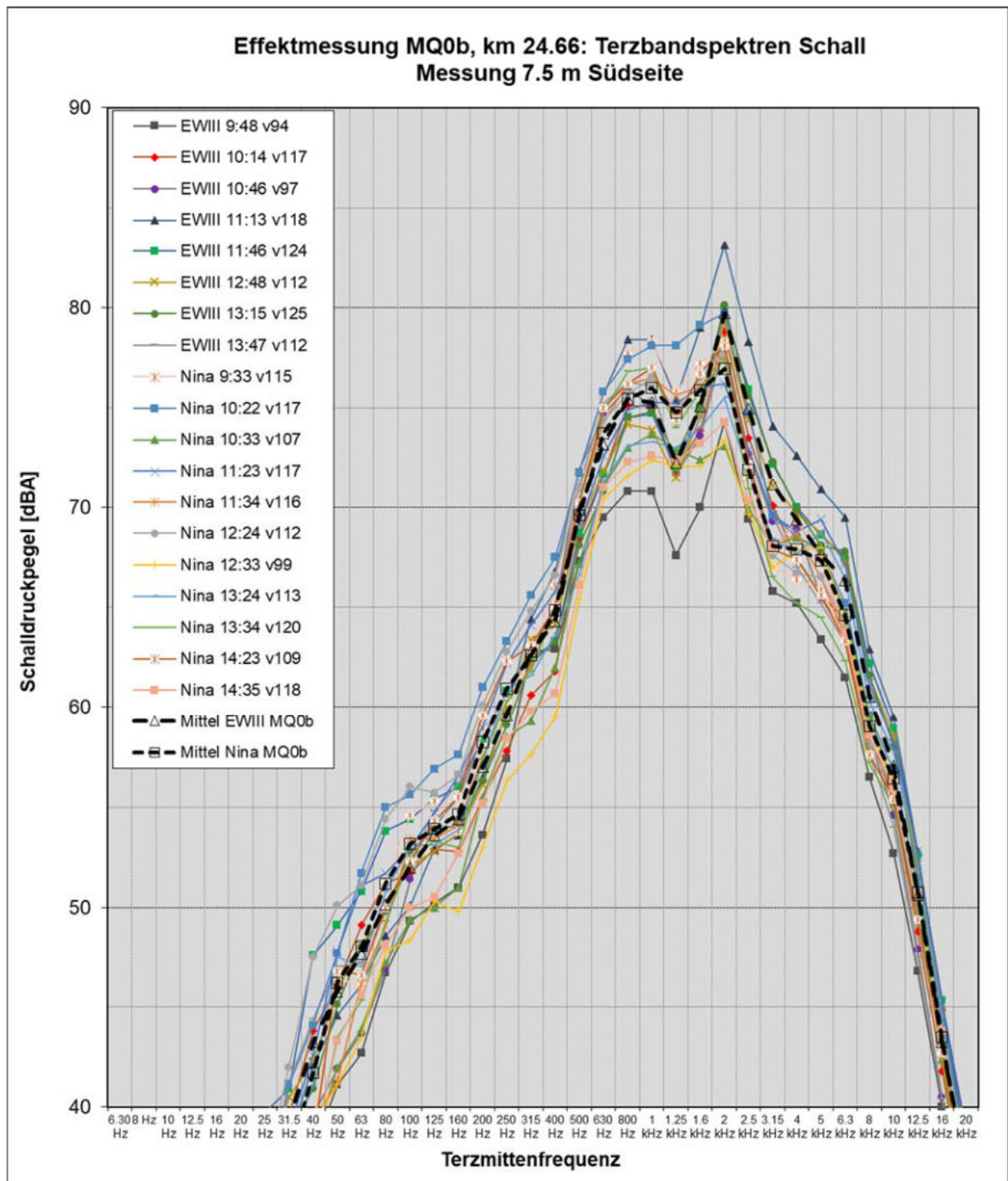


Nullmessung, Vergleich Mittel MQ0a zu MQ1a

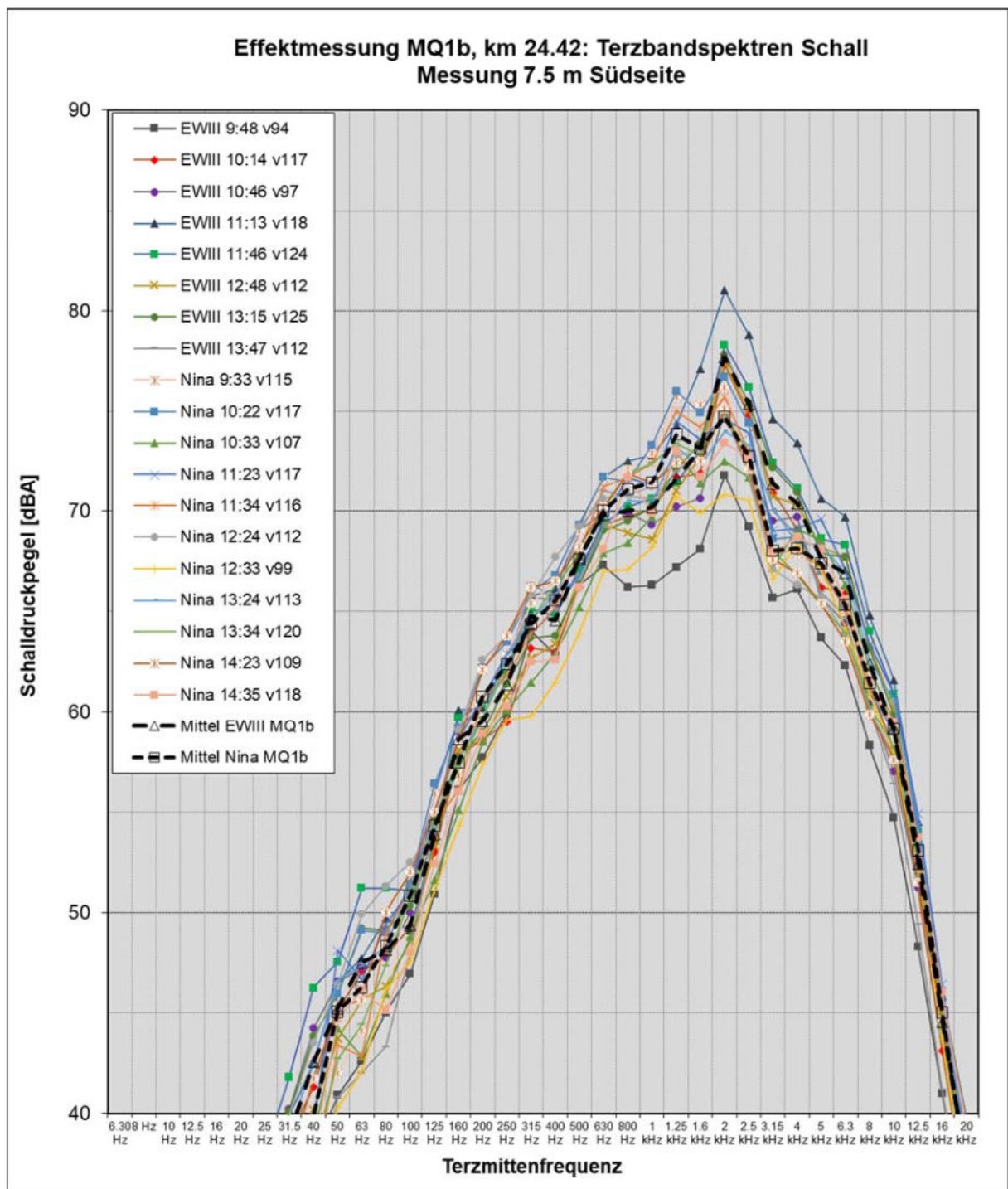
Nullmessung, Differenzspektrum MQ1a – MQ0a



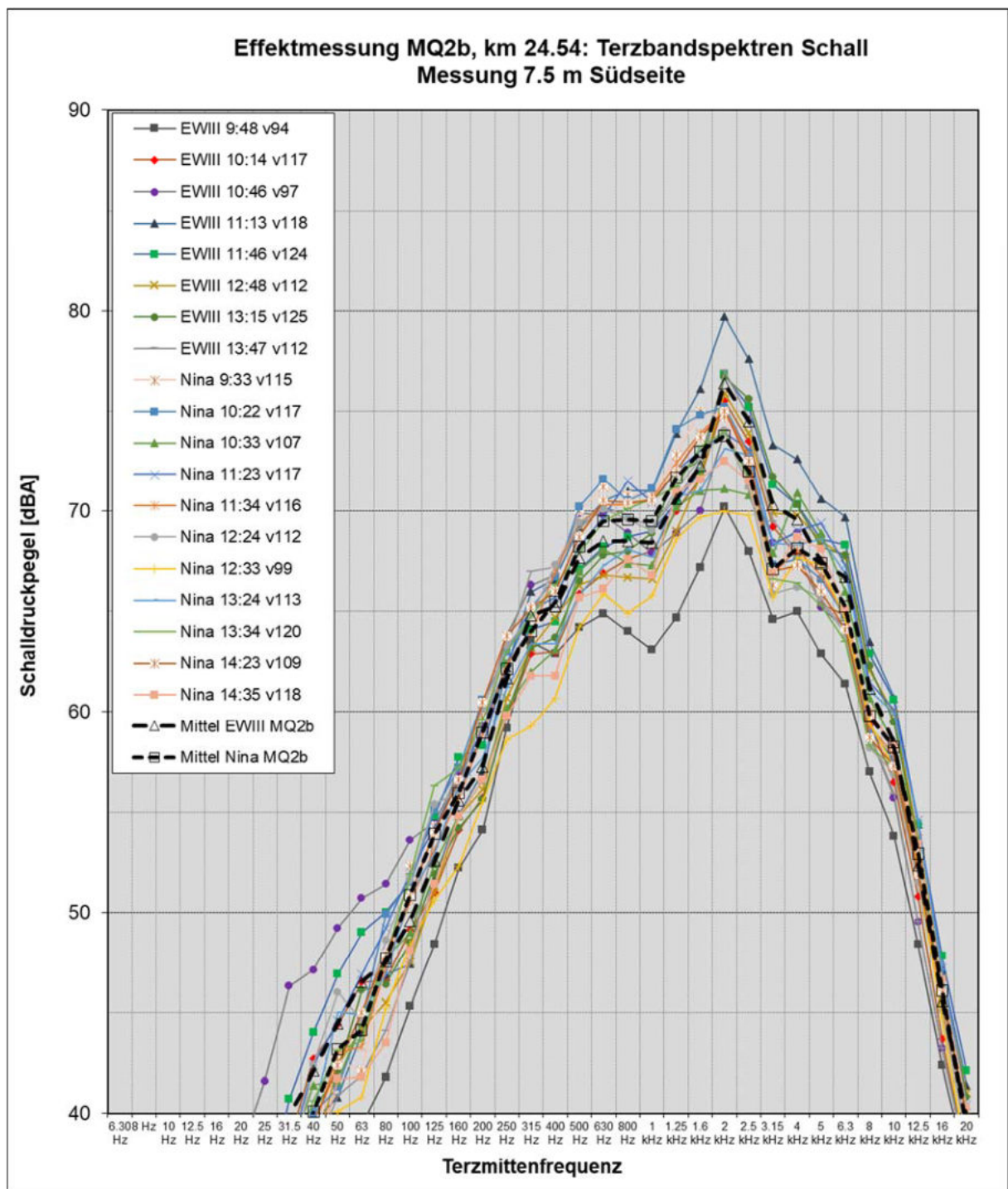
Effektmessung, Terzspektren MQ0b

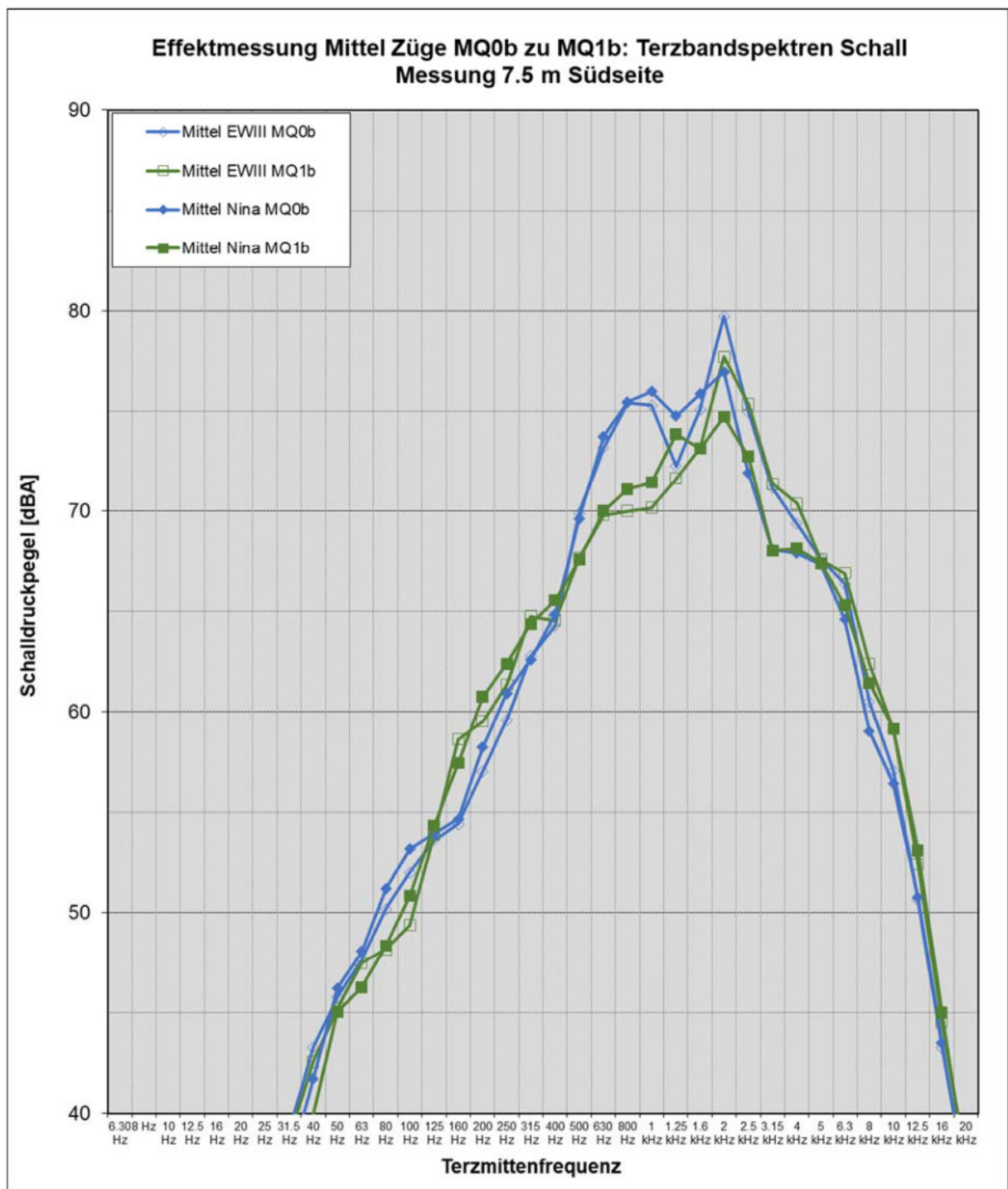


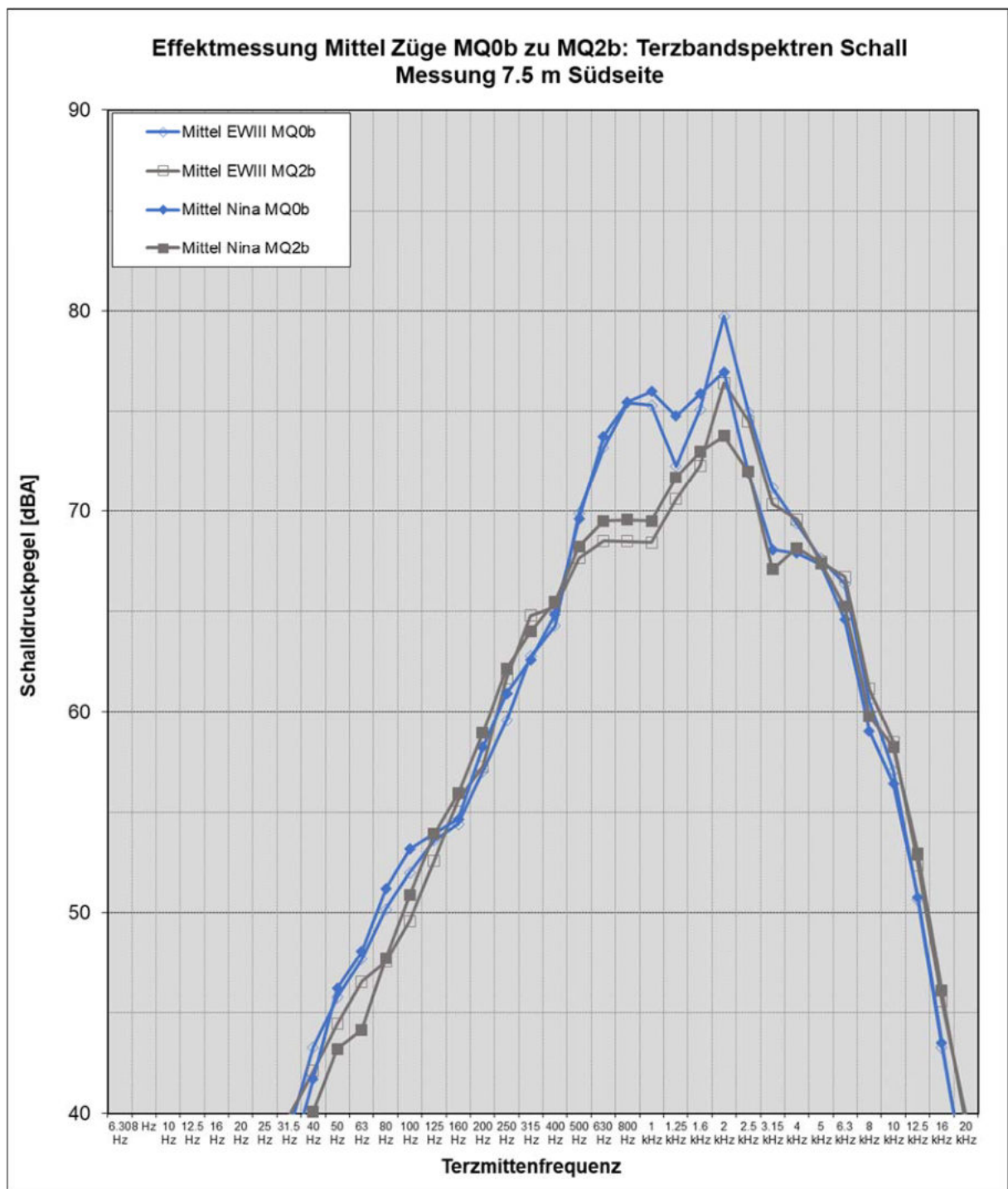
Effektmessung, Terzspektren MQ1b



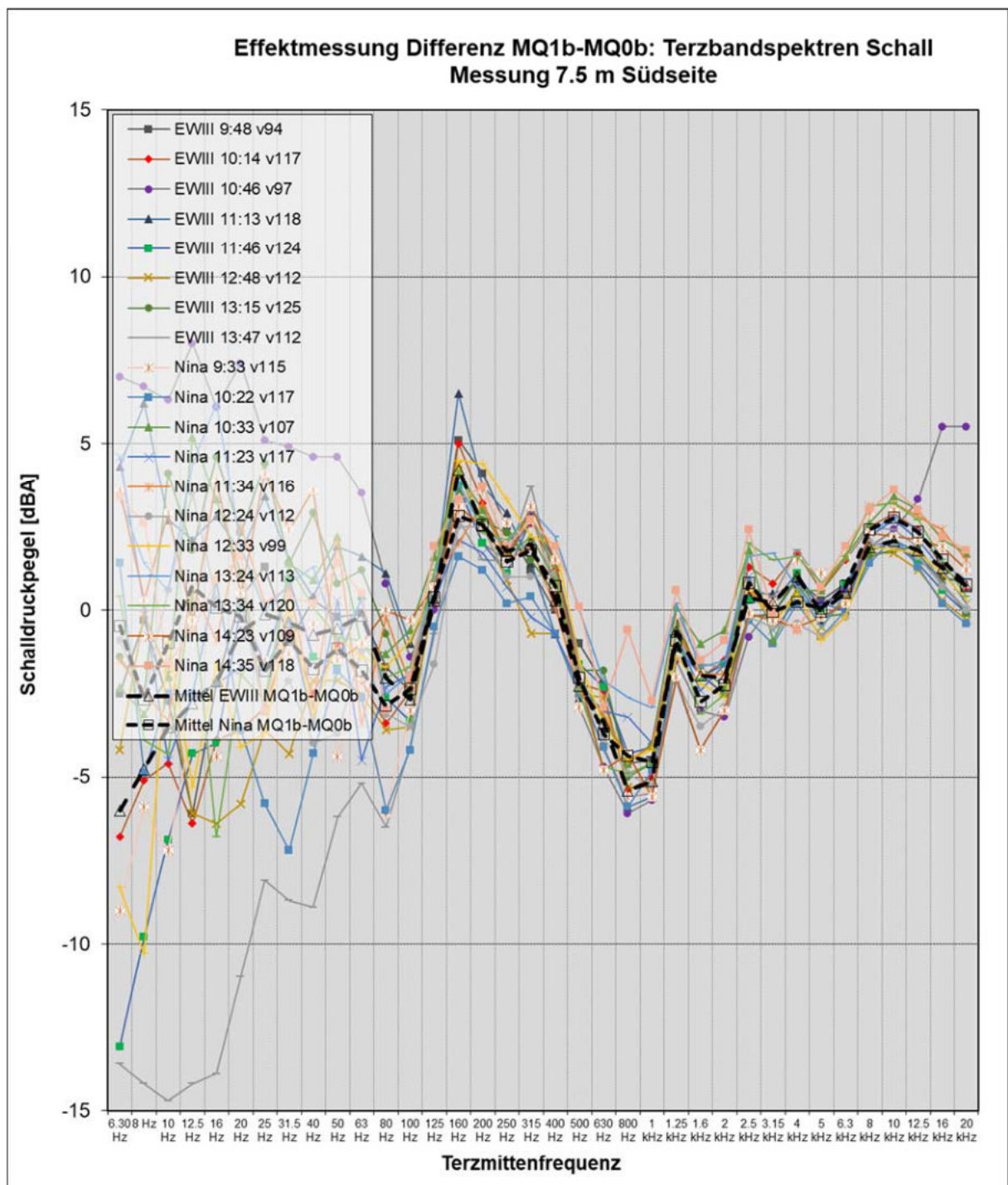
Effektmessung, Terzspektren MQ2b



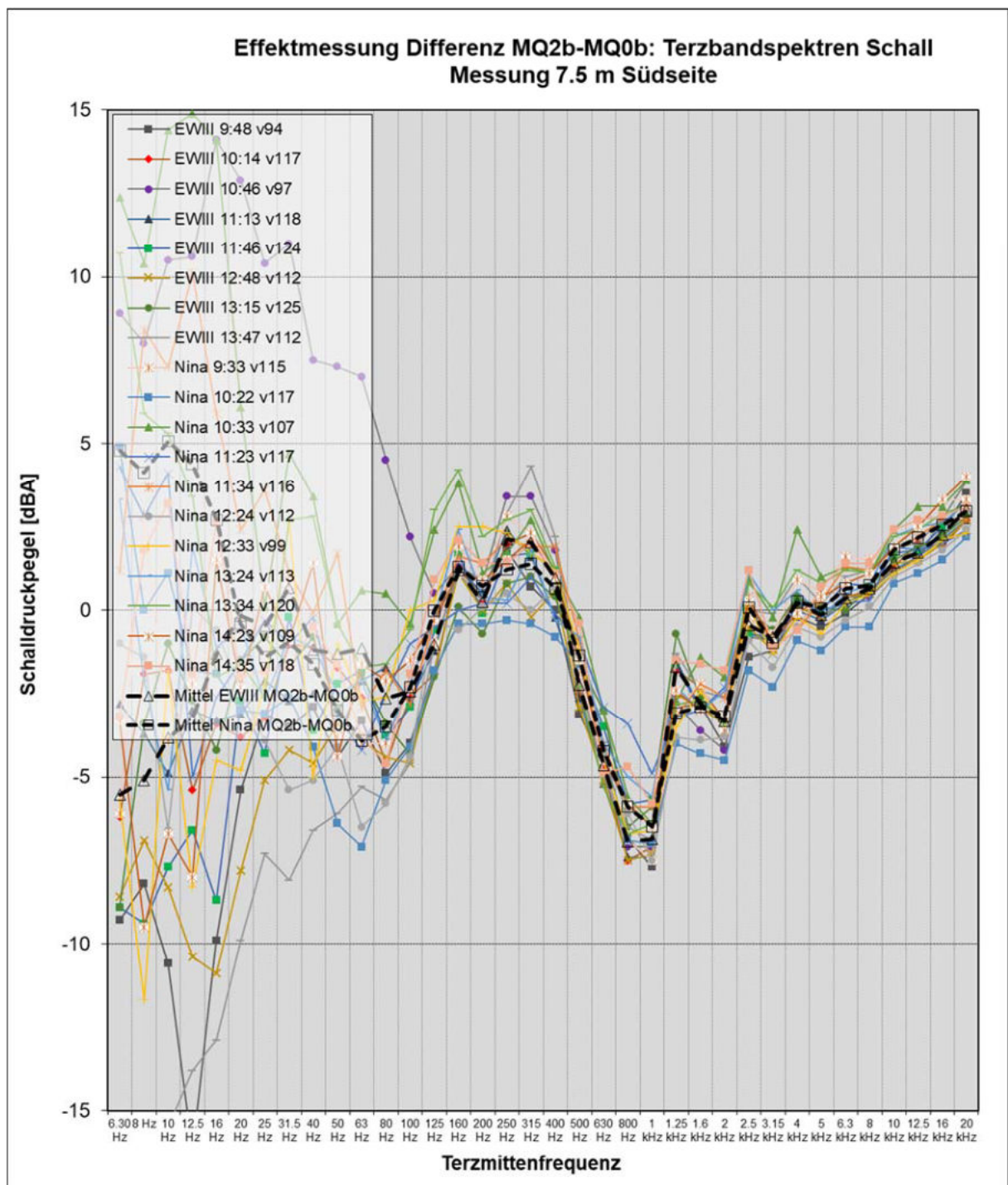
Effektmessung, Vergleich Mittel MQ0b zu MQ1b

Effektmessung, Vergleich Mittel MQ0b zu MQ2b

Effektmessung, Differenzspektrum MQ1b – MQ0b

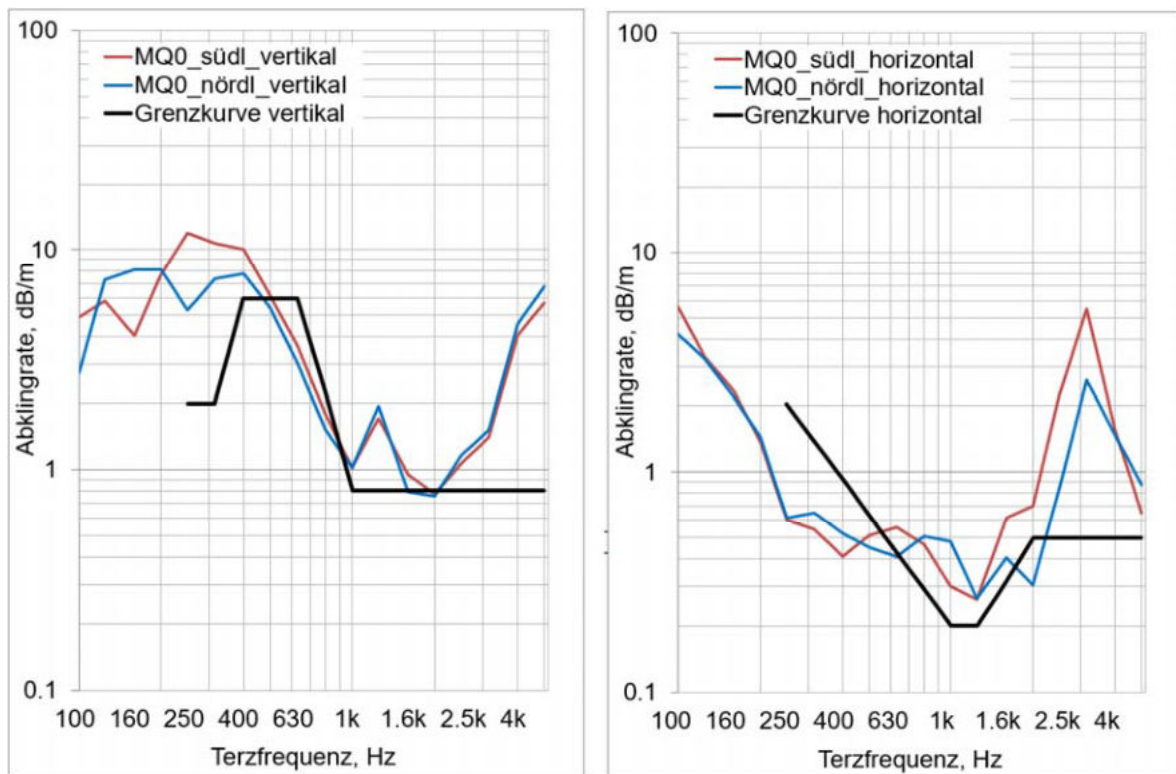


Effektmessung, Differenzspektrum MQ2b – MQ0b

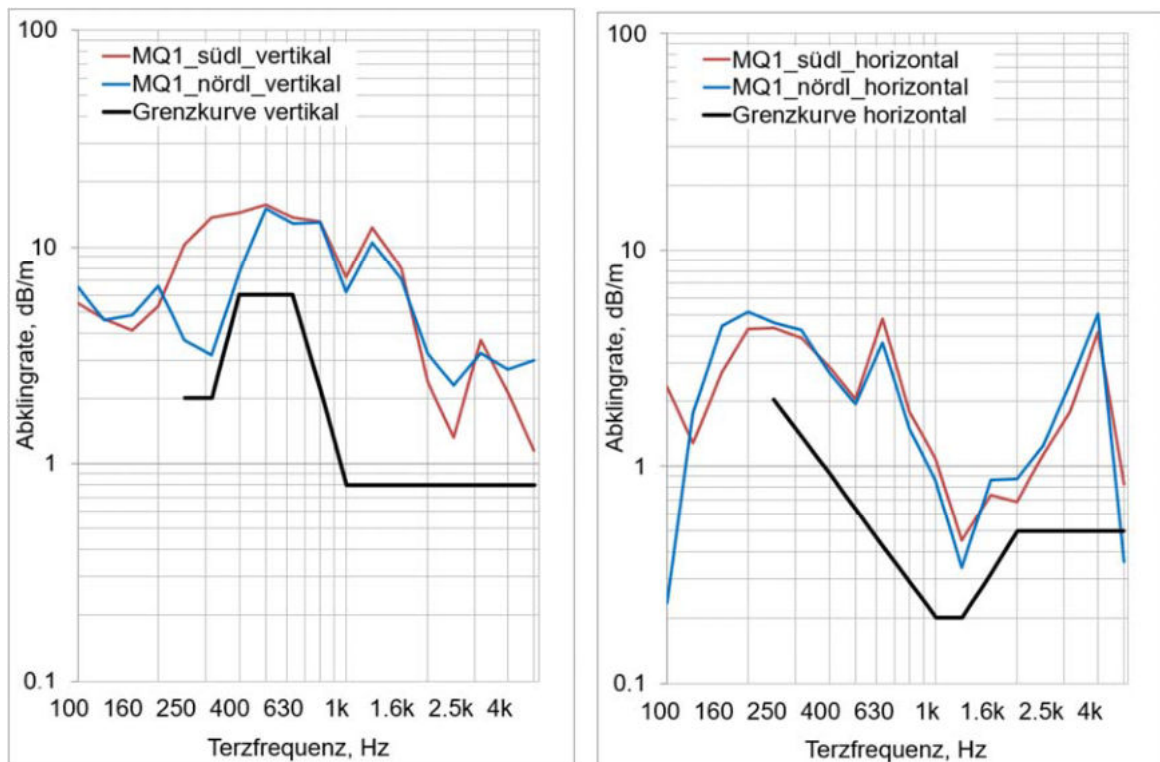


Anhang 2: Gleisabklingraten

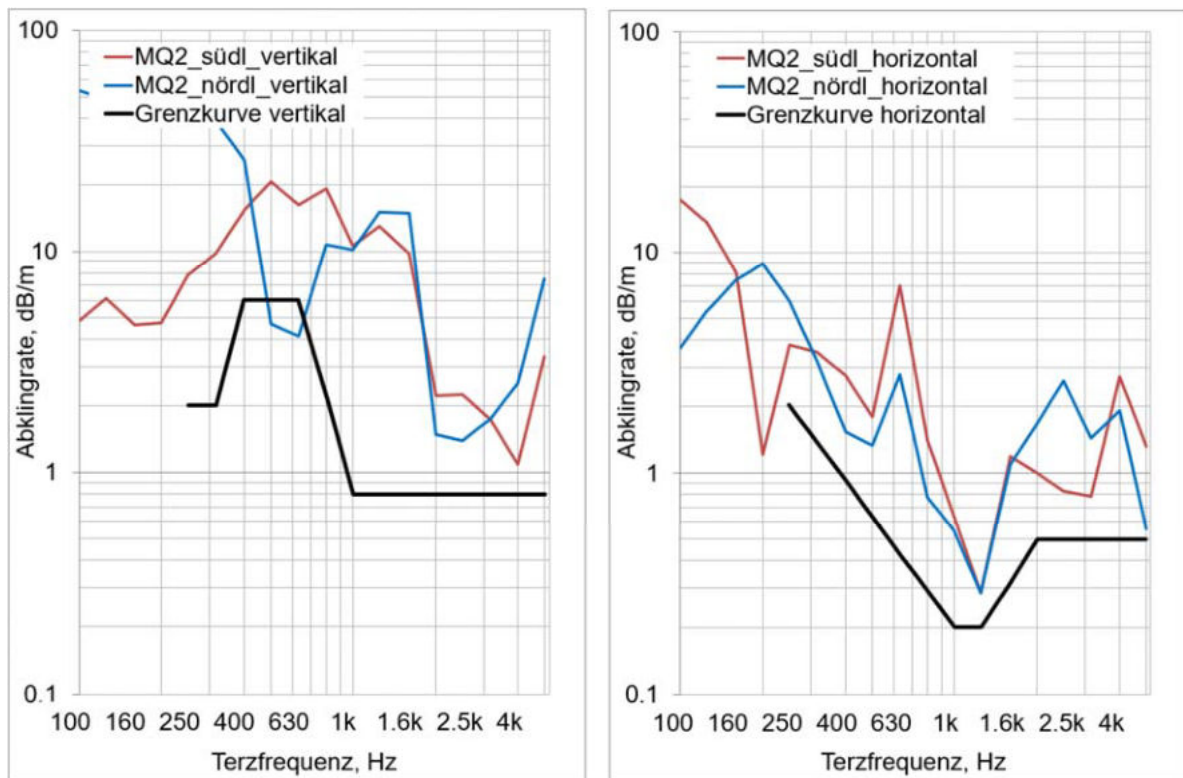
Gleisabklingraten des Streckenabschnitts MQ0 [7] mit vertikaler Abklingrate (links) und horizontaler Abklingrate (rechts). Die südliche Schiene ist rot, die nördlichen blau dargestellt.



Gleisabklingraten des Streckenabschnitts MQ1 [7] mit vertikaler Abklingrate (links) und horizontaler Abklingrate (rechts). Die südliche Schiene ist rot, die nördlichen blau dargestellt.

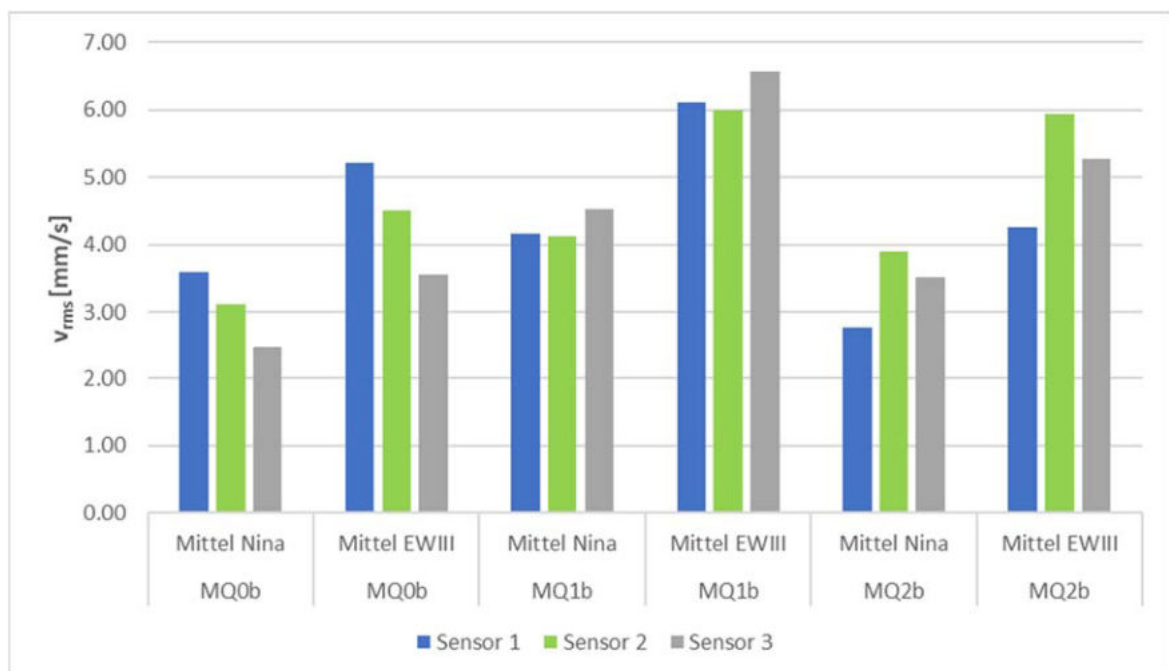
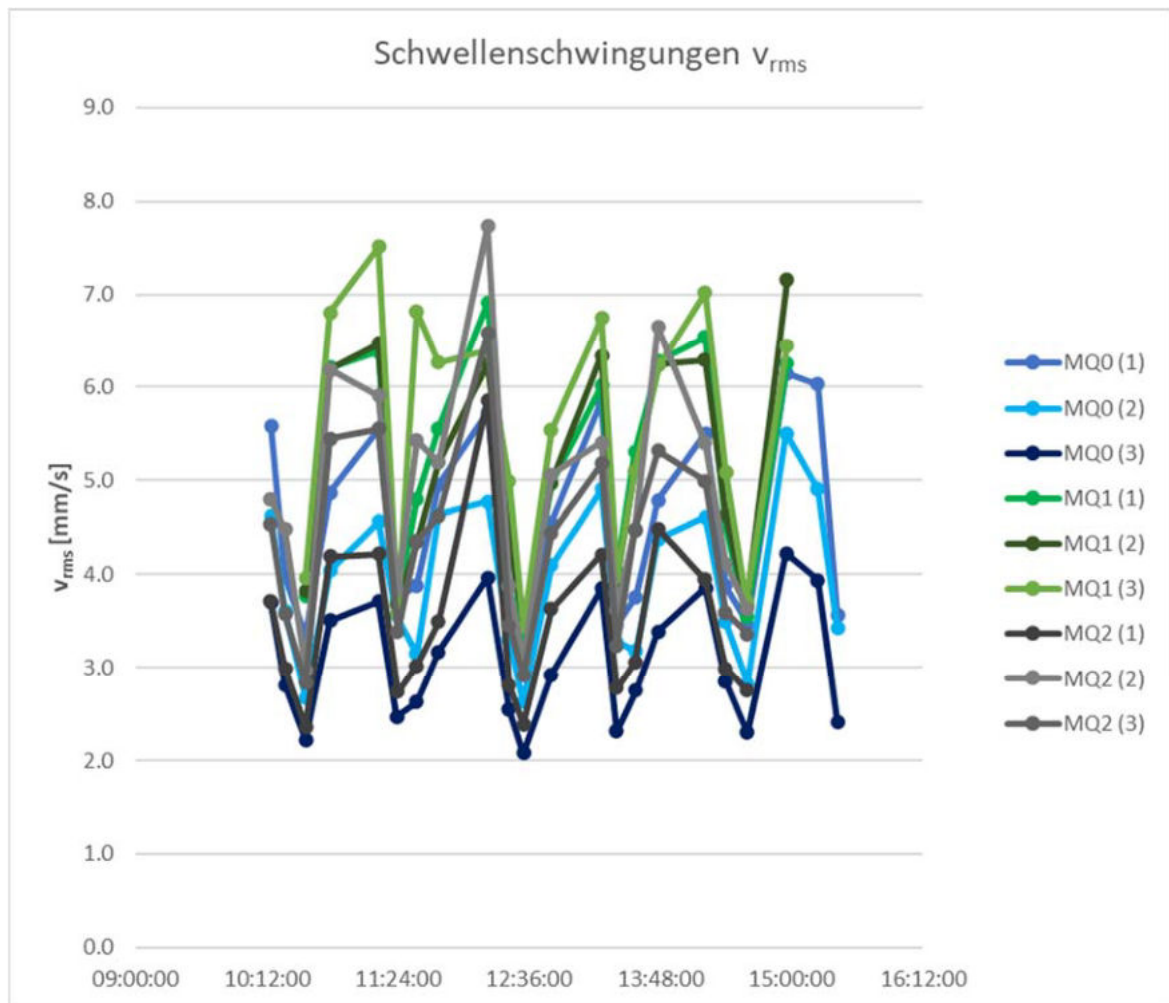


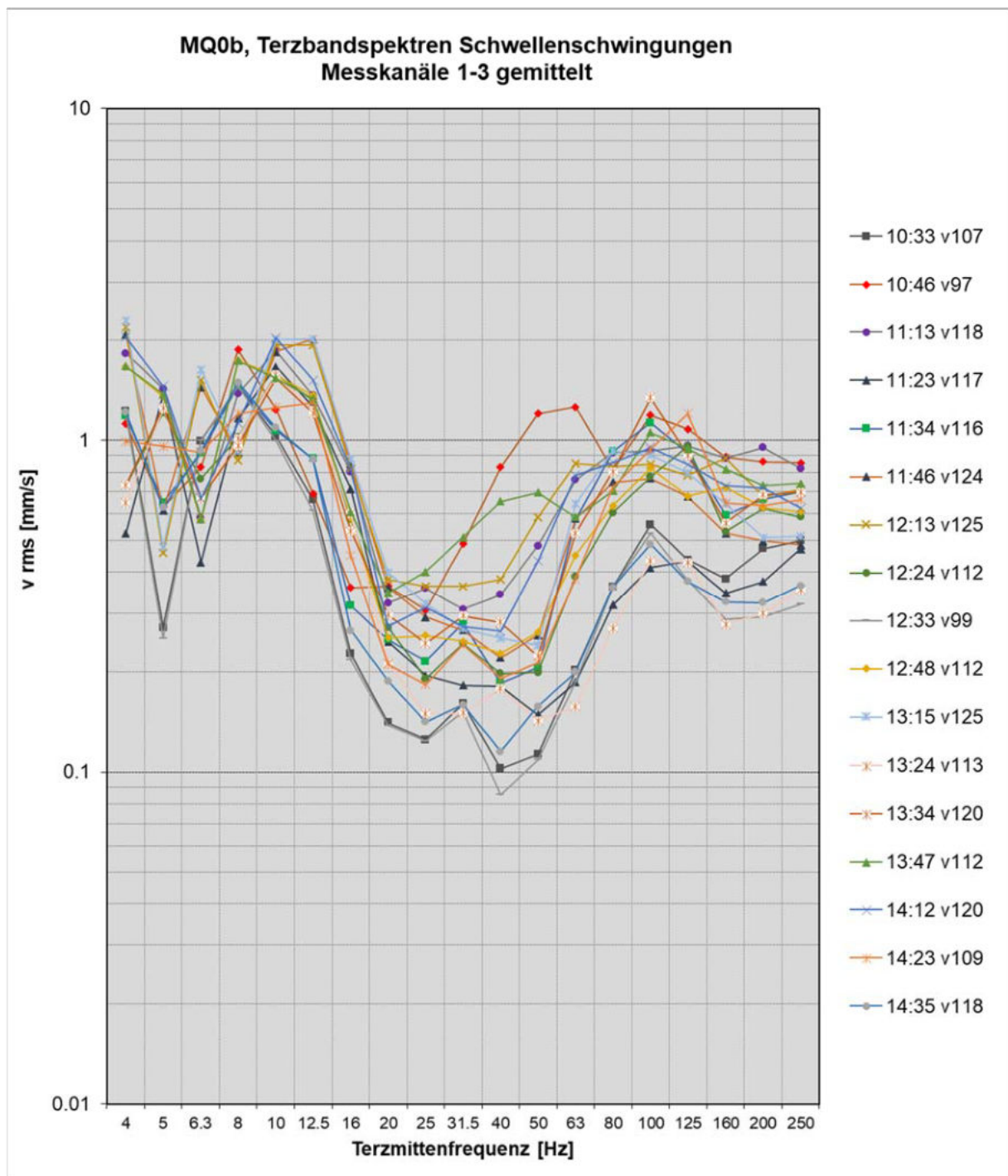
Gleisabklingraten des Streckenabschnitts MQ2 [7] mit vertikaler Abklingrate (links) und horizontaler Abklingrate (rechts). Die südliche Schiene ist rot, die nördlichen blau dargestellt.



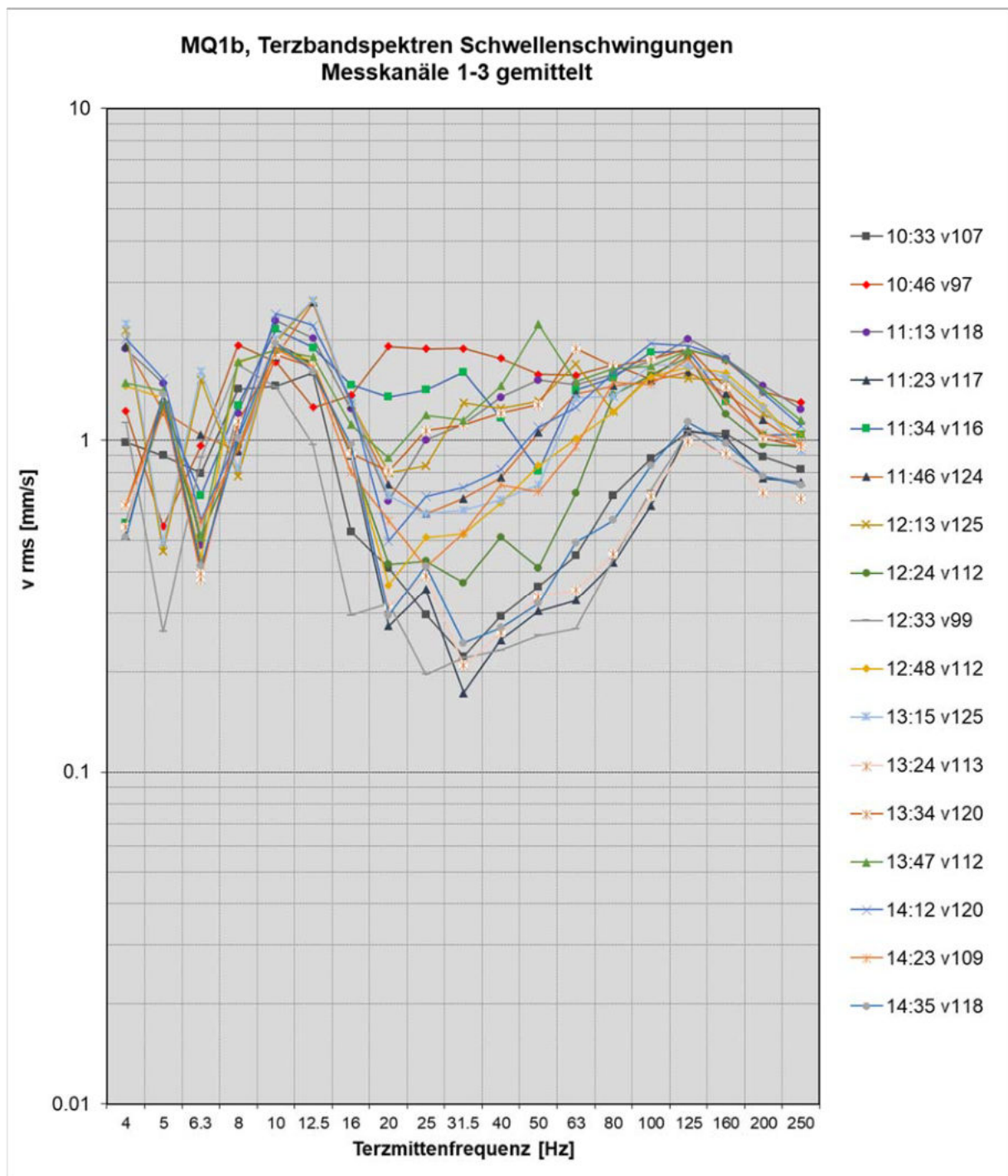
Anhang 3: Schwellenschwingungen

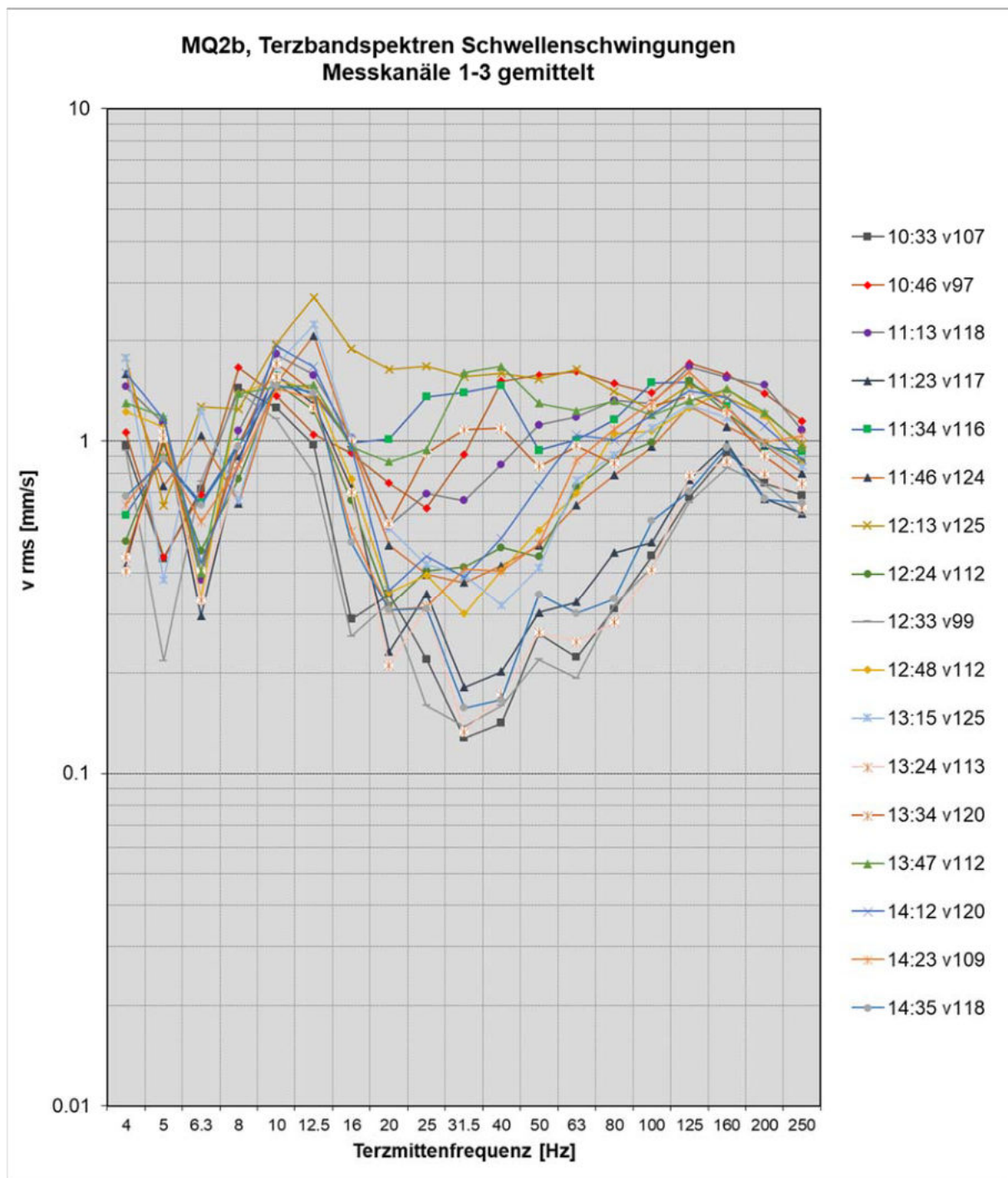
Schwellenschwingungen v_{rms}

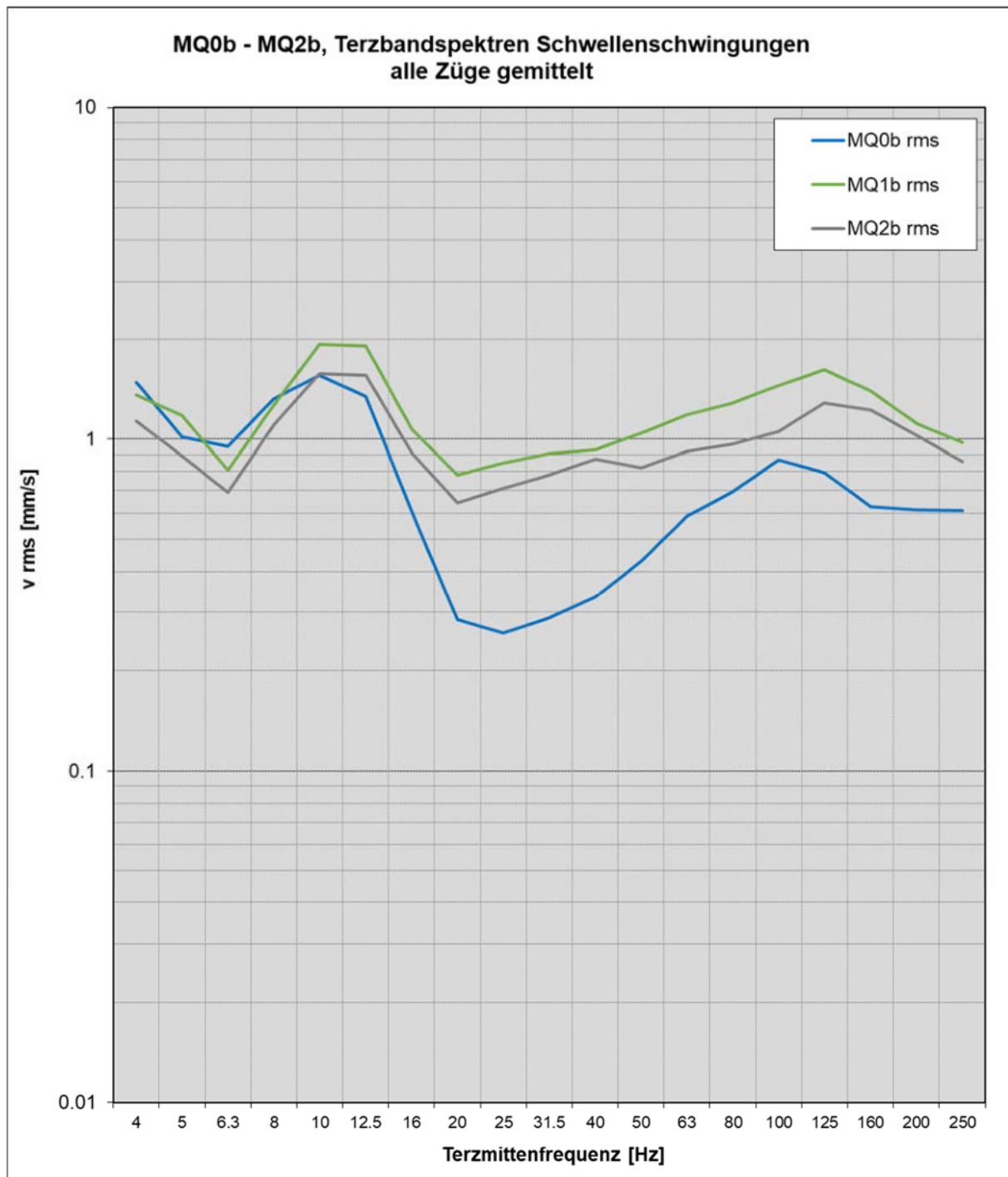


Schwellenschwingungen, Terzspektren MQ0b

Schwellenschwingungen, Terzspektren MQ1b



Schwellenschwingungen, Terzspektren MQ2b

Schwellenschwingungen, Vergleich Terzspektren MQ0b bis MQ2b

Anhang 4: Fotos Messungen Schallemissionen

Nullmessung MQ0a



Nullmessung MQ1a



Effektmessung MQ0b



Effektmessung MQ1b



Effektmessung MQ2b

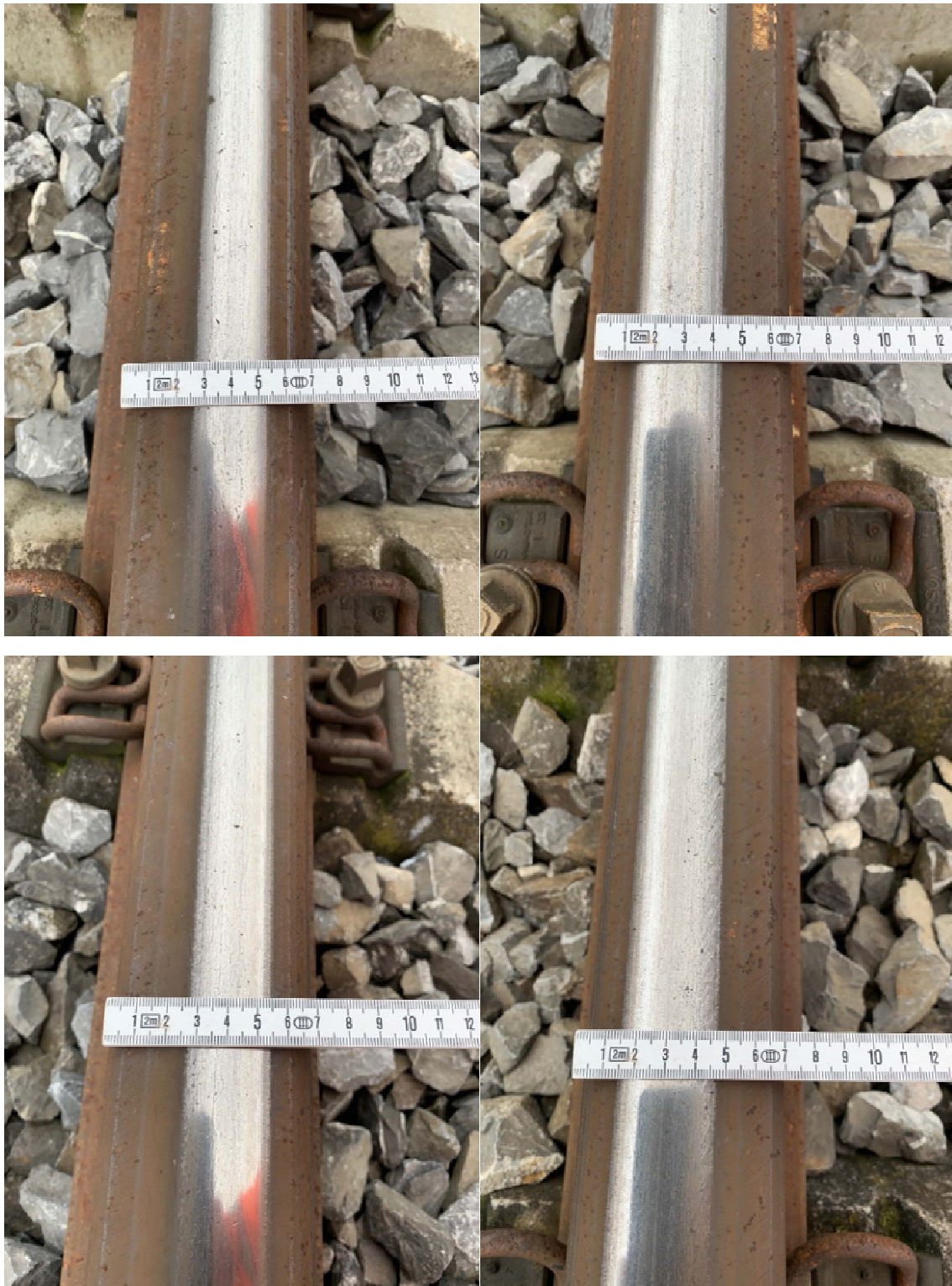


Anhang 5: Fotos Messungen Schienenrauheit



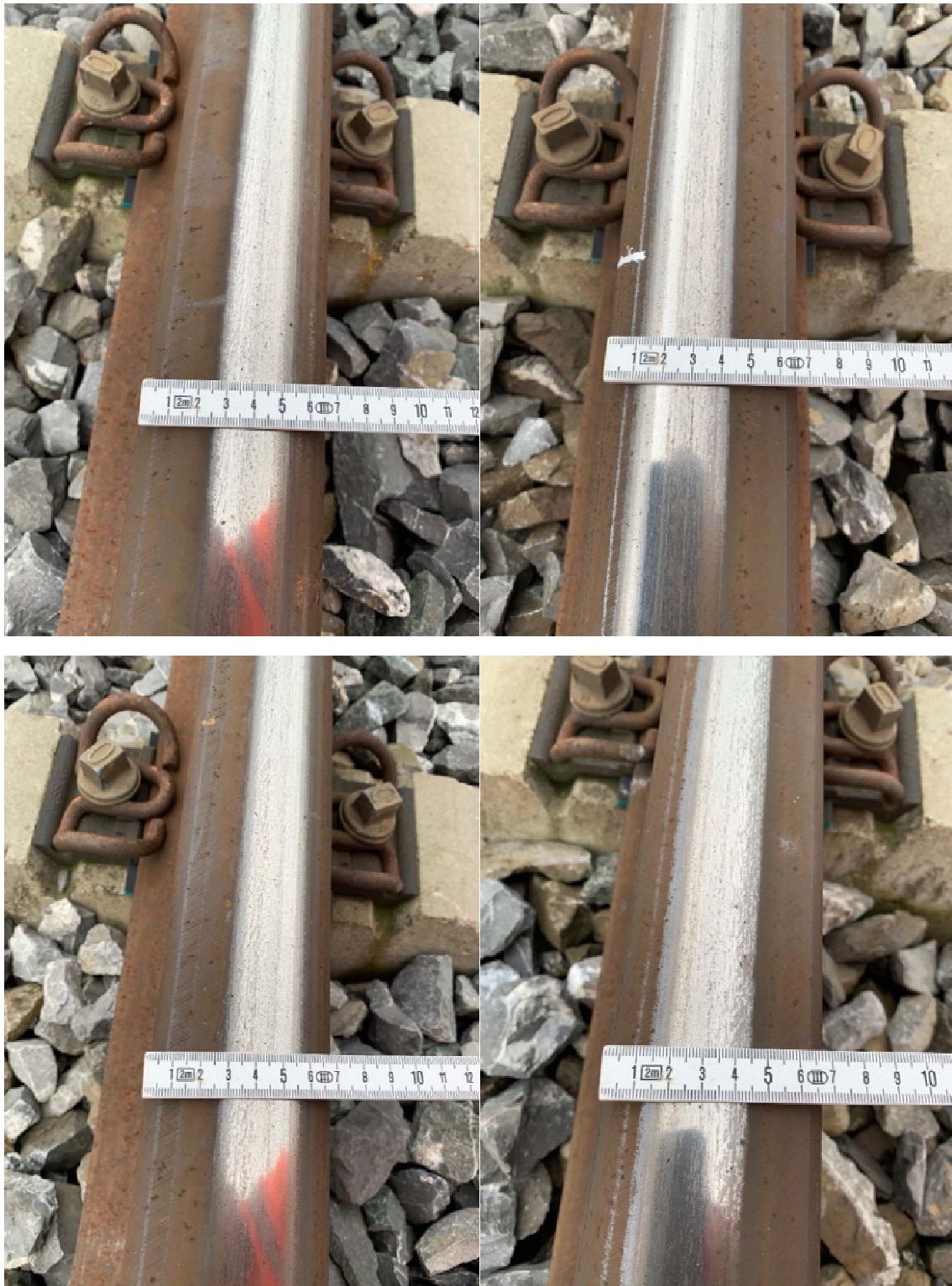
Messquerschnitt MQ0





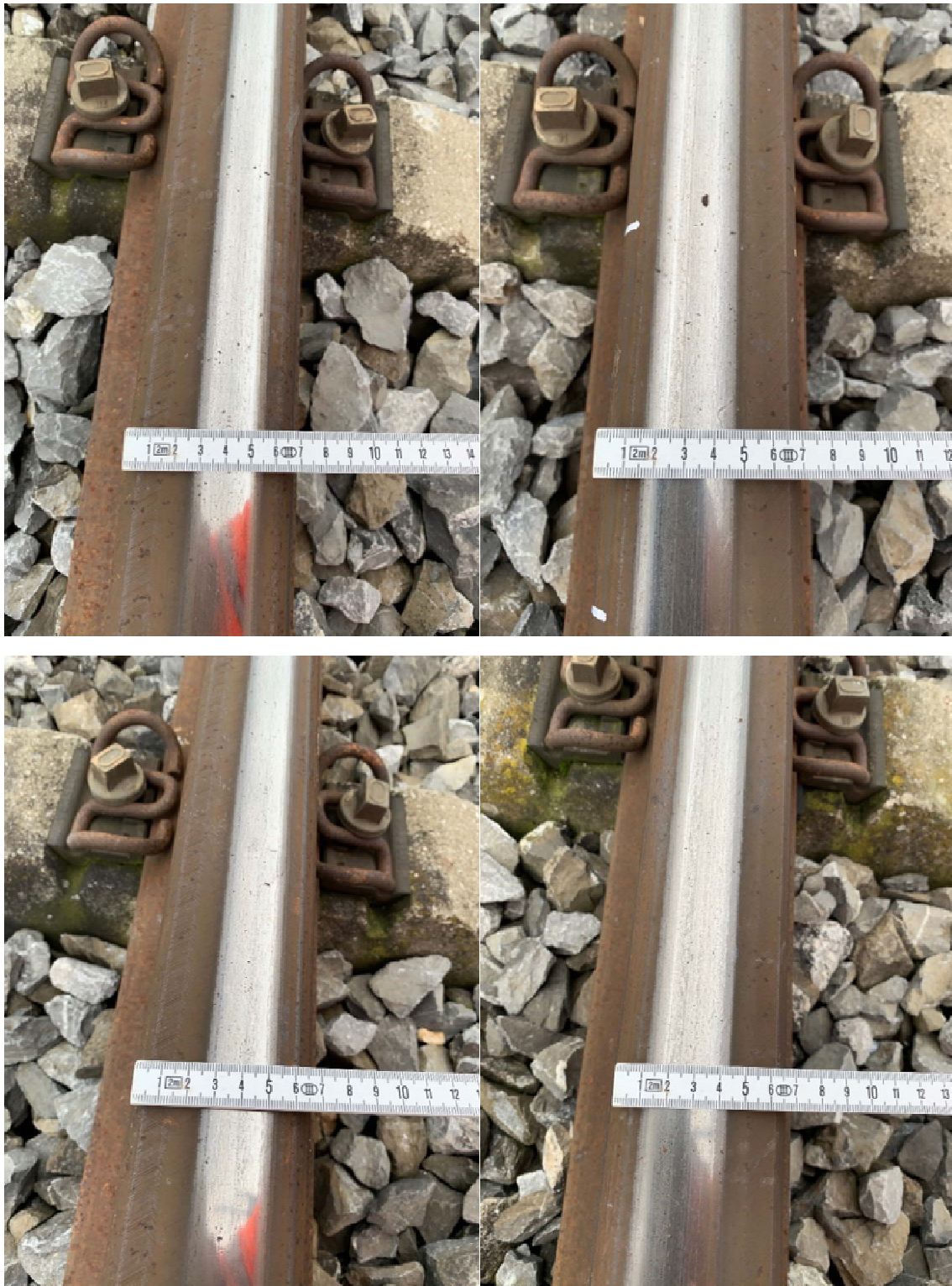
Messquerschnitt MQ1





Messquerschnitt MQ2





Anhang 6: Fotos Messungen Schwellenschwingungen

Messquerschnitt MQ0



Messquerschnitt MQ1



Messquerschnitt MQ2



Anhang 7: Protokoll Zugsvorbeifahrten Nullmessung 14.10.2020

BAFU hochdämpfende Zwischenlagen					Auftrag N° 717		KPZ Fahrbahn AG Schützengasse 3 CH - 8001 Zürich		
Lärmmessungen									
MESSPROTOKOLL VOM 14.10.2020					Name: Philipp Huber			Seite 1	
Uhrzeit	09:40	10:40	11:40	12:40					
Temperatur	8	11	11	12	°C				
Wind / Richtung	4	10	12	14	km/h				
Luftfeuchtigkeit	80	65	60	55	%				
Luftdruck									
Regen									

Zug Nr.	Uhrzeit	Video	Zug Richtung		Gleis Nr.	Geschw. keit	Zugs- typ	Tp [s]	Bemerkungen (Zug, Anz. Wagen, etc.)
			Ost	West					
1	09:33			x	1	90	Nina	1.91	
2	09:47		x		1	120	EW III	4.95	
3	10:13			x	1	126	EW III	4.71	
4	10:21		x		1	100	Nina	1.72	
5	10:33			x	1	123	Nina	1.40	
6	10:47		x		1	118	EW III	5.03	
7	11:13			x	1	127	EW III	4.68	
8	11:22		x		1	120	Nina	1.43	
9	11:33			x	1	117	Nina	1.47	
10	11:48		x		1	105	EW III	5.66	
11	12:12			x	1	125	EW III	4.75	
12	12:22		x		1	116	Nina	1.48	
13	12:33			x	1	105	Nina	1.64	
14	12:46		x		1	112	EW III	5.30	
15	13:14			x	1	120	EW III	4.95	
16	13:23		x		1	109	Nina	1.58	
17	13:33			x	1	90	Nina	1.91	
18	13:46		x		1	119	EW III	4.99	
19	14:13			x	1	118	EW III	5.03	
20	14:22		x		1	108	Nina	1.59	
21	14:34			x	1	117	Nina	1.47	
22	14:46		x		1	97	EW III	6.12	
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
46									
47									
48									
49									
50									
51									
52									
53									
54									
55									
56									

Anhang 8: Protokoll Zugsvorbeifahrten Effektmessung 04.11.2020

BAFU hochdämpfende Zwischenlagen					Auftrag N° 717		KPZ Fahrbahn AG Schützengasse 3 CH - 8001 Zürich		
Lärmmessungen									
MESSPROTOKOLL VOM 04.11.2020					Name: Philipp Huber			Seite 1	
Uhrzeit		10:40	11:40	13:00					
Temperatur		8	9	9	°C				
Wind / Richtung		10	15	15	km/h				
Luftfeuchtigkeit		85	80	85	%				
Luftdruck									
Regen		nein	nein	leicht					

Zug Nr.	Uhrzeit	Video	Zug Richtung		Gleis Nr.	Geschwindigkeit	Zugs- typ	Tp [s]	Bemerkungen (Zug, Anz. Wagen, etc.)
			Ost	West					
1	09:33			x	1	115	Nina	1.49	
2	09:48		x		1	94	EW III	6.32	
3	10:14			x	1	117	EW III	5.08	
4	10:22		x		1	117	Nina	1.47	
5	10:33			x	1	107	Nina	1.60	
6	10:46		x		1	97	EW III	6.12	
7	11:13			x	1	118	EW III	5.03	
8	11:23		x		1	117	Nina	1.47	
9	11:34			x	1	116	Nina	1.48	
10	11:46		x		1	124	EW III	4.79	
11	12:13			x	1	125	EW III	4.75	Ausfall MQ0
12	12:24		x		1	112	Nina	1.53	
13	12:33			x	1	99	Nina	1.73	
14	12:48		x		1	112	EW III	5.30	
15	13:15			x	1	125	EW III	4.75	
16	13:24		x		1	113	Nina	1.52	
17	13:34			x	1	120	Nina	1.43	
18	13:47		x		1	112	EW III	5.30	
19	14:12			x	1	120	EW III	4.95	Ausfall MQ1
20	14:23		x		1	109	Nina	1.58	
21	14:35			x	1	118	Nina	1.46	
22	14:57		x		1	?	GZ		
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
46									
47									
48									
49									
50									
51									
52									
53									
54									
55									
56									

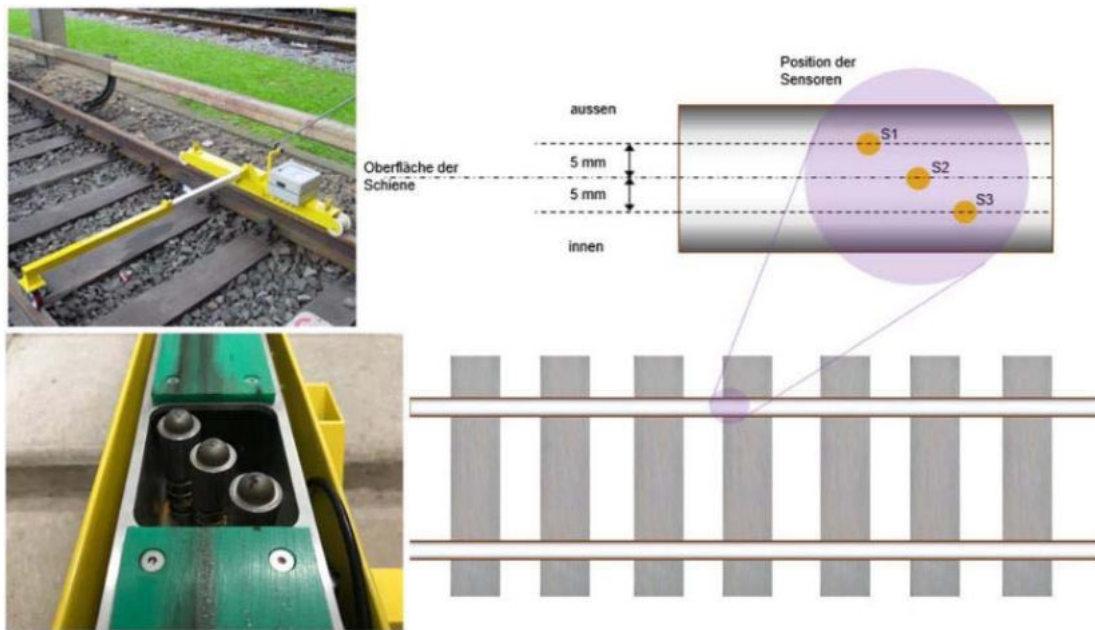
Anhang 9: Messgerät Schallemissionen: NOR140

Präzisions-Schallanalysator Nor140. Echtzeit-Analysator mit Tonaufzeichnung.



- Entspricht allen relevanten Klasse-1-Spezifikationen nach IEC und ANSI.
- METAS Zulassung.
- Schallaufzeichnung auf einer austauschbaren SD-Karte.
- Parallel Messung aller relevanten Grössen.
- Pegelschrieb mit Multispektrum-Funktion. Auflösung 25ms.
- Grosser Messbereich (5 dBA - 147 dBA).
- Frequenzanalyse in Terz- oder Oktavbandbreite zwischen 0.4 Hz und 20 kHz.
- FFT-Analyse.
- Umfangreiche Trigger.
- USB 2.0 und RS-232 Hochgeschwindigkeits-Schnittstelle.
- Hoch auflösende hintergrundbeleuchtete Anzeige.
- Benutzerführung in E, D und F
- Auswertesoftware NorReview 6.2

Anhang 10: Messgerät Schienenrauheiten: 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 : $\pm 5000 \mu\text{m}$
- Aufnehmertyp: Wegsensor (LVDT)
- Anzahl Aufnehmer: 3 (unabhängig positioniert auf dem Schienenkopf)
- Grundrauschen Sensor: $0.1 \mu\text{m}$
- 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 Laptop: 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 11: Messgerät Schwellenschwingungen: Syscom MR 2002



Normalausrüstung Typ MR 2002, bestehend aus:

elektronisches Erfassungsgerät mit dreikanaligem Sensor, zur Messung der drei Schwingungsrichtungen X (horizontal, Kanal 1), Y (horizontal, Kanal 2) und Z (vertikal, Kanal 3) bzw. wahlweise auch mit drei Einzelsensoren:

- Übertragung Seismometer --> Erfassungsgerät: analog
- Übertragung Erfassungsgerät --> Lesestation: digital

Sensoren mit schwinggeschwindigkeits-proportionalen Messspulen, zur Erfassung der Schwinggeschwindigkeit in mm/s

digitale Speicherung der Messdaten auf Magnetspeicherkarte im Erfassungsgerät

Bedienung/Ablesung/Auswertung mittels WinCom Version 2.2 und View2002 Version 3.1:

- Integrieren (Schwingweg) / Differenzieren (Schwingbeschleunigung)
- Mittelwertbildung (verschiedene Zeitkonstanten)
- Frequenzanalysen (Schmalband / Terzband)
- statistische Funktionen
- grafische Auswertungen
- usw.

Anhang 12: Wetterdaten während Null- und Effektmessung

Wetterstation Mühleberg, 479 m.ü.M

Quelle: Meteo Schweiz

Datum: 14.10.2020

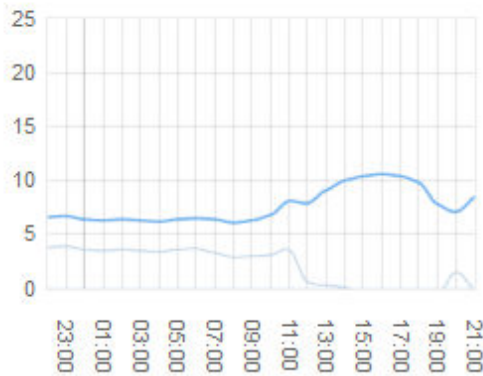
24 Stunden

48 Stunden

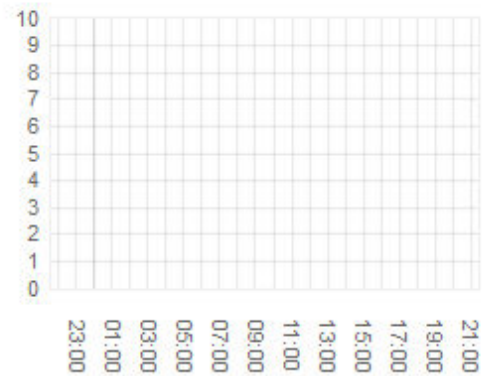
7 Tage

14 Tage

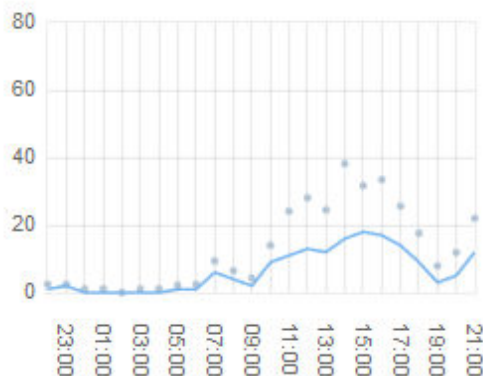
Temperatur/Taupunkt [°C]



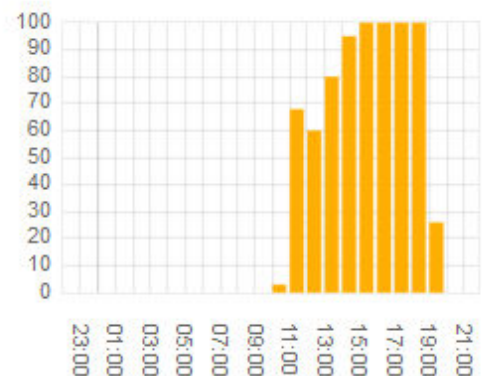
Niederschlag [mm]



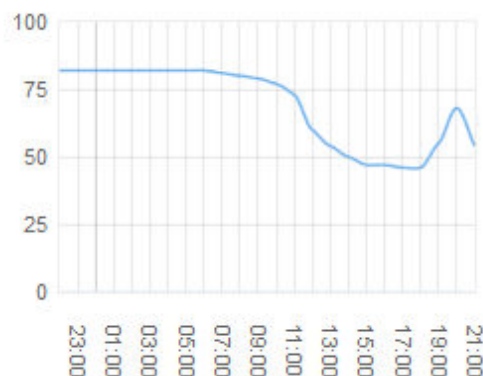
Wind/Windspitzen [km/h]



Sonnenschein [%/h]



Luftfeuchtigkeit [%]



Luftdruck [hPa]



Wetterstation Mühleberg, 479 m.ü.M

Quelle: Meteo Schweiz

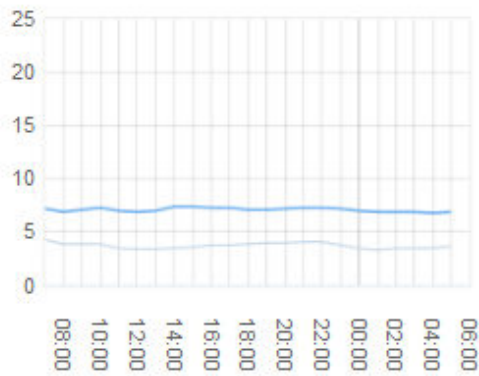
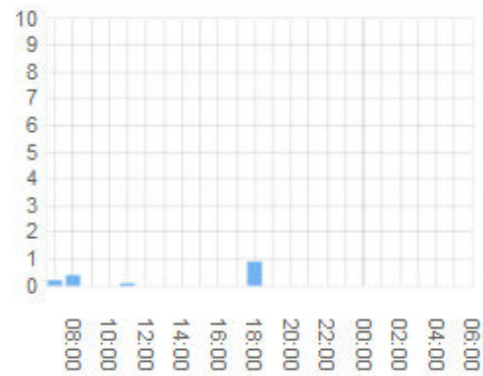
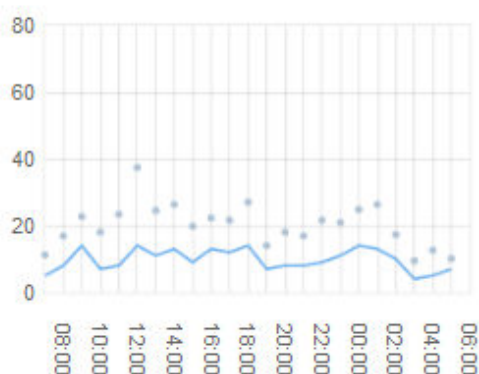
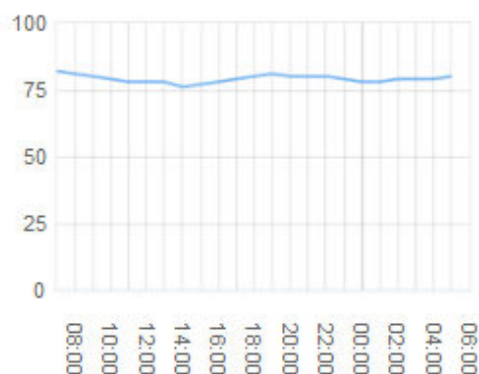
Datum: 04.11.2020

24 Stunden

48 Stunden

7 Tage

14 Tage

Temperatur/Taupunkt [°C]**Niederschlag [mm]****Wind/Windspitzen [km/h]****Sonnenschein [%/h]****Luftfeuchtigkeit [%]****Luftdruck [hPa]**