



TROMBIK INGENIEURE AG

Dipl. Ing. ETH/SIA/USIC

Limmattalstrasse 344

CH - 8049 Zürich

Tel: 044 344 41 71

Fax: 044 344 41 72

Mail: trombik@trombik.ch

Web: www.trombik.ch

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU:

**Pilotprojekt: Erschütterungs- und Körperschall-
messungen zur Analyse der Schutzwirkung eines
Isolierkörpers im Boden**

Messungen, Beurteilung, Folgerungen

Bericht Nr.: 20.04201.EDS.001.B

Impressum

Auftraggeber

Bundesamtes für Umwelt BAFU, Abteilung Lärm und NIS, 3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)

Auftragnehmer

Trombik Ingenieure AG, Limmattalstrasse 344, 8049 Zürich

Autor

Dr. Adrian Egger

Datum

Zürich, 16. Dezember 2021

Hinweise

Diese Studie wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Dieser Bericht kann auf der BAFU-Webseite (www.bafu.admin.ch) heruntergeladen werden.

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

Diese Publikation ist ausschliesslich in deutscher Sprache verfügbar.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	EINLEITUNG.....	4
1.1.	Problemstellung.....	4
1.2.	Grundlagen	4
3.	ERSTELLUNG DES INJEKTIONSKÖRPERS	5
4.	MESSKAMPAGNE.....	6
4.1.	Messkampagne	6
4.2.	Technische Angaben zu den Messungen und Auswertungen	7
4.3.	Ausgewählte Messresultate Erschütterungen	8
4.4.	Differenzspektren Erschütterungen	10
4.5.	Terzbandspektren Schallmessung	12
5.	DÄMMLEISTUNG DES INJEKTIONSKÖRPERS.....	14
5.1.	Erschütterungen.....	14
5.2.	Abgestrahlter Körperschall.....	15
5.3.	Beurteilung gemäss BEKS	15
5.4.	Sensitivitätsbetrachtungen.....	16
7.	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	18
8.	BEILAGENVERZEICHNIS	20

1. EINLEITUNG

1.1. Problemstellung

Eine Liegenschaft im Kanton Aargau liegt nur 11 m neben einer Bahnlinie. Voruntersuchungen durch ein Ingenieurbüro vor der Erstellung der Liegenschaft haben gezeigt, dass die Richtwerte bezüglich Erschütterungen und Körperschall gemäss BEKS mit dem Bau zwar eingehalten würden, es wurde aber trotzdem eine Erschütterungsschutzmassnahme in Form einer elastischen Lagerung des Gebäudes empfohlen. Die Erschütterungsschutzmassnahme in Form einer Gummischrotmatte unter der Bodenplatte wurde ausgeführt. Es stellte sich nach Fertigstellung des Gebäudes heraus, dass die Erschütterungsimmissionen trotz Massnahme hoch waren. Eine Nachmessung durch das Ingenieurbüro ergab deutlich stärkere Erschütterungen als prognostiziert und damit Richtwertüberschreitung gemäss BEKS.

Als Massnahme zur Verbesserung der Situation soll ein Injektionskörper der Firma Uretek Schweiz AG, Hergiswil mit expandierendem Kunstharz ausgeführt werden, der in seiner Art der Erschütterungsschutzmassnahme «Bodenschlitz» als Isolierkörper sehr ähnlich ist.

Die Firma Trombik Ingenieure AG wurde vom BAFU beauftragt, die Erstellung des Injektionskörpers zu begleiten und mit Erschütterungs- und Körperschallmessungen vor und nach der Erstellung die Dämmleistung bzw. Wirkung der Massnahme zu ermitteln. Die Untersuchungsergebnisse sind im vorliegenden Bericht in Kurzform zusammengefasst. Für weitergehende Betrachtungen stehen die Unterlagen im Büro zur Verfügung.

1.2. Grundlagen

Für die Durchführung der vorliegenden Untersuchung standen insbesondere die folgenden Planunterlagen und Berichte zur Verfügung:

- Erschütterungen und Körperschall – In situ Messungen, 27.12.2014, Ziegler Consultants, Zürich
- Architektenpläne, März.2014
- Zonen- und Nutzungsplan, Baureglement der Gemeinde
- Verkehrszahlen gemäss Angaben SBB
- Uretek Schweiz AG: Projektbeschrieb, 29.05.2019
- P. Sadegh-Azar, M. Ziegler, RWTH-Aachen: Erschütterungsreduktion durch einen effizienten, kostengünstigen und praktisch umsetzbaren Isolierkörper im Boden. 23. Christian Veder Kolloquium; Graz, 27. und 28. März 2008, S. 207-226
- Julian Sprengel: Dissertation «Praktische Anwendung injizierter Isolierkörper als Erschütterungsreduktionsmassnahme» an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen. 15.12.2017
- Weisung für die Beurteilung von Erschütterung und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS), BUWAL, 20. Dezember 1999
- DIN Norm DIN 4150/2, Erschütterungen im Bauwesen - Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden (Juni 1999)

3. ERSTELLUNG DES INJEKTIONSKÖRPERS

Ein Bodenschlitz als Erschütterungsschutzmassnahme im Bahnverkehr wird im Vergleich zu anderen Schutzmassnahmen relativ selten eingesetzt. Die Gründe sind unterschiedlicher Natur. Vorteilhaft ist zwar, dass ein Bodenschlitz zwischen bereits bestehenden Gleisanlagen und Gebäuden erstellt werden kann, ohne den Betrieb der Anlagen gross zu stören. Nachteilhaft ist jedoch die Unsicherheit der zu erreichenden Schutzwirkung infolge unterschiedlicher geologischer Verhältnisse des Baugrundes und die relativ hohen Kosten für Einzelobjekte.

Ideal wäre ein offener, luftgefüllter langer und tiefer Bodenschlitz, der die Schwingungen in den massgebenden Frequenzen deutlich reduziert, da die den Schlitz umgehenden Wellen nicht mehr zu störenden Immissionen führen würden. Da ein solcher offener Bodenschlitz jedoch nicht standfest ist, muss ein stützender Festkörper in den Boden gebracht werden, über den Schwingungsenergie übertragen wird. Je grösser der Impedanzunterschied zwischen dem umgebenden Bodenmaterial und dem Schlitzkörper ist, desto weniger Schwingungsenergie wird übertragen. Bei der Dimensionierung eines solchen Körpers im Boden sind auch die Wellenlängen der Störfrequenzen zu berücksichtigen. Zur Minderung von tieferen Frequenzen im Erschütterungsbereich ist ein wesentlich breiterer Körper notwendig als für die hörbaren Frequenzen im Körperschallbereich. Im Normalfall sind für die Bauvorgänge schwere Geräte notwendig mit den entsprechenden Einwirkungen auf die Umgebung und Kosten.

Hier setzt die Firma Uretek Schweiz AG mit ihrem Produkt an. Bisher wurden ihre Kunstharzschäume zur Stabilisierung des Untergrundes oder Hebung von Bauwerken verwendet. Die Einbringung des Schaumes erfolgt durch Bohrungen kleinen Durchmessers in kurzer Bauzeit und damit entsprechend kostengünstig. Dadurch, dass beim Aufschäumen des Harzes Bodenmaterial verdrängt wird, entsteht bei entsprechender Anordnung der Bohrungen ein durchgehender Isolierkörper im Boden wie bei einem Bodenschlitz. Je grösser der Erd- druck ist, desto geringer ist aber die Bodenverdrängung, der Schaum füllt die Poren im Boden und umschliesst gröbere Partikel. Je nach Baugrund entsteht ein mehr oder weniger durchgehender Schaumkörper, der aber bereichsweise noch das Bodenmaterial enthält.

Der Kunstharzschaum ist zwar sehr leicht, besteht hauptsächlich aus Luftporen und ist dennoch druckbeständig. Da der Schaumriegel jedoch nicht in einem offenen Schlitz entsteht, sondern vom umgebenden Material mehr oder weniger in seiner Expansion behindert wird, ist auch bei diesem Bodenschlitzverfahren die Wirkung bezüglich Schwingungsreduktion schwierig abzuschätzen. Da die Dimension des Riegels zwischen mehreren Zentimetern und Dezimetern variiert, kann erwartet werden, dass die Dämmleistung bei den erschütterungsrelevanten Frequenzen gering ist, bei den körperschallrelevanten Frequenzen sind die Erwartungen der Dämmleistung etwas höher.

Da sich die Schwingungsenergie bei der Ausbreitung im Boden auf die oberflächennahen Bereiche konzentriert (Oberflächenwellen), hat man bei der Erstellung des Injektionskörpers des Untersuchungsobjektes mit einem kleinen Bagger einen offenen Schlitz von ca. 1.5 m Tiefe ausgehoben. Diese Massnahme erhöhte zwar die Baukosten, aber es bestand die Hoffnung, dass durch das Ausschäumen des offenen Schlitzes die Wirkung bezüglich Reduktion der Oberflächenwelle erhöht werden könnte, da das Gebäude nicht unterkellert ist. Ausführungsinformationen der Firma Uretek und die Bilder in **→ Beilage N°1, S.21** zeigen die verschiedenen Bauvorgänge nach Erstellung des offenen Grabens:

- Bohrungen 1. Reihe mit Injektion,
- Bohrungen 2. Reihe mit Injektion,
- Auffüllen des offenen Grabens mit dem Kunstschaum.

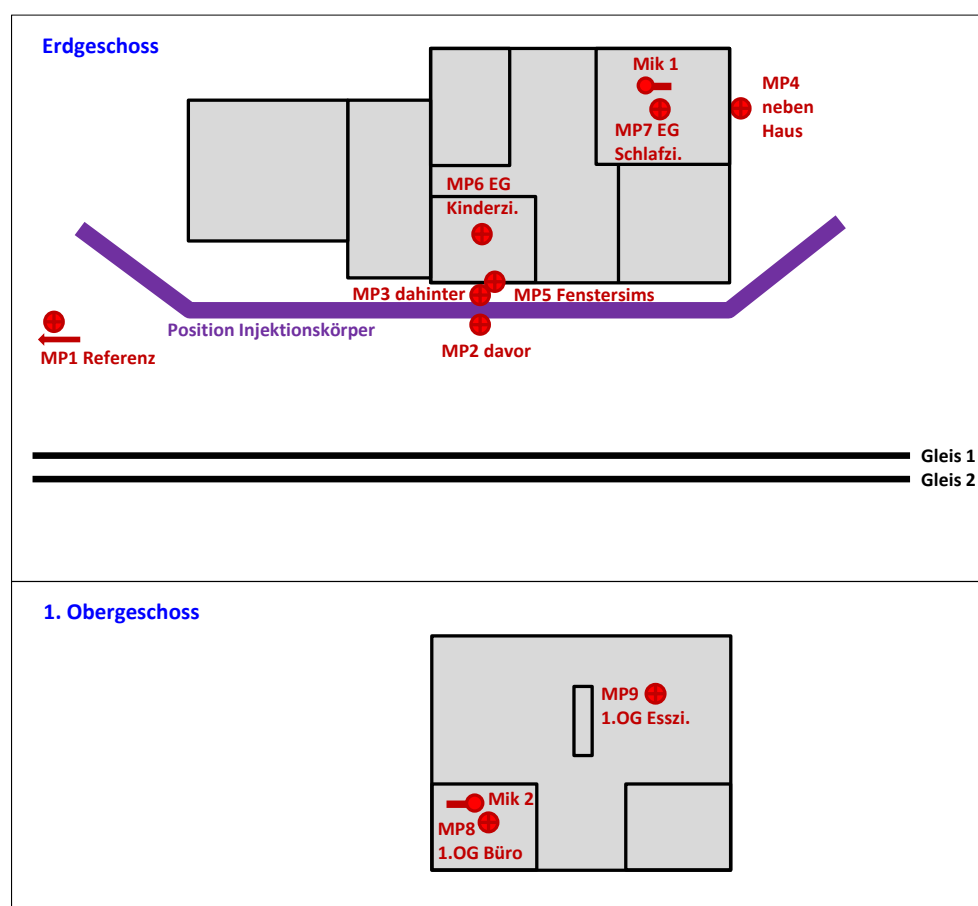
Nach Abschluss der Arbeiten (Wiederherstellung der Oberfläche) ist vom Injektionskörper nichts mehr zu sehen. Zusätzlich zur Fotodokumentation wurden auch Videoaufnahmen von den Injektionsarbeiten gemacht, die mit weiteren Unterlagen im Büro Trombik aufbewahrt werden.

4. MESSKAMPAGNE

4.1. Messkampagne

Die Aufnahme der Erschütterungssituation vor und nach dem Einbau des Injektionskörpers wurde anhand von mehreren Erschütterungsmesspunkten ausserhalb und innerhalb des Gebäudes durchgeführt. Bei der Wahl der Messpunkte wurde darauf geachtet, dass der Effekt des Injektionskörpers ausserhalb und innerhalb des Gebäudes möglichst gut dokumentiert werden konnte und die empfindlichsten Räume des Gebäudes bezüglich ihrer Nutzung gewählt wurden. Es wurde die Vertikalkomponente der Schwingungen an 9 Messpunkten parallel gemessen. Im zwei Zimmern wurde zusätzlich mit Mikrofonen der Körperschall gemessen.

Messpunktanordnung:



- MP 1: Referenzmesspunkt ca. 30 m südlich des Gebäudes im Freifeld; Abstand zur näheren Gleisachse von Gl. 1: 8 m.
- MP 2: Aussenmesspunkt direkt vor dem Injektionskörper vor dem Gebäude; Abstand zur näheren Gleisachse von Gl. 1: 10 m, ca. 1 m vor dem Gebäude.
- MP 3: Aussenmesspunkt direkt hinter dem Injektionskörper vor dem Gebäude; Abstand zum Gebäude ca. 0.3 m.
- MP 4: Aussenmesspunkt im hinteren Bereich ca. 0.3 m vor der Gebäudenordfassade; Abstand zur näheren Gleisachse von Gl. 1: ca. 18 m.
- MP 5: Fundamentmesspunkt auf dem Fenstersims der Gebäudeostfassade (keine Unterkellerung des Gebäudes mit elastischer Lagerung).
- MP 6: Messpunkt Mitte Kinderzimmer im EG des Gebäudes.
- MP 7: Messpunkt Mitte Schlafzimmer im EG des Gebäudes mit Messung des Körperschalls etwa in der Mitte des Zimmers (Mik 1).
- MP 8: Messpunkt Mitte Bürozimmer im 1.OG des Gebäudes mit Messung des Körperschalls etwa in der Mitte des Zimmers (Mik 2).
- MP 9: Messpunkt Mitte Esszimmer im 1.OG des Gebäudes.

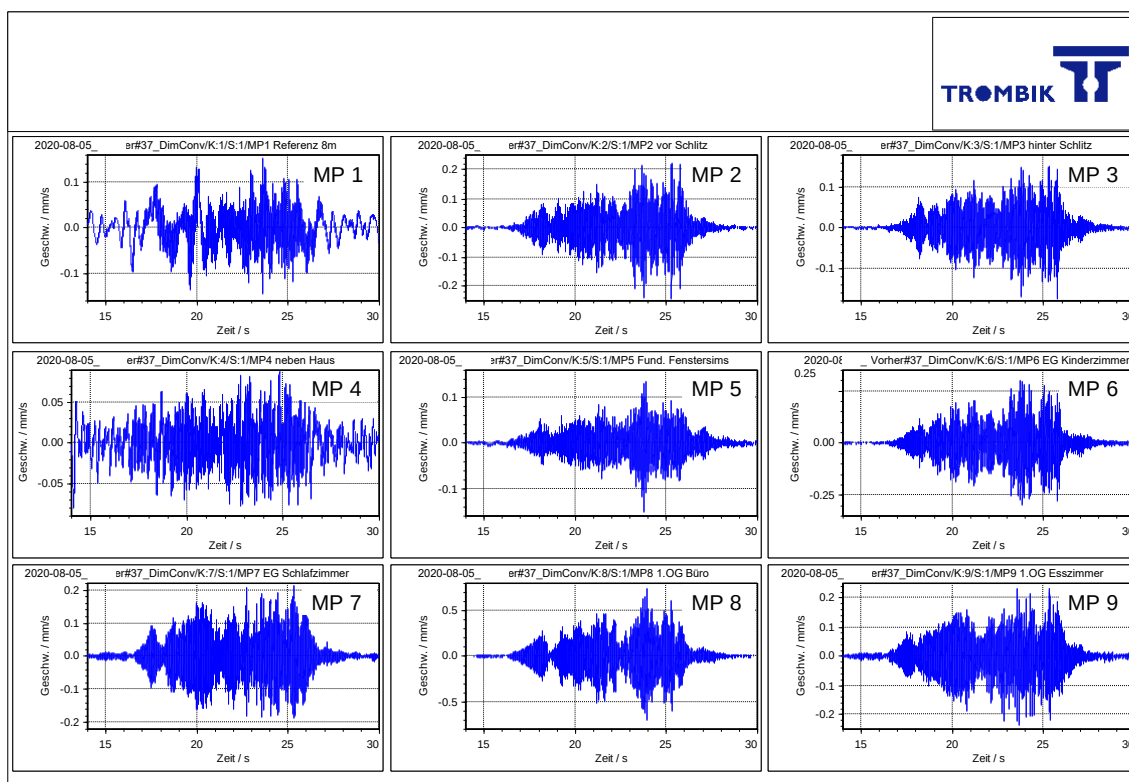
Die Messkampagnen zur Erfassung der Schwinggeschwindigkeiten [mm/s] vor dem Einbau des Injektionskörpers fand am 5. August 2020 und nach dem Einbau am 13. August 2020 statt. Die Spiesse der Aussenmesspunkte MP1-MP4 wurden nach der Vorhermessung bis zur Nachhermessung im Boden belassen, damit kein Unterschied von der Sensorankopplung herrühren konnte. Am Messort wurden während einer Beobachtungsdauer von je ca. 3 Stunden jeweils total 32 Zugsvorbeifahrten (Regionalzüge, Schnell- und Güterzüge) mittels manueller Messauslösung erfasst. Siehe Messprotokolle in → **Beilage N°2, S.27**, Fotos der Messpunkte finden sich in → **Beilage N°3, S.30**.

4.2. Technische Angaben zu den Messungen und Auswertungen

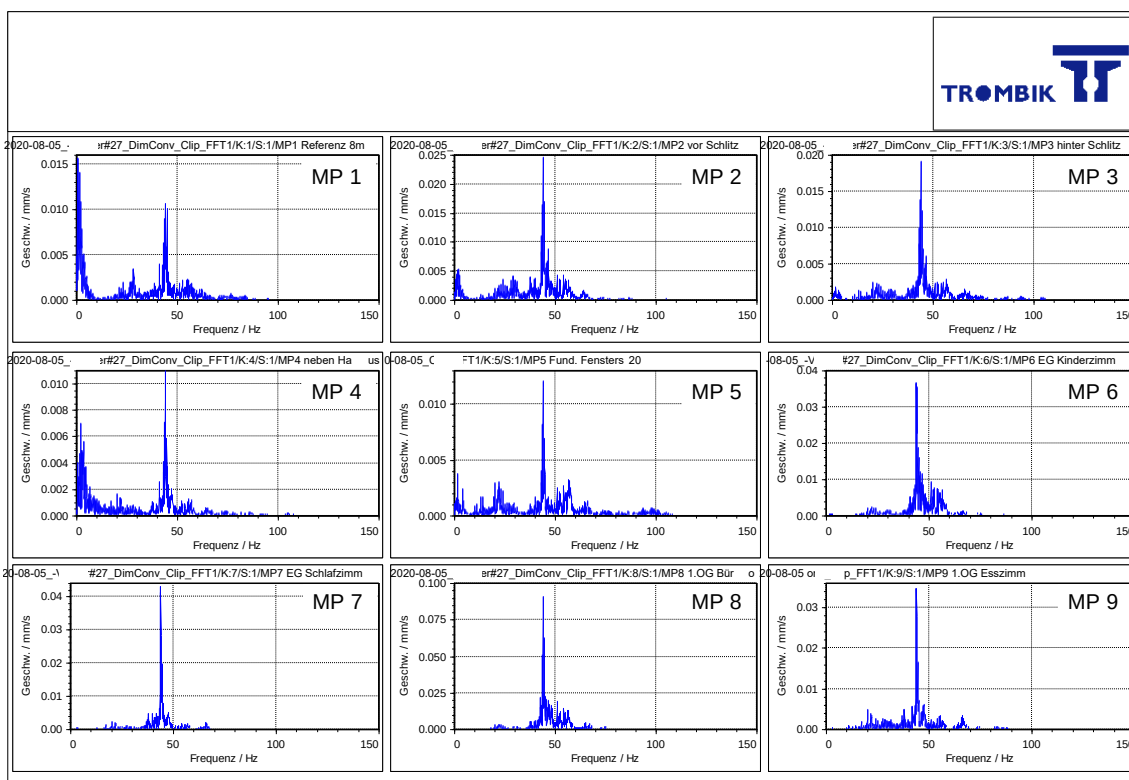
Die Messungen und Resultatauswertungen fanden mit Hilfe von hochwertigen Messgeräten und unter Beachtung der gängigen Verfahren statt. Eine Liste des verwendeten Geräteparks findet sich in → **Beilage N°9, S.57**.

4.3. Ausgewählte Messresultate Erschütterungen

Nachfolgend typische Messaufzeichnungen von einer Zugfahrt der Vorhermessung:

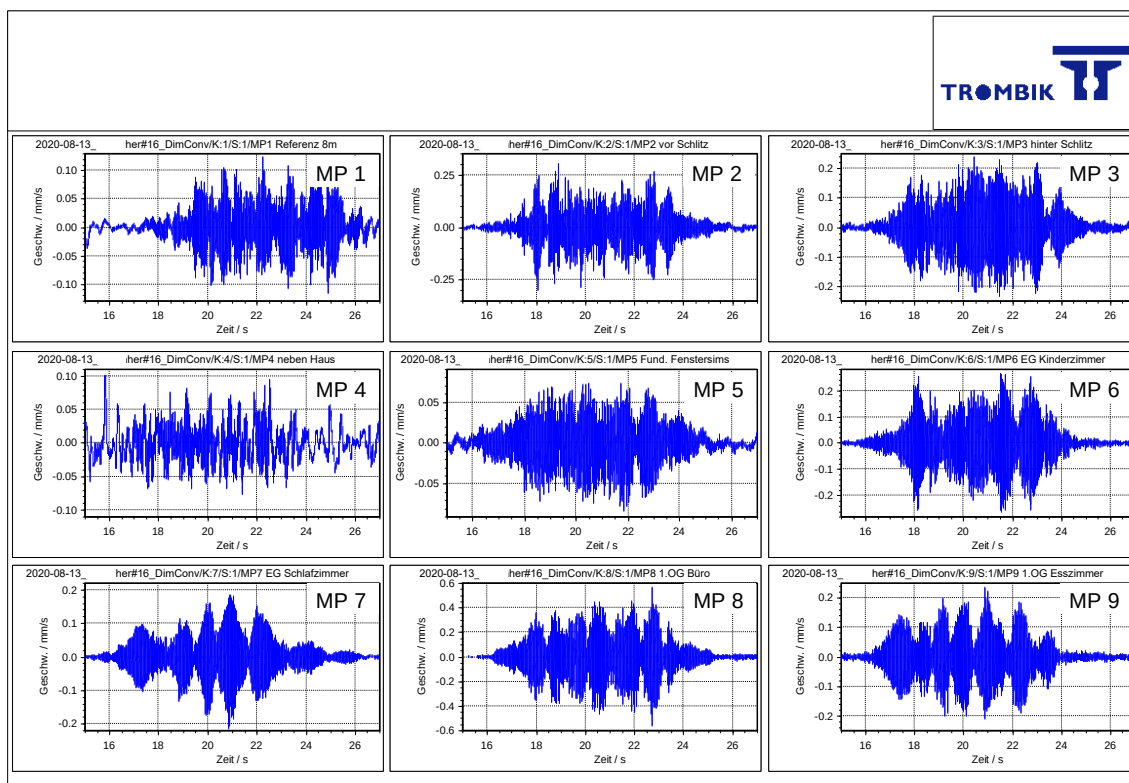


Zeitverlauf MP 1-9, z-Komp. für IC um 14:22 Uhr auf Gleis 2

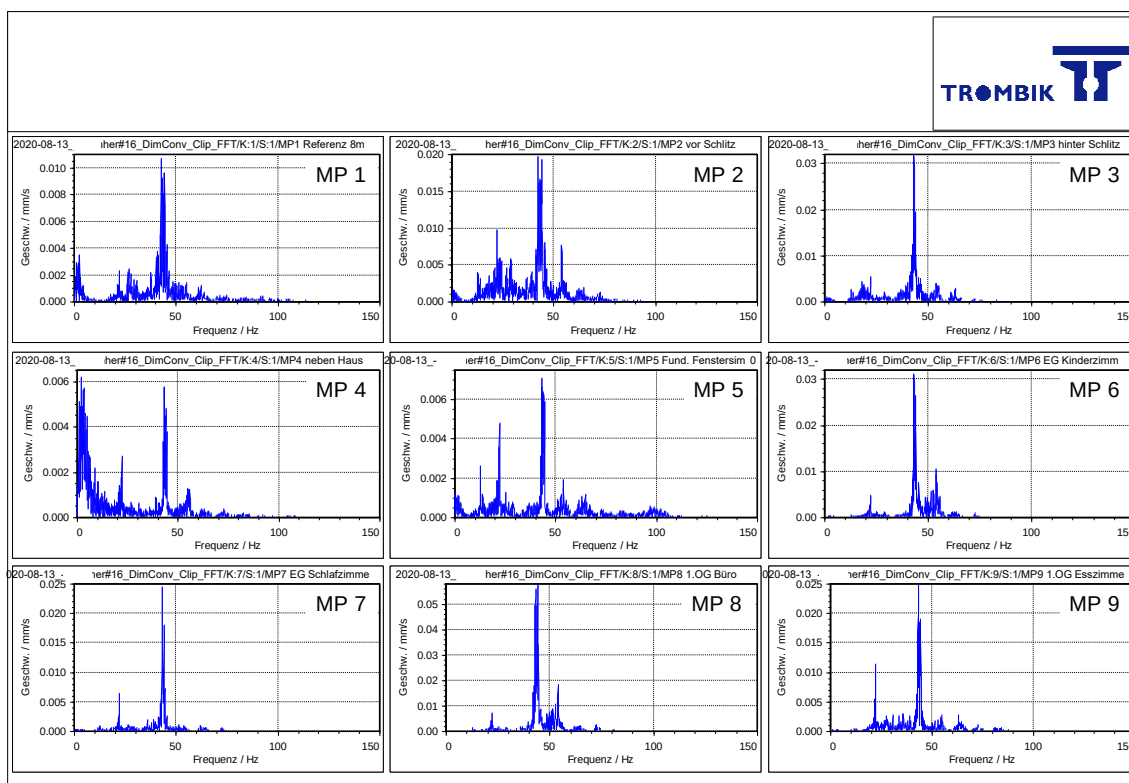


Schmalbandspektren MP 1-9, z-Komp. für IC um 14:22 Uhr auf Gleis 2

Nachfolgend typische Messaufzeichnungen von einer Zugfahrt der Nachhermessung:



Zeitverlauf MP 1-9, z-Komp. für RE um 17:03 Uhr auf Gleis 2



Schmalbandspektren MP 1-9, z-Komp. für RE um 17:03 Uhr auf Gleis 2

Da für die Beurteilung der Immissionen die KB-Werte gemäss DIN 4150-2 benötigt werden, wurden diejenigen der 24 ausgewerteten Zugsvorbeifahrten in **→ Beilage N°4, S.33** zusammengestellt. Im Weiteren wurden die Zeitverläufe frequenzanalysiert und entsprechend gemittelt. Beispiele der Terzbandspektren sind in **→ Beilage N°5, S.37** wiedergegeben.

Die Spektren der Züge, die auf Gleis 1 bzw. auf Gleis 2 führen, zeigen bei den Messpunkten MP 1 bis MP 9 erwartungsgemäss nicht viel Unterschied. Bei einem erheblichen Anteil der Züge (vor allem RE und IC) konzentriert sich die Schwingungsenergie im Wesentlichen auf den Frequenzbereich zwischen 40 und 50 Hz (siehe Schmalbandspektren in den Abbildungen oben). Bei anderen Zuggattungen (RZ, GZ) ist das Frequenzspektrum breiter, d.h. die Schwingungsenergie verteilt sich auf mehr Frequenzen. Aber auch bei diesen Zuggattungen liegt die Hauptenergie meist zwischen 40 und 50 Hz. Da diese Frequenzverteilung bei allen Messpunkten auftritt, auch beim Referenzmesspunkt MP1, der ca. 30 m neben dem Gebäude liegt, liegt die Ursache mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht auf Gebäudeseite, sondern beim Bodenaufbau in Kombination mit der Fahrgeschwindigkeit der Züge (Schwellenfrequenz), welche zu einer Resonanz des Untergrunds führen kann. Die Felsoberfläche befindet sich in etwa 6 m Tiefe, darüber liegen wassergesättigte Schotter (Fluss Aare in geringer Entfernung). Die meisten Züge fahren mit 90-100 km/h, was zu einer Schwellenfrequenz zwischen 40 und 50 Hz führt.

Die Deckeneigenfrequenzen f_0 der Betondecken in den gemessenen Räumen des Gebäudes betragen:

EG Kinderzimmer: 50 Hz

EG Schlafzimmer: 42.5 Hz

1.OG Bürozimmer: 45 Hz

1.OG Esszimmer: 32.5 Hz

Die unglückliche Konstellation, dass sich 3 der 4 Eigenfrequenzen im Bereich der Hauptenergie der Züge liegen, führt bei diesen zu erheblichen Verstärkungen der Schwingungen (4- bis 8-mal) innerhalb des Gebäudes.

4.4. Differenzspektren Erschütterungen

Die Vorher- und Nachhermessung lagen 8 Tage auseinander. Die Wetterbedingungen während dieser Zeit waren gut, was die Bodenverhältnisse nicht änderte. Die Züge waren aber nicht dieselben, zwar gleich von der Art, aber unterschiedlich in den Kompositionen. Auch die Bodenunruhe war verschieden. Strassenverkehr, Gewerbe und eine Baustelle in der Umgebung erzeugten unterschiedliche Erschütterungen.

Um die zur Zeit der Messungen herrschenden Schwingungsverhältnisse besser zu verstehen, wurden verschiedene Differenzspektren jeder Zugsvorbeifahrt berechnet. Die gemittelten Terzbandspektren und Differenzspektren sind schliesslich zur Bestimmung der Dämmleistung des Injektionskörpers und deren Interpretation herangezogen werden.

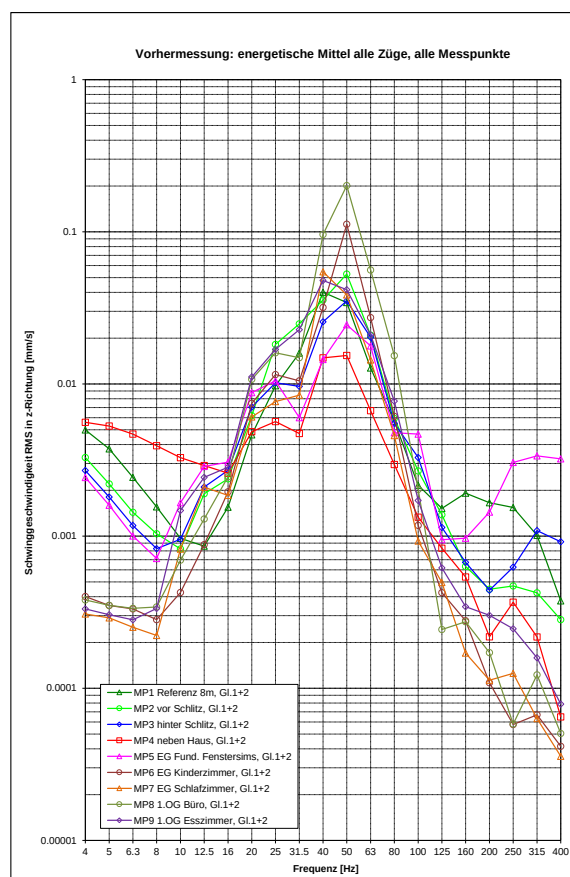
Die unterschiedliche Beeinflussung durch die allgemeine Unruhe von Messpunkt zu Messpunkt lässt eine zweifelsfreie Interpretation der Terzband- und Differenzspektren nur im Frequenzbereich zwischen 8-12.5 Hz und 125-200 Hz zu, wo die Schwingungsenergie der

Züge ausreichend stark ist. Die unsicheren Frequenzbereiche sind in den Grafiken der Differenzspektren in **→ Beilage N°6, S.44** grau hinterlegt.

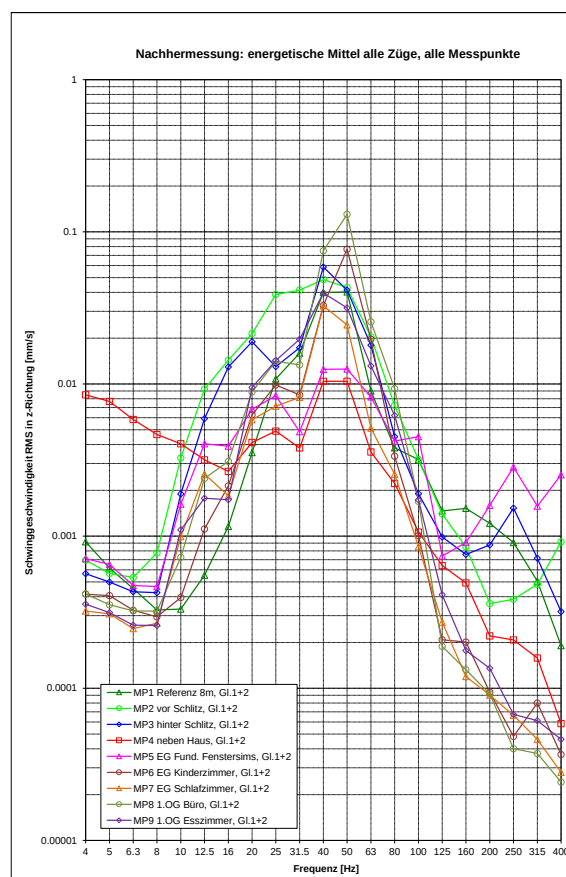
Bei identischer Anregung (allg. Unruhe, Züge) bei der Vorher- und Nachhermessung sollten die Differenzen im Spektrum am Referenz-MP1 (**→ Beilage N°6.3, S49**) gleich 1 und die Differenzspektren innerhalb des Gebäudes vom Fundament-MP5 auf die Geschossdecken MP6-MP9 (**→ Beilage N°6.1, S.45/46 und 6.2, S.47/48** untere Grafiken) in etwa gleich sein. Leider war die allgemeine Unruhe beim Referenzpunkt MP1 bei der Vorhermessung bei den tieferen Frequenzen unterhalb 25 Hz deutlich grösser als bei der Nachhermessung. Die Unterschiede im Schwingungsenergiebereich der Züge über 25 Hz bis 160 Hz waren aber sehr gering, dass für das Rollmaterial der beiden Messungen keine Korrektur durchgeführt werden musste. Die Differenzspektren innerhalb des Gebäudes (Schwingungsverhalten des Gebäudes) waren bis auf kleine Abweichungen gleich, was bedeutet, dass die Schwingungsverhältnisse an den Gebäudemesspunkten bei der Vorher- und Nachhermessung vergleichbar waren.

Daraus folgt, dass die Erschütterungsimmissionen im Gebäude im massgebenden Frequenzbereich zwischen 10 und 160 Hz zur Bestimmung der Wirkung des Injektionskörpers ohne Korrektur verwendet werden können.

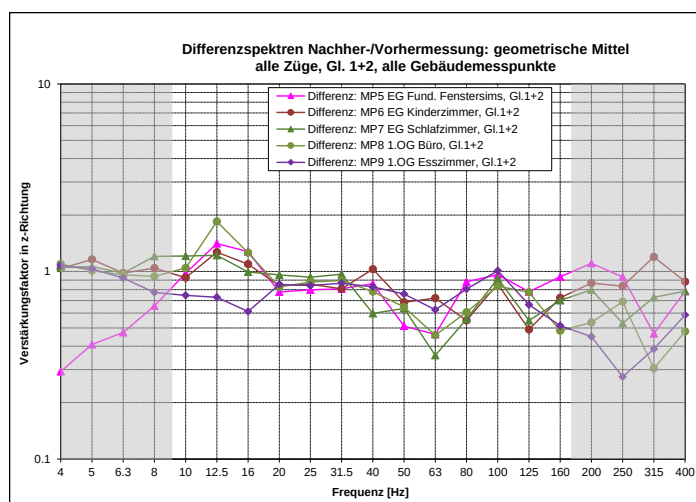
Vorhermessung



Nachhermessung



*Energetische Mittelungsspektren aller Messpunkte MP1-MP9, z-Komponenten
für Züge auf Gleis 1 und 2*



*Differenzen der geom. Mittel der Gebäudemesspunkte
Nachher- zu Vorhermessung*

Interessant für Aussagen der Wirkung des Injektionskörpers direkt an der Oberfläche im Aussenbereich des Gebäudes sind die Bilanzen bei den Messpunkten MP2 und MP3 direkt vor und hinter dem Injektionskörpers und beim Messpunkt MP4 im hinteren Bereich neben dem Gebäude (**→ Beilage N°6.3, S.49** obere Grafik). Obwohl alle Spiesse der Aussenmesspunkte im Boden belassen wurden und durch die Grab- und Injektionsarbeiten nicht direkt beeinträchtigt wurden, d.h. die Spiesse immer noch satt im Untergrund steckten, müssen die Bauarbeiten am offenen Schlitz den Untergrund so weit gestört haben, dass es sowohl vor als auch hinter dem Schlitz bereits unterhalb 50 Hz bei der Nachhermessung zu deutlich höheren Schwingungsamplituden führte. Dazu kam der Unterschied der allgemeinen Unruhe bei den tiefen Frequenzen. Beim Messpunkt MP4 neben dem Gebäude war die allgemeine Unruhe praktisch über alle Frequenzen deutlich höher als bei allen anderen Messpunkten. Grund dafür könnte die benachbarte Baustelle oder eine andere Störquelle im Untergrund gewesen sein.

Daraus folgt, dass für diese Aussenmesspunkte leider keine verlässlichen Angaben zur Wirkung des Injektionskörpers gemacht werden können.

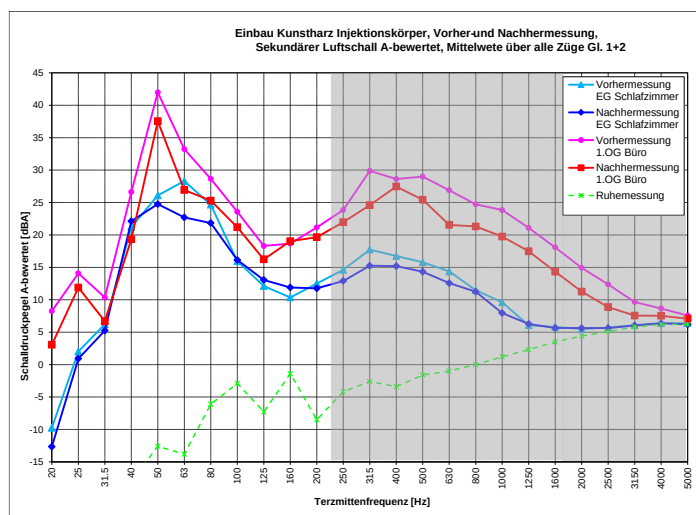
4.5. Terzbandspektren Schallmessung

Von den 24 Zugsvorbeifahrten, deren Erschütterungsaufzeichnungen ausgewertet wurden, sind über die jeweils gleichen Zeitfenster auch die Schallregistrierungen im EG Schlafzimmer und 1.OG Büro als Vorbeifahrts LAeq und A-bewerteten Terzbandspektren abgeleitet worden.

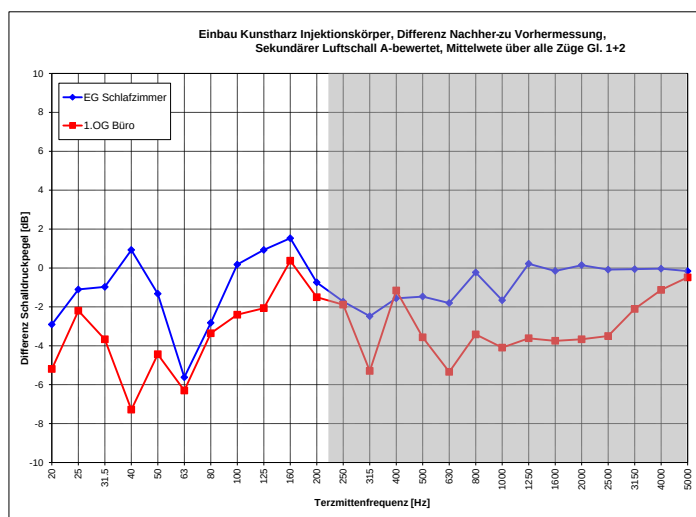
Das Schlafzimmer im EG im hinteren Teil des Hauses ist mit nur einem Fenster auf der bahnabgewandten Seite gut gegen den störenden Direktschall abgeschirmt. Das Bürozimmer im 1.OG hat ein seitliches Fenster und ist dadurch weniger gegen den Direktschall abgeschirmt.

Die Zusammenstellung der Vorbeifahrts LAeq der Schallmessungen der Vorher- und Nachhermessung sind in **→ Beilage N°7, S.50** zu finden. Die Grafiken der Terzbandspektren sind

in → **Beilage N°8, S.54** dargestellt. Das ebenfalls dargestellte Mittelungsspektrum ist über alle Züge berechnet worden. In allen Grafiken ist ein relatives Pegelminimum zwischen 125 und 200 Hz zu erkennen, bei dem der Übergang vom abgestrahlten Körperschall zum eindringenden Direktschall stattfindet. Pegelbestimmend ist aber das deutliche Maximum bei 50-63 Hz. Es ist rund 10 dBA höher als das Maximum des Direktschalls bei 315-500 Hz. Für Aussagen zur Einwirkung des Injektionskörpers bezüglich abgestrahltem Körperschall werden nur die Schallpegel der Terzbänder bis 200 Hz berücksichtigt. Folgende Abbildung zeigt die Mittelungspegel der Vorher- und Nachhermessung der beiden Zimmer.



*Terzspektren der mittleren Schalldruckpegel
Vorher- und Nachhermessung*



Differenzspektren Nachher- zu Vorhermessung

Deutlich erkennbar ist der stärkere Einfluss des Direktschalls im 1.OG Büro gegenüber dem Schlafzimmer im EG (Bereich grau hinterlegt). Wie bei den Erschütterungen ist im Büro im 1.OG eine schmale Energiespitze beim 50 Hz-Terzband vorhanden, in welchem die Eigenfrequenz der Geschossdecke und die Hauptenergie der Schwingungsemission der Züge liegt. Es kann ein klarer Trend zu etwas tieferen Körperschallpegeln bei der Nachhermessung erkannt werden.

5. DÄMMLEISTUNG DES INJEKTIONSKÖRPERS

Die Dämmleistung des Injektionskörpers kann an verschiedenen Orten und unterschiedlichen Kriterien bestimmt werden. Was schliesslich zählt, ist die Reduktion der Erschütterungen und des Körperschalls in den beurteilungsrelevanten Räumen des Hauses. Ist die Reduktion spürbar und hörbar, bzw. werden die Beurteilungsgrössen der BEKS bezüglich Erschütterungen und Körperschall deutlich reduziert.

5.1. Erschütterungen

Wie bereits erwähnt, ist eine Dämmleistungsbestimmung im Aussenbereich direkt hinter dem Injektionskörper infolge Beeinflussung des Bodens beim Spiess des Messensors durch die Bauarbeiten nicht möglich und neben dem Gebäude im hinteren Bereich wegen der hohen allgemeinen Unruhe nur beschränkt möglich.

Folgende Differenzen Nachher- zu Vorhermessung wurden für die Gebäudemesspunkte MP5-MP9 bestimmt:

- (1) Mittlere Änderung in den vertrauenswürdigen Terzbändern 10-160 Hz
- (2) Mittlere Änderung in den relevanten Terzbändern bezüglich Schwingungsenergie 20-80 Hz
- (3) Änderung in den Terzbändern mit der Hauptschwingungsenergie 40 oder 50 Hz
- (4) Mittlere Änderung der KB-Werte KB_{FTim}
- (5) Änderung des maximal gemessenen KB-Wertes KB_{Fmax} (ist aber auch vom Rollmaterial während der Messzeit abhängig)

Änderung aufgrund Injektionskörper	MP5 Fundament	MP6 EG Kinderzimmer	MP7 EG Schlafzimmer	MP8 1.OG Büro	MP9 1.OG Esszimmer
(1) Terzbänder 10-160 Hz	-12.0%	-16.5%	-18.5%	-12.8%	-24.2%
(2) Terzbänder 20-80 Hz	-27.1%	-21.6%	-28.5%	-27.2%	-20.3%
(3) Terzband 40 oder 50 Hz	-31.4%	-31.5%	-40.2%	-35.4%	-17.2%
(4) KB-Werte KB_{FTim}	-56.1%	-34.6%	-38.8%	-34.7%	-31.2%
(5) max. KB-Wert KB_{Fmax}	-76.7%	-28.2%	-37.1%	-36.6%	-54.1%

Mittlere Änderung mit dem Injektionskörper bezüglich Amplituden in Terzbandspektren und KB-Werten gemäss DIN 4150-2 in Prozent

Bemerkung: Auch beim Messpunkt MP4 neben dem Gebäude (mit hoher allgemeiner Unruhe) ist eine Reduktion der Amplituden bei den Terzbändern, die deutlich über der allgemeinen Unruhe liegen, von 25% zu beobachten, bei den Hauptfrequenzbändern 40 und 50 Hz etwa von 30%. Dies in Analogie zu den Messpunkten im Gebäude.

Bei der wichtigsten Grösse KB_{FTim} (durchschnittlicher Wert einer Einzelvorbeifahrt) zur Beurteilung der Erschütterungsimmissionen gemäss BEKS (DIN 4150-2) ergibt sich in den Räumen des Gebäudes immerhin eine Reduktion mit dem Injektionskörper zwischen 30 und 40%. Die Einzelwerte und Mittelungen der Vorher- und Nachhermessung sowie deren Differenzen sind in **→ Beilage N°4, S.33** zu finden.

5.2. Abgestrahlter Körperschall

Folgende Differenzen Nachher- zu Vorhermessung wurden für die Gebäudemesspunkte MP7 und MP8 bestimmt:

- (1) Mittlere Änderung in den relevanten Terzbändern bezüglich A-bewerteter Schallenergie 40-80 Hz
- (2) Änderung in den Terzbändern mit der A-bewerteten Hauptschallenergie 50 bzw. 63 Hz
- (3) Mittlere Änderung der A-bewerteten Vorbeifahrtspegel LA_{eq}
- (4) Änderung des maximal gemessenen A-bewerteten Vorbeifahrtspegel LA_{eq} (ist aber auch vom Rollmaterial während der Messzeit abhängig)

Änderung aufgrund Injektionskörper	MP7 EG Schlafzimmer	MP8 1.OG Büro
(1) Terzbänder 40-80 Hz	-2.7 dB	-4.6 dB
(2) Terzband 63 bzw. 50 Hz	-5.6 dB	-4.4 dB
(3) Werte LA_{eq}	-2.4 dB	-4.5 dB
(4) max. Wert LA_{eq}	-2.5 dB	-4.1 dB

Mittlere Änderung mit dem Injektionskörper bezüglich Amplituden in Terzbandspektren und LA_{eq} -Werten in dB

Bei der wichtigsten Grösse LA_{eq} (durchschnittlicher Wert einer Einzelvorbeifahrt) zur Beurteilung der Erschütterungsimmissionen gemäss BEKS ergibt sich in den Räumen des Gebäudes immerhin eine Reduktion mit dem Injektionskörper 2.5 dB und 4.5 dB. Die Einzelwerte und Mittelungen der Vorher- und Nachhermessung sowie deren Differenzen sind in **→ Beilage N°7, S.50** zu finden.

5.3. Beurteilung gemäss BEKS

Im Messbericht der Untersuchung von 2014 wurde ein Konflikt mit den Anforderungen der BEKS festgestellt, und zwar bei den Erschütterungen nachts. Die Werte in den Tabellen 7.1 und 7.2 des Berichtes lauteten folgendermassen:

Tabelle 7.1 Vergleich der KB-Werte mit Anhaltswerten

Periode	$KB_{FT,r}$ -Wert	KB_{Fmax} -Wert	Anhaltswerte für Mischzonen
Tag	0.098		$A_r = 0.10$
Nacht	0.073		$A_r = 0.07$
Tag		1.379	$A_0 = 5.0$
Nacht		0.991	$A_0 = 0.6$

Tabelle 7.2 Vergleich der Körperschall-Immissionen mit BUWAL-Richtwerten

Periode	L_K -Wert	Planungsrichtwert für L_K für Mischzone
Tag	22.7 dBA	40 dBA
Nacht – 1h	22.3 dBA	30 dBA

Es wird konservativ eine Reduktion durch den Injektionskörper bei den Erschütterungen KB_{FTr} und KB_{Fmax} um 30% und beim abgestrahlten Körperschall um 3 dB angesetzt. Werden diese Reduktionen auf diese Beurteilungswerte angewendet, ergibt sich Folgendes:

Periode	KB_{FTr} -Wert	KB_{Fmax} -Wert	Anhaltswerte für Mischzonen
Tag	0.067		$A_r = 0.10$
Nacht	0.051		$A_r = 0.07$
Tag		0.965	$A_o = 5.0$
Nacht		0.694	$A_o = 0.6$

Bei den Erschütterungen ist nur noch der obere Anhaltswert A_o nachts knapp überschritten. Bei diesem Wert kommt es aber auf das gemessene Rollmaterial an. Bei der Trombik-Messung 2020 lag der KB_{Fmax} bei der Vorhermessung bei 0.863 und mit dem Injektionskörper bei der Nachhermessung bei 0.547 (entspricht sich in etwa). Für die Untersuchung von 2014 wurde allerdings wesentlich länger, nämlich über 24 h (150 Züge) gemessen.

Periode	L_K -Wert	Anhaltswerte für Mischzonen
Tag	19.7 dBA	40 dBA
Nacht – 1h	19.3 dBA	30 dBA

Der Körperschall war bereits ohne Injektionskörper eingehalten und ist es auch mit diesem.

5.4. Sensitivitätsbetrachtungen

Bei der Wahl der Messpunkte wurde darauf geachtet, dass die Messpunkte an den gleichen Positionen gesetzt wurden und die gleichen Bedingungen bei der Ankopplung der Sensoren herrschten. Darum wurden die Spiesse bei den Aussenpunkten im Boden belassen. Bei den Bauarbeiten für den Injektionskörper veränderten sich anscheinend die Ankopplungsbedingungen bei den Messpunkten MP2 und MP3 direkt vor und hinter dem Injektionskörper, was bei diesen Messpunkten bei der Nachhermessung zu eher unplausiblen Erschütterungswerten führte.

Die allgemeine Unruhe betreffend Lärm und Erschütterungen kann nicht direkt beeinflusst werden. Gewerbebauten, eine stark befahrene Strasse und eine Baustelle in der Umgebung sowie teilweise Personen im Gebäude führten zu Störungen oder Lärm, was die Messungen

unterschiedlich stark beeinflusste. Durch eine Auswahl der besten Signale für die Auswertung wurden diese Effekte so gut wie möglich reduziert, aber nicht ganz eliminiert.

Durch längere Messzeiten hätten mehr Züge ausgewertet werden können, was die Streuung etwas reduziert hätte, besonders bei den Güterzügen, die im Normalfall sehr heterogen sind und auch anzahlmässig untervertreten waren. Aus Rücksicht auf die Bewohner des Gebäudes wurde die jeweilige Messzeit auf etwa 3 Stunden begrenzt.

Die Aussagen bezüglich Dämmleistung des Injektionskörpers gelten nur für den gemessenen Fall dieses Pilotprojektes. Die geologischen Verhältnisse waren für diesen Versuch sehr günstig. Die Felsoberfläche liegt in ca. 6 m Tiefe und es wurde versucht, den Injektionskörper bis in diese Tiefe zu errichten. Dadurch sollten Reflexionen der Schwingungen an der Felsoberfläche verhindert werden. Zur Verbesserung der Dämmleistung wurde zudem ein offener Bodenschlitz von 1.5 m Tiefe und 30-40 cm Breite erstellt, der mit dem Kunstharzschaum aufgefüllt wurde. Ein messtechnischer Nachweis, wieviel Dämmleistung der offene Bodenschlitz allein gebracht hätte, wurde nicht gemacht, da ein stufenweises Vorgehen beim Nachweis der Dämmleistung nicht vorgesehen war. Aus Forschungszwecken wäre es aber interessant zu wissen, wie sich die Dämmleistung mit den einzelnen Herstellungsschritten - offener Bodenschlitz, Injektionskörper mit offenem Bodenschlitz und schliesslich mit Verfüllung des offenen Bodenschlitzes - verändern würde.

Für die Erstellung eines Injektionskörpers an anderer Stelle sind die räumlichen Verhältnisse, die Gebäudekonstruktion (in diesem Fall keine Unterkellerung und Betondecken mit relativ hohen Eigenfrequenzen) und der Bodenaufbau sicher verschieden gegenüber dem Pilotversuch dieser Studie. Die Resultate können deshalb nicht Eins-zu-Eins auf einen anderen Ort übertragen werden. Für eine generelle Aussage zur Dämmleistung eines mit Kunstharzschaum erstellten Injektionskörpers sollten unbedingt weitere Objekte erstellt und vermessen werden.

7. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

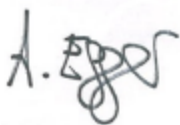
- Die Erschütterungsmessungen vor und nach Erstellung des Injektionskörpers der Liegenschaft im Kanton Aargau konnten bei gleichen Bedingungen an vier Aussen- und fünf Gebäudemesspunkten erfolgreich durchgeführt werden. Es wurde jeweils die Vertikalkomponente der Schwinggeschwindigkeit (Integration aus Schwingbeschleunigung) an allen Messpunkten parallel aufgezeichnet. Dazu wurde auch in zwei Zimmern der abgestrahlte Körperschall simultan gemessen.
- Die Erstellung des Injektionskörpers durch die Firma Uretex Schweiz AG wurde durch Trombik Ingenieure AG begleitet und mit Foto- und Videoaufnahmen dokumentiert.
- Von den registrierten Zugvorbeifahrten wurden je 24 möglichst störungsfreie Aufzeichnungen der Erschütterungen und des Körperschalls ausgewertet. Dazu wurden von den Erschütterungen die KB-Werte gemäss DIN 4150-2 und die Terzbandspektren berechnet und von den Schallmessungen die Vorbeifahrtspegel LA_{eq} und die Terzbandspektren abgeleitet.
- Von den ausgewerteten Erschütterungs- und Körperschalldaten wurden verschiedene Differenzen von der Vorher- zur Nachhermessung berechnet.
- Bezüglich der Beurteilungsgrössen der BEKS ergibt sich bei den Erschütterungen bei KB_{FTr} und KB_{Fmax} eine Minderung von rund 30-40% und beim abgestrahlten Körperschall einer mittleren Einzelvorbeifahrt LA_{eq} von 2.5-4.5 dB. Obwohl bei den Erschütterungen über alle vertrauenswürdigen Frequenzen (Amplituden deutlich über der allgemeinen Unruhe) nur eine Reduktion von 10-20% zu verzeichnen ist. Dies kann durch die Reduktion der Amplituden im Bereich der Hauptschwingungsenergie bei 40-50 Hz begründet werden. Dies ist jedoch eine Charakteristik der Schwingungsverhältnisse in der Messumgebung und kann nicht auf andere Örtlichkeiten direkt übertragen werden.
- Der Grund für die teilweise hohen Erschütterungsimmissionen im Gebäude (nicht unterkellert) ist die unglückliche Konstellation der Übereinstimmung verschiedener Deckeneigenfrequenzen im Gebäude mit der Hauptschwingungsenergie der Umgebung (Schwellenfachfrequenz mit Bodenresonanz), welche die Schwingungsamplituden so weit verstärken, dass es zu Überschreitung der Anhaltswerte der BEKS bei den Erschütterungen und zu erheblichen Störungen der Anwohner in den betroffenen Räumen kommt.

- **Je nach Rollmaterial (Güterzüge) kann es mit dem Injektionskörper immer noch zu störenden Erschütterungsmissionen führen, insgesamt kann aber objektiv gesehen aufgrund der gemessenen Differenzen eine spür- und hörbare Reduktion der Immissionen durch die getroffene Massnahme des Injektionskörpers festgestellt werden. Der Hauseigentümer selbst empfindet in seiner subjektiven Wahrnehmung jedoch keine Reduktion weder bei den Erschütterungen noch beim Körperschall. Der abgestrahlte Körperschall wird vom direkten Luftschall allerdings teilweise maskiert und dementsprechend sind Änderungen bei den Körperschallimmissionen im vorliegenden Fall schwierig festzustellen. Im Weiteren ist das Rollmaterial nicht homogen, was einen Vergleich weiter erschwert.**
- **Der Baggerschlitz bis auf eine Tiefe von 1.5 m stellt eine durchgängige Unterbrechung dar, welche dann durch die Ausfüllung mit dem Kunstharzschaum eine flächige, elastische Trennung bewirkte. Ohne diesen Baggerschlitz, das heisst mit einem Isolierkörper, der über die ganze Tiefe allein mit Bohren und Lanzeninjektionen erstellt worden wäre, hätte sehr wahrscheinlich eine etwas geringere Dämmwirkung resultiert.**
- **Um die Dämmleistung der Methode mit der Injektion eines Kunstharzkörpers zu verifizieren, braucht es weitere Objekte, die messtechnisch begleitet werden, denn die Bodenverhältnisse, der geologische Schichtaufbau, die Gebäudekonstruktion und die räumlichen Verhältnisse ändern von Ort zu Ort. Die bei diesem Pilotobjekt gemessene Dämmleistung ist über Erwarten recht gut, kommt aber nicht an die Wirkung von etablierten Erschütterungsschutzmassnahmen wie Unterschottermatten oder Masse-Feder-Systeme heran. Auch die aufgrund von verschiedenen theoretischen Berechnungen und Simulationen und ein paar wenigen realisierten Bodenschlitzen zu erwartende Dämmleistung eines vollwertigen Bodenschlitzes ist höher als die im vorliegenden Fall ermittelte. Vorteilhaft bei dieser Methode ist, dass weder die Bahninfrastruktur noch die Gebäude selbst bei der Erstellung des Injektionskörpers angerührt werden müssen und die Erstellung in relativ kurzer Zeit und kostengünstig erfolgen kann.**
- **Diese Schutzmassnahme zeigte im vorliegenden Fall eine zumindest messtechnisch nachgewiesene Wirkung im fühl- und hörbaren Bereich. Somit sollte die Massnahme weiterentwickelt und das Potential von derartigen Isolierkörpern an weiteren Objekten getestet und erforscht werden.**

Zürich, 27. Januar 2021

Rev. A: 2. Juli 2021

Rev. B: 16. Dezember 2021



Adrian Egger

Dr. sc. nat. ETH

Trombik Ingenieure AG

8. BEILAGENVERZEICHNIS

Beilage 1: Informationen und Fotos Erstellung Injektionskörper

Beilage 2: Messprotokolle

Beilage 3: Fotos der Messkampagne

Beilage 4: Auswertung Erschütterungen

Beilage 5: Erschütterungsmessungen: Ausgewählte Terzbandspektren

Beilage 6: Erschütterungsmessungen: Ausgewählte Differenzspektren

Beilage 7: Auswertung Schallmessungen

Beilage 8: Körperschallmessungen: Terzbandspektren

Beilage 9: Kurzbeschreibung Messgeräte

Beilage 10: Grundlagen / Theorie

Beilage 1:

Erstellung Injektionskörper

- Ausführungsinformationen der Firma Uretek**
- Fotos**

(Total 5 Seiten)

Ausführungsinformationen der Firma Uretek

Injektionskörper zur Reduktion von Bahn-Erschütterungen und Körperschall

Um die Verringerung von Körperschall und Erschütterungen zu bewirken, sind in einem ca. 36.00 m langen und ca. 1.50 m tiefen offenen Bodenschlitz URETEK Kunstharz-Injektionen bis -4.00 m ab OK Terrain durchgeführt worden. Die "Multipoint Injektionen" erfolgten mit einem horizontalen Abstand von ca. 0.50 m.

Ausführung der Injektionsarbeiten

Das URETEK-Kunstharz wurde durch die in die Bohrlöcher (Durchmesser bis max. 26 mm) eingeführten Injektionsrohre in den zu behandelnden Boden injiziert (Multipoint-Injektionen) und der Bodenschlitz wurde mit gespritztem Kunstharz verfüllt.

Ausmass und Dauer der Arbeiten

Kunstharz-Verbrauch: 1000 kg in den Bodenschlitz (Volumengewicht 40 kg/m³)
1000 kg Multipoint-Injektionen (Volumengewicht 140 kg/m³)

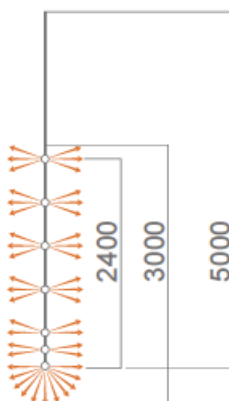
Dauer der Arbeiten: 3 Tage

URETEK Multipoint-Verfahren

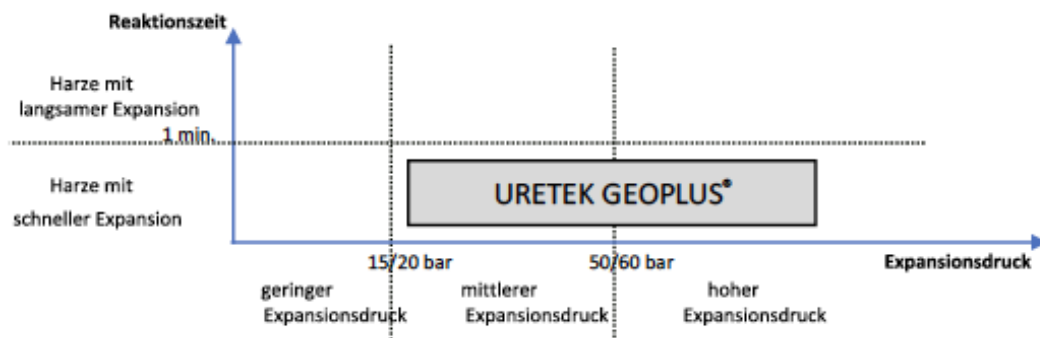
Durch die hohe Anzahl von seitlichen Austritts-Öffnungen in den Injektionslanzen entsteht im Boden ein engmaschiges und gleichmässiges Injektionsraster. Dank der genau aufeinander abgestimmten Grösse und Lage der Öffnungen (die Lochgrösse nimmt mit der Injektions-Tiefe zu) tritt das Kunstharz aus allen Löchern (12-14 pro Injektionslanze) gleichzeitig aus und sorgt so für eine homogene Verbesserung des Bodens. So kann für jedes einzelne Loch die genaue Austrittsmenge bestimmt werden.

Da das Kunstharz schnell aushärtet, kann durch Unterbrechung der Injektion sichergestellt werden, dass das Kunstharz in unmittelbarer Nähe der Austrittsöffnung aushärtet und es somit nicht zu einer "Vergeudung" von Material durch Abfluss in unerwünschte Bereiche kommt.

Das Kunstharz tritt mit einem Druck aus den Öffnungen aus, der gross genug ist, den Boden aufzubrechen, wodurch es sich auch in bindigen Böden ohne makroskopische Hohlräume gut ausbreiten kann.



Die Geoplus-Harze von URETEK expandieren schnell und mit einem mittleren bis hohen Expansionsdruck. Durch die schnelle Reaktion wird sichergestellt, dass sich das Kunstharz nicht zu weit vom Austrittspunkt entfernt. Der hohe Expansionsdruck sorgt dafür, dass das Kunstharz gleichmässig aus allen Öffnungen der Injektionslanzen austritt und den Boden in allen Bereichen verdichtet.



Die Injektion wird immer wieder für einige Sekunden unterbrochen, damit das injizierte Kunstharz Zeit hat, zu expandieren und den gewünschten Bodenbereich zu verfestigen. So wird auch das im nächsten Intervall injizierte Material daran gehindert, sich zu weit vom Austrittspunkt zu entfernen.

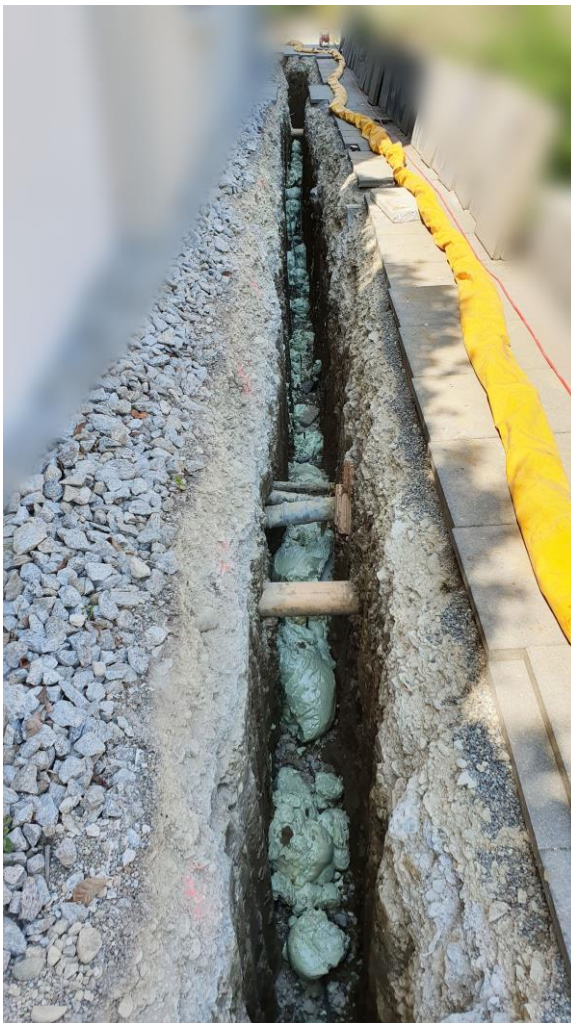
Fotos Erstellung Injektionskörper



Ausgangszustand



Zustand bei Messung Vorher



Zustand während Injektionsarbeiten



Zustand bei Messung Nachher

Fotos Erstellung Injektionskörper



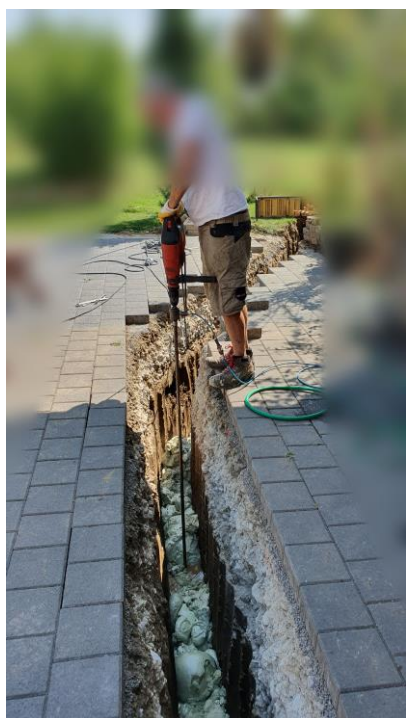
Bodenaufbau im offenen Bodenschlitz



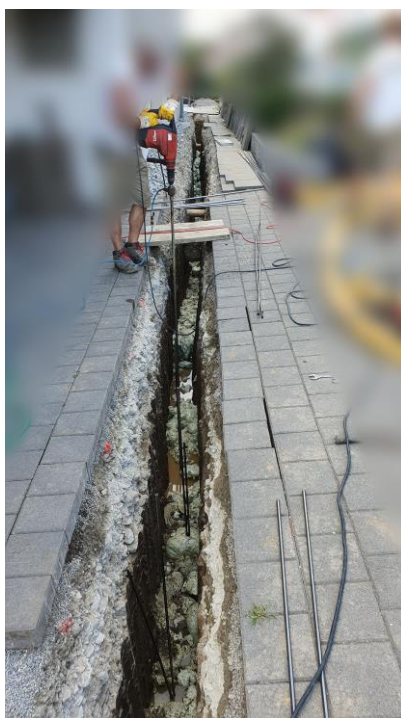
Injektionsarbeiten für 1. Bohrreihe



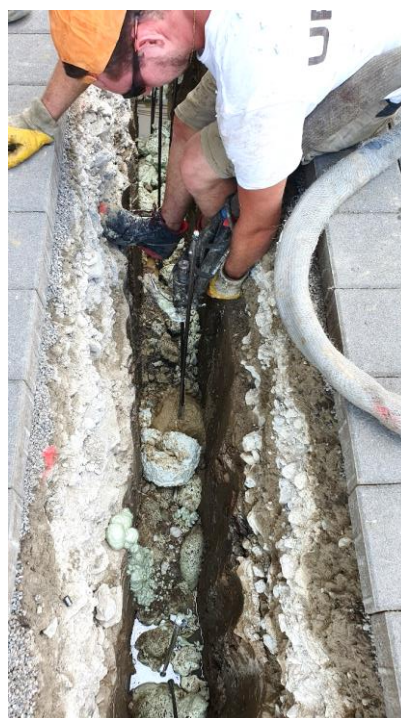
Boden nach 1. Injektion



Bohrarbeiten Injektionslanzen für 2. Injektionsreihe



Bohrarbeiten Injektionslanzen für 2. Injektionsreihe



Injektionsarbeiten für 2. Bohrreihe

Fotos Erstellung Injektionskörper



Ausschäumen des offenen Bodenschlitzes



fertiger Injektionskörper (ohne Abschlussarbeiten)



fertiger Injektionskörper (ohne Abschlussarbeiten)



fertiger Injektionskörper (ohne Abschlussarbeiten)



Baufahrzeug Uretek mit Injektionsausrüstung

Beilage 2:

Übersicht Messprotokolle

(Total 2 Seiten)

Messprotokoll vom 5. August 2020

Projektname BAFU Injektionskörper Erschütterungen / Körperschall					Auftrag N° 20.04201		Trombik Ingenieure AG Limmattalstrasse 344 CH - 8049 Zürich	
E- und KS-Messungen								
MESSPROTOKOLL VOM 05.08.2020					Name: AE		Seite 1	
Zug Nr.	Uhr-zeit	File Nr.	Zug Richtung N S		Gleis Nr.	Geschw. keit km/h	Zugs- typ	Bemerkungen (Zug, Anz. Wagen, etc.)
-	12:10	1						Sprünge EG Ki.zi.
-	12:12	2						Sprünge EG Schl.zi.
-	12:13	3						Sprünge 1.OG Büro
-	12:14	4						Sprünge 1.OG Esszi.
1	12:19	5	x		1	102	RZ	4 Wagen
-	12:20	6						Ruhemessung
2	12:23	7	x		1	77	IC	1 Lok, 7 Wagen
3	12:37	8		x	2	92	IC	7 Wagen, 1 Lok
4	12:45	9	x		1	88	RZ	4 Wagen
5	12:50	10		x	2	104	RZ	3 Wagen
6	12:55	11	x		1	100	RE	6 Wagen
7	13:01	12	x		1	61	GZ	1 Lok, 13 Wagen
8	13:03	13		x	2	90	RE	6 Wagen
9	13:06	14		x	2	89	LZ	2 Loks
10	13:06	-	x		1	88	RZ	2x4 Wagen
11	13:08	15		x	2	101	LZ	1 Lok
12	13:24	16	x		1	104	IC	1 Lok, 7 Wagen
13	13:37	17		x	2	92	IC	7 Wagen, 1 Lok
14	13:39	18	x		1	82	GZ	1 Lok, 15 Wagen
15	13:42	19	x		1	65	GZ	1 Lok, 18 Wagen
16	13:46	20	x		1	83	RZ	4 Wagen
17	13:51	21		x	2	103	RZ	2x4 Wagen
18	13:55	22	x		1	94	RE	6 Wagen
19	14:03	23		x	2	94	RE	6 Wagen
20	14:06	24	x		1	109	RZ	3 Wagen
21	14:13	25		x	2	95	RZ	4 Wagen
22	14:22	26	x		1	92	IC	1 Lok, 7 Wagen
23	14:36	27		x	2	94	IC	7 Wagen, 1 Lok
24	14:46	28	x		1	107	RZ	4 Wagen
-	14:49	29						Ruhemessung
25	14:51	30		x	2	107	RZ	3 Wagen
26	14:55	31	x		1	102	RE	6 Wagen
27	15:03	32		x	2	107	RE	6 Wagen
-	15:04	33						Ruhemessung
28	15:07	34	x		1	109	RZ	2x3 Wagen
29	15:13	35		x	2	111	RZ	4 Wagen
30	15:24	36	x		1	92	IC	1 Lok, 7 Wagen
31	15:36	37		x	2	92	IC	7 Wagen, 1 Lok
32	15:37	38	x		1	79	GZ	1 Lok, 7 Wagen

Messprotokoll vom 13. August 2020

Projektname BAFU Injektionskörper Erschütterungen / Körperschall					Auftrag N° 20.04201			Trombik Ingenieure AG Limmattalstrasse 344 CH - 8049 Zürich	
E- und KS-Messungen									
MESSPROTOKOLL VOM 13.08.2020					Name: AE			Seite 1	
Zug Nr.	Uhr- zeit	File Nr.	Zug Richtung N S		Gleis Nr. Nr.	Geschw. keit km/h	Zugs- typ	Bemerkungen (Zug, Anz. Wagen, etc.)	
1	15:46	1	x		1	110	RZ	4 Wagen	
2	15:51	2		x	2	109	RZ	4+3 Wagen	
3	15:55	3	x		1	97	RE	6 Wagen	
4	16:03	4		x	2	91	RE	6 Wagen	
5	16:07	5	x		1	104	RZ	4 Wagen	
6	16:16	6		x	2	107	RZ	4 Wagen	
-	16:23	7						Ruhemessung	
7	16:25	8	x		1	92	IC	1 Lok, 10 Wagen	
8	16:28	9		x	2	89	GZ	1 Lok, 18 Wagen	
9	16:33	10	x		1	68	GZ	1 Lok, 17 Wagen	
-	16:36	11						Ruhemessung	
10	16:36	12		x	2	93	IC	10 Wagen, 1 Lok	
11	16:36	12	x			?	GZ	1 Lok, 3 Wagen	
12	16:46	13	x		1	95	RZ	4 Wagen	
13	16:48	14		x	2	?	RZ	4 Wagen	
14	16:57	15	x		1	89	RE	6 Wagen	
15	17:03	16		x	2	94	RE	6 Wagen	
16	17:10	17	x		1	83	RZ	3 Wagen	
17	17:14	18		x	2	111	RZ	3 Wagen	
18	17:16	19		x	2	89	GZ	1 Lok, 10 Wagen	
19	17:26	20	x		1	113	IC	1 Lok, 11 Wagen	
-	17:28	21						Ruhemessung	
20	17:39	22		x	2	100	IC	11 Wagen, 1 Lok	
21	17:45	23	x		1	97	RZ	4 Wagen	
22	17:51	24		x	2	89	RZ	3 Wagen	
23	17:59	25	x		1	107	RE	6 Wagen	
24	18:03	26		x	2	109	RE	6 Wagen	
-	18:05	27						Sprünge 1.OG Esszi.	
25	18:08	28	x		1	87	RZ	3 Wagen	
26	18:14	29		x	2	87	RZ	4 Wagen	
27	18:23	30	x		1	87	IC	1 Lok, 11 Wagen	
28	18:30	31		x	2	92	GZ	1 Lok, 13 Wagen	
29	18:31	32	x		1	?	IC	1 Lok, 7 Wagen	
-	18:34	33						Ruhemessung	
30	18:38	34		x	2	94	IC	11 Wagen, 1 Lok	
31	18:47	35	x		1	94	RZ	4 Wagen	
32	18:53	36		x	2	109	RZ	3 Wagen	

Beilage 3:

Fotos der Messkampagne

(Total 2 Seiten)

Fotos Vorhermessung



MP1 Referenzmesspunkt, 8 m ab 1. Gleisachse



MP5 Fenstersims, MP3 hinter Injektionskörper, MP2 vor Injektionskörper



Messpunkt MP4, neben dem Gebäude Nordseite



MP6 EG Kinderzimmer



MP7 + Mik1 EG Schlafzimmer



MP8 + Mik2 1.OG Bürozimmer

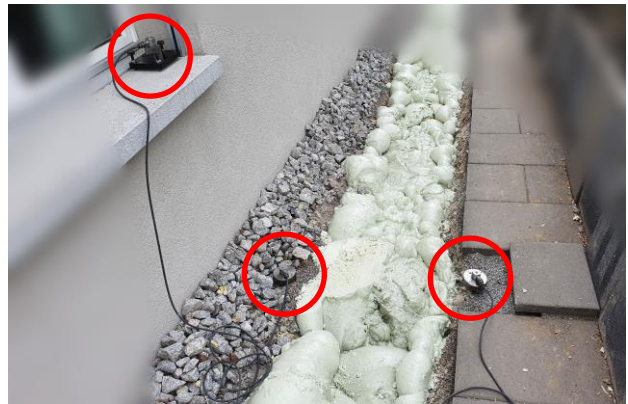


MP9 1.OG Esszimmer

Fotos Nachhermessung



MP1 Referenzmesspunkt, 8 m ab 1. Gleisachse



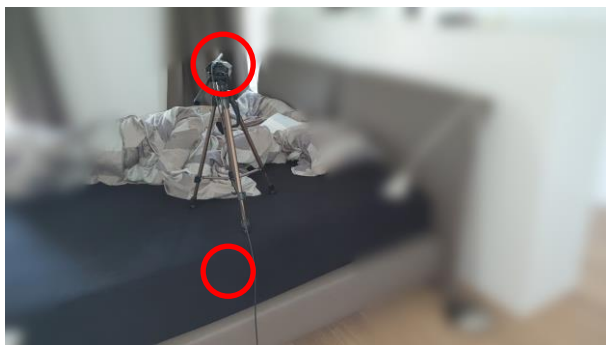
MP5 Fenstersims, MP3 hinter Injektionskörper, MP2 vor Injektionskörper



Messpunkt MP4, neben dem Gebäude Nordseite



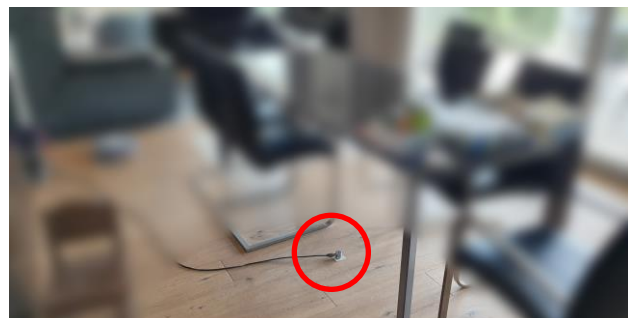
MP6 EG Kinderzimmer



MP7 + Mik1 EG Schlafzimmer



MP8 + Mik2 1.OG Bürozimmer



MP9 1.OG Esszimmer

Beilage 4:

Auswertung Erschütterungen

(Total 3 Seiten)

Vorhermessung vom 5. August 2020

Projektname BAFU Injektionskörper Erschütterungen / Körperschall								Auftrag N° 20.04201		Trombik Ingenieure AG Limmattalstrasse 344 CH - 8049 Zürich	
E- und KS-Messungen											
MESSAUSWERTUNG VOM 05.08.2020						Name: AE		Seite 1			
Zug Nr.	Uhr- zeit	Zug Richtung		Gleis Nr.	Geschw. keit km/h	Zugs- typ	Fundament KB _{FTi} (EG) KB	Kinderzi. KB _{FTi} (EG) KB	Schlafzi. KB _{FTi} (EG) KB	Büro KB _{FTi} (1.OG) KB	Esszimmer KB _{FTi} (1.OG) KB
N	S										
1	12:19	x		1	102	RZ	0.073	0.311	0.091	0.449	0.102
2	12:23	x		1	77	IC	0.100	0.063	0.076	0.111	0.101
3	12:37		x	2	92	IC	0.087	0.181	0.128	0.363	0.115
6	12:55	x		1	100	RE	0.064	0.175	0.130	0.456	0.129
7	13:01	x		1	61	GZ	0.102	0.073	0.037	0.144	0.077
8	13:03		x	2	90	RE	0.099	0.290	0.162	0.601	0.140
9	13:06		x	2	89	LZ	0.068	0.120	0.205	0.384	0.167
11	13:08		x	2	101	LZ	0.118	0.445	0.155	0.863	0.162
14	13:39	x		1	82	GZ	0.067	0.166	0.149	0.336	0.159
15	13:42	x		1	65	GZ	0.102	0.259	0.112	0.522	0.216
17	13:51		x	2	103	RZ	0.041	0.132	0.077	0.294	0.086
18	13:55	x		1	94	RE	0.136	0.332	0.153	0.762	0.197
19	14:03		x	2	94	RE	0.051	0.174	0.137	0.331	0.117
20	14:06	x		1	109	RZ	0.058	0.329	0.089	0.450	0.103
22	14:22	x		1	92	IC	0.062	0.204	0.148	0.341	0.144
23	14:36		x	2	94	IC	0.040	0.128	0.101	0.271	0.101
25	14:51		x	2	107	RZ	0.039	0.117	0.051	0.235	0.080
26	14:55	x		1	102	RE	0.093	0.366	0.125	0.600	0.132
27	15:03		x	2	107	RE	0.100	0.287	0.116	0.591	0.158
28	15:07	x		1	109	RZ	0.062	0.288	0.095	0.417	0.101
29	15:13		x	2	111	RZ	0.036	0.129	0.052	0.233	0.075
30	15:24	x		1	92	IC	0.040	0.145	0.153	0.268	0.119
31	15:36		x	2	92	IC	0.060	0.157	0.110	0.365	0.106
32	15:37	x		1	79	GZ	0.261	0.456	0.229	0.261	0.456
					Anzahl						
tot					24	KB _{FTim,tot}	0.094	0.247	0.128	0.440	0.158
Gl. 1					13	KB _{FTim,Gl.1}	0.108	0.268	0.130	0.430	0.183
Gl. 1 PZ					9	KB _{FTim,Gl.1,PZ}	0.081	0.264	0.121	0.463	0.129
Gl. 1 GZ					4	KB _{FTim,Gl.1,GZ}	0.153	0.277	0.149	0.344	0.267
Gl. 2					11	KB _{FTim,Gl.2}	0.073	0.220	0.126	0.452	0.123
Gl. 2 PZ					9	KB _{FTim,Gl.2,PZ}	0.066	0.188	0.110	0.388	0.112
Gl. 2 GZ					2	KB _{FTim,Gl.2,GZ}	0.096	0.326	0.181	0.668	0.164
Max						KB _{Fmax,tot}	0.261	0.456	0.229	0.863	0.456
Gl. 1						KB _{Fmax,Gl.1}	0.261	0.456	0.229	0.762	0.456
Gl. 1 PZ						KB _{Fmax,Gl.1,PZ}	0.136	0.366	0.153	0.762	0.197
Gl. 1 GZ						KB _{Fmax,Gl.1,GZ}	0.261	0.456	0.229	0.522	0.456
Gl. 2						KB _{Fmax,Gl.2}	0.118	0.445	0.205	0.863	0.167
Gl. 2 PZ						KB _{Fmax,Gl.2,PZ}	0.100	0.290	0.162	0.601	0.158
Gl. 2 GZ						KB _{Fmax,Gl.2,GZ}	0.118	0.445	0.205	0.863	0.167

Nachhermessung vom 13. August 2020

Projektname BAFU Injektionskörper Erschütterungen / Körperschall							Auftrag N° 20.04201			Trombik Ingenieure AG Limmattalstrasse 344 CH - 8049 Zürich	
E- und KS-Messungen											
MESSAUSWERTUNG VOM 13.08.2020							Name: AE		Seite 1		
Zug Nr.	Uhr- zeit	Zug Richtung N S		Gleis Nr. Nr.	Geschw. keit km/h	Zugs- typ	Fundament KB _{FTi} (EG) KB	Kinderzi. KB _{FTi} (EG) KB	Schlafzi. KB _{FTi} (EG) KB	Büro KB _{FTi} (1.OG) KB	Esszimmer KB _{FTi} (1.OG) KB
1	15:46	x		1	110	RZ	0.033	0.200	0.062	0.309	0.082
2	15:51		x	2	109	RZ	0.029	0.155	0.040	0.247	0.081
3	15:55	x		1	97	RE	0.048	0.191	0.106	0.307	0.138
4	16:03		x	2	91	RE	0.032	0.072	0.070	0.172	0.092
5	16:07	x		1	104	RZ	0.035	0.130	0.056	0.215	0.066
6	16:16		x	2	107	RZ	0.026	0.121	0.037	0.197	0.068
7	16:25	x		1	92	IC	0.036	0.099	0.078	0.181	0.110
8	16:28		x	2	89	GZ	0.055	0.190	0.099	0.463	0.132
9	16:33	x		1	68	GZ	0.052	0.108	0.035	0.159	0.112
14	16:57	x		1	89	RE	0.045	0.114	0.086	0.250	0.120
15	17:03		x	2	94	RE	0.038	0.148	0.119	0.284	0.119
16	17:10	x		1	83	RZ	0.043	0.107	0.067	0.165	0.096
18	17:16		x	2	89	GZ	0.058	0.156	0.144	0.350	0.209
19	17:26	x		1	113	IC	0.053	0.293	0.084	0.468	0.124
20	17:39		x	2	100	IC	0.032	0.185	0.056	0.339	0.077
23	17:59	x		1	107	RE	0.061	0.327	0.094	0.547	0.128
24	18:03		x	2	109	RE	0.037	0.180	0.062	0.340	0.093
25	18:08	x		1	87	RZ	0.039	0.180	0.092	0.209	0.128
26	18:14		x	2	87	RZ	0.018	0.072	0.043	0.105	0.062
27	18:23	x		1	87	IC	0.039	0.100	0.099	0.150	0.130
28	18:30		x	2	92	GZ	0.048	0.130	0.082	0.250	0.095
30	18:38		x	2	94	IC	0.036	0.122	0.067	0.263	0.092
31	18:47	x		1	94	RZ	0.034	0.103	0.046	0.208	0.078
32	18:53		x	2	109	RZ	0.032	0.108	0.044	0.233	0.066

	Anzahl						
tot	24	KB _{FTim,tot}	0.041	0.162	0.079	0.288	0.109
Gl. 1	12	KB _{FTim,Gl.1}	0.044	0.179	0.078	0.290	0.112
Gl. 1 PZ	11	KB _{FTim,Gl.1,PZ}	0.043	0.184	0.081	0.299	0.112
Gl. 1 GZ	1	KB _{FTim,Gl.1,GZ}	0.052	0.108	0.035	0.159	0.112
Gl. 2	12	KB _{FTim,Gl.2}	0.038	0.142	0.079	0.285	0.106
Gl. 2 PZ	9	KB _{FTim,Gl.2,PZ}	0.032	0.135	0.064	0.253	0.085
Gl. 2 GZ	3	KB _{FTim,Gl.2,GZ}	0.053	0.161	0.111	0.365	0.153
Max		KB _{Fmax,tot}	0.061	0.327	0.144	0.547	0.209
Gl. 1		KB _{Fmax,Gl.1}	0.061	0.327	0.106	0.547	0.138
Gl. 1 PZ		KB _{Fmax,Gl.1,PZ}	0.061	0.327	0.106	0.547	0.138
Gl. 1 GZ		KB _{Fmax,Gl.1,GZ}	0.052	0.108	0.035	0.159	0.112
Gl. 2		KB _{Fmax,Gl.2}	0.058	0.190	0.144	0.463	0.209
Gl. 2 PZ		KB _{Fmax,Gl.2,PZ}	0.038	0.185	0.119	0.340	0.119
Gl. 2 GZ		KB _{Fmax,Gl.2,GZ}	0.058	0.190	0.144	0.463	0.209

Differenzen Nachher- zu Vorhermessung

Differenz Nachher-/Vorhermessung

tot		$KB_{FTim,tot}$	0.439	0.654	0.612	0.653	0.688
Gl. 1		$KB_{FTim,Gl.1}$	0.405	0.668	0.601	0.675	0.610
Gl. 1 PZ		$KB_{FTim,Gl.1,PZ}$	0.530	0.697	0.669	0.647	0.866
Gl. 1 GZ		$KB_{FTim,Gl.1,GZ}$	0.338	0.390	0.238	0.460	0.418
Gl. 2		$KB_{FTim,Gl.2}$	0.526	0.646	0.626	0.630	0.863
Gl. 2 PZ		$KB_{FTim,Gl.2,PZ}$	0.476	0.718	0.587	0.651	0.760
Gl. 2 GZ		$KB_{FTim,Gl.2,GZ}$	0.556	0.494	0.614	0.546	0.932
Max		$KB_{Fmax,tot}$	0.233	0.718	0.629	0.634	0.459
Gl. 1		$KB_{Fmax,Gl.1}$	0.233	0.718	0.461	0.718	0.302
Gl. 1 PZ		$KB_{Fmax,Gl.1,PZ}$	0.447	0.894	0.689	0.718	0.698
Gl. 1 GZ		$KB_{Fmax,Gl.1,GZ}$	0.198	0.237	0.154	0.303	0.245
Gl. 2		$KB_{Fmax,Gl.2}$	0.491	0.428	0.704	0.537	1.253
Gl. 2 PZ		$KB_{Fmax,Gl.2,PZ}$	0.377	0.638	0.735	0.565	0.752
Gl. 2 GZ		$KB_{Fmax,Gl.2,GZ}$	0.491	0.428	0.704	0.537	1.253

Reduktion in %

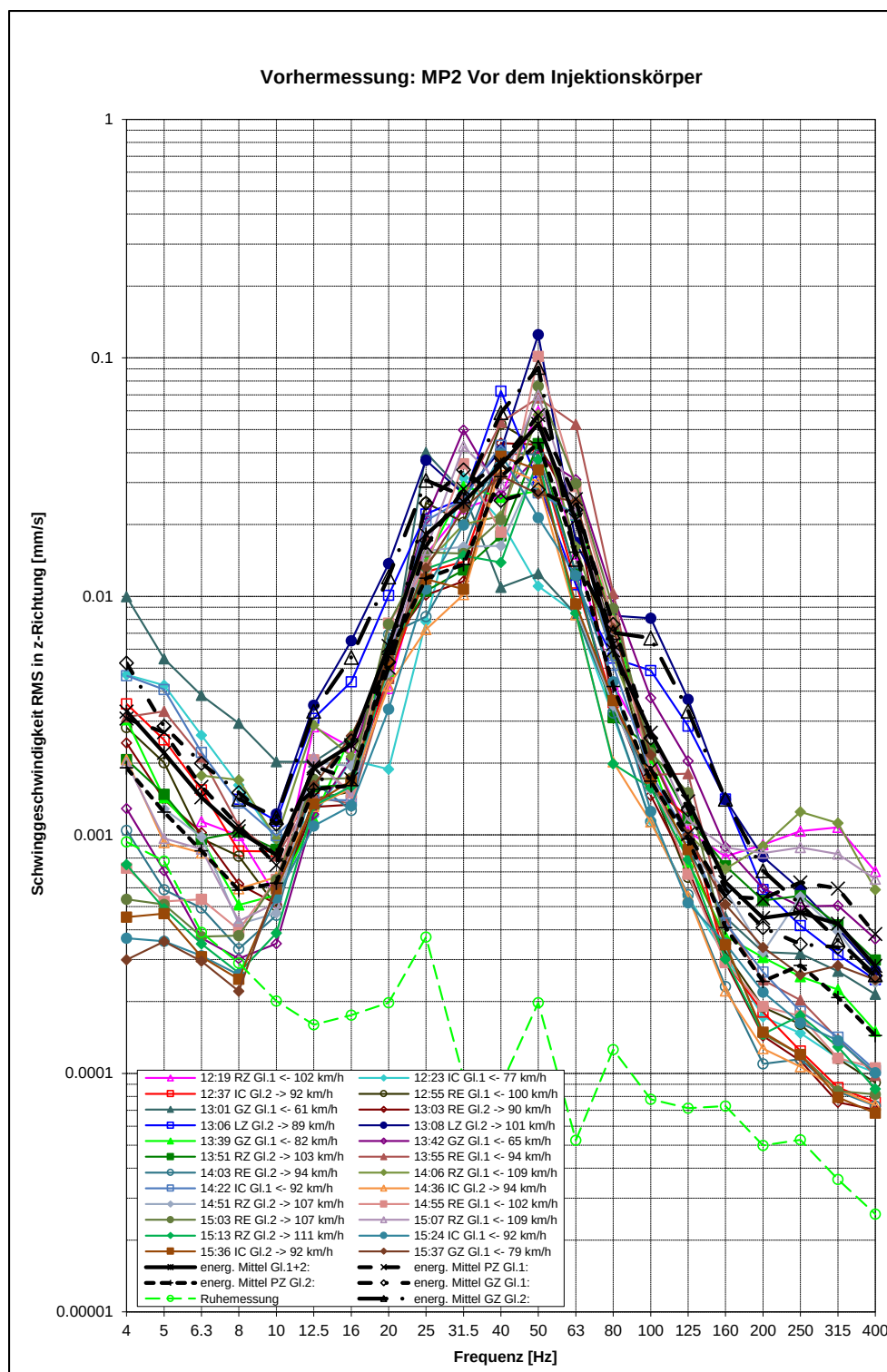
tot		$KB_{FTim,tot}$	56.10	34.62	38.76	34.66	31.19
Gl. 1		$KB_{FTim,Gl.1}$	59.53	33.23	39.91	32.48	39.00
Gl. 1 PZ		$KB_{FTim,Gl.1,PZ}$	46.96	30.27	33.10	35.32	13.39
Gl. 1 GZ		$KB_{FTim,Gl.1,GZ}$	66.20	61.03	76.21	53.96	58.21
Gl. 2		$KB_{FTim,Gl.2}$	47.41	35.37	37.36	36.96	13.66
Gl. 2 PZ		$KB_{FTim,Gl.2,PZ}$	52.44	28.20	41.31	34.87	24.01
Gl. 2 GZ		$KB_{FTim,Gl.2,GZ}$	44.38	50.60	38.59	45.37	6.82
Max		$KB_{Fmax,tot}$	76.75	28.24	37.13	36.57	54.08
Gl. 1		$KB_{Fmax,Gl.1}$	76.75	28.24	53.91	28.17	69.80
Gl. 1 PZ		$KB_{Fmax,Gl.1,PZ}$	55.35	10.59	31.08	28.17	30.22
Gl. 1 GZ		$KB_{Fmax,Gl.1,GZ}$	80.18	76.29	84.56	69.65	75.51
Gl. 2		$KB_{Fmax,Gl.2}$	50.93	57.19	29.57	46.34	-25.28
Gl. 2 PZ		$KB_{Fmax,Gl.2,PZ}$	62.33	36.24	26.49	43.49	24.83
Gl. 2 GZ		$KB_{Fmax,Gl.2,GZ}$	50.93	57.19	29.57	46.34	-25.28

Beilage 5:

Erschütterungsmessungen: Ausgewählte Terzbandspektren

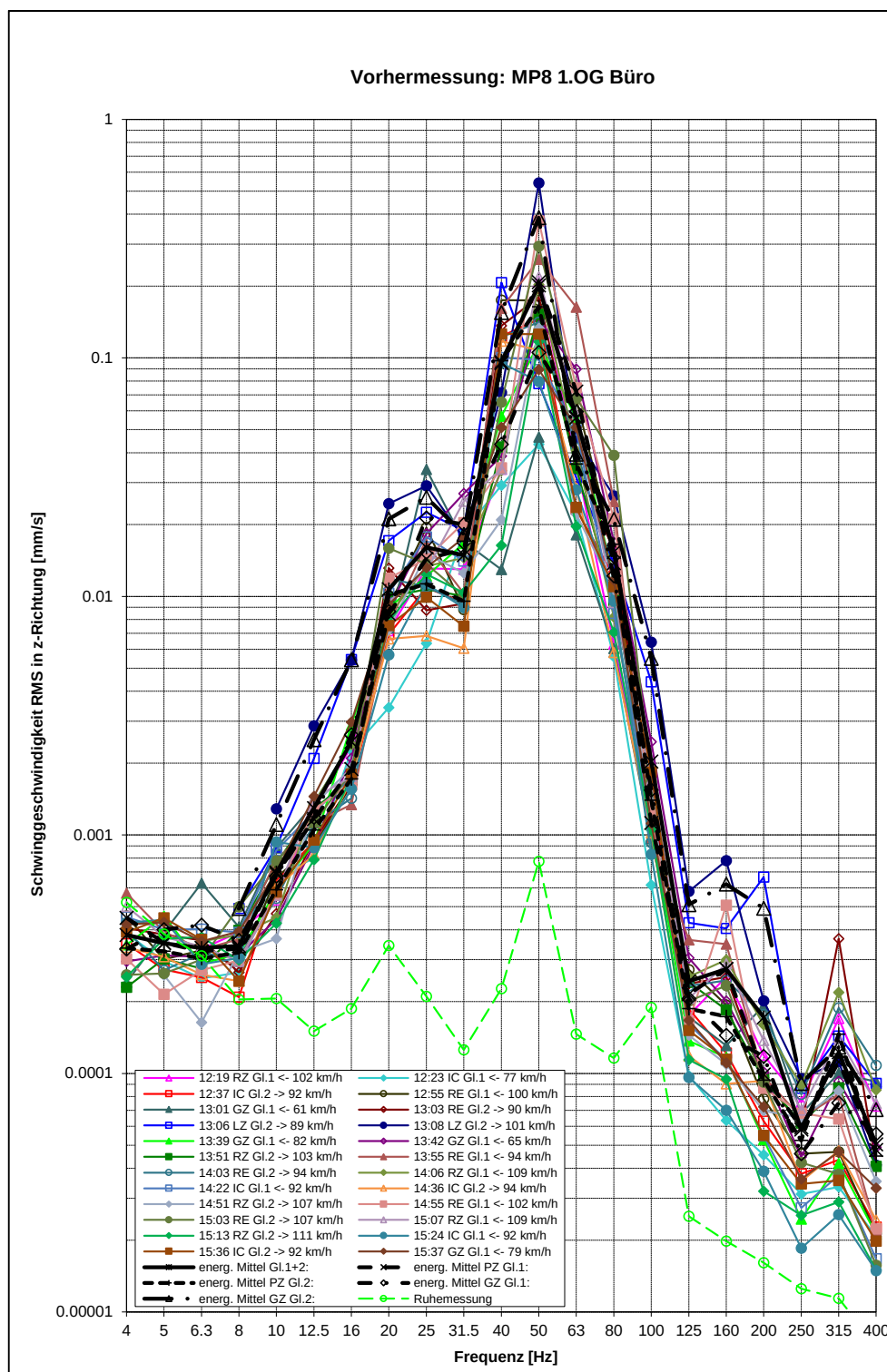
(Total 6 Seiten)

Beilage 5.1: Ausgewählte Terzbandspektren Vorhermessung



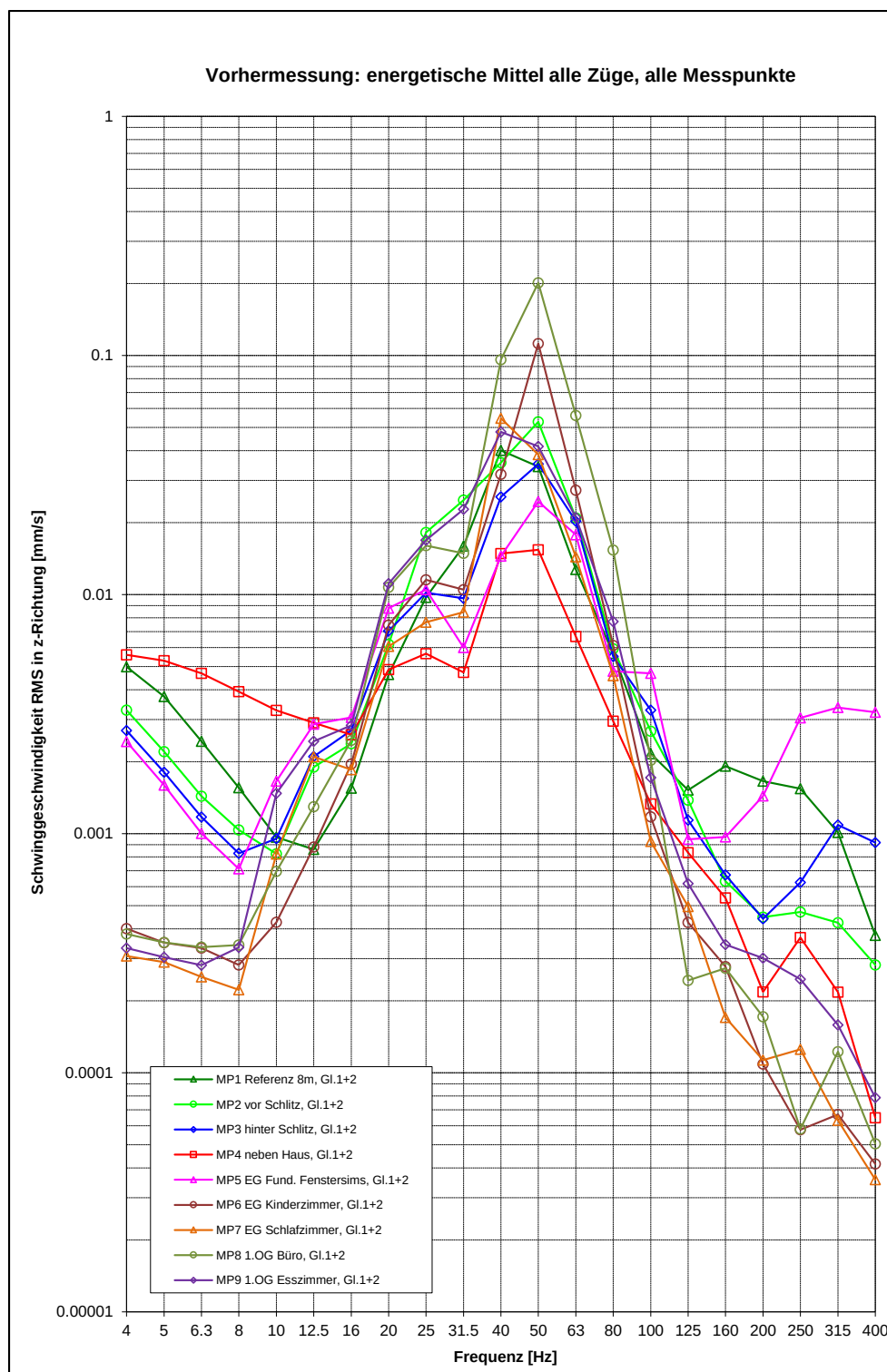
MP2, z-Komponente als Beispiel für Streuung der Einzelspektren vor dem Gebäude

Beilage 5.1: Ausgewählte Terzbandspektren Vorhermessung



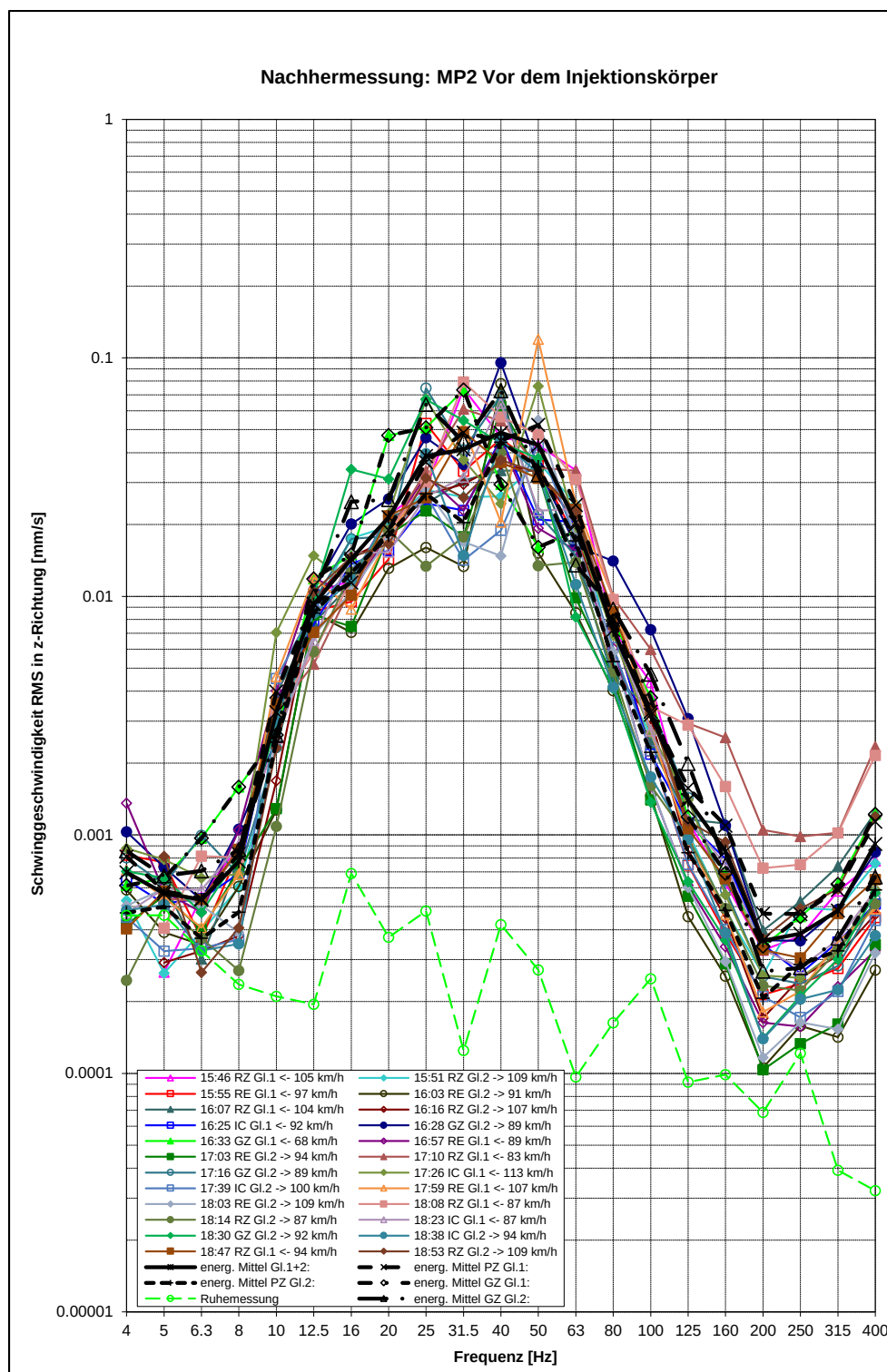
MP8, z-Komponente als Beispiel für Streuung der Einzelspektren im Gebäude

Beilage 5.1: Ausgewählte Terzbandspektren Vorhermessung



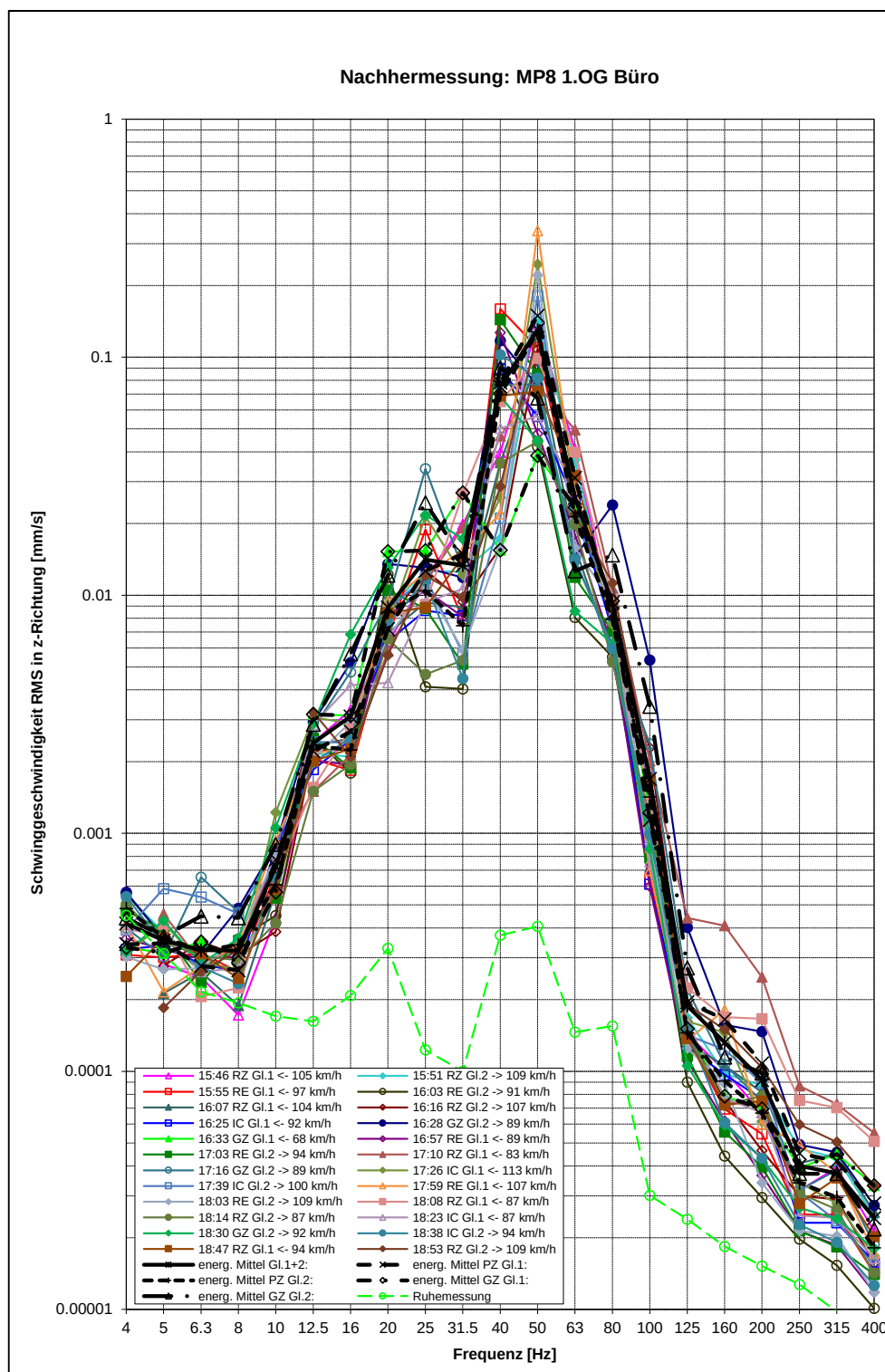
Energetische Mittelungsspektren aller Messpunkte MP1-MP9, z-Komponenten
für Züge auf Gleis 1 und 2

Beilage 5.2: Ausgewählte Terzbandspektren Nachhermessung



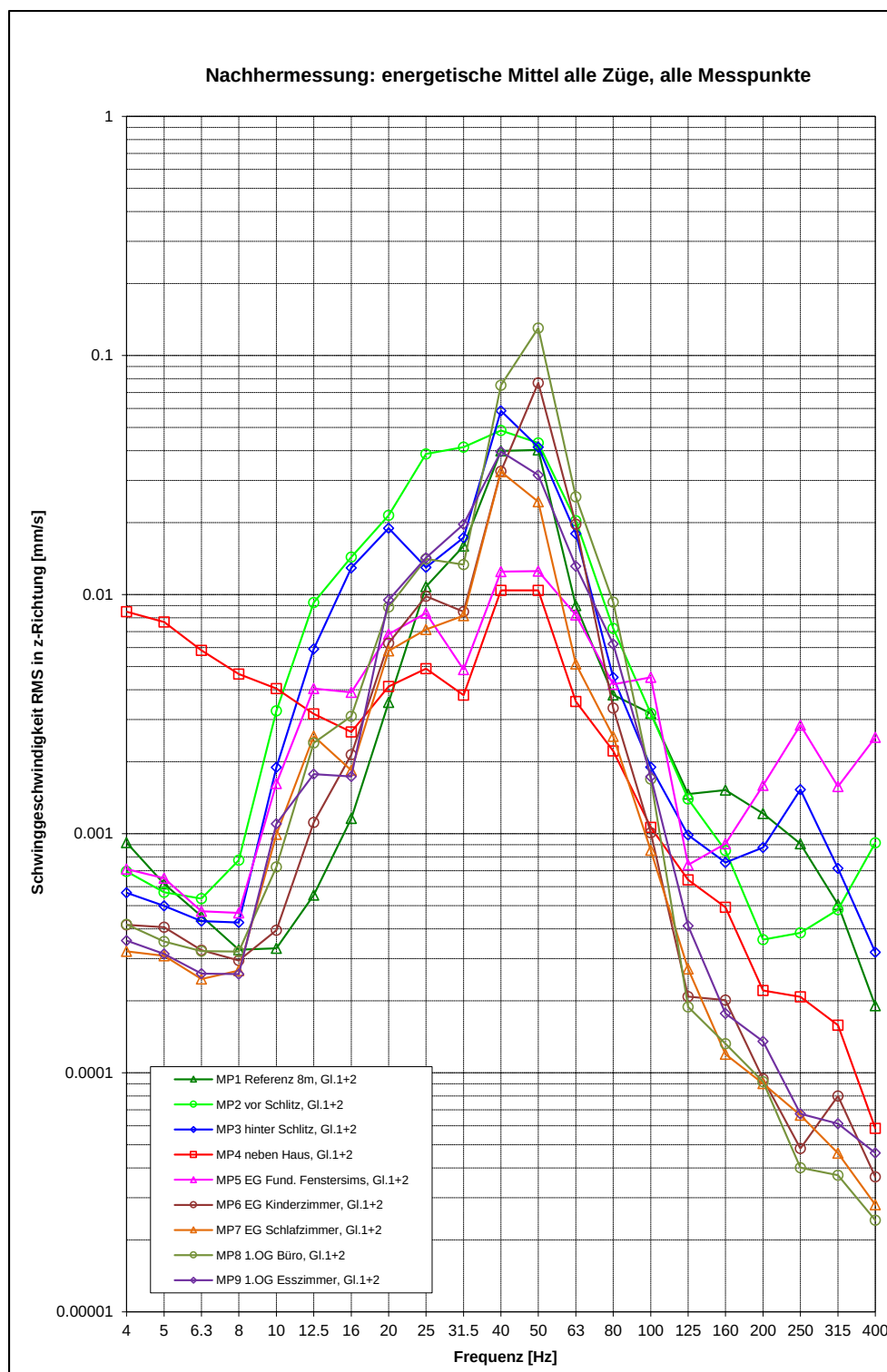
MP2, z-Komponente als Beispiel für Streuung der Einzelspektren vor dem Gebäude

Beilage 5.2: Ausgewählte Terzbandspektren Nachhermessung



MP8, z-Komponente als Beispiel für Streuung der Einzelspektren im Gebäude

Beilage 5.2: Ausgewählte Terzbandspektren Nachhermessung



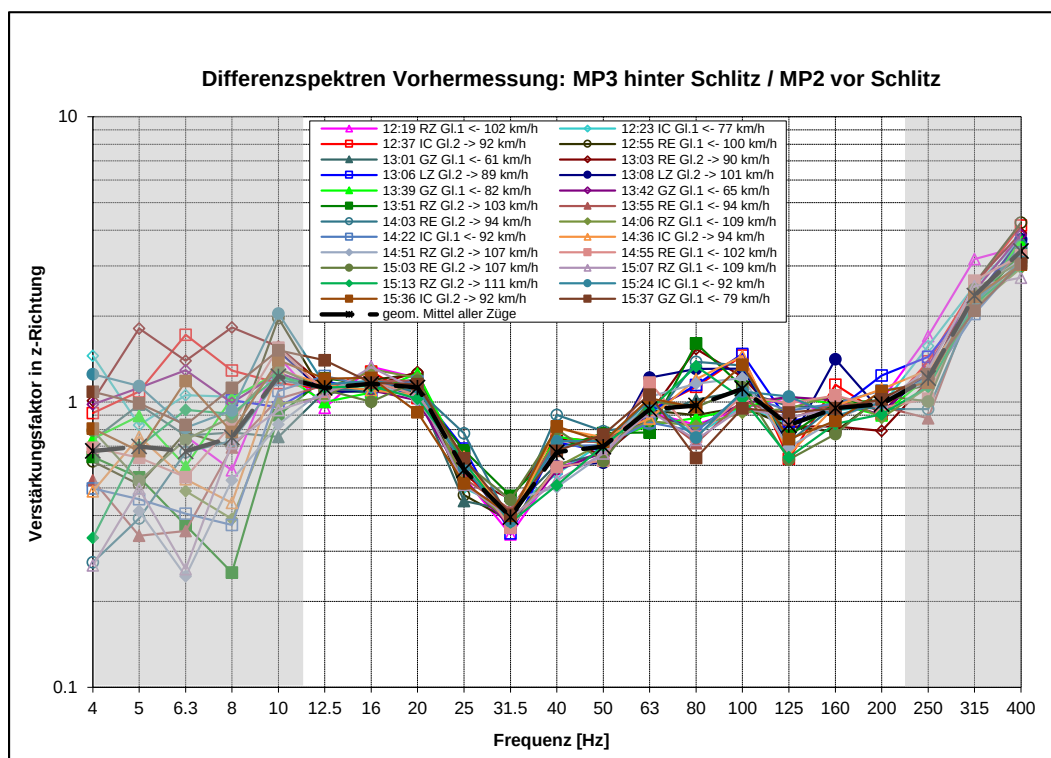
Energetische Mittelungsspektren aller Messpunkte MP1-MP9, z-Komponenten
für Züge auf Gleis 1 und 2

Beilage 6:

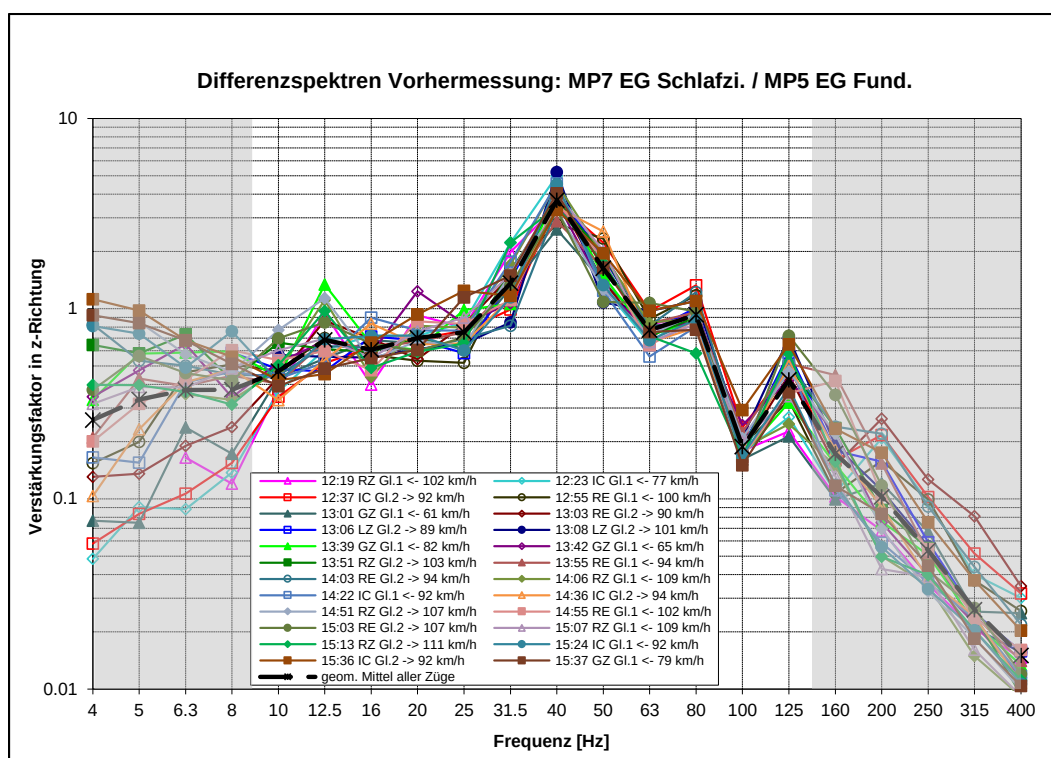
Erschütterungsmessungen: Ausgewählte Differenzspektren

(Total 5 Seiten)

Beilage 6.1: Ausgewählte Differenzspektren Vorhermessung

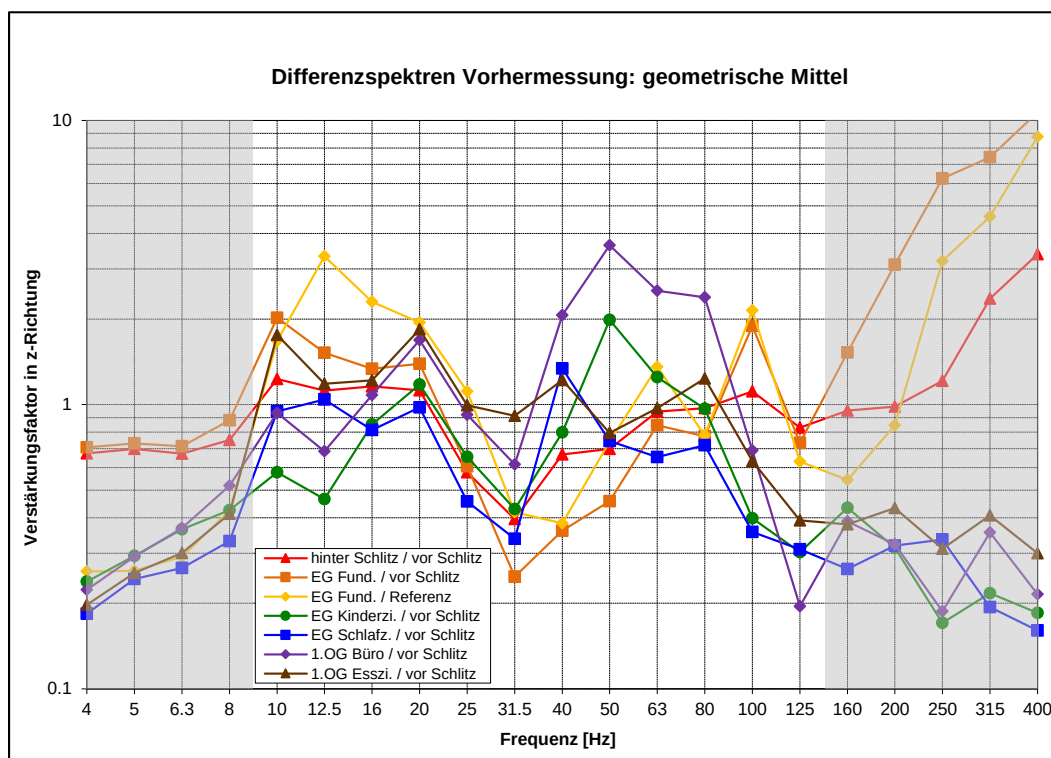


Differenzspektren MP3/MP2, als Beispiel für Streuung der Einzelspektren

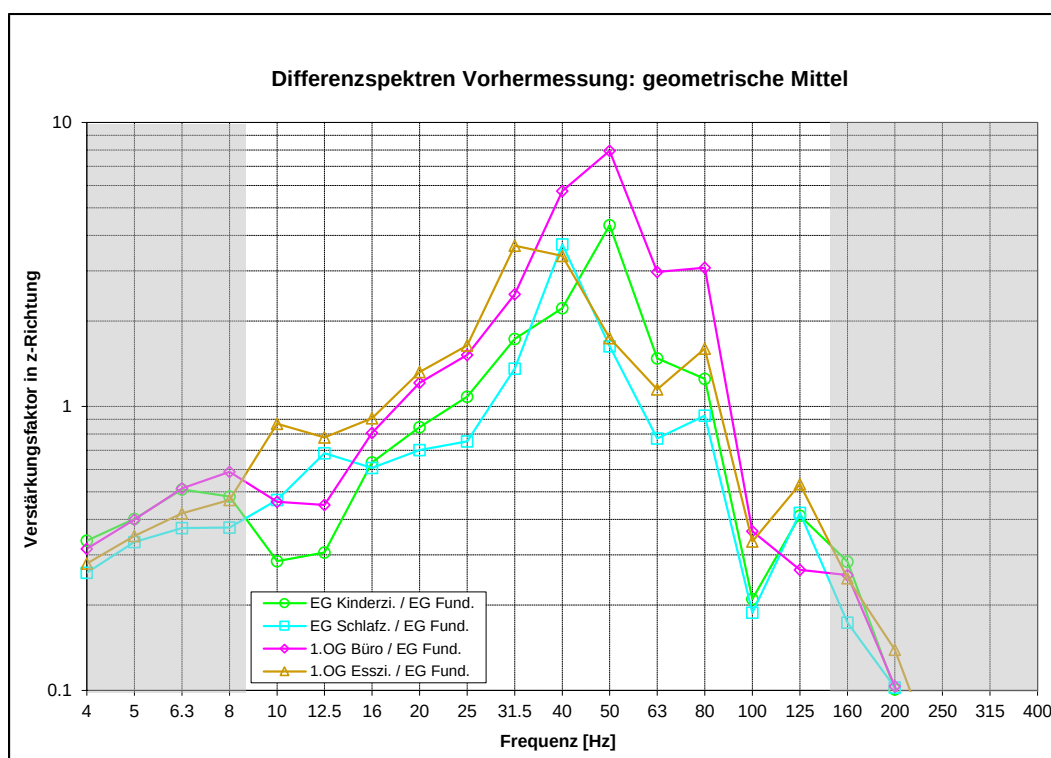


Differenzspektren MP7/MP5, als Beispiel für Streuung der Einzelspektren

Beilage 6.1: Ausgewählte Differenzspektren Vorhermessung

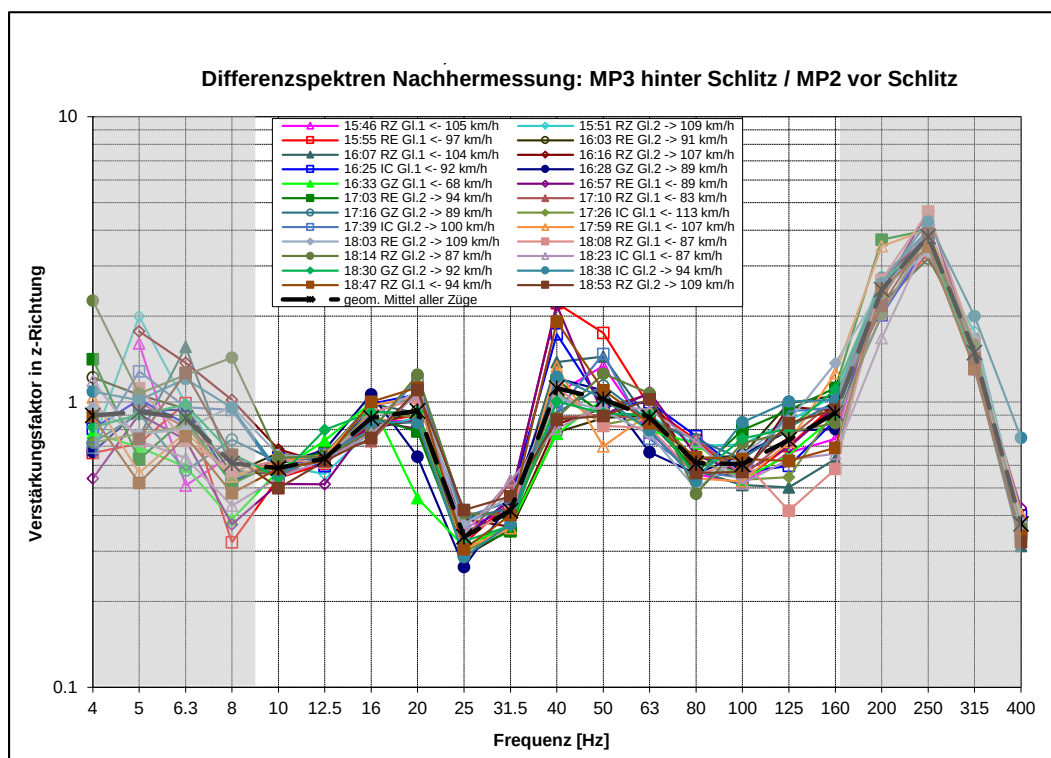


Geom. Mittel der Differenzspektren, verschiedene MP gegenüber MP2

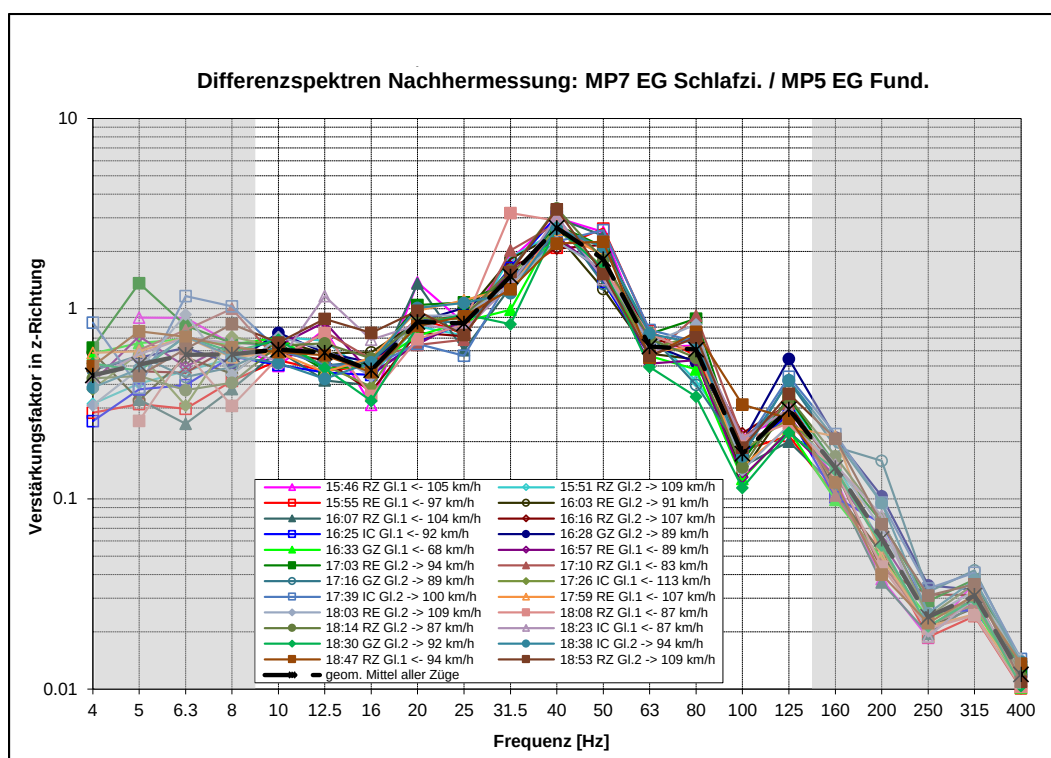


Differenzspektren MP7/MP5, verschiedene MP gegenüber MP5

Beilage 6.2: Ausgewählte Differenzspektren Nachhermessung

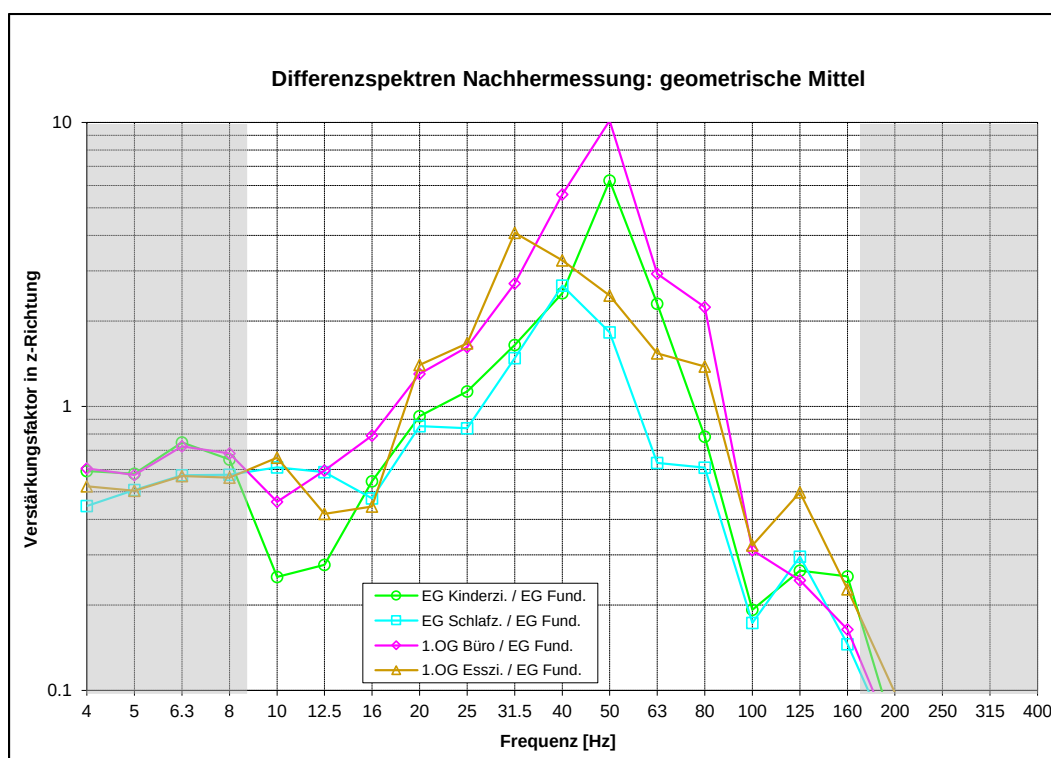
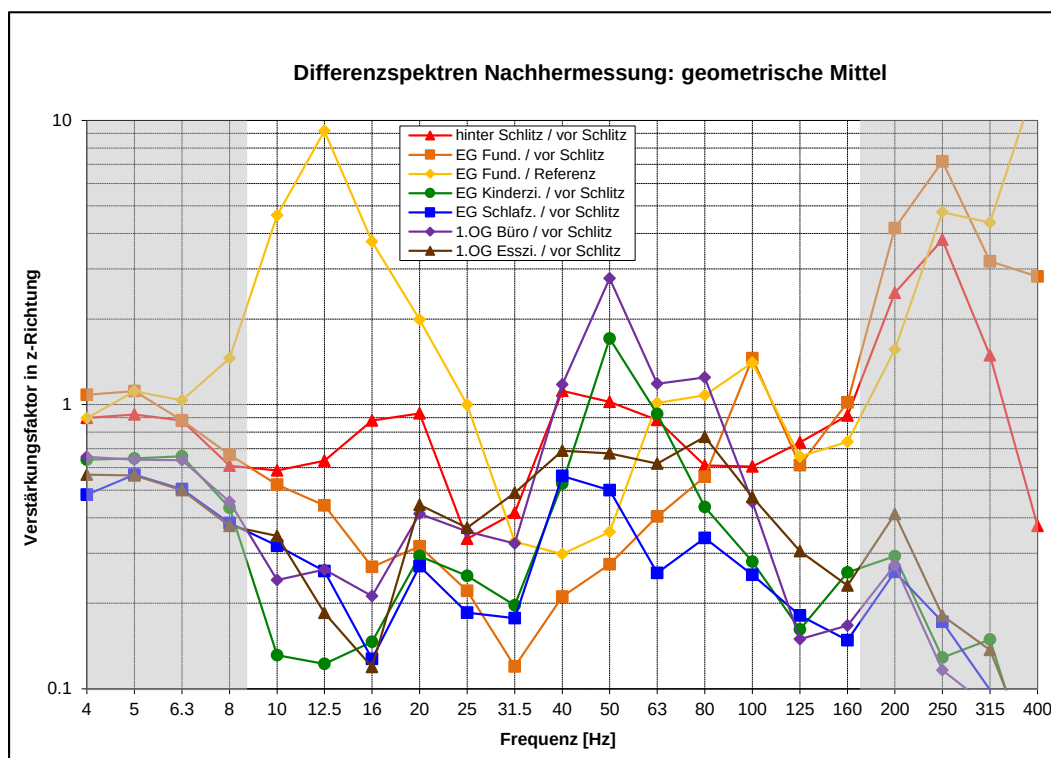


Differenzspektren MP3/MP2, als Beispiel für Streuung der Einzelspektren

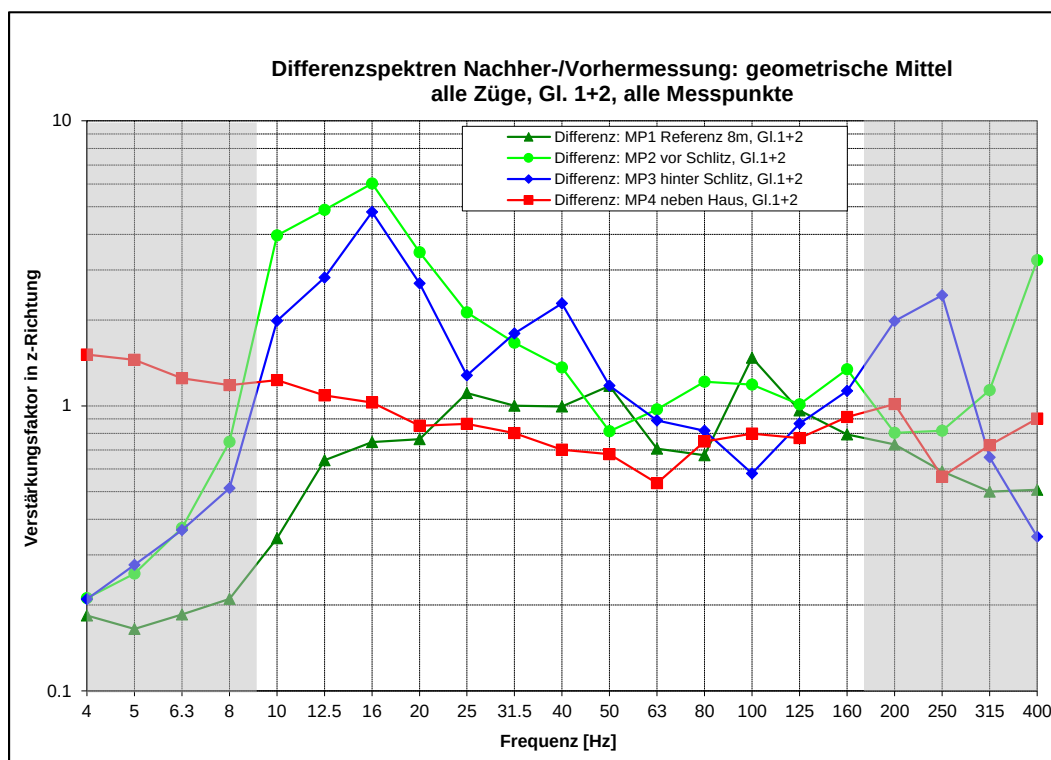


Differenzspektren MP7/MP5, als Beispiel für Streuung der Einzelspektren

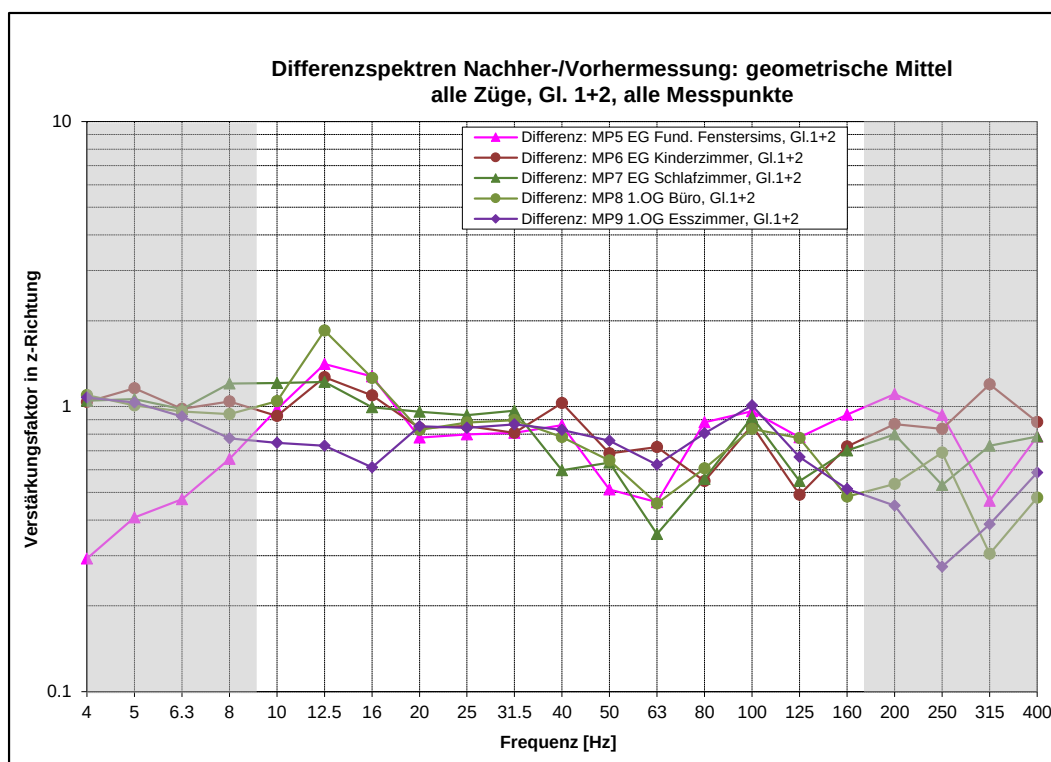
Beilage 6.2: Ausgewählte Differenzspektren Nachhermessung



Beilage 6.3: Differenzspektren Nachher- zu Vorhermessung



Differenzen der geom. Mittel der Aussenmesspunkte Nachher- zu Vorhermessung



Differenzen der geom. Mittel der Gebäudemesspunkte Nachher- zu Vorhermessung

Beilage 7:

Auswertung Schallmessungen

(Total 3 Seiten)

Vorhermessung vom 5. August 2020

Projektname BAFU Injektionskörper Erschütterungen / Körperschall					Auftrag N° 20.04201		Trombik Ingenieure AG Limmattalstrasse 344 CH - 8049 Zürich	
E- und KS-Messungen								
MESSAUSWERTUNG VOM 05.08.2020					Name: AE		Seite 1	
Zug Nr.	Uhr- zeit	Zug Richtung N S		Gleis Nr. Nr.	Geschw. keit km/h	Zugs- typ	Schlafzi. LA _{eq} (EG) dBA (bis 200 Hz)	Büro LA _{eq} (1.OG) dBA (bis 200 Hz)
1	12:19	x		1	102	RZ	29.6	41.9
2	12:23	x		1	77	IC	23.4	31.6
3	12:37		x	2	92	IC	30.2	38.3
6	12:55	x		1	100	RE	32.3	39.6
7	13:01	x		1	61	GZ	25.0	34.6
8	13:03		x	2	90	RE	31.5	43.1
9	13:06		x	2	89	LZ	31.9	38.0
11	13:08		x	2	101	LZ	35.7	51.2
14	13:39	x		1	82	GZ	30.7	38.3
15	13:42	x		1	65	GZ	33.6	43.2
17	13:51		x	2	103	RZ	30.1	39.1
18	13:55	x		1	94	RE	37.3	43.8
19	14:03		x	2	94	RE	30.1	38.2
20	14:06	x		1	109	RZ	30.1	43.0
22	14:22	x		1	92	IC	29.7	40.3
23	14:36		x	2	94	IC	28.5	36.6
25	14:51		x	2	107	RZ	26.6	41.3
26	14:55	x		1	102	RE	36.1	51.1
27	15:03		x	2	107	RE	39.0	49.5
28	15:07	x		1	109	RZ	33.4	45.3
29	15:13		x	2	111	RZ	26.4	39.5
30	15:24	x		1	92	IC	28.6	36.9
31	15:36		x	2	92	IC	29.9	38.6
32	15:37	x		1	79	GZ	31.3	38.6

	Anzahl			
tot	0	LA _{eq,tot}	32.1	43.0
Gl. 1	13	LA _{eq,Gl.1}	32.0	42.8
Gl. 1 PZ	9	LA _{eq,Gl.1,PZ}	32.4	43.9
Gl. 1 GZ	4	LA _{eq,Gl.1,GZ}	31.4	40.2
Gl. 2	11	LA _{eq,Gl.2}	32.2	43.3
Gl. 2 PZ	9	LA _{eq,Gl.2,PZ}	32.0	42.3
Gl. 2 GZ	2	LA _{eq,Gl.2,GZ}	34.2	48.4
Max		LA _{eq,tot}	39.0	51.2
Gl. 1		LA _{eq,Gl.1}	37.3	51.1
Gl. 1 PZ		LA _{eq,Gl.1,PZ}	37.3	51.1
Gl. 1 GZ		LA _{eq,Gl.1,GZ}	33.6	43.2
Gl. 2		LA _{eq,Gl.2}	39.0	51.2
Gl. 2 PZ		LA _{eq,Gl.2,PZ}	39.0	49.5
Gl. 2 GZ		LA _{eq,Gl.2,GZ}	35.7	51.2

Nachhermessung vom 13. August 2020

Projektname BAFU Injektionskörper Erschütterungen / Körperschall					Auftrag N° 20.04201		Trombik Ingenieure AG Limmattalstrasse 344 CH - 8049 Zürich	
E- und KS-Messungen								
MESSAUSWERTUNG VOM 13.08.2020					Name: AE		Seite 1	
Zug Nr.	Uhr- zeit	Zug Richtung N S		Gleis Nr. Nr.	Geschw. keit km/h	Zugs- typ	Schlafzi. LA _{eq} (EG) dBA (bis 200 Hz)	Büro LA _{eq} (1.OG) dBA (bis 200 Hz)
1	15:46	x		1	110	RZ	28.7	34.6
2	15:51		x	2	109	RZ	28.2	36.8
3	15:55	x		1	97	RE	30.7	33.7
4	16:03		x	2	91	RE	25.5	30.4
5	16:07	x		1	104	RZ	27.0	32.6
6	16:16		x	2	107	RZ	27.5	34.7
7	16:25	x		1	92	IC	29.1	33.9
8	16:28		x	2	89	GZ	33.6	38.5
9	16:33	x		1	68	GZ	26.5	32.3
14	16:57	x		1	89	RE	28.6	32.0
15	17:03		x	2	94	RE	29.2	32.7
16	17:10	x		1	83	RZ	32.7	35.2
18	17:16		x	2	89	GZ	28.5	37.0
19	17:26	x		1	113	IC	31.3	43.5
20	17:39		x	2	100	IC	30.0	37.6
23	17:59	x		1	107	RE	35.1	48.7
24	18:03		x	2	109	RE	30.7	44.5
25	18:08	x		1	87	RZ	30.4	36.6
26	18:14		x	2	87	RZ	23.4	29.2
27	18:23	x		1	87	IC	28.9	32.0
28	18:30		x	2	92	GZ	24.2	30.4
30	18:38		x	2	94	IC	27.3	30.8
31	18:47	x		1	94	RZ	28.4	34.9
32	18:53		x	2	109	RZ	28.6	39.2
					Anzahl			
tot					0	LA _{eq,tot}	29.6	38.9
Gl. 1					12	LA _{eq,Gl.1}	30.3	40.0
Gl. 1 PZ					11	LA _{eq,Gl.1,PZ}	30.7	40.5
Gl. 1 GZ					1	LA _{eq,Gl.1,GZ}	26.5	32.3
Gl. 2					12	LA _{eq,Gl.2}	28.5	37.2
Gl. 2 PZ					9	LA _{eq,Gl.2,PZ}	28.3	37.4
Gl. 2 GZ					3	LA _{eq,Gl.2,GZ}	29.3	36.1
Max						LA _{eq,tot}	35.1	48.7
Gl. 1						LA _{eq,Gl.1}	35.1	48.7
Gl. 1 PZ						LA _{eq,Gl.1,PZ}	35.1	48.7
Gl. 1 GZ						LA _{eq,Gl.1,GZ}	26.5	32.3
Gl. 2						LA _{eq,Gl.2}	33.6	44.5
Gl. 2 PZ						LA _{eq,Gl.2,PZ}	30.7	44.5
Gl. 2 GZ						LA _{eq,Gl.2,GZ}	33.6	38.5

Differenzen Nachher- zu Vorhermessung

Differenz Nachher- zu Vorhermessung

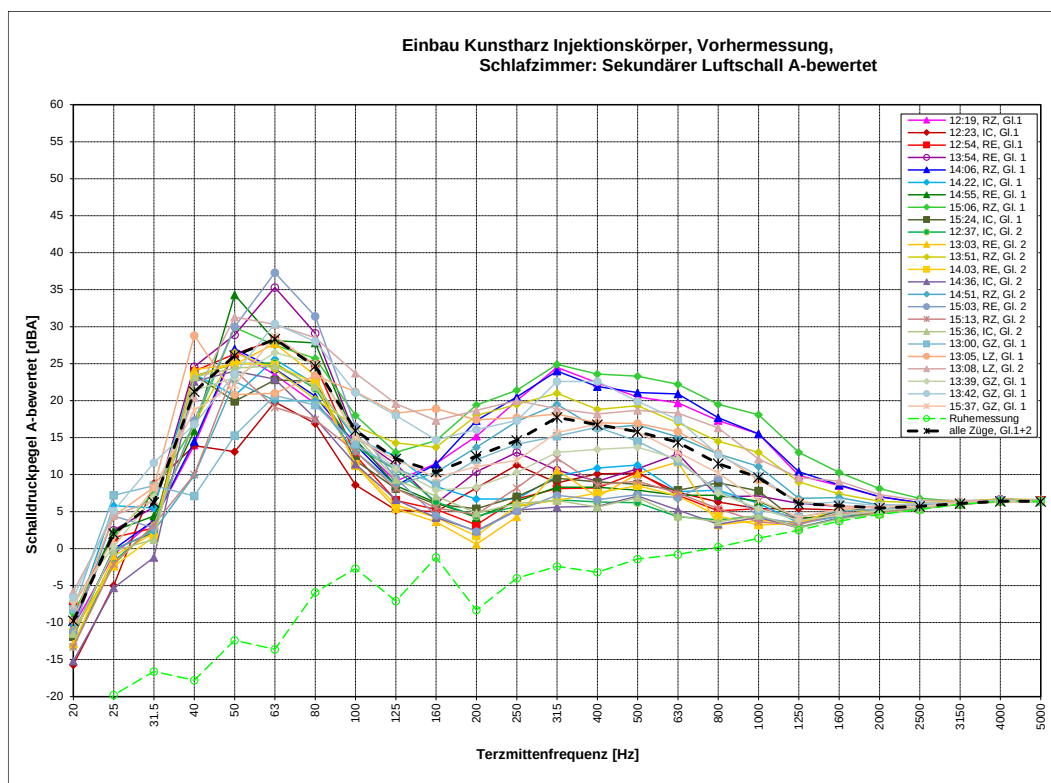
tot		$LA_{eq,tot}$	-2.5	-4.1
Gl. 1		$LA_{eq,Gl.1}$	-1.7	-2.8
Gl. 1 PZ		$LA_{eq,Gl.1,PZ}$	-1.7	-3.4
Gl. 1 GZ		$LA_{eq,Gl.1,GZ}$	-4.9	-7.9
Gl. 2		$LA_{eq,Gl.2}$	-3.7	-6.2
Gl. 2 PZ		$LA_{eq,Gl.2,PZ}$	-3.7	-4.9
Gl. 2 GZ		$LA_{eq,Gl.2,GZ}$	-4.9	-12.2
Max		$LA_{eq,tot}$	-3.8	-2.5
Gl. 1		$LA_{eq,Gl.1}$	-2.1	-2.4
Gl. 1 PZ		$LA_{eq,Gl.1,PZ}$	-2.1	-2.4
Gl. 1 GZ		$LA_{eq,Gl.1,GZ}$	-7.1	-10.9
Gl. 2		$LA_{eq,Gl.2}$	-5.3	-6.7
Gl. 2 PZ		$LA_{eq,Gl.2,PZ}$	-8.2	-5.0
Gl. 2 GZ		$LA_{eq,Gl.2,GZ}$	-2.1	-12.7

Beilage 8:

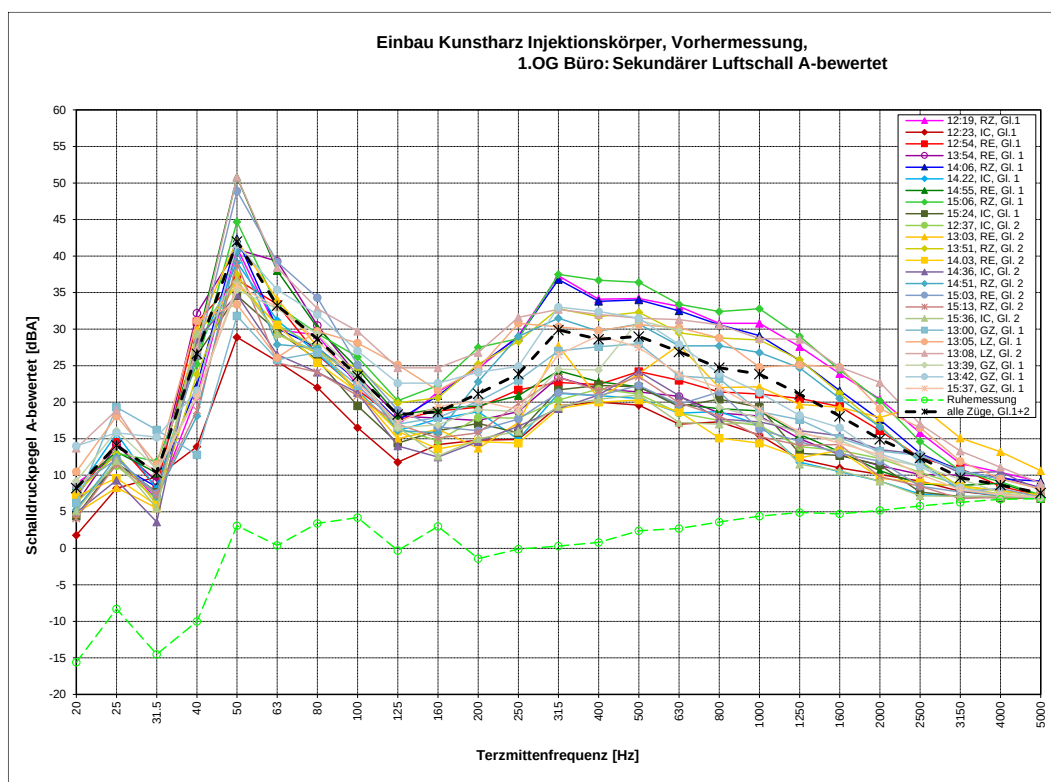
Körperschallmessungen: Terzbandspektren

(Total 2 Seiten)

Beilage 8.1: Terzbandspektren Schallmessung Vorhermessung

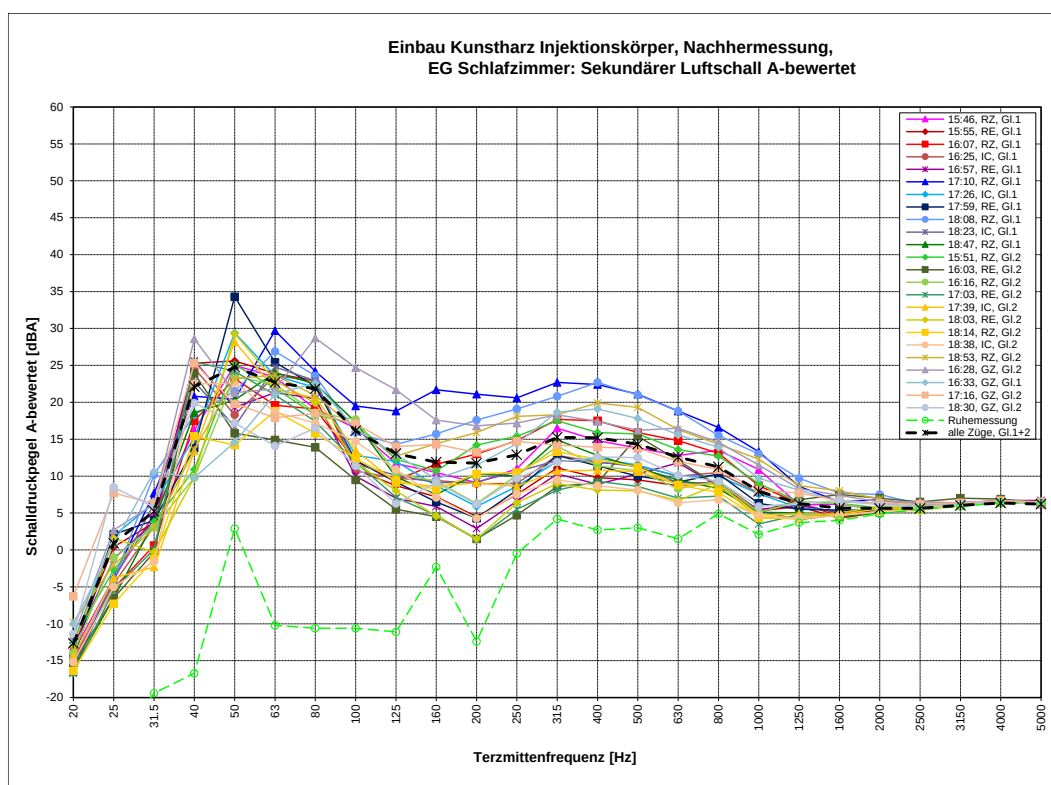


Terzbandspektren A-bewertet der Schallmessungen im EG Schlafzimmer

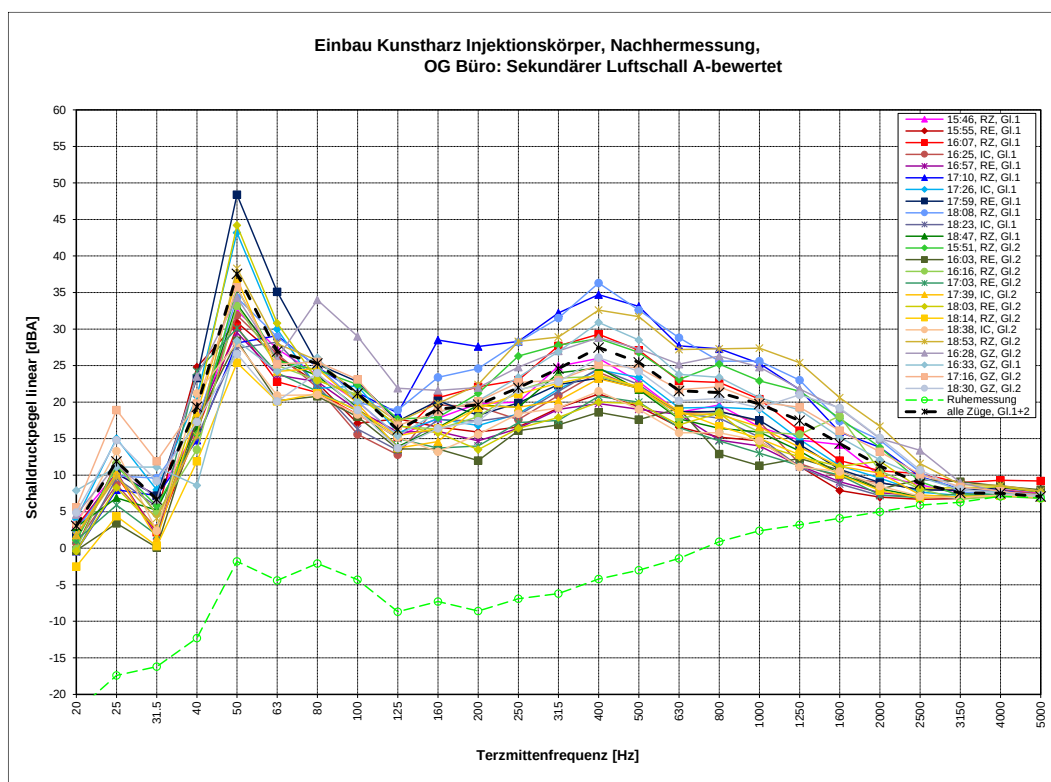


Terzbandspektren A-bewertet der Schallmessungen im 1.OG Büro

Beilage 8.2: Terzbandspektren Schallmessung Nachhermessung



Terzbandspektren A-bewertet der Schallmessungen im EG Schlafzimmer



Terzbandspektren A-bewertet der Schallmessungen im 1.OG Büro

Beilage 9:

Kurzbeschreibung Messgeräte

(Total 1 Seite)

Messeinrichtung für Erschütterungsmessungen

Erschütterungsmessung

System MEDA RedSens (drahtloses Übertragungssystem):

- Schwingungsmesser 4x Beschleunigungsaufnehmer PCB 625 B02
Empfindlichkeit 500 mV/g
Frequenzbereich 0.5 Hz bis 2 kHz
Messbereich +/- 10g
- Datenträger Laptop mit Software MEDA zur direkten Signalaufzeichnung auf Harddisk, 9-kanalig für Schwingungs- und Schallmessungen
verwendete Aufnahmebandbreite 1 - 500 Hz,
Aufnahmezeitfenster 40 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
angewendete Zeitfenster für Zugsvorbeifahrten 6.4 s, 12.8 s und 25.6 s je nach Zuglänge

Schallmessung

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

- 1 oder 2 Mikrophone Klasse 1
- Akustischer Kalibrator B&K 4230
- 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: Interner Harddisk (> 4 GB)
- Signalauswertung mit Softwarepaket Norsonic NorReview für die Nachverarbeitung und die Präsentation von Lärmessdaten

Beilage 10:

Grundlagen / Theorie:

- Berechnung der Erschütterungsimmissionen**
- Schallpegel dB(A): Vergleichsgeräusche**

(Total 2 Seiten)

Berechnung der Erschütterungsimmissionen (DIN 4150-2)

Objektspezifische Zusammenfassung (nicht näher bezeichnete Abkürzungen: siehe Norm)

Erschütterungsimmissionen durch Schienenverkehr

Bei der Anwendung der DIN 4150-2 auf Schienenverkehr wird eine Einteilung der Zugsdurchfahrten in **Schichten „j“** empfohlen. Die Schichtung erfolgt so, dass je Gleis und vorkommender Zugart (Güterzug, Reisezug, ...) eine Schicht gebildet wird. Diese Schichten werden je durch einen **Taktmaximal-Effektivwert** $KB_{FTm,j}$ beschrieben:

$$KB_{FTm,j} = \sqrt{\frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{M_j} KB_{FTi,j}^2}$$

Dabei ist:

M_j die Anzahl der durch die Schicht j während der Beurteilungszeit belegten Takte

Der $KB_{FTm,j}$ -Wert kann als schichttypische Grösse (Mittelwert) angesehen werden: eine typische Zugsdurchfahrt mit einem bestimmten Gleisabstand. Sie sagt aber nichts über die Anzahl der Zugsdurchfahrten aus. Liegt eine bestimmte Anzahl Messungen Z_j vor (mind. 5 Messungen pro Schicht j), so kann er folgenderweise bestimmt werden:

$$KB_{FTm,j} = \sqrt{\frac{1}{Z_j} \sum_{i=1}^{Z_j} KB_{FTi,j}^2}$$

Die **Beurteilungs-Schwingstärke** KB_{FTr} wird alsdann aus diesen Mittelwerten der einzelnen Schichten ($KB_{FTm,j}$) und der Anzahl der während der gesamten Beurteilungszeit in den einzelnen Schichten belegten Takte M_j (Anzahl der in der Beurteilungszeit fahrenden Züge dieser Schicht) nach folgender Gleichung berechnet:

$$KB_{FTr} = \sqrt{\frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^L M_j \cdot KB_{FTm,j}^2}$$

Dabei ist:

N_r die Anzahl der Takte im Beurteilungszeitraum (tags: $N_r = 1920$, nachts: $N_r = 960$)

L die Anzahl der unterschiedlichen Schichten

Schallpegel dB(A): Vergleichsgeräusche

