

Synthesebericht

Weiche Schwellenbesohlung auf offener Strecke zwischen Lengnau und Pieterlen

Entwurf zur Vernehmlassung

Autoren: Peter Balmer ^{a)}, Yves Brechbühl ^{a)}, Roger Müller ^{b)}

^{a)} I-PJ-NEP-UMW, Zentralstrasse 1, 6002 Luzern

^{b)} I-AT-IU-UMW, Mittelstrasse 43, 3000 Bern 65



Inhaltsverzeichnis

1. ABSTRACT	4
2. AUSGANGSLAGE	5
2.1. Auftrag	5
2.2. Teststrecke	5
3. VORGEHENSWEISE	7
3.1. Untersuchungen und Dokumentation	7
3.2. Lage der Messpunkte	9
3.3. Umgang mit grossen Datenmengen	12
4. RESULTATE UND AUSWERTUNG	13
4.1. v_{RMS} Werte	13
4.2. Terzbanz-Spektren	25
4.3. Fahrbahntechnische Untersuchungen	42
4.4. Aussenlärmmessungen	47
4.5. Geophysikalische Untersuchungen	49
5. INTERPRETATION UND DISKUSSION	50
5.1. Vergleich mit Prattle	50
5.2. Aussenlärmmessungen	50
6. SCHLUSSFOLGERUNGEN	51
7. LITERATUR	52
8. ANLAGEN	53

1. Abstract

Im Herbst 2011 haben die SBB im Auftrag des Bundesrats auf dem Abschnitt Lengnau – Pieterlen eine Teststrecke realisiert, um den Einsatz von Schwellenbesohlungen als Massnahme zum Schutz vor Erschütterungen zu untersuchen. Im vorliegenden Synthesebericht sind die Ergebnisse einer vertieften Auswertung zu verschiedenen Messreihen zusammengefasst.

Die Auswertungen haben gezeigt, dass durch den Einbau von Schwellenbesohlungen eine Reduktion der Erschütterungen festgestellt werden kann. Die Reduktion beläuft sich bezogen auf alle Zugskategorien und gemessen an den v_{RMS} Werten je nach Auswertungsmethode auf zwischen 15% - 45% bzw. 8% - 39% (Normierung mit Modell). Die durchschnittliche Reduktion in dBA für alle Zugskategorien und über den gesamten erfassten Frequenzbereich beträgt rund 5.5 dBA.

Mit Aussenlärmmessungen wurden Hinweise gefunden, dass im Zusammenhang mit dem Einbau von USP eine Zunahme des Lärmpegels im Bereich zwischen 315 und 1250 Hz zu verzeichnen ist, während im Bereich zwischen 25 – 160 Hz eine Abnahme festgestellt wurde. Für den Bereich, in welchem eine Zunahme zu verzeichnen ist, bieten sich bauliche Massnahmen zur Optimierung des Systems an.

2. Ausgangslage

2.1. Auftrag

Der Eisenbahnbetrieb verursacht mechanische Schwingungen im Boden, welche bei bahnnahe Bauten über das Gebäudefundament auf die Wohnräume übertragen werden. In der Nähe von Bahnanlagen werden diese Schwingungen von den Anwohnern in Form von Erschütterungen und/oder abgestrahltem Körperschall oftmals als störend wahrgenommen. Bis heute gibt es jedoch keine kostengünstigen und wirksamen Schutzmassnahmen, um derartige störende Immissionen zu vermeiden. Aufgrund dessen ist die SBB vom Bund beauftragt worden, entsprechende Schutzmassnahmen zu entwickeln. Als Massnahme mit den grössten Erfolgsaussichten wird eine Konstruktion betrachtet, bei welcher die Schwellen mit einer Gummisohle ausgerüstet werden. Diese Massnahme wird als „Schwellenbesohlung“ oder englisch „under sleeper pad“ (USP) bezeichnet.

Im Herbst 2011 haben die SBB auf dem Abschnitt Lengnau – Pieterlen eine Teststrecke realisiert. Auf dieser Strecke wurden im April 2012 Messungen hinsichtlich der erschütterungsdämpfenden Eigenschaften durchgeführt, im April 2013 wurden die Auswirkungen auf den Aussenlärm untersucht. Oberbaumessungen wurden von 2012-2013 durchgeführt.

2.2. Teststrecke

Die USP Teststrecke Lengnau (LEN) – Pieterlen (PIE) liegt auf der Jura-Südfuss-Linie 410 zwischen Solothurn und Biel. Sie wird von Intercity-, ICN-, Regional- und Güterzügen befahren. Die Belastung der Strecke ist vergleichsweise hoch; sie betrug im Jahr 2010 rund 58'000 GBRT pro Tag und Gleis. Die Höchstgeschwindigkeit der Reihe R beträgt 130 km/h und diejenige der Reihe N 140 km/h. Die Versuchsabschnitte liegen einerseits auf einer Geraden und andererseits in einer Kurve mit einem Radius von 887 m.



Abbildung 1. Orthofoto mit Lage der Teststrecke EKS. Die Schwellenbesohlung wurde beim südlichen Gleis eingebaut, das nördliche Gleis im bezeichneten Abschnitt wurde gleichzeitig mit der Teststrecke erneuert. In Richtung links folgt der Bahnhof Pieterlen, rechts der Bahnhof Lengnau (beide Bahnhöfe liegen ausserhalb des abgebildeten Ausschnitts). Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie 2004.

Im Bereich des Referenzabschnitts erfolgte der Einbau des Oberbaus entsprechend dem aktuellen Stand der Technik bei der SBB, nämlich Betonschwellen B91 mit einer steifen Schienenzwischenlage (Zw661-6, $c_{stat}=800\text{kN/mm}$) und ohne USP. Sowohl Wirk- als auch Übergangsbereiche wurden mit weichen Schienenzwischenlagen (Zw700a, $c_{stat}=100\text{ kN/mm}$) versehen. Die Strecke wurde mit der Schienenbefestigung W14 von Vossloh ausgerüstet. Das Schienenprofil ist SBB VI (UIC 60). Eine schematische Darstellung der Teststrecke ist in Abbildung 2 gezeigt, detailliertere Angaben sind dem Situationsplan Lengnau (LEN) – Pieterlen (PIE) mit Massstab 1:1000 zu entnehmen. Der Situationsplan ist auf dem **beigelegten Datenträger** abgelegt.

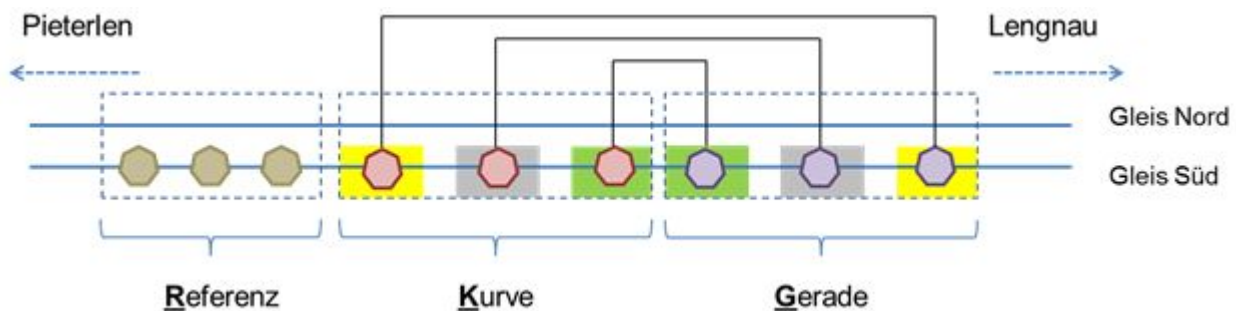


Abbildung 2. Schematische Darstellung der Teststrecke EKS. Sowohl im Bereich der Kurve (Radius 887 m, rot eingefärbte Sechsecke) als auch im Bereich der Geraden (violett eingefärbte Sechsecke) sind auf drei Teilabschnitten verschiedene Schwellenbesohlungs-Produkte eingebaut (Tiflex, gelb hinterlegt; CDM, grau hinterlegt; Getzner, grün hinterlegt und weiche Schienenzwischenlagen (Zw700a)). Im Referenz-Abschnitt sind Schwellen ohne Besohlung mit harten Schienenzwischenlagen (Zw661-6) eingebaut.

3. Vorgehensweise

3.1. Untersuchungen und Dokumentation

3.1.1. Erschütterungsmessungen

Die Firma Ziegler Consultants in Zürich wurde beauftragt, auf der Teststrecke im Abschnitt Pieterlen - Lengnau Messungen durchzuführen, um die erschütterungsdämpfenden Eigenschaften der Schwellenbesohlung messtechnisch zu erfassen. Die Messanordnung, die Messstandorte sowie eine Übersicht zu den Resultaten sind im Bericht [1] „Schwellenbesohlung auf offener Strecke – Messungen Pieterlen“ (Ziegler Consultants, Zürich, 25.07.2012) dargestellt. Der Messbericht ist als Anhang 1 Teil dieses Berichts.

Der Beschrieb des Messkonzepts „Erschütterungen“ und „Aussenlärm“ vom 01.02.2012 (SBB Infrastruktur, Netzprojekte, Kompetenzzentrum Umwelt und Erschütterungen, Luzern) enthält weitere Angaben über Messgrössen, Messanordnung sowie die Verteilung der Messstellen. Das Messkonzept ist als Anhang 2 Teil dieses Berichts.

Angesichts der Bedeutung der Resultate wurden die Messwerte für den vorliegenden Bericht vertieft ausgewertet. Die wichtigsten Ergebnisse hinsichtlich der erschütterungsdämpfenden Eigenschaften sind in der vorliegenden Teilauswertung zusammengestellt, eine Dokumentation sämtlicher Resultate ist auf dem **beigelegten Datenträger** zu finden. Eine Gegenüberstellung mit den Ergebnissen aus dem Bericht „Schwellenbesohlung auf offener Strecke – Messungen Pieterlen“ erfolgt jeweils in der Diskussion der Resultate aus der vertieften Auswertung.

3.1.2. Lärmmessungen

Die Firma Planteam GHS in Sempach-Station wurde beauftragt, Lärmmessungen auf der Teststrecke im Abschnitt Pieterlen – Lengnau durchzuführen, um die Auswirkungen der vom Standardoberbau abweichenden Komponenten auf den Aussenlärm zu erfassen. Die Messanordnung, die Messstandorte sowie eine Übersicht zu den Resultaten sind im Bericht [2] „Aussenlärm-Messungen - Messbericht“ (Planteam GHS, Sempach-Station, 25.08.2013) dargestellt. Der Messbericht ist als **Anhang 3** Teil dieses Berichts.

Der Beschrieb des Messkonzepts „Aussenlärm“ vom 07.03.2013 (SBB Infrastruktur, Netzprojekte, Kompetenzzentrum Umwelt und Erschütterungen, Luzern) bietet zusätzliche Information zu den Messgrössen, der Messanordnung sowie der Verteilung der Messstellen. Das Messkonzept ist als Anhang 4 Teil dieses Berichts.

3.1.3. Fahrbahntechnische Untersuchungen

Seit dem Jahr 2005 sind sogenannte Schwellenbesohlungen (USP) im SBB-Netz bei verschiedenen Teststrecken und –weichen in Betriebserprobung. Erste Erkenntnisse aus diesen Versuchen haben zu weiteren Optimierungen der USP-Materialien und -Formen sowie zur Verbesserung der Anbindung der USP an die Schwellen geführt.

In den letzten drei Jahren wurden umfangreiche Labortests als Vorbereitung für den Einbau in der vorliegenden Teststrecke durchgeführt. Es liegen also detaillierte Ergebnisse über die verschiedenen USP-Materialien vor. Sowohl bei den Materialeigenschaften (wie Steifigkeit resp. Bettungsmodul, Härte etc.) als auch bei den Dauerschwingversuchen (sog. Vibrogir-Tests) im eigens dafür eingerichteten SNCF Labor in Paris haben die nun vorliegenden neuen USP-Materialien sehr gute Resultate gezeigt.

Bei der EKS-Teststrecke (EKS: Erschütterung und Körperschall) kommen weiche USP zum Einsatz. Daher ist es wichtig, Übergangsbereiche vom normalen Gleis mit unbesohlenen Schwellen

aufs Versuchsgleis mit Schwellen mit weichen USP einzubauen. Dies geschieht mittels besohlter Schwellen mit steifen USP. Um die Ergebnisse vergleichen zu können, wird der Referenzabschnitt am Anfang und am Ende der Teststrecke mit der heutigen SBB-Standardausführung verglichen.

Folgende Messungen (s. Bericht [3]) wurden an der USP-Teststrecke Lengnau-Pieterlen durchgeführt:

1. Einmalige Messung der **Gleiseinsenkung** (vertikale Gleissteifigkeit) über die gesamte Teststrecke.
2. Messung der **Gleissetzung** in den Abschnitten 11 bis 16 über einen Zeitraum von zwei Jahren mittels Präzisionsnivellement. Die erste Messung erfolgt direkt nach dem Umbau der Teststrecke, diese Messung dient als Referenzmessung. Es folgen weitere Messungen nach 2, 4, 6, 9, 12 und 24 Monaten ab Umbau.
3. Einmalige Messung der **Querverschiebewiderstände** der besohlenen und unbesohlenen Beton-schwellen. Bei Bedarf sind weitere Messungen vorzusehen.
4. Einmalige Messung der **Schwingungen** an den Schwellen in den Abschnitten 11 bis 16 im Frühjahr 2012. Bei Bedarf sind die Messungen nach 12, resp. 24 Monaten zu wiederholen.

3.1.4. Weitere Messungen

Neben den vorgängig beschriebenen Untersuchungen wurden weitere Messgrößen erhoben, um das System „Weiche Schwellenbesohlung auf offener Strecke“ umfassend zu charakterisieren:

- (i) Ausbreitung von Erschütterungsimpulsen:

Die BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung) mit Sitz in Berlin hat im Rahmen des internationalen RIVAS Projekts (Railway Induced Vibration Abatement Solutions, <http://www.rivas-project.eu>) geophysikalische Messungen entlang bestimmter Bereiche der Teststrecke Pieterlen-Lengnau durchgeführt. Die Messungen wurden im August 2013 abgeschlossen, der Messbericht mit exakten Angaben zur Lage der Messstellen liegt gegenwärtig jedoch noch nicht vor.

- (ii) Messungen der statischen und dynamischen Kennwerte im Labor der drei USP-Typen bei der BAM.

- (iii) Track Decay Rate (TDR):

Die Firma Müller BBM Schweiz in Basel hat im Verlauf des Julis 2013 die für die einzelnen Teilabschnitte (vergleiche Abbildung 2. Schematische Darstellung der Teststrecke EKS) ermittelt. Aus diesen Messdaten lassen sich Rückschlüsse zum Schwingverhalten der Schiene gewinnen. Der Messbericht ist als Anhang 5 Teil dieses Berichts.

- (iv) Schienenrauheit:

Zwischen dem 01.07.2013 und dem 04.07.2013 wurde durch die Firma Müller BBM Schweiz zudem die Schienenrauheit für die einzelnen Teilabschnitte (vergleiche Abbildung 2. Schematische Darstellung der Teststrecke EKS) ermittelt. Diese Messdaten lassen Rückschlüsse auf die Abnutzung der Schienen im Bereich mit Schwellenbesohlung im Vergleich zum Referenzabschnitt zu. Die Schienenrauheit wirkt sich auf Lärm- und Erschütterungsemissionen aus. Der Messbericht ist als Anhang 6 Teil dieses Berichts.

3.2. Lage der Messpunkte

3.2.1. Erschütterungsmessungen

Die Lage der Messpunkte für die Erschütterungsmessungen wurde vor Ort dokumentiert und in den Situationsplan Lengnau (LEN) – Pieterlen (PIE) übertragen, welcher als **separate Datei auf dem beigelegten Datenträger** abgelegt ist. Insgesamt wurden im Verlauf des ersten Messtages an 19 Stellen die Erschütterungsimpulse von durchfahrenden Zügen in einer Distanz von 8 m zum südlichen Gleis (mit USP) registriert. An weiteren 8 Stellen wurden die Zugsdurchfahrten in 16 m (4 Stellen) bzw. 32 m (4 Stellen) erfasst. Im vorliegenden Bericht sind jedoch lediglich die Messwerte, welche in 8 m Entfernung vom südlichen Gleis aufgezeichnet wurden, vertieft ausgewertet und dargestellt. Sämtliche Aufnehmer wurden nördlich der Strecke platziert.

Für die in diesem Bericht vertiefte Auswertung der Messwerte aus den Erschütterungsmessungen wurden zunächst die einzelnen Messpunkte kritisch evaluiert. Ausgeschlossen wurden von Vornherein die Messwerte der Messpunkte 8 und 23, da die entsprechenden Messgeräte an diesen Stellen nicht wie an den übrigen Stellen aufgebaut worden sind. Die Vergleichbarkeit der Messwerte ist somit aufgrund des unterschiedlichen Versuchsaufbaus nicht gegeben, was sich mit den Messwerten auch belegen lässt.

Weiter wurden bauliche Elemente im Ober- und Unterbau sowie in der unmittelbaren Umgebung der einzelnen Messpunkte, welche die Ausbreitung von Erschütterungsimpulsen im Untergrund allenfalls zu beeinflussen vermögen, festgehalten.

Eine Übersicht zur Lage der Messpunkte, deren Bezeichnung sowie zu baulichen Elemente im Ober- und Unterbau in der unmittelbaren Umgebung und Hinweisen zur Verwendung der Messresultate sind nachfolgend in Tabelle 3.2.1.1 zusammengestellt.

Tabelle 3.2.1.1. Zusammenstellung aller Messpunkte im Abstand von 8 m zum Gleis Süd (Gleis 2). Die Nummerierung der Messpunkte (MP) wurde aus dem Bericht [1] übernommen und mit Angaben zur Lage innerhalb der Teststrecke, Bemerkungen zu baulichen sowie messtechnischen Aspekten, welche hinsichtlich der Messwerte relevant sein könnten und einer Wertung hinsichtlich der Verwendung im Rahmen der Auswertung.

	MP	USP	Lage (km)	Bemerkungen	Wertung
Referenzabschnitt	1	keine	89.484	unmittelbar am Böschungsfuss, direkt hinter Fahrleitungsmast-Fundament	Verwendung zu prüfen
	2	keine	89.457		
	3	keine	89.430	unmittelbar am Böschungsfuss, direkt neben offenem Entwässerungsgraben (Nennweite 0.3 m), in 1 m Abstand zu Fahrleitungsmast-Fundament	Verwendung zu prüfen
Kurve	4	Tiflex	89.321		
	5	Tiflex	89.295	unmittelbar am Böschungsfuss, direkt neben/auf Normschacht (0.6 m) zu Transportleitungen Meteorwasser (0.2m)	Verwendung zu prüfen
	6	Tiflex	89.268	unmittelbar am Böschungsfuss, in 4 m Abstand zu Fahrleitungsmast-Fundament	
	7	CDM	89.204	In Ebene	
	8	CDM	89.181	auf Mastfundament	nicht verwenden
	9	CDM	89.168	In Ebene, in 1 m Abstand zu Fahrleitungsmast-Fundament	
	12	Getzner	89.097	Böschung, direkt bei Fahrleitungsmast-Fundament	Verwendung zu prüfen
	15	Getzner	89.061	In der Böschung	
Gerade	18	Getzner	88.922	Unmittelbar nebe/oberhalb Abwasserleitung (Betonrohr Nennweite 600 mm)	Verwendung zu prüfen
	21	Getzner	88.894		
	22	CDM	88.827	Direkt hinter/auf Kabelverteiler (anschliessend Kabelschacht Nennweite 1 m)	Verwendung zu prüfen
	23	CDM	88.807	auf Mastfundament	nicht verwenden
	24	CDM	88.791		
	25	Tiflex	88.729		
	26	Tiflex	88.701		
	27	Tiflex	88.674	Direkt auf FS Anker-Fundament	Verwendung zu prüfen

Eine vorhergehende Betrachtung (siehe z.B. Bericht [1]) hat gezeigt, dass die Resultate für den östlichen Referenzabschnitt („Referenz O“) einerseits mit einer verhältnismässig grossen Streuung behaftet sind, und andererseits über die 3 Messpunkte (MP 28, 29 und 30) hinweg in hohem Mass unterschiedlich sind. Die Ursachen dafür können vielfältig sein (z.B. unterschiedliche Eigenschaften des Untergrunds im betreffenden Testabschnitt, Fremdeinwirkungen). Die Wiederholungsmessungen am nachfolgenden Tag zeigen ein ähnliches Bild. Im Hinblick auf die Normierung der Datensätze sowie für die Auswertung der Messergebnisse hinsichtlich der Wirkung von USP werden diese Messpunkte deshalb nicht in die Analyse miteinbezogen. Zu diesem Schluss kommt auch eine parallele Auswertung im Messbericht [1].

3.2.2. Lärmmessungen

Im Referenzabschnitt wurden drei Messpunkte vorgesehen, um die Variabilität der Lärmmessungen bestimmen zu können. Die einzelnen Wirkungsbereiche wurden mit je einem Messpunkt erfasst. Die exakte Lage der einzelnen Messpunkte wurde festgelegt und dokumentiert. Eine entsprechen-

de Übersicht ist basierend auf den Angaben im Bericht [2] nachfolgend in Tabelle 3.2.2.1 zusammengestellt.

Sämtliche erfassten Zugsdurchfahrten wurden über alle 9 Mikrofone quasi simultan erfasst. Dies ist deshalb von grosser Bedeutung, weil Unterschiede beim Rollmaterial zweier Zugkompositionen vom gleichen Typ zu signifikant unterschiedlichen Lärmemissionen führen können. Zudem besteht im Allgemeinen auch ein direkter Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit einer bestimmten Zugkomposition und dem gemessenen Lärmpegel. Mit der simultanen Erfassung der Lärmemissionen einer Zugkomposition über die gesamte Teststrecke können somit allfällige Unterschiede innerhalb Kompositionen gleichen Typs mit den Faktoren Rollmaterial und Geschwindigkeit erklärt werden.

Tabelle 3.2.2.1 Übersicht zur Lage und Bezeichnung der Mikrofone, welche für die Lärmmessungen aufgebaut wurden. Die Mikrofone in den einzelnen Abschnitten wurden jeweils in 7,5 Meter Entfernung von der Achse des südlichen Gleises und 1,2 Meter über der Schienenoberkante positioniert.

	MP	USP	Lage	Höhe Mikrofon über Boden
Referenzabschnitt	R1	keine	7.5 m ab Gleismitte und 4.71 m ab Mast Nr. 35	0.76 m
	R2	keine	7.5 m ab Gleismitte und 6.98 m ab Schacht	0.63 m
	R3	keine	7.5 m ab Gleismitte und 6.20 m ab Mast Nr. 33	0.67 m
Kurve	K1	Tiflex	7.5 m ab Gleismitte und 14.94 m ab Mast Nr. 25	1.79 m
	K2	CDM	7.5 m ab Gleismitte und 12.29 m ab Mast Nr. 23	1.22 m
	K3	Getzner	7.5 m ab Gleismitte und 6.73 m ab Mast Nr. 15	3.86 m
Gerade	G1	Getzner	7.5 m ab Gleismitte und 23.85 m ab Brückenkante	3.17 m
	G2	CDM	7.5 m ab Gleismitte und 27.35 m ab Mast Nr. 5	3.16 m
	G3	Tiflex	7.5 m ab Gleismitte und 7.34 m ab Mast Nr. 1	4.55 m

3.2.3. Weitere Messungen

Im vorliegenden Bericht wird das Schwergewicht auf die Auswertung der Erschütterungs- sowie Aussenlärmmessungen gelegt. Ausgewählte Ergebnisse der weiteren Messungen fliessen in erster Linie in einzelnen Teilaspekten dieser Auswertung ein. Bezüglich der Lage der Messpunkte der zusätzlich durchgeführten und unter 3.1.3 und 3.1.4 beschriebenen Messungen wird auf die dort erwähnten Messberichte verwiesen.

3.3. Umgang mit grossen Datenmengen

Aufgrund der verhältnismässig hohen Zahl an Messpunkten bei den Erschütterungsmessungen (siehe 3.2.1) und der Zahl an erfassten Zügen resultiert eine grosse Anzahl an Terzband-Spektren und v_{RMS} -Werten. Alleine schon deswegen hat sich die Auswahl von Spektren / v_{RMS} -Werten „typischer Zugdurchfahrten“ als schwierig erwiesen.

Eine Zusammenstellung sämtlicher Terzband-Spektren sowie v_{RMS} -Werte deutet auf signifikante Unterschiede innerhalb der einzelner Zugdurchfahrten hin. Hinsichtlich der Klassifikation von „typischen Zugdurchfahrten“ ist jedoch zu berücksichtigen, dass es a priori nicht einfach zu beurteilen ist, aufgrund welcher Kriterien gewisse Terzband-Spektren beziehungsweise v_{RMS} -Werte im Speziellen und bestimmte Zugdurchfahrten im Allgemeinen als „typisch“ zu klassieren sind. Mangels solcher Kriterien können im Gegenzug auch Ausreisser nicht ohne weiteres eindeutig identifiziert werden. Grund dafür, dass diese Kriterien nicht eindeutig festgelegt werden können, ist die Vielzahl an Einflussgrössen, welche zu Unterschieden zwischen Messwerten führen können:

Aufgrund der Gegenüberstellung sämtlicher Terzband-Spektren sowie v_{RMS} -Werte kann zunächst festgestellt werden, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Messpunkten gross sind. Einflussgrössen, welche zur Erklärung dieser Unterschiede berücksichtigt werden müssen sind naheliegender Weise

- (i) geologische Charakteristika im Boden respektive Untergrund des Oberbaus,
- (ii) Unterschiede im Oberbau
- (iii) bauliche Elemente im Nahbereich von bestimmten Messpunkten,
- (iv) unterschiedliche Ankopplung des Messaufnehmers, und
- (v) Unterschiede in der Durchfahrtsgeschwindigkeit.

In ihrer Gesamtheit begründen diese Einflussgrössen eine gewisse Heterogenität über den Verlauf der Teststrecke. Eine Folge dieser Heterogenität wiederum ist es, dass deswegen sämtliche Datensätze gesichtet werden müssen. Jedoch lassen sich dadurch nicht die oben erwähnten Kriterien „typischer Zugdurchfahrten“ festlegen.

Es können jedoch einerseits Datensätze identifiziert werden, welche sich in unerklärlicher Weise vom Gros der Messwerte abheben, und andererseits können die Werte von einzelnen Messpunkten im Vergleich plausibilisiert werden.

Hinsichtlich von gesicherten Aussagen zur Wirkung der weichen Schwellenbesohlung muss folglich mangels an Kriterien für „typische Zugdurchfahrten“ mit Durchschnittswerten argumentiert werden, welche zu einem gewissen Grad die Streuung der Messwerte abbilden. Dies ist in der nachfolgenden Auswertung zu bedenken, und aus diesem Grund sind die Ergebnisse als Tendenzen zu verstehen.

4. Resultate und Auswertung

4.1. v_{RMS} Werte

4.1.1. Charakterisierung und Bedeutung von v_{RMS} Werten

v_{RMS} Werte sind Leq (RMS) über einzelne Zugvorbeifahrten; damit können Erschütterungsimpulse mittels einer einzigen Zahl abgebildet werden.

mit: RMS: Root Mean Square

v: Schwingungsgeschwindigkeit [mm/s]

Erschütterungen können auch im Frequenzbereich als Terzband-Spekten dargestellt werden, dabei summieren die Terzbänder einen gewissen Frequenzbereich auf (siehe Kapitel 4.2).

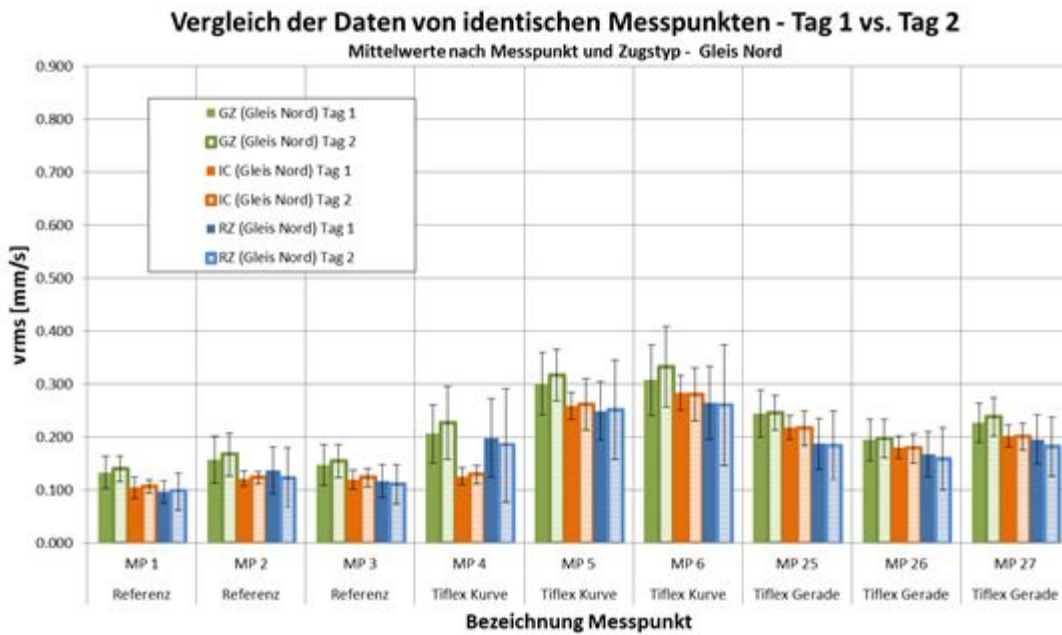
4.1.2. Reproduzierbarkeit der Messungen

Die Erschütterungsmessungen entlang der Teststrecke wurden in zwei Etappen während zwei Tagen erhoben. Dabei wurden vier Abschnitte zweimal erfasst. Die Analyse dieser wiederholt erfassten Abschnitte lässt Rückschlüsse auf die Reproduzierbarkeit der Messungen zu.

In Abbildungen 4.1.2.1 bis 4.1.2.3 sind die v_{rms} -Werte der beiden Messtage gegenübergestellt. Abbildung 4.1.2.1 gibt Aufschluss darüber, wie stark die Messwerte - unter gleichen Bedingungen - an den zwei verschiedenen Tagen variieren. Zudem sind die in Kapitel 3.3 erwähnten Unterschiede zwischen den einzelnen Messpunkten zu erahnen. Abbildung 4.1.2.1a) widerspiegelt dieses Verhalten für die einzelnen Zugstypen und Messpunkte für Gleis Nord. Auf diesem Gleis wurden keine USP eingebaut. Bei den verschiedenen Zugstypen, welche unterschieden wurden, handelt es sich um Intercityzüge, Reisezüge und Güterzüge. In Abbildung 4.1.2.1b) sind die entsprechenden Messdaten für die einzelnen Zugstypen auf Gleis Süd dargestellt. Auf diesem Gleis wurden abschnittsweise USP verschiedener Anbieter eingebaut.

An jedem Messpunkt gilt für alle Zugstypen, dass die Messwerte beider Tage innerhalb der Streuung (Mittelwert \pm Standardabweichung) liegen.

a)



b)

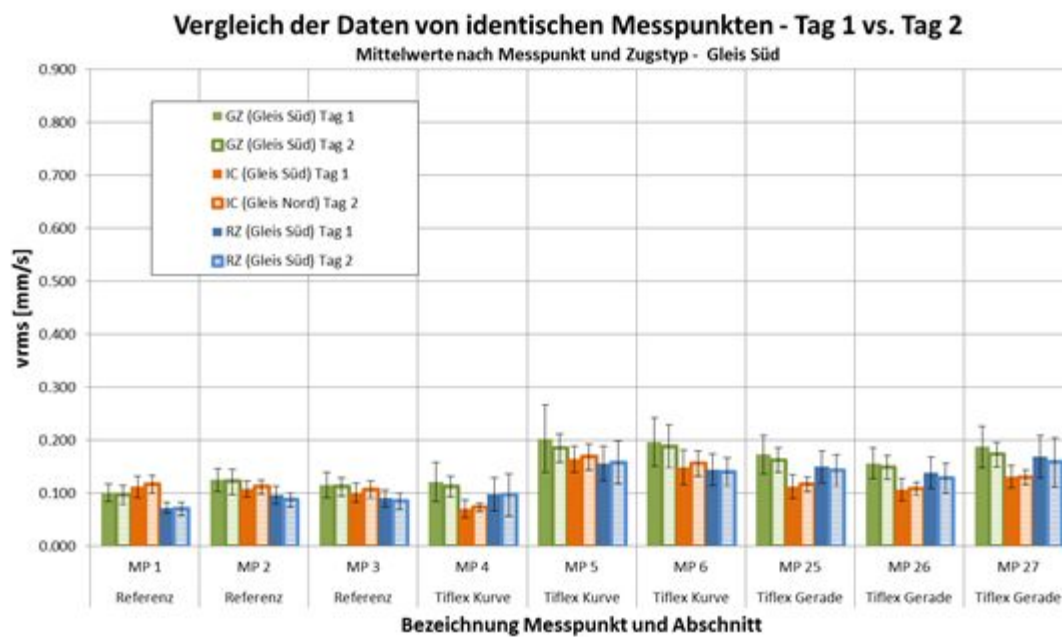
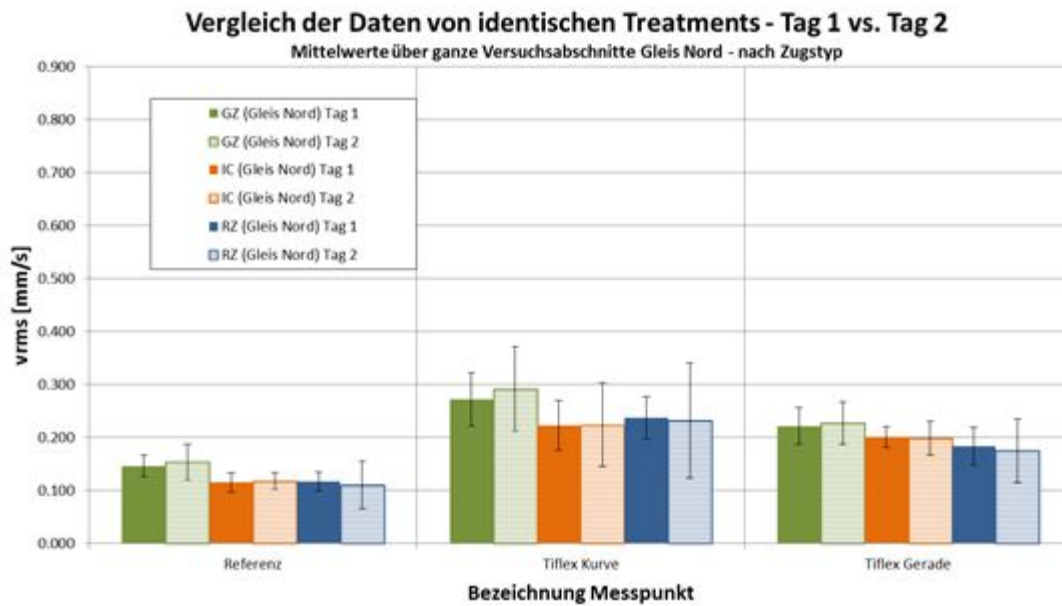


Abbildung 4.1.2.1. Vergleich der aus identischen Messpunkten stammenden Daten, welche an zwei verschiedenen Tagen aufgenommen wurden. Die ausgefüllten Balken bezeichnen jeweils den gemessenen v_{RMS} Wert - ermittelt für drei verschiedene Zugstypen (Güterzug [GZ], Intercity [IC] und Reisezug [RZ] auf Gleis „Nord“, Distanz zum Aufnehmer 4m (a) und Gleis Süd, Distanz zum Aufnehmer 8m (b) am ersten Messtag, die schraffierten Balken beziehen sich auf die entsprechenden Resultate vom zweiten Messtag.

Es kann festgehalten werden, dass die Messkampagne grundsätzlich über die gesamte Messperiode stabile v_{RMS} Werte geliefert hat – die erhobenen Messwerte sind innerhalb diesem Zeitraum (Tag 1 gegenüber Tag 2) reproduzierbar. In Abbildung 4.1.2.2 sind für jedes Treatment (also Mittelung aller Aufnehmer für jeden Testabschnitt mit einem bestimmten Typ der Schwellenbeschlungen) die Daten von jeweils 3 Messpunkten (2 Messpunkte für die Abschnitte „Getzner Kurve“ und

„Getzner Gerade“) für jeden der drei Zugstypen zusammengefasst. Abbildung 4.1.2.2a) zeigt die Daten für Gleis Nord, in Abbildung 4.1.2.2b) sind die entsprechenden Werte für Gleis Süd dargestellt.

a)



b)

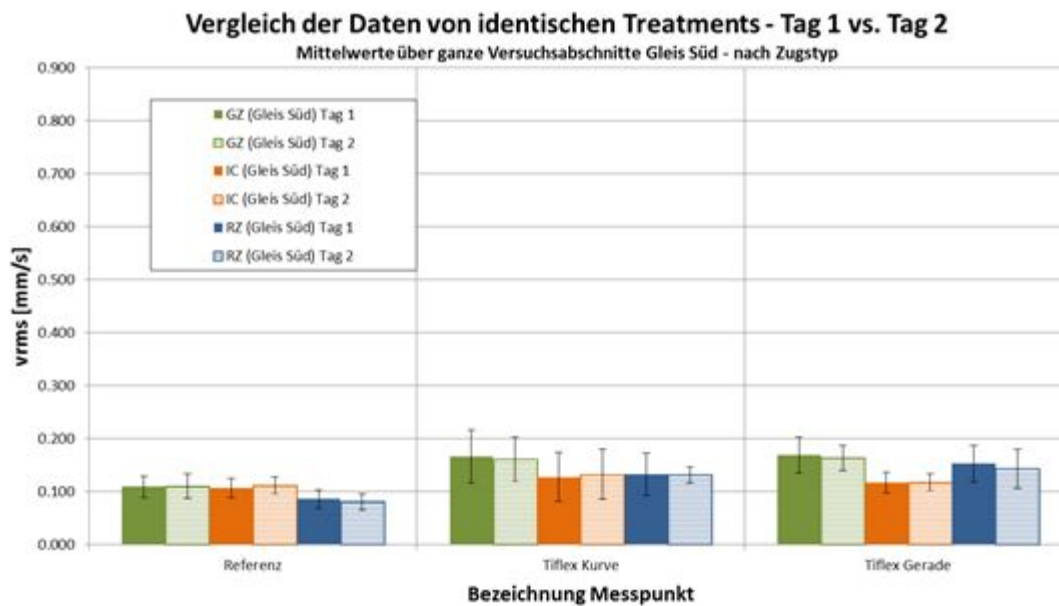


Abbildung 4.1.2.2. Vergleich der Daten für gleiche Treatments nach Zugstyp (Güterzug [GZ], Intercity [IC] und Reisezug [RZ] auf Gleis Nord (a) und Gleis Süd (b), aufgenommen an zwei verschiedenen Tagen. Für jedes Treatment wurden die Daten von jeweils 3 Messpunkten zusammengefasst. Die ausgefüllten Balken bezeichnen jeweils den gemessenen durchschnittlichen vRMS Wert, welche am ersten Tag erhoben wurden, die schraffierten Balken beziehen sich auf die entsprechenden Resultate vom zweiten Messtag.

Es kann festgehalten werden, dass die zusammengefassten Messpunkte in Bezug auf die hier ausgewerteten v_{RMS} Werte untereinander verhältnismässig konsistent sind.

Abbildung 4.1.2.3 schliesslich zeigt die über alle Züge zusammengefassten Daten für die einzelnen Testabschnitte an beiden Messtagen.

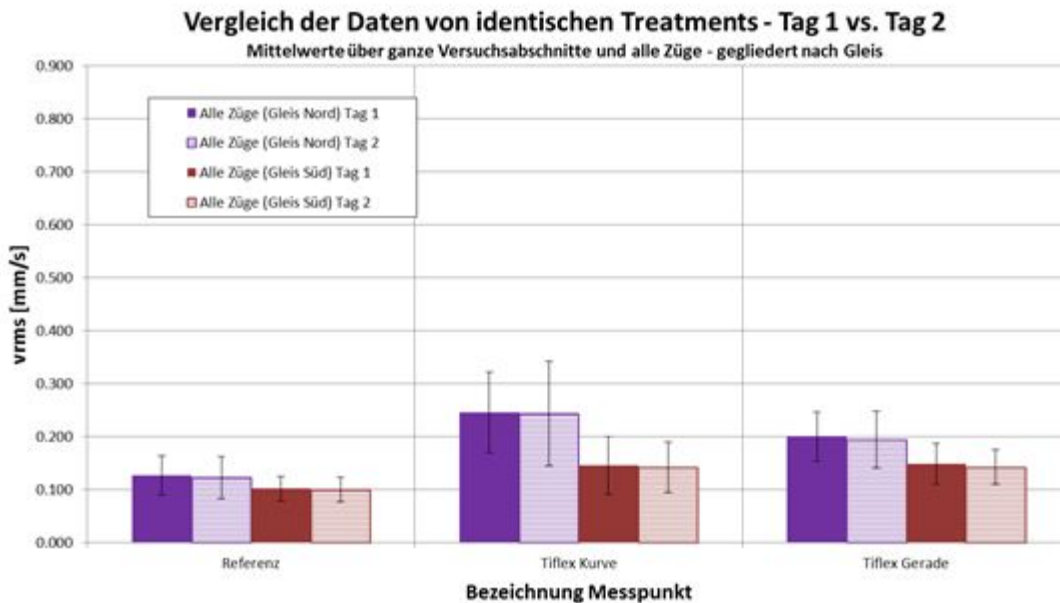


Abbildung 4.1.2.3. Vergleich der Daten für gleiche Treatments auf Gleis Nord und Gleis Süd, aufgenommen an zwei verschiedenen Tagen. Für jedes Treatment wurden die Daten von jeweils 3 Messpunkten zusammengefasst. Die ausgefüllten Balken bezeichnen jeweils den über alle Zugstypen gemittelten v_{RMS} Wert welche am ersten Tag erhoben wurden, die schraffierten Balken beziehen sich auf die entsprechenden Resultate vom zweiten Messtag.

Erwartungsgemäss sind auch die so dargestellten v_{RMS} Werte offensichtlich konsistent und reproduzierbar. Zudem ist aus Abbildungen 4.1.2.1 bis 4.1.2.3 ersichtlich, dass sich die Messwerte der zwei erfassten Gleise mit unterschiedlicher Distanz zum Messgerät im Referenzbereich nur wenig voneinander unterscheiden.

4.1.3. Normalisierung der Daten

Die zentrale Frage der vorliegenden Teilauswertung der v_{RMS} Werte ist die Bestimmung der Wirksamkeit von Schwellenbeschlungen im Pilotprojekt. Eine erste Auswertung der Messwerte hat gezeigt, dass die Wirksamkeit der USP über einen Vergleich von Gleis Nord mit Gleis Süd erfolgen muss (siehe Bericht „Schwellenbeschlungen auf offener Strecke – Messungen Pieterlen, Ziegler Consultants, Zürich, 25.07.2012), da sich einerseits die Messwerte der beiden Referenzabschnitte stark voneinander unterscheiden, und weil sich andererseits zeigen lässt, dass die verschiedenen Versuchsabschnitte bezüglich der Ausbreitung von Erschütterungsimpulsen nicht homogen verhalten. Unabhängig von der Distanz zum Messgerät, dem Zugstyp und ob eine Schwellenbeschlungen eingesetzt wurde (Gleis Süd) oder nicht (Gleis Nord), zeichnet sich über die gesamte Teststrecke hinweg ein nahezu gleicher Verlauf der v_{RMS} Werte ab. Dies ist aus Abbildungen 4.1.2.1 – 4.1.2.3 ersichtlich. Zudem mussten die Messresultate für den östlichen Referenzabschnitt hinsichtlich der Auswertung weggelassen werden, da dies mit einer sehr grossen Streuung behaftet sind (siehe entsprechender Hinweis in Kapitel 3.1.2).

Da die Messungen gezeigt haben, dass auf dem Referenzabschnitt („Referenz“) in Pieterlen die Streuung der einzelnen Datenpunkte sehr klein ist, und da die Messwerte unabhängig vom Zugs-

typ für beide Gleis reproduzierbar sind, können diese Daten hinsichtlich der Normierung eine wertvolle Grundlage bieten.

4.1.3.1. Normierung durch einen konstanten Faktor für alle Zugskategorien

Unter der Annahme, dass sich die Ausbreitung von Erschütterungsimpulsen im Bereich des Trassees gleichförmig verhält (unabhängig vom betrachteten Abschnitt), ist somit der einfachste Normierungsansatz die Addition eines konstanten Faktors:

$$v(r) = v_0 + \text{const.} \tag{1}$$

- r... normierte Distanz zur Erschütterungsquelle
- v(r)... Geschwindigkeit der Erschütterungsschwingungen in der Distanz r
- v₀... Geschwindigkeit der Erschütterungsschwingungen in der Distanz r₀
- const... Abweichung von v (Gleis Nord, westlicher Referenzabschnitt) zu v (Gleis Süd, westlicher Referenzabschnitt)

Der einfachste konstante Faktor entspricht dem Mittelwert der Differenzen der v_{rms}-Werte, welche für jeden Zugstyp für Gleis Nord und Gleis Süd auf dem westlichen Referenzabschnitt (MP 1 – 3) durch Messungen am Messtag 1 festgestellt wurden. Dieser Ansatz führt zu plausiblen Ergebnissen (siehe Abbildung 4, Referenzabschnitt W). Es ist zu beachten, dass die Normierung nach Gleichung (1) zu einem neutralen Ergebnis (d.h. Reduktionsfaktor = 1) im Bereich des Referenzabschnitts W in Pieterlen führt (über alle Zugstypen betrachtet). Dies ist eine mathematische Voraussetzung des gewählten Ansatzes; dieser Ansatz ist deshalb plausibel, weil die Bauweise der beiden Gleise in diesem Abschnitt identisch ist.

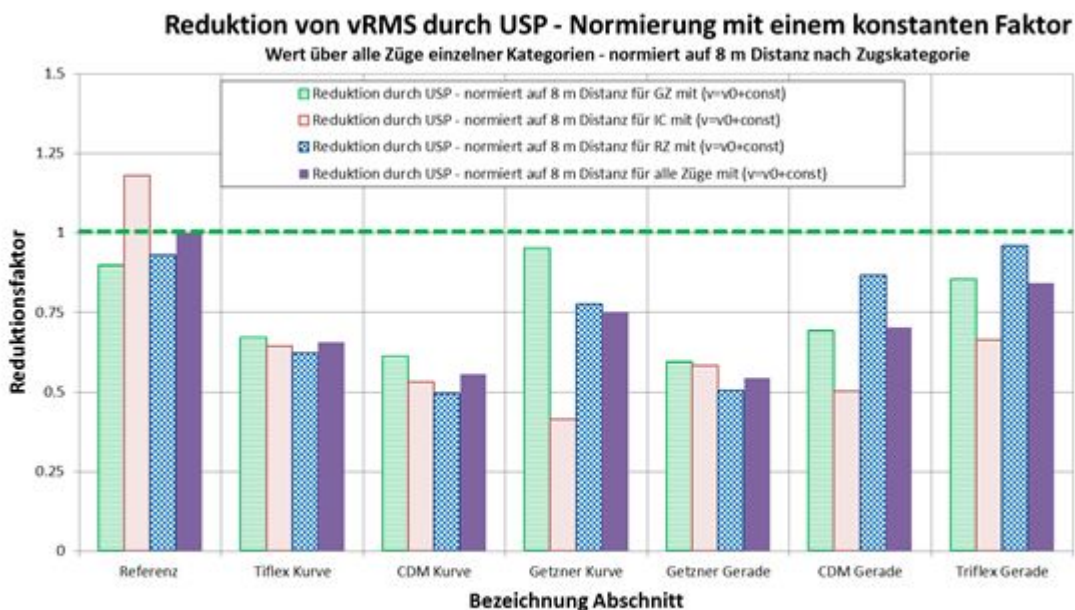


Abbildung 4.1.3.1.1 Reduktionsfaktoren berechnet nach Normierung mit konstantem Faktor für alle Zugskategorien.

Die so berechneten Werte für die einzelnen Reduktionsfaktoren sowie die erzielte Wirkung in Prozent ist nachfolgend in Tabelle 4.1.3.1.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1.3.1.1 Reduktion der Erschütterungen durch USP, dargestellt als Abschwächungsfaktor sowie als Wirkung in Prozent. Die Normierung der Daten auf eine einheitliche Distanz vom Messgerät von 8 m erfolgte über die Gleichung $v(r) = v_0 + \text{const.}$

Abschwächungsfaktoren nach Zugskategorie ermittelt für v_{RMS} Werte, normiert auf 8 m ($v(r) = v_0 + \text{const.}$)							
Zugstyp \ Treatment	Referenz	Tiflex Kurve	CDM Kurve	Getzner Kurve	Getzner Gerade	CDM Gerade	Tiflex Gerade
GZ	0.899	0.670	0.612	0.952	0.596	0.692	0.853
IC	1.178	0.643	0.532	0.413	0.581	0.502	0.664
RZ	0.930	0.623	0.494	0.776	0.503	0.867	0.959
alle Züge (GZ, IC, RZ)	1.000	0.657	0.558	0.753	0.543	0.703	0.844
Reduktion nach Zugskategorie, in %							
Zugstyp \ Treatment	Referenz	Tiflex Kurve	CDM Kurve	Getzner Kurve	Getzner Gerade	CDM Gerade	Tiflex Gerade
GZ	10.1	33.0	38.8	4.8	40.4	30.8	14.7
IC	-17.8	35.7	46.8	58.7	41.9	49.8	33.6
RZ	7.0	37.7	50.6	22.4	49.7	13.3	4.1
alle Züge (GZ, IC, RZ)	0.0	34.3	44.2	24.7	45.7	29.7	15.6

Unter Verwendung von Gleichung (1) zur Normalisierung des Distanzeffekts resultieren für die unterschiedlichen Wirkbereiche Reduktionen der Erschütterungsemissionen über alle Zugskategorien von zwischen 15% (Tiflex Gerade) – 45% (Getzner Gerade).

4.1.3.2. Normierung durch konstanten Faktor für jede Zugskategorie

Die Differenzen der v_{RMS} -Werte für jeden Zugstyp im Referenzabschnitt für Gleis Nord und Gleis Süd lassen sich auch direkt als Konstanten zur Korrektur verwenden: dem Distanzeffekt wird dabei in Abhängigkeit des Zugstyps Rechnung getragen unter Verwendung von drei verschiedenen Konstanten (const.GZ, const.IC, const.RZ, siehe Tabelle 4.1.3.2.1).

$$v(r) = v_0 + \text{const}_{\text{Kategorie}} \quad (1)$$

- r... normierte Distanz zur Erschütterungsquelle
- $v(r)$... Geschwindigkeit der Erschütterungsschwingungen in der Distanz r
- v_0 ... Geschwindigkeit der Erschütterungsschwingungen in der Distanz r_0
- const... Abweichung von v (Gleis Nord, westlicher Referenzabschnitt) zu v (Gleis Süd, westlicher Referenzabschnitt)

Auch diese Vorgehensweise ist sinnvoll, da die verschiedenen Zugstypen erfahrungsgemäss ein unterschiedliches Erschütterungsverhalten zeigen. Zudem führt die Normierung nach diesem Ansatz dazu, dass die Reduktionsfaktoren auf dem Referenzabschnitt unabhängig vom Zugstypen neutral ausfallen (Reduktionsfaktoren = 1).

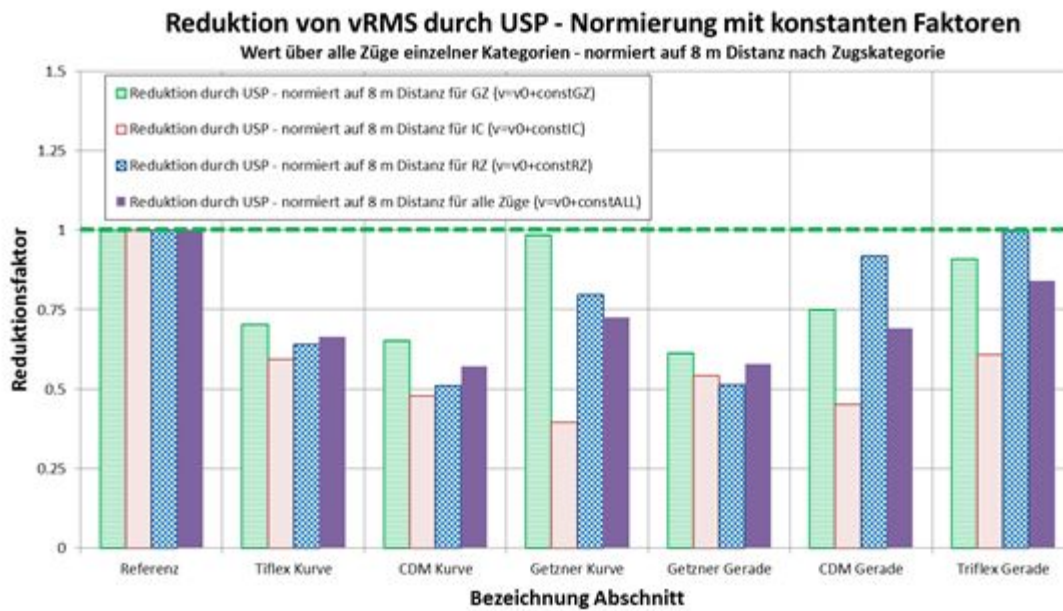


Abbildung 4.1.3.2.1 Reduktionsfaktoren berechnet nach Normierung durch konstanten Faktor für jede Zugskategorie.

Die so berechneten Werte für die einzelnen Reduktionsfaktoren sowie die erzielte Wirkung in Prozent ist nachfolgend in Tabelle 4.1.3.2.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1.3.2.1. Reduktion der Erschütterungen durch USP, dargestellt als Abschwächungsfaktor sowie als Wirkung in Prozent. Die Normierung der Daten auf eine einheitliche Distanz vom Messgerät von 8 m erfolgte über die Gleichung $v(r) = v_0 + const$.

Abschwächungsfaktoren nach Zugskategorie							
ermittelt für vRMS Werte, normiert auf 8 m ($v(r) = v_0 + const$)							
Zugstyp \ Treatment	Referenz	Tiflex Kurve	CDM Kurve	Getzner Kurve	Getzner Gerade	CDM Gerade	Triflex Gerade
GZ	1.000	0.705	0.652	0.985	0.615	0.750	0.910
IC	1.000	0.594	0.479	0.395	0.544	0.453	0.608
RZ	1.000	0.642	0.513	0.797	0.515	0.919	0.999
alle Züge (GZ, IC, RZ)	1.000	0.664	0.570	0.725	0.580	0.691	0.840
Reduktion nach Zugskategorie, in %							
Zugstyp \ Treatment	Referenz	Tiflex Kurve	CDM Kurve	Getzner Kurve	Getzner Gerade	CDM Gerade	Triflex Gerade
GZ	0.0	29.5	34.8	1.5	38.5	25.0	9.0
IC	0.0	40.6	52.1	60.5	45.6	54.7	39.2
RZ	0.0	35.8	48.7	20.3	48.5	8.1	0.1
alle Züge (GZ, IC, RZ)	0.0	33.6	43.0	27.5	42.0	30.9	16.0

Unter Verwendung von Gleichung (2) zur Normalisierung des Distanzeffekts resultieren für die unterschiedlichen Wirkbereiche Reduktionen der Erschütterungsemissionen über alle Zugskategorien von zwischen 16% (Tiflex Gerade) – 43% (CDM Kurve).

4.1.3.3. Normierung durch gedämpfte Ausbreitung

Ein weiterer Ansatz basiert auf einem stark vereinfachten Modell zur Ausbreitung von Erschütterungsimpulsen im Untergrund; die entsprechenden Ergebnisse sind im Bericht [1] dargestellt.

Im Bericht von Ziegler Consultants vorgeschlagen, die Normierung der Daten *nicht* über die Referenzabschnitte vorzunehmen, sondern eine Korrektur der v_{RMS} Werte beider Gleise über die Distanz vom Messgerät vorzunehmen. Dabei wurde angenommen, dass die Messwerte von Gleis Nord (Distanz von den Messgeräten = 4 m) mit der nachfolgenden Gleichung auf die Standarddistanz von 8 m (= Distanz von Gleis Süd zu den Messgeräten) normiert werden können.

$$v(r) = v_0 * (r_0/r)^n \tag{3}$$

- r... normierte Distanz zur Erschütterungsquelle (r = 8 m)
- r₀... bekannte Distanz zur Erschütterungsquelle (r₀ für Gleis Nord = 4 m)
- v(r)... Geschwindigkeit der Erschütterungsschwingungen in der Distanz r
- v₀... Geschwindigkeit der Erschütterungsschwingungen in der Distanz r₀ (v₀ = gemessener v_{rms}-Wert)
- n... Exponent zur Gewichtung der Dämpfung der Ausbreitung der Erschütterungsimpulse

Die Gewichtung der Dämpfung der Ausbreitung der Erschütterungsimpulse mittels dem Exponenten n bedarf jedoch zusätzlicher Annahmen zum Untergrund, ohne deren genaue Kenntnis systematische Fehler erwachsen. Um diese Fehlerquelle ausschliessen zu können wird im Sinne einer Vereinfachung für n meist der Wert 1 eingesetzt.

Im Rahmen des vorliegenden Syntheseberichts wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt. Die im Messbericht [1] ermittelten Reduktionsfaktoren sind nachfolgend der Vollständigkeit halber dargestellt:

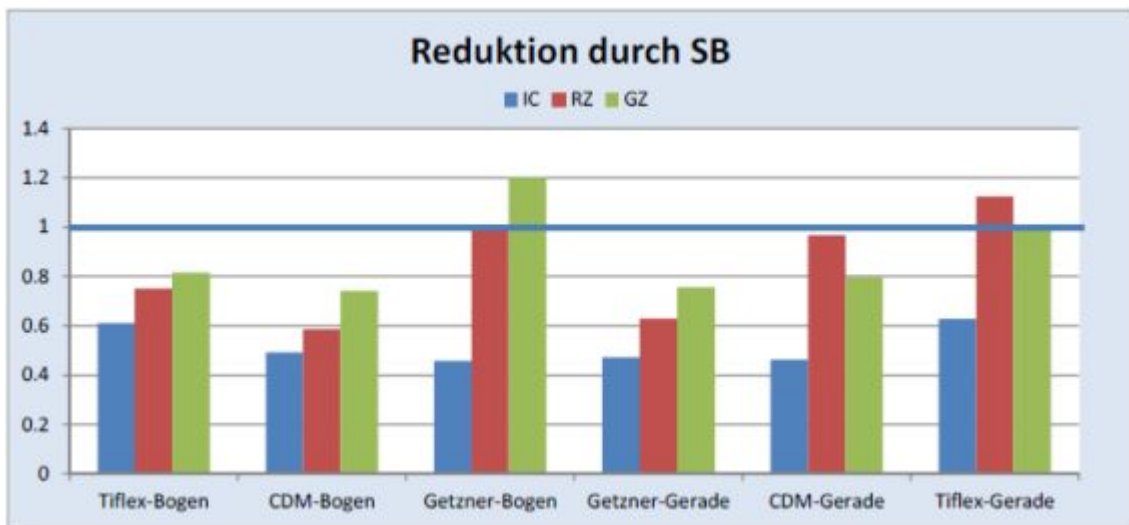


Abbildung 4.1.3.3.1 Reduktionsfaktoren berechnet nach Normierung durch gedämpfte Ausbreitung..

Die deutlichste Wirkung von zwischen 40-60% wurde für IC-Kompositionen ermittelt, für Reisezüge konnte mit Ausnahme des Wirkungsbereichs Tiflex Gerade eine Reduktion zwischen 0-40% gezeigt werden, und im Fall von Güterzügen wurde die Wirkung abgesehen vom Wirkungsbereich Getzner Kurve mit 0-25% beziffert.

4.1.3.4. Normierung durch Modell zur Teststrecke

Ein letzter hier untersuchter Ansatz schliesslich basiert auf einem relativ einfachen Modell zur Teststrecke. Abbildung X gibt einen Überblick zu den Charakteristika dieses Modells, welches nachfolgend erläutert wird.

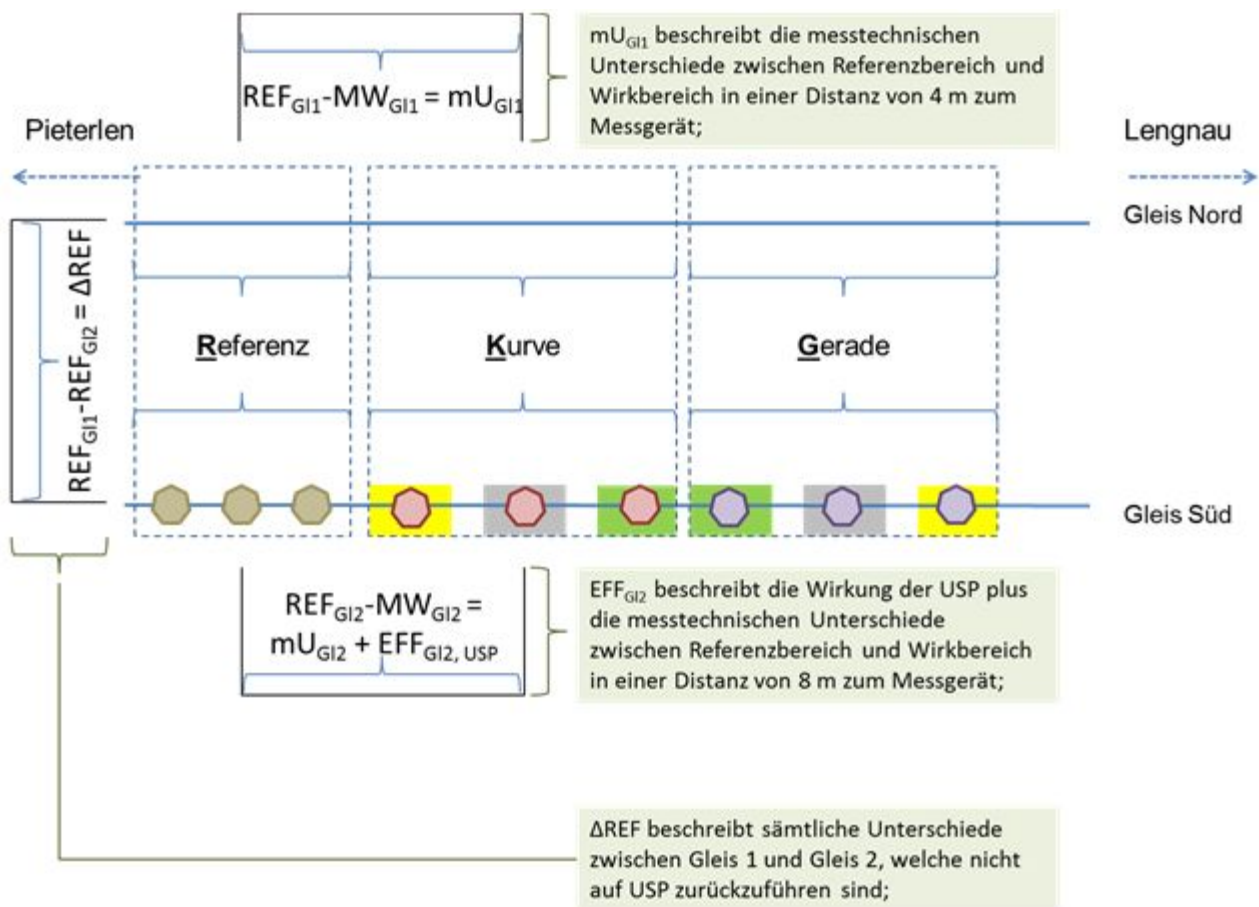


Abbildung 4.1.3.4.1 Schematische Darstellung des Modells zur Teststrecke.

Im Referenzbereich sind beide Gleise der Teststrecke bezogen auf ihre Bauweise nahezu identisch. Es handelt sich um den Stand der Technik bei der SBB mit Stand der Technik mit Betonschwellen B91 sowie einer steifen Schienenzwischenlage (siehe Kapitel 2.2). Die Unterschiede werden als sehr gering eingeschätzt und deshalb vernachlässigt. Weil im Zug der Analyse der v_{RMS} Werte Durchschnittswerte in die Auswertung einfließen und diese auf einer verhältnismässig grossen Stichprobe basieren, werden auch Unterschiede beim Rollmaterial einzelner Zugskategorien als gering eingeschätzt und vernachlässigt; die Differenz zwischen den durchschnittlichen Messwerten *im Referenzbereich* („REF“) für Gleis Nord (ohne USP; „G1“) und Gleis Süd (ohne USP; „G2“) beinhaltet demnach sämtliche Unterschiede zwischen den beiden Gleisen, welche nicht auf USP zurückzuführen sind – und dies widerspiegelt in erster Linie die unterschiedliche Distanz zum Messgerät.

Die durchschnittlichen Messwerte in den einzelnen *Test-Abschnitten* („MW“) für Gleis Nord (ohne USP; „G1“) und Gleis Süd (*mit* USP; „G2“) beinhalten Unterschiede gegenüber den entsprechenden Referenzbereichen sowie gegenüber des entsprechenden Test-Abschnitts auf dem Nachbargleis.

Zwischen Referenzabschnitt und den Testabschnitten auf Gleis Nord handelt es sich bei den Unterschieden um rein messtechnische Unterschiede (Signal-Ankopplung beim Messgerät und Ausbreitungsbedingungen im Untergrund; „mU“). Zwischen Referenzabschnitt und den Testabschnitten auf Gleis Süd kommt zu messtechnische Unterschieden der Effekt der Schwellenbeschlungen hinzu („EffG12,USP“).

Es können demnach folgende Zusammenhänge festgehalten werden:

$$\text{REF}_{\text{G1}} - \text{MW}_{\text{G1},j} = \text{mU}_{\text{G1},j} \quad (4)$$

$$\text{REF}_{\text{G2}} - \text{MW}_{\text{G2},j} = \text{mU}_{\text{G2},j} + \text{Eff}_{\text{G2USP},j} \quad (5)$$

- REF_{G1...} durchschnittliche Messwerte für die verschiedenen Zugskategorien im Referenzbereich für Gleis 1 resp. 2
 MW_{G1j} durchschnittliche Messwerte für die verschiedenen Zugskategorien in den Test-Abschnitten j für Gleis 1 resp. 2 (mit j = Tiflex Kurve, CDM Kurve, Getzner Kurve, Getzner Gerade, CDM Gerade und Tiflex Gerade)
 mU_{G1j...} Wert für die messtechnischen Unterschiede der einzelnen Test-Abschnitte j für Gleis 1 resp. 2 im Vergleich mit den entsprechenden Referenzbereichen
 Eff_{G2USP,j} Wert für die Wirkung der USP der einzelnen Test-Abschnitte j auf Gleis 2

Hinsichtlich der Normierung beider Gleise auf die Distanz von 8 m wird zugrunde gelegt, dass der Unterbau sich zwischen Gleis Nord und Gleis Süd nicht unterscheidet; dies ist plausibel, da die USP nur den Oberbau betreffen und im Rahmen einer gewöhnlichen Oberbauerneuerung eingebaut wurden, im Zuge welcher keine Massnahmen am Unterbau getroffen worden sind. Die unterschiedlichen Werte der messtechnischen Unterschiede mU_j zwischen Gleis Nord und Gleis Süd innerhalb eines Abschnitts j kommen alleine durch die unterschiedliche Distanz zum Messgerät zustande.

Die eigentliche Normierung basiert auf der Annahme, dass mit den Messwerten im Referenzbereich eine ausreichende Datengrundlage zur Verfügung steht, mittels welcher sich der Distanzeffekt exakt berechnen lässt. Die Information zum Distanzeffekt lässt sich mittels dem Verhältnis der Signalintensität (REF_{G2}/REF_{G1}) im Referenzbereich in Gleichungen (4) und (5) ergänzen, und die messtechnischen Unterschiede lassen sich normieren:

$$\text{mU}_{\text{G1},j(\text{normiert},8\text{m})} \equiv \text{mU}_{\text{G2},j(8\text{m})} \quad (6)$$

Dies impliziert, dass mittels einer geeigneten Normierungsmethode mU_{G1,j} in mU_{G2,j} umrechnen lässt, und so der Effekt der Schwellenbeschlungen auf dem entsprechenden Abschnitt beziffert werden kann. Unter Berücksichtigung der Signalintensität wird folgender Zusammenhang verwendet:

$$(\text{REF}_{\text{G1}} - \text{MW}_{\text{G1},j})/\text{REF}_{\text{G1}} = (\text{REF}_{\text{G2}} - (\text{mU}_{\text{G2},j} + \text{Eff}_{\text{G2USP},j}))/\text{REF}_{\text{G2}} \quad (7)$$

Dies lässt sich nach dem Effekt der USP in den unterschiedlichen Test-Abschnitten umformen:

$$\text{Eff}_{\text{G2USP},j} = -\text{MW}_{\text{G2},j} - (\text{REF}_{\text{G2}}/\text{REF}_{\text{G1}}) * \text{MW}_{\text{G1}} \quad (8)$$

Eine Übersicht zu den Reduktionsfaktoren, welche aus diesem Ansatz resultieren, ist in Abbildung 4.1.4.4.3 gegeben.

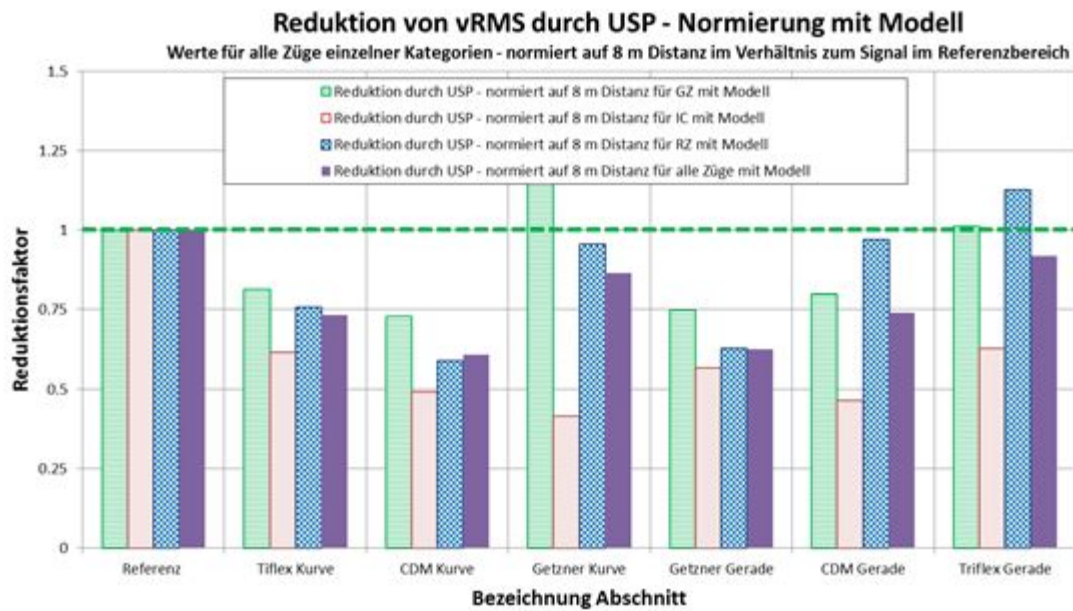


Abbildung 4.1.3.4.2 Reduktionsfaktoren berechnet nach Normierung durch das Modell der Teststrecke..

Die so berechneten Werte für die einzelnen Reduktionsfaktoren sowie die erzielte Wirkung in Prozent ist nachfolgend in Tabelle 4.1.3.4.1 zusammengestellt.

Tabelle 4.1.3.4.1. Reduktion der Erschütterungen durch USP, dargestellt als Abschwächungsfaktor sowie als Wirkung in Prozent. Die Normierung der Daten auf eine einheitliche Distanz vom Messgerät von 8 m erfolgte über die Gleichung $v(r) = v_0 * (r/r_0)$.

Abschwächungsfaktoren nach Zugskategorie							
ermittelt für v_{RMS} Werte, normiert auf 8 m mittels Modell zur Teststrecke							
Treatment \ Zugstyp	Referenz	Tiflex Kurve	CDM Kurve	Getzner Kurve	Getzner Gerade	CDM Gerade	Tiflex Gerade
GZ	1.000	0.814	0.729	1.190	0.748	0.801	1.014
IC	1.000	0.616	0.491	0.417	0.567	0.465	0.628
RZ	1.000	0.759	0.589	0.957	0.630	0.970	1.129
alle Züge (GZ, IC, RZ)	1.000	0.733	0.607	0.865	0.626	0.740	0.918
Reduktion nach Zugskategorie, in %							
Treatment \ Zugstyp	Referenz	Tiflex Kurve	CDM Kurve	Getzner Kurve	Getzner Gerade	CDM Gerade	Tiflex Gerade
GZ	0.0	18.6	27.1	-19.0	25.2	19.9	-1.4
IC	0.0	38.4	50.9	58.3	43.3	53.5	37.2
RZ	0.0	24.1	41.1	4.3	37.0	3.0	-12.9
alle Züge (GZ, IC, RZ)	0.0	26.7	39.3	13.5	37.4	26.0	8.2

4.1.3.5. Vergleich der unterschiedlichen Normierungsansätze

Zusammenfassend kann hier festgehalten werden, dass sowohl die Normierung mit konstanten Faktoren als auch die Normierung mittel einem Modell zur Teststrecke zu plausiblen Ergebnissen im Referenzbereich führen.

Eine Gegenüberstellung der Reduktionsfaktoren nach Normierungsmethode ist in der nachfolgenden Abbildung gezeigt.

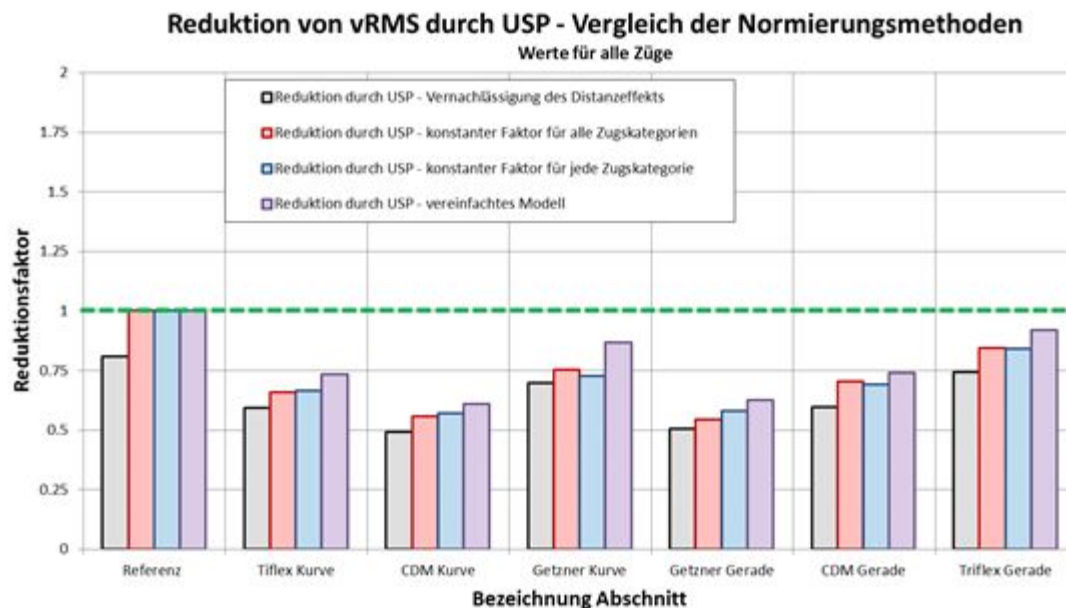


Abbildung 4.1.3.4.2 Reduktionsfaktoren berechnet nach Normierung durch das Modell der Teststrecke..

Da sich Gleis Nord und Gleis Süd im Referenzbereich nicht unterscheiden, müssen nach der Normierung die Reduktionsfaktoren neutral sein (d.h. = 1). Die Normierung durch die gedämpfte Ausbreitung von Erschütterungsimpulsen liefert keine neutralen Reduktionsfaktoren für den Referenzbereich. Diese Bedingung muss jedoch notwendigerweise erfüllt sein, da die Berechnung der Reduktionsfaktoren beziehungsweise der Wirkung direkt davon abhängt. Zudem unterscheiden sich die Gleise Nord und Süd im Referenzbereich nicht, weshalb die Differenzen in den Messwerten einzig mit der unterschiedlichen Distanz zum Messgerät erklärt werden können.

Hinweise auf Trends zur Wirksamkeit der USP können folglich aus den Übersichten in Tabellen 4.1.3.1.1, 4.1.3.2.1 und 4.1.3.4.1 abgeleitet werden.

Es kann festgehalten werden, dass unabhängig der angewendeten Normierungsmethode eine Reduktion der Erschütterungsimpulse festzustellen ist. Über alle Zugskategorien gemittelt konnte für die Normierung mittels eines konstanten Faktor für alle Zugskategorien eine Reduktion von zwischen 15-45% ermittelt werden, die Normierung mittels eines Modells resultierte in einer Wirkung von 8-39%.

Unabhängig der Normierungsmethode resultierte die geringste Wirkung jeweils für die Abschnitte Tiflex Gerade und Getzner Kurve. Die grösste Reduktion wurde für die Abschnitte CDM Kurve sowie Getzner Gerade ermittelt. Die Werte für die Abschnitte Tiflex Kurve und CDM Gerade bewegen sich dazwischen.

Diese Trends sind Gegenstand der Interpretation und Diskussion (Kapitel 5). Grundsätzlich kann unabhängig der Normierungsmethode eine Reduktion der Erschütterungsimpulse festgestellt werden. Das Ausmass der Reduktion hängt jedoch mit der Normierungsmethode zusammen.

4.2. Terzbanz-Spektren

4.2.1. Datengrundlage

Wie in Kapitel 3.3 dargelegt wurde, wurden im Zuge der Messkampagne eine sehr grosse Zahl an spektralen Datensätzen erfasst, deren vollständige Abbildung den Rahmen dieses Syntheseberichts sprengen würde. Eine Zusammenstellung der erfassten und ausgewerteten Datensätze ist in elektronischer Form als auf dem beigelegten Datenträger zu finden.

Eine erste Betrachtung sämtlicher Datensätze vom ersten Messtag, an welchem alle Abschnitte in einer Distanz von 4 m bzw. 8 m zur Gleisachse simultan erfasst wurden, hat ähnlich wie im Fall der v_{RMS} Werte generell grosse Unterschiede gezeigt; diese Unterschiede können festgestellt werden zwischen:

- i) den einzelnen Test-Abschnitten,
- ii) den einzelnen Messpunkten innerhalb eines Abschnitts,
- iii) den Messwerten an einem Messpunkt innerhalb ein und derselben Zugskategorie;

Sowohl die Unterschiede zwischen den einzelnen Test-Abschnitten (i) als auch zwischen den einzelnen Messpunkten innerhalb eines Abschnitts (ii) dürften grösstenteils mit der Inhomogenität der Ausbreitungsbedingungen für Erschütterungsimpulse im Untergrund zusammenhängen. Im Zuge der ersten Betrachtung sämtlicher Datensätze wurden jedoch einige Messpunkte identifiziert, welche für die weitere Auswertung möglicherweise nur teilweise miteinbezogen werden können:

- (i) Messwerte von MP5 (Tiflex Kurve) weisen gegenüber MP4 und MP6 (auch Tiflex Kurve) grosse Unterschiede auf; Inhomogenität im Untergrund oder bezüglich der Ankopplung ans Messgerät ist nicht auszuschliessen.
- (ii) Messwerte von MP18 (Getzner Kurve) zeigen ungewöhnlich hohe Maxima, welche mit Vorsicht zu betrachten sind; es befindet sich in der Nähe ein Brückenbauwerk, welches möglicherweise in einem Zusammenhang mit den ungewöhnlich hohen Messwerte steht.
- (iii) Messwerte von MP21 (Getzner Gerade) zeigt ebenfalls ungewöhnlich hohe Maxima; MP21 befindet sich ebenfalls in der Nähe des vorher bezeichneten Brückenbauwerk, welches möglicherweise in einem direkten Zusammenhang mit den ungewöhnlich hohen Messwerte steht.
- (iv) Messwerte von MP27 (Tiflex Gerade) weisen gegenüber MP25 und MP26 (auch Tiflex Gerade) grosse Unterschiede auf; Inhomogenität im Untergrund oder bezüglich der Ankopplung ans Messgerät ist nicht auszuschliessen.

Die Unterschiede zwischen einzelnen Messwerten an einem bestimmten Messpunkt (Punkt iii - also die Streuung innerhalb eines Datensatzes) sind erstaunlicherweise sehr gross. Diese Streuung dürfte jedoch in erster Linie durch Unterschiede im Rollmaterial bzw. die Kombination von Rollmaterial und Resonanz im Untergrund zustande kommen.

Weitere Anhaltspunkte zur Charakterisierung der Ausbreitungsbedingungen können durch den Einbezug der fahrbahntechnischen Untersuchungen (Kapitel 4.3, indirekte Anhaltspunkte) sowie der geophysikalischen Messkampagne (Kapitel 4.4, direkte Anhaltspunkte) gewonnen werden.

4.2.2. Durchschnitts- und Differenzspektren innerhalb des Referenz-Abschnitts

Wertvolle erste Hinweise zur Ausbreitung sowie zur messtechnischen Erfassung von Erschütterungsimpulsen in Abhängigkeit der Frequenz liefert ein Vergleich der erfassten Terzband-Spektren für Zugsdurchfahrten auf Gleis Nord und Gleis Süd innerhalb des Referenz-Abschnitts. Die Bauweise beider Gleise in diesem Abschnitt ist nämlich identisch (SBB Standard; siehe Kapitel 2.2)

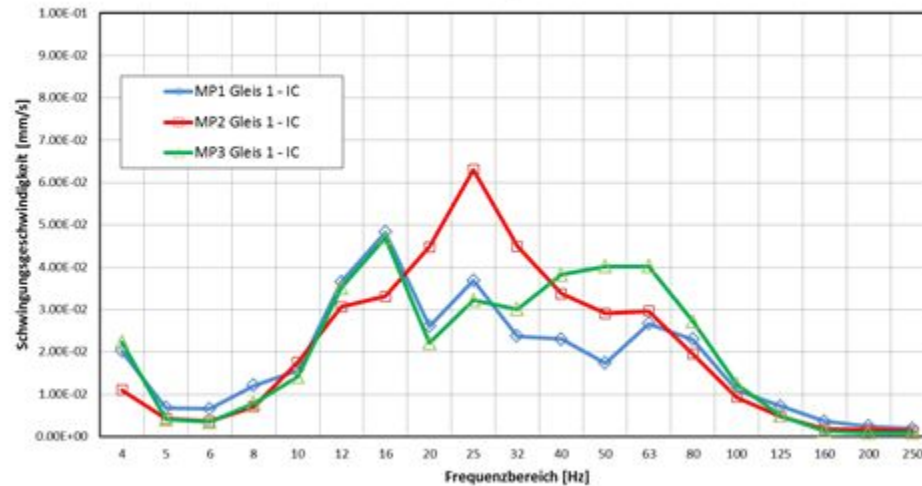
Die eingehende Analyse dieser Terzband-Spektren ist von grosser Bedeutung, da die zwischen beiden Gleisen festgestellten Differenzen zwischen direkt in die Berechnung der Wirkung der Schwellenbesohlung einfließen.

Nachfolgend werden die durchschnittlichen Terzbandspektren für die verschiedenen Zugskategorien für Gleis Nord und Gleis Süd für den Referenz-Abschnitt gegenübergestellt (Kapitel 4.2.2.1 bis Kapitel 4.2.2.3); dabei wurde für jeden Messpunkt im Referenz-Abschnitt – das sind MP1, MP2 und MP3 – ein durchschnittliches Terzband-Spektrum aus den Messdaten von Tag 1 berechnet. Zudem werden durchschnittlich Differenzspektren für den Referenz-Abschnitt präsentiert, welche sich für die einzelnen Zugskategorien berechnen lassen.

4.2.2.1. Intercity Züge

Durchschnittliche Spektren für Intercityzüge, Gleis Nord (ohne USP)

Referenz-Abschnitt: MP1, MP2 und MP3



Durchschnittliche Spektren für Intercityzüge, Gleis Süd (mit USP)

Referenz-Abschnitt: MP1, MP2 und MP3

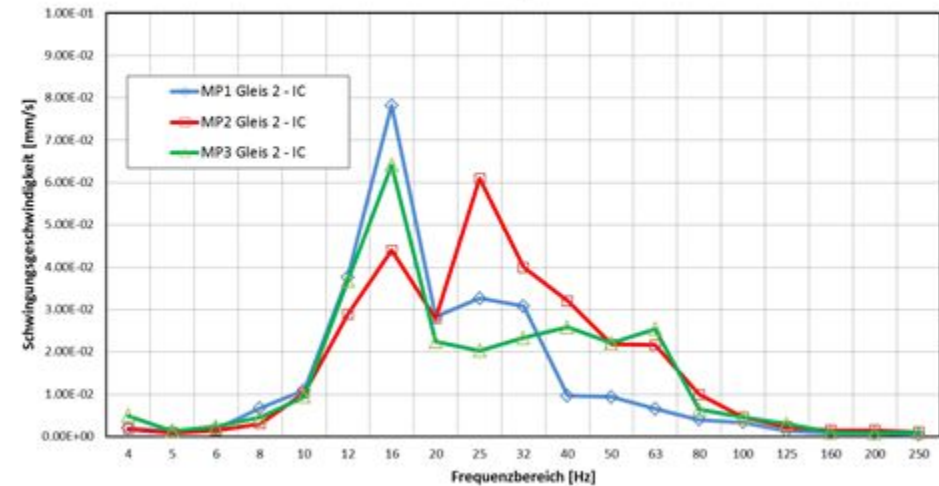


Abbildung 4.2.2.1.1 Gegenüberstellung der durchschnittlichen Spektren für sämtliche Durchfahrten von Intercityzügen auf Gleis Nord und Gleis Süd innerhalb des Referenzabschnitts. Die Durchschnittsspektren für die einzelnen Messpunkte entsprechen dem arithmetischen Mittelwert der Messwerte.

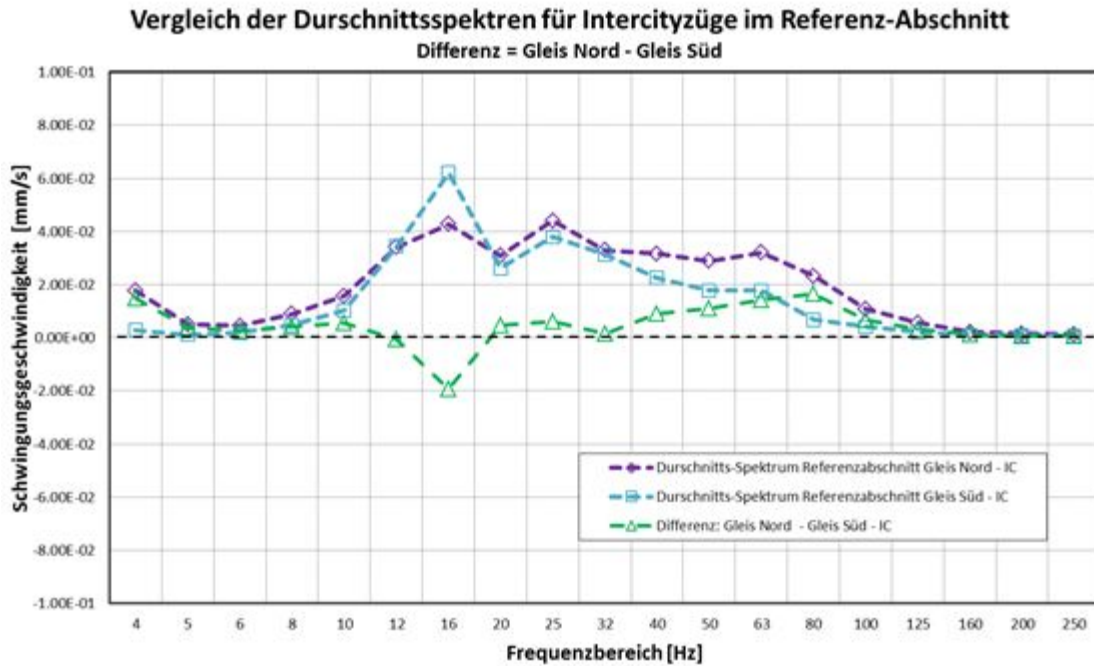
Für den Frequenzbereich bei 16 Hz sind die Messwerte von Gleis Süd für alle 3 Messpunkte höher als für Gleis Nord.

Aus dem Vergleich dieser Spektren zwischen Gleis Nord und Gleis Süd geht hervor, dass MP1 und MP3 tendenziell ähnlich charakterisieren lassen; das Peak-Maximum befindet sich für diese beiden Messpunkte bei 16 Hz während das Terzband-Spektrum für MP2 einen maximalen Wert bei 25 Hz annimmt.

Beim Vergleich der Durchschnittsspektren für die einzelnen Messpunkte im Referenz-Abschnitt auf Gleis Nord fällt auf, dass sich die einzelnen Terzbandspektren bei bestimmten Frequenzen relativ deutlich unterscheiden; der deutlichste Unterschied tritt im Bereich zwischen etwa 16 Hz bis 63 Hz auf. Im Bereich zwischen 4 Hz bis 12 Hz sowie zwischen 80 Hz und 250 Hz verlaufen die Spektren hingegen nahezu identisch. Praktisch analoge Tendenzen lassen sich auch für den Vergleich der Durchschnittsspektren für die einzelnen Messpunkte auf Gleis Süd festhalten.

Ermittlung der Transferspektren

a)



b)

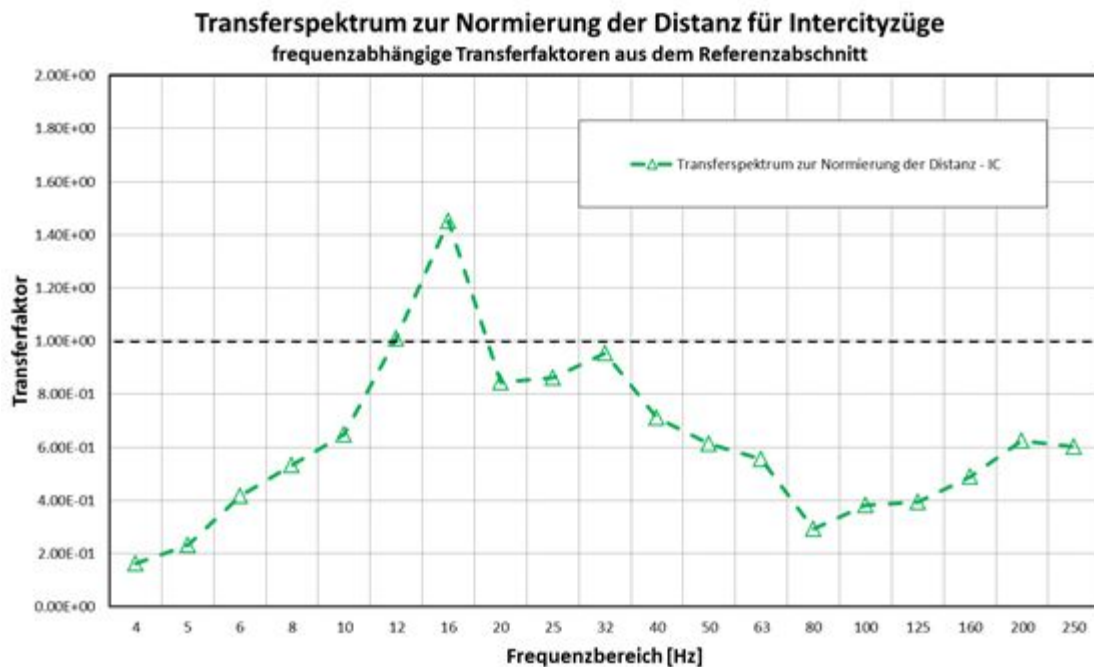


Abbildung 4.2.2.2.2 Durchschnittliche Terzband-Spektren zwischen Gleis Nord und Gleis Süd für Reisezüge im Referenz-Abschnitt (a) und Transferspektrum zur Normierung der Distanz für Reisezüge (b).

Das durchschnittliche Terzband-Spektrum von IC-Kompositionen im Referenzabschnitt auf Gleis Nord weist bis auf den Frequenzbandbereich bei 16 Hz durchgehend höhere Schwingungsgeschwindigkeiten auf, als für Gleis Süd festgestellt.

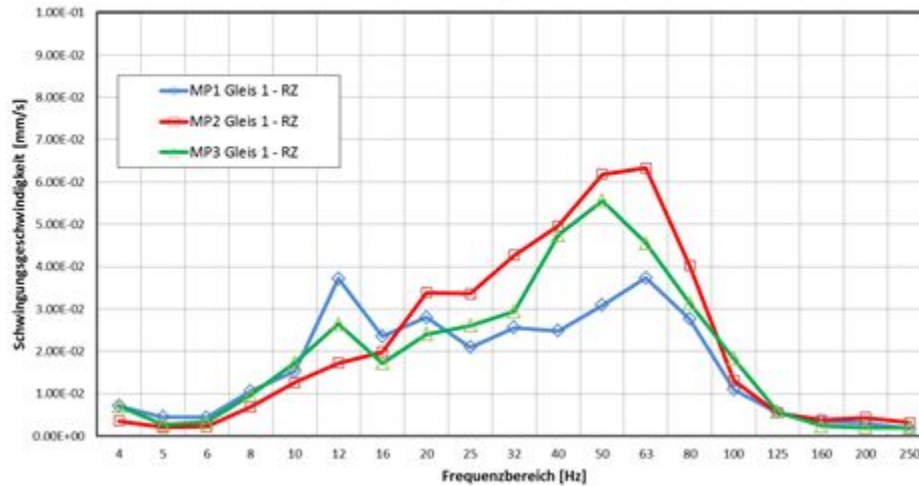
Eine einfache Erklärung des Peak Maximums kann über die Durchfahrtsgeschwindigkeit erfolgen; mit einem Achsabstand von 2.4 m und einer Geschwindigkeit von 140 km/h resultiert einer Resonanz bei 16 Hz.

Dass diese Resonanz auf dem südlichen Gleis zu einem höheren Messwert bei 16 Hz führt, lässt entgegen der vorher getroffenen Annahmen (identischer Unterbau bzw. Untergrund) den Schluss zu, dass es möglicherweise Unterschiede im Trasse oder in der Ausbreitung der Erschütterungsimpulse im Untergrund des Oberbaus gibt; solche Unterschiede werden im Zuge der Messungen der BAM untersucht; Die Messergebnisse stehen noch aus, die Messungen haben im August 2013 jedoch stattgefunden.

4.2.2.2. Reisezüge

Durchschnittliche Spektren für Reisezüge, Gleis Nord (ohne USP)

Referenz-Abschnitt: MP1, MP2 und MP3



Durchschnittliche Spektren für Reisezüge, Gleis Süd (mit USP)

Referenz-Abschnitt: MP1, MP2 und MP3

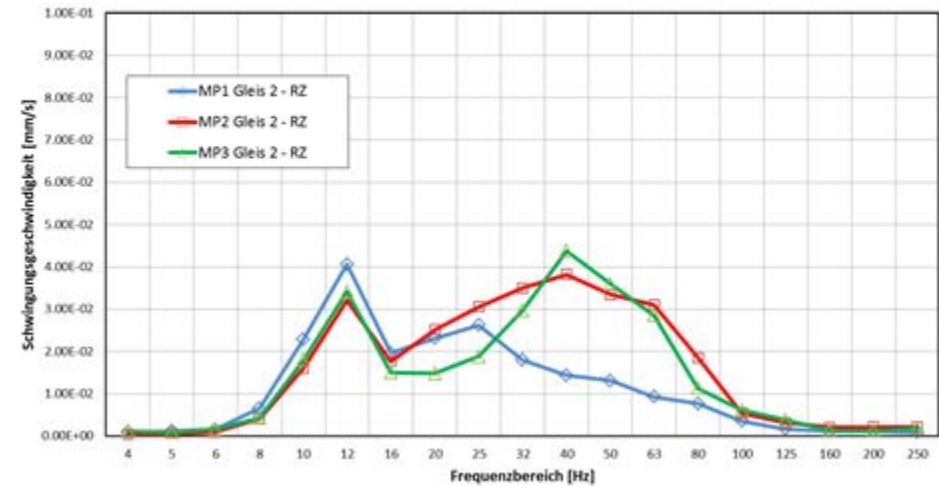


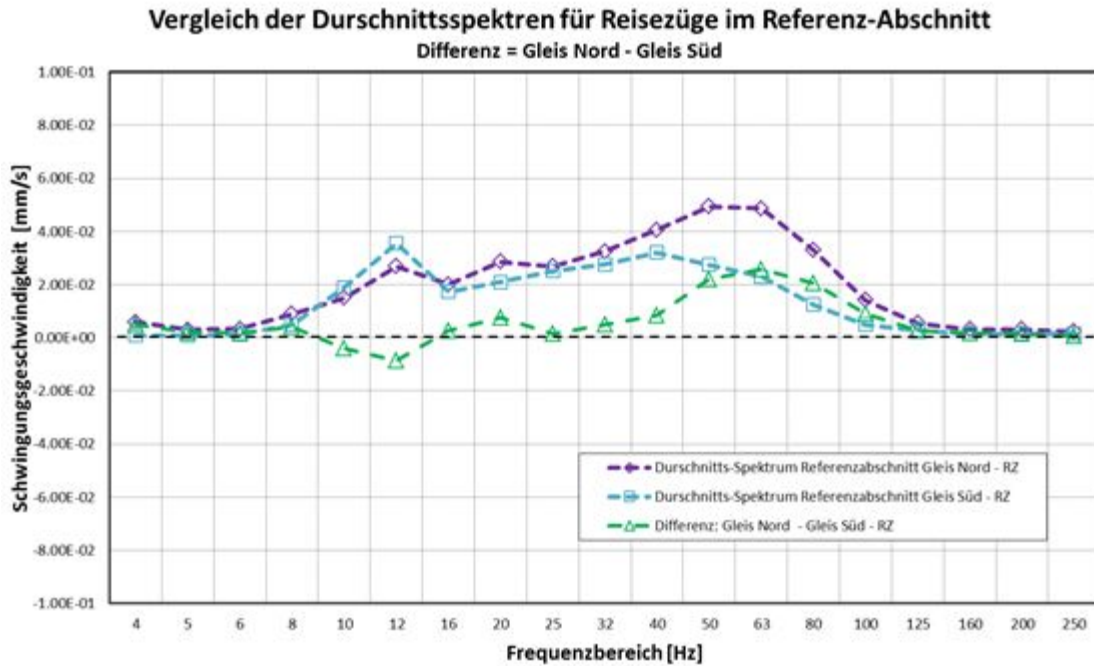
Abbildung 4.2.2.2.1 Gegenüberstellung der durchschnittlichen Spektren für sämtliche Durchfahrten von Reisezügen auf Gleis 1 und Gleis 2 innerhalb des Referenz-Abschnitts. Die Durchschnittsspektren für die einzelnen Messpunkte entsprechen dem arithmetischen Mittelwert der Messwerte.

Ähnlich wie für IC-Kompositionen festgestellt sind die Messwerte von Gleis Süd für alle 3 Messpunkte im Frequenzbereich bei 12 Hz (IC: 16 Hz) höher als für Gleis Nord.

Sowohl innerhalb der Durchschnittsspektren auf Gleis Nord als auch innerhalb der Durchschnittsspektren auf Gleis Süd gibt es zwischen den einzelnen Messpunkten verhältnismässig grosse Unterschiede; diese Unterschiede scheinen leicht weniger drastisch auszufallen im Frequenzbereich bis 25 Hz verglichen mit denjenigen, welche für Intercityzüge ermittelt worden sind, im Frequenzbereich zwischen 25 Hz und 80 Hz sind die Unterschiede jedoch beachtlich.

Ermittlung der Transferspektren

a)



b)

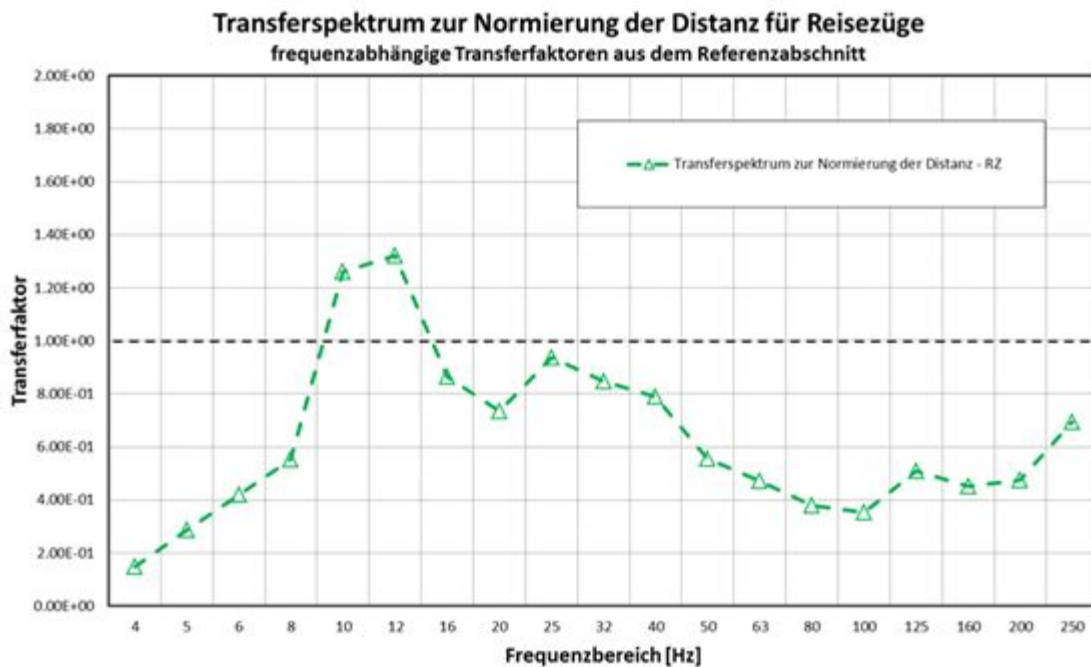


Abbildung 4.2.2.2.2 Durchschnittliche Terzband-Spektren zwischen Gleis Nord und Gleis Süd für Reisezüge im Referenz-Abschnitt (a) und Transferspektrum zur Normierung der Distanz für Reisezüge (b).

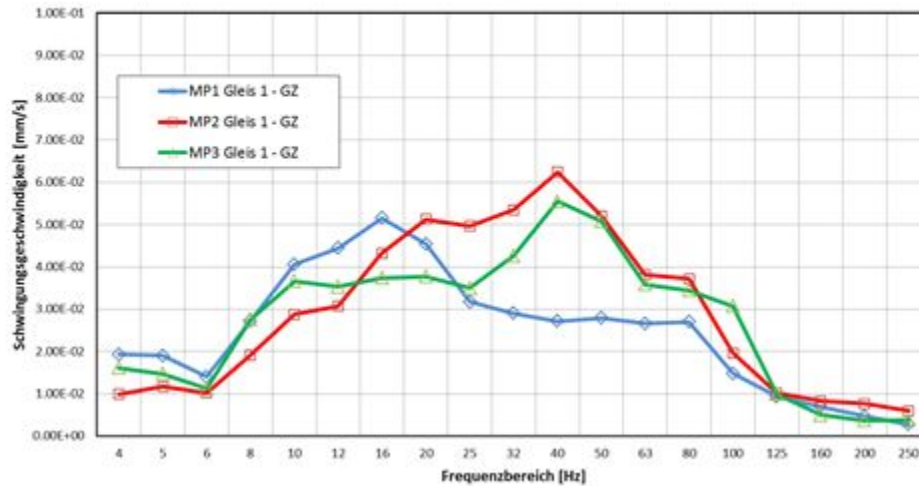
Das durchschnittliche Terzband-Spektrum von RZ-Kompositionen im Referenzabschnitt auf Gleis Nord weist bis auf den Frequenzbandbereich bei 10-12 Hz durchgehend höhere Schwingungsgeschwindigkeiten auf, als für Gleis Süd festgestellt.

Analog der Erklärung im vorhergehenden Fall kann mit einer Durchfahrtsgeschwindigkeit von 105 km/h und einem Achsabstand von 2.4 m eine Resonanz bei 12 Hz erklärt werden.

4.2.2.3. Güterzüge

Durchschnittliche Spektren für Güterzüge, Gleis Nord (ohne USP)

Referenz-Abschnitt: MP1, MP2 und MP3



Durchschnittliche Spektren für Güterzüge, Gleis Süd (mit USP)

Referenz-Abschnitt: MP1, MP2 und MP3

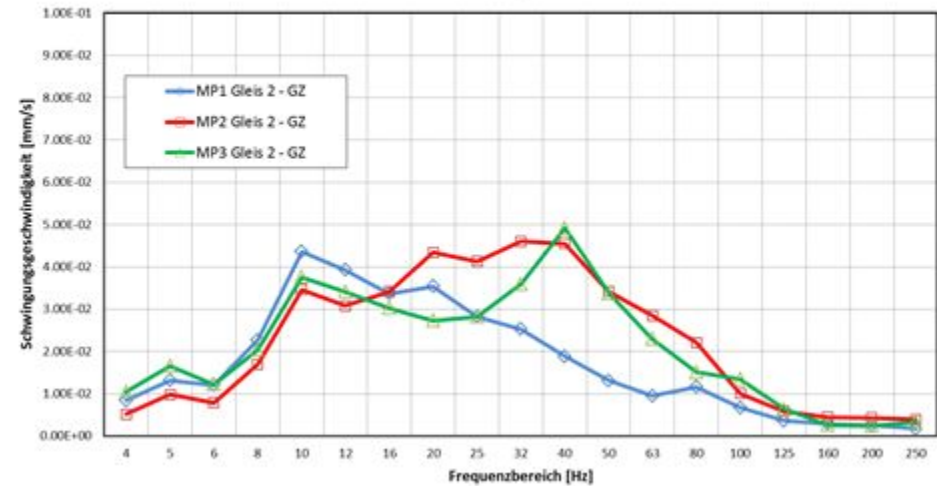


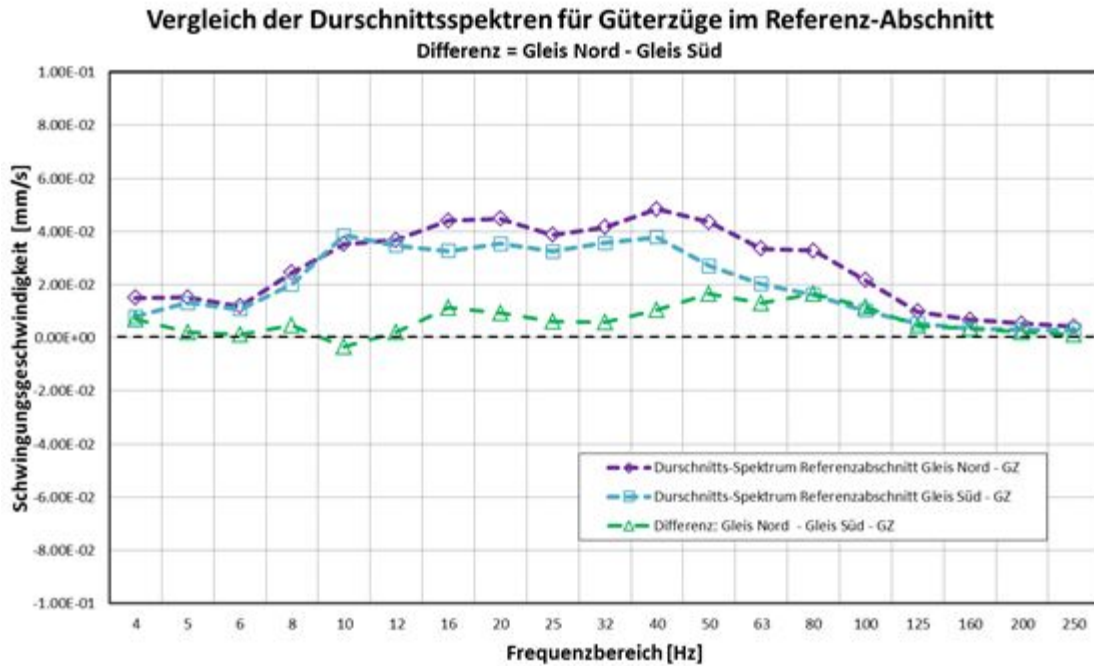
Abbildung 4.2.2.3.1. Gegenüberstellung der durchschnittlichen Spektren für sämtliche Durchfahrten von Güterzügen auf Gleis 1 und Gleis 2 innerhalb des Referenz-Abschnitts. Die Durchschnittsspektren für die einzelnen Messpunkte entsprechen dem arithmetischen Mittelwert der Messwerte.

Für den Frequenzbereich bei 12 Hz sind die Messwerte für Gleis 2 für alle 3 Messpunkte leicht höher als für Gleis Nord (vergleiche IC: 16 Hz, RZ: 12 Hz).

Auch für Güterzüge wurden im Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 80 Hz deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Messpunkten festgestellt.

Ermittlung der Transfer-Spektren

a)



b)

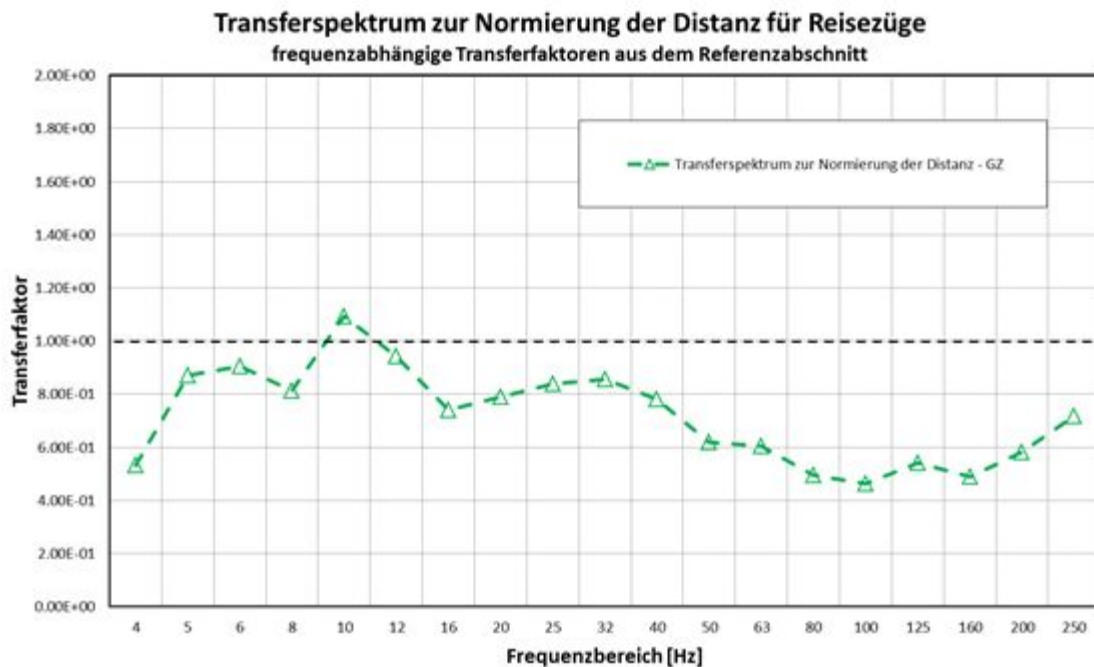


Abbildung 4.2.2.2.2 Durchschnittliche Terzband-Spektren zwischen Gleis Nord und Gleis Süd für Reisezüge im Referenz-Abschnitt (a) und Transferspektrum zur Normierung der Distanz für Reisezüge (b).

Das durchschnittliche Terzband-Spektrum von GZ-Kompositionen im Referenzabschnitt auf Gleis Nord schliesslich weist bis auf den Frequenzbandbereich bei 10 Hz durchgehend höhere Schwingungsgeschwindigkeiten auf, als für Gleis Süd festgestellt worden sind.

Mit einer durchschnittlichen Durchfahrts-geschwindigkeit von 80 km/h und einem Achsabstand von 2.4 m kann auch in diesem Fall eine Resonanz bei 10 Hz erklärt werden.

Zusammenfassend kann für alle Zugskategorien festgehalten werden, dass die Unterschiede zwischen Gleis Nord und Gleis Süd im Bereich von 40 Hz bis 80 Hz am stärksten ausgeprägt sind; die Messwerte von Gleis Nord sind dort deutlich stärker als diejenigen von Gleis Süd. Die Signale in diesem Bereich sind zur Beurteilung der Wirksamkeit von Interesse.

Im Bereich zwischen 10 Hz und 16 Hz übersteigen die Messwerte für alle Zugskategorien von Gleis Süd (Distanz zum Abnehmer 8 m) diejenigen von Gleis Nord (Distanz zum Abnehmer 4 m); diese „Anomalie“ ist für die verschiedenen Zugskategorien unterschiedlich stark ausgeprägt und tritt bei IC-Kompositionen bei 16 Hz, bei RZ-Kompositionen bei 12 Hz und bei GZ-Kompositionen bei 10 Hz auf. Die Peaks in diesem Frequenzbereich hängen vermutlich mit der Fahrgeschwindigkeit und den Achsabständen der einzelnen Zugskategorien zusammen.

Diese Unterschiede können jedoch mittels der Transferspektren für die einzelnen Zugskategorien kompensiert werden, Aussagen zur Wirkung von USP in diesen Frequenzbereichen sind jedoch mit Vorsicht zu bewerten.

4.2.3. Durchschnittsspektren für die Test-Abschnitte

Die Durchschnittsspektren für die einzelnen Test-Abschnitte wurden ebenfalls ermittelt. Eine Zusammenstellung nach Zugskategorien ist in elektronischer Form als auf dem beigelegten Datenträger zu finden.

Es kann festgehalten werden, dass - obschon grosse Unterschiede in den Datensätzen vorhanden sind (siehe Kapitel 4.2.1) welche erklärt werden müssen - sich gleichwohl Tendenzen erkennen lassen.

4.2.4. Wirkung der USP nach Zugskategorien

4.2.4.1. Vergleichbarkeit der Terzband-Spektren von Gleis Nord mit Gleis Süd

In den vorhergehenden Abschnitten wurden die messtechnischen Unterschiede (plus Unterschiede im Boden/Untergrund) zwischen den einzelnen Teilabschnitten und die möglichen Ursachen dafür eingehend aufgezeigt und diskutiert. Zur Ermittlung der Wirksamkeit der Schwellenbeschlung als Funktion der erfassten Frequenzbereiche müssen einerseits diese messtechnischen Unterschiede zwingend berücksichtigt werden. Zusätzlich zu den messtechnischen Unterschiede kommt andererseits der Effekt der Distanz zwischen beiden Gleisen hinzu. Dieser Effekt beinhaltet sämtliche Unterschiede zwischen Gleis 1 und Gleis 2, welche nicht auf USP beziehungsweise auf die Messtechnik zurückzuführen sind.

Dieser Effekt kann ähnlich wie im Fall der v_{RMS} Werte über einen systematischen Vergleich zwischen den Terzbandspektren von Gleis Nord und Gleis Süd im Referenzabschnitt ermittelt werden (siehe vorhergehender Abschnitt).

Es ist zu beachten, dass eine Verminderung der gemessenen Erschütterungssignale in den Abschnitten mit USP gegenüber dem Zustand ohne USP als positive Werte resultieren. Folglich nehmen Intensivierungen gegenüber dem Zustand ohne USP als negative Werte auf. Mit dieser Festlegung wird einer Definition der International Union of Railways (UIC) Rechnung getragen, womit die rasche Vergleichbarkeit solcher Daten auf internationaler Ebene gewährleistet werden kann.

Die so berechneten Wirkungs-Spektren werden nachfolgend für die einzelnen Zugskategorien vorgestellt.

4.2.4.2. Korrigierte, frequenzabhängige Reduktion der USP nach Zugskategorien:

Mittels der Transferspektren, welche basierend auf den Messwerten im Referenzbereich für Gleis Nord bzw. Gleis Süd für die einzelnen Zugskategorien berechnet wurden, kann die frequenzabhängige Wirkung der USP festgestellt werden. Eine Reduktion der Erschütterungsimpulse gegenüber dem Zustand ohne USP wird nachfolgend wie im vorhergehenden Kapitel festgehalten mit positiven Werte dargestellt.

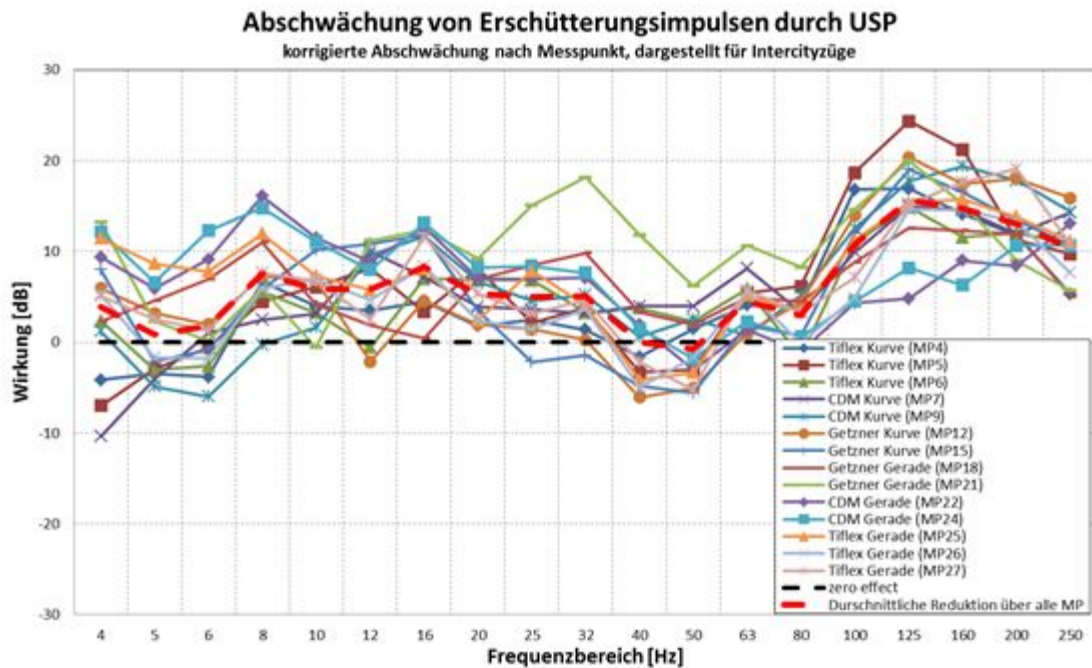
Die frequenzabhängige Reduktion in dB wurde mit folgender Gleichung berechnet:

$$\text{Wirkung [dB]} = 20 \cdot \text{LOG}\left\{\frac{MW_{Gl2,j}}{MW_{Gl1,j,\text{korrigiert}}}\right\} \quad (9)$$

$MW_{Gl2,j}$	durchschnittliche Messwerte für die verschiedenen Zugskategorien in den Test-Abschnitten j für Gleis Süd (mit USP) resp. 2 (mit j = Tiflex Kurve, CDM Kurve, Getzner Kurve, Getzner Gerade, CDM Gerade und Tiflex Gerade)
$MW_{Gl1,j,\text{korrigiert}}$	durchschnittliche Messwerte für die verschiedenen Zugskategorien in den Test-Abschnitten j für Gleis Nord (ohne USP), korrigiert für den Effekt der Distanz mittels der Transferspektren (mit j = Tiflex Kurve, CDM Kurve, Getzner Kurve, Getzner Gerade, CDM Gerade und Tiflex Gerade)

In den nachfolgenden Abbildungen 4.2.4.2.1 bis 4.2.4.2.3 sind die korrigierten, frequenzabhängigen Reduktionen nach Zugskategorie dargestellt; eine Übersicht zu den durchschnittlichen Reduktionen nach Zugskategorie ist in Abbildung 4.2.4.2.4 gegeben. Eine analoge Darstellung nach USP Fabrikaten und Wirkungsbereich (Kurve bzw. Gerade) ist in Abbildung 4.2.4.2.5 zusammengestellt.

a)



b)

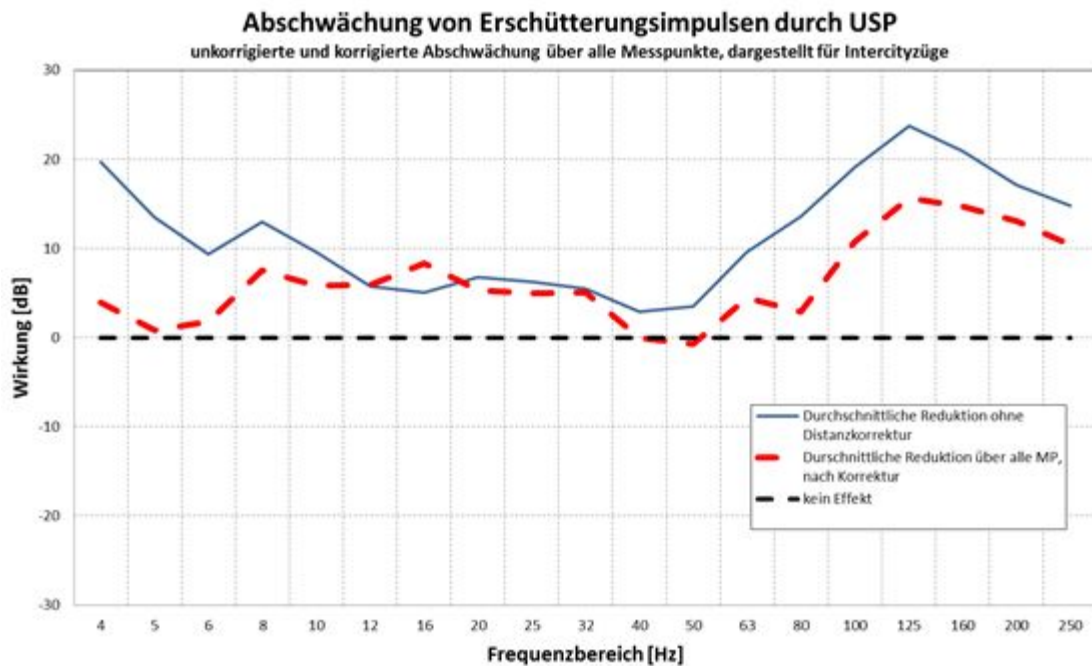
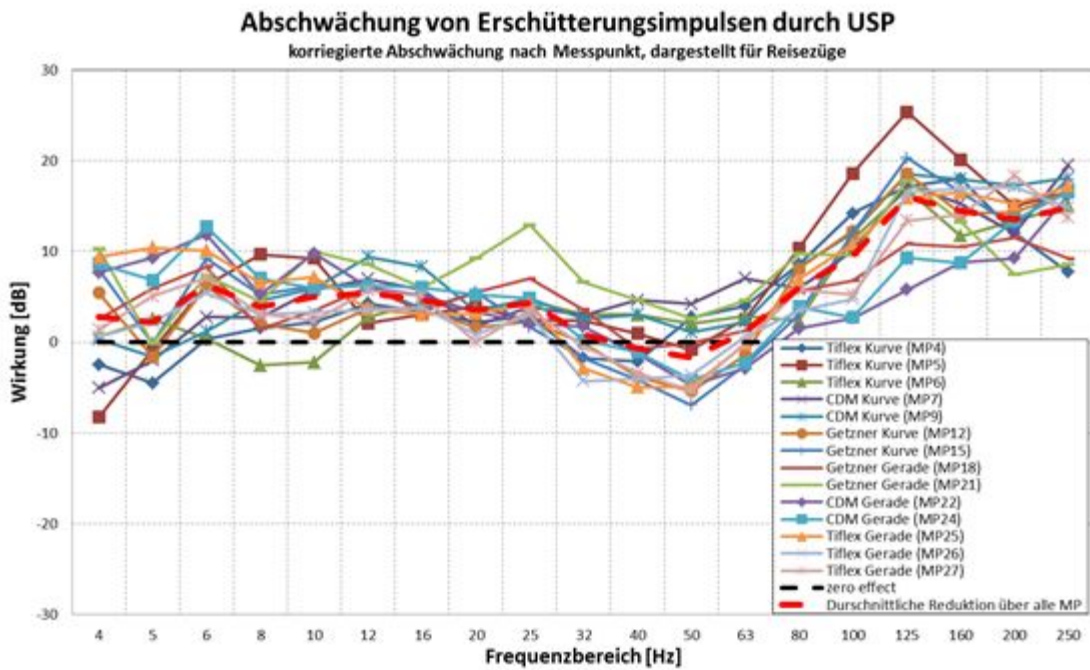


Abbildung 4.2.4.2.1 Abschwächung von Erschütterungsimpulsen in Abhängigkeit der Frequenz für Intercityzüge, dargestellt nach Messpunkten (a) und als Durchschnittswerte über alle Messpunkte (b).

a)



b)

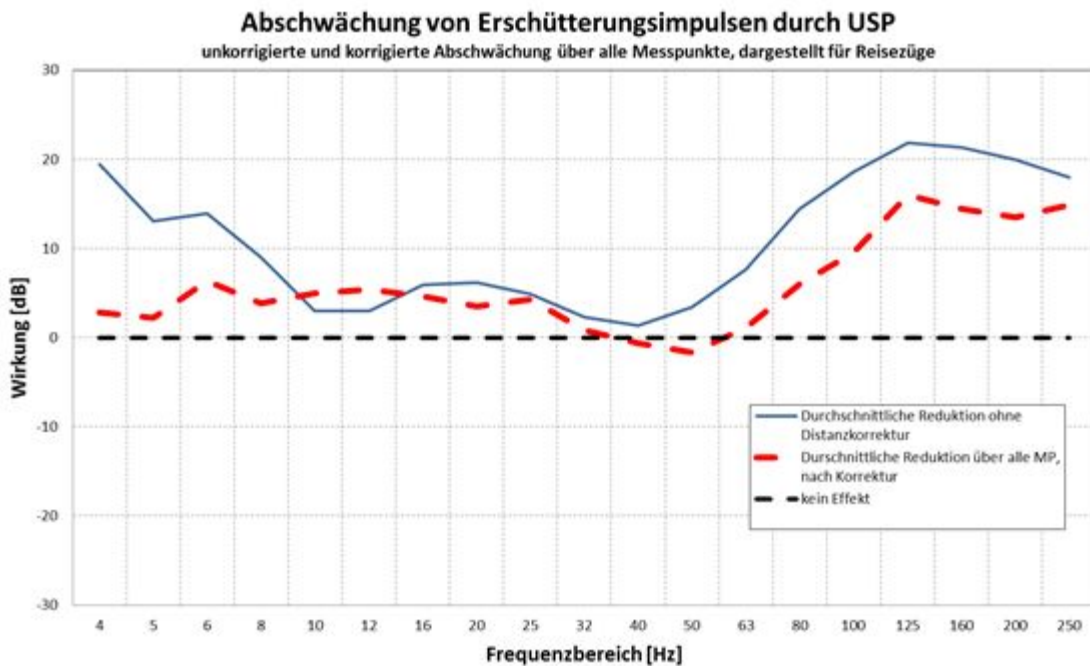
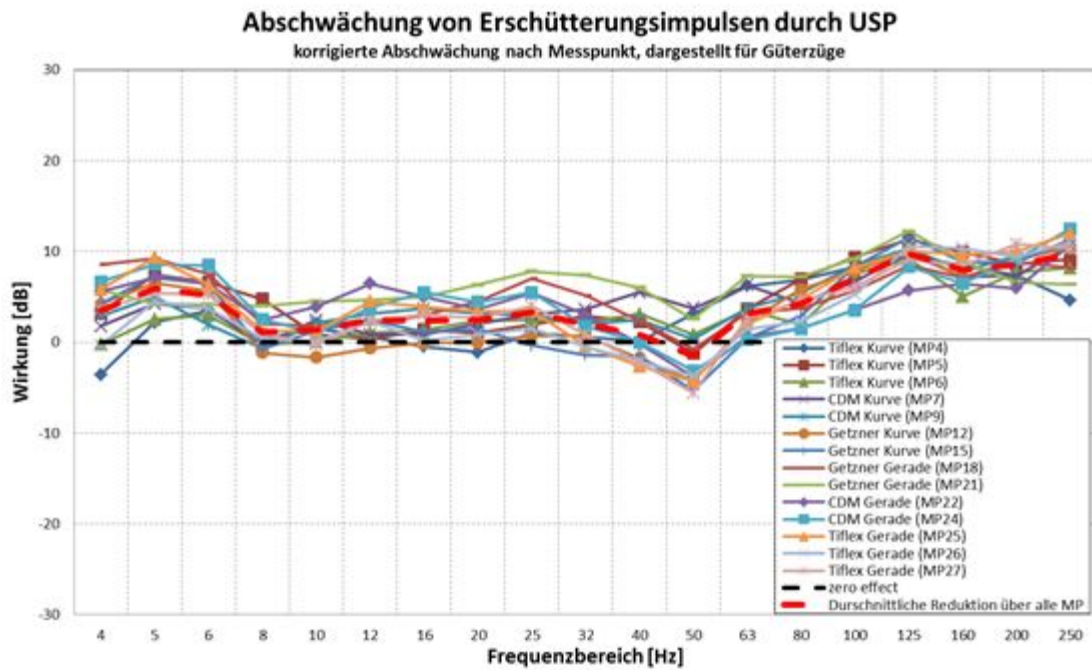


Abbildung 4.2.4.2.2 Abschwächung von Erschütterungsimpulsen in Abhängigkeit der Frequenz für Reisezüge, dargestellt nach Messpunkten (a) und als Durchschnittswerte über alle Messpunkte (b).

a)



b)

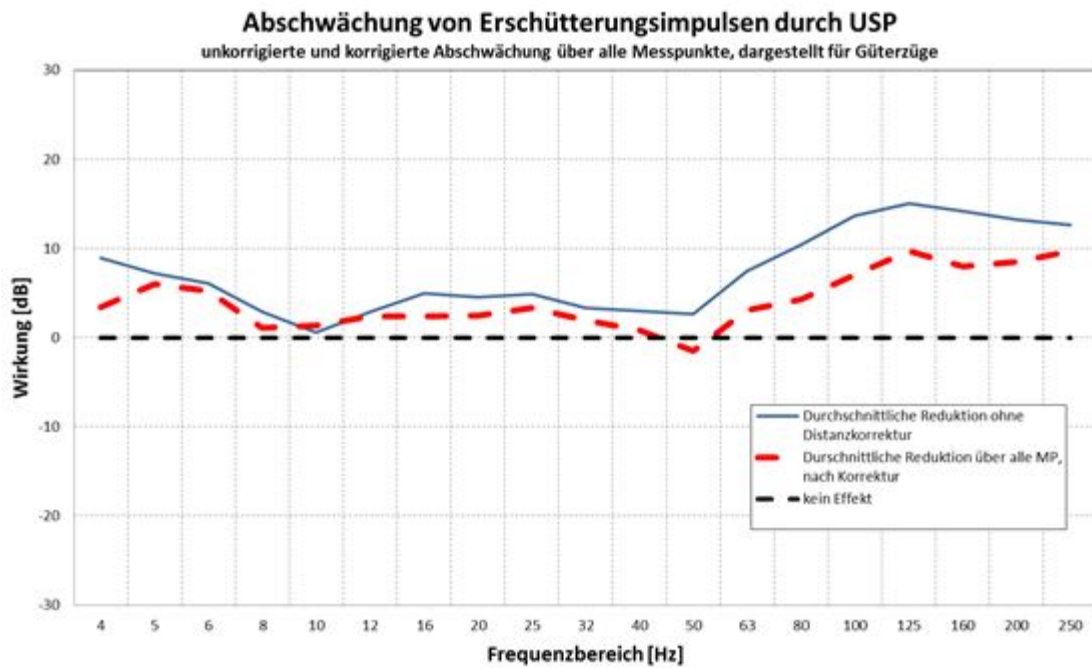


Abbildung 4.2.4.2.3 Abschwächung von Erschütterungsimpulsen in Abhängigkeit der Frequenz für Intercityzüge, dargestellt nach Messpunkten (a) und als Durchschnittswerte über alle Messpunkte (b).

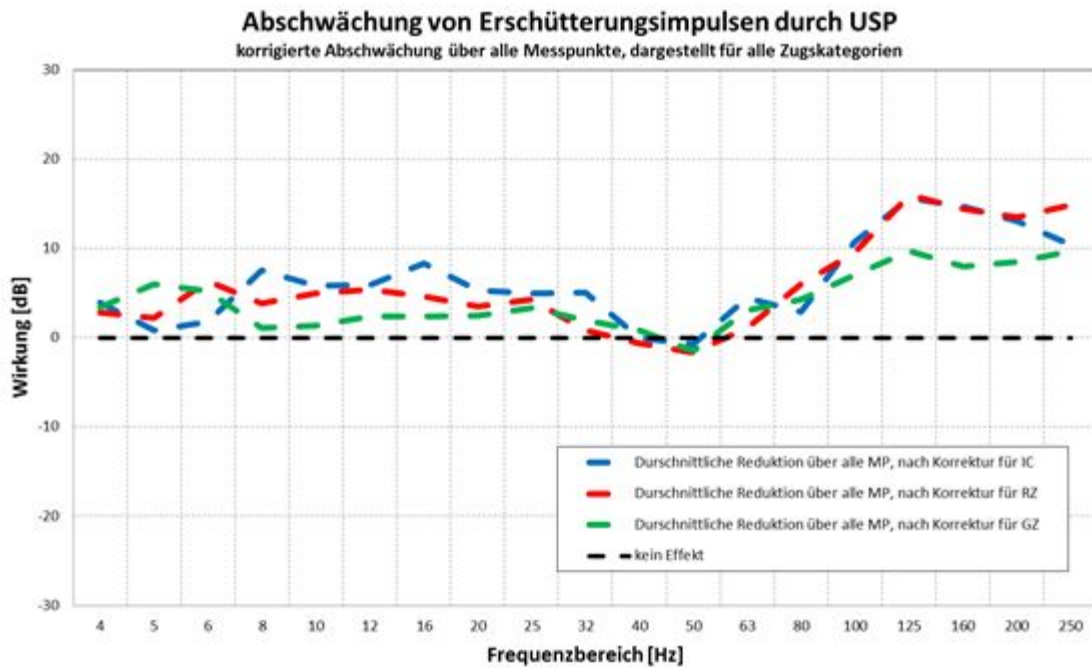


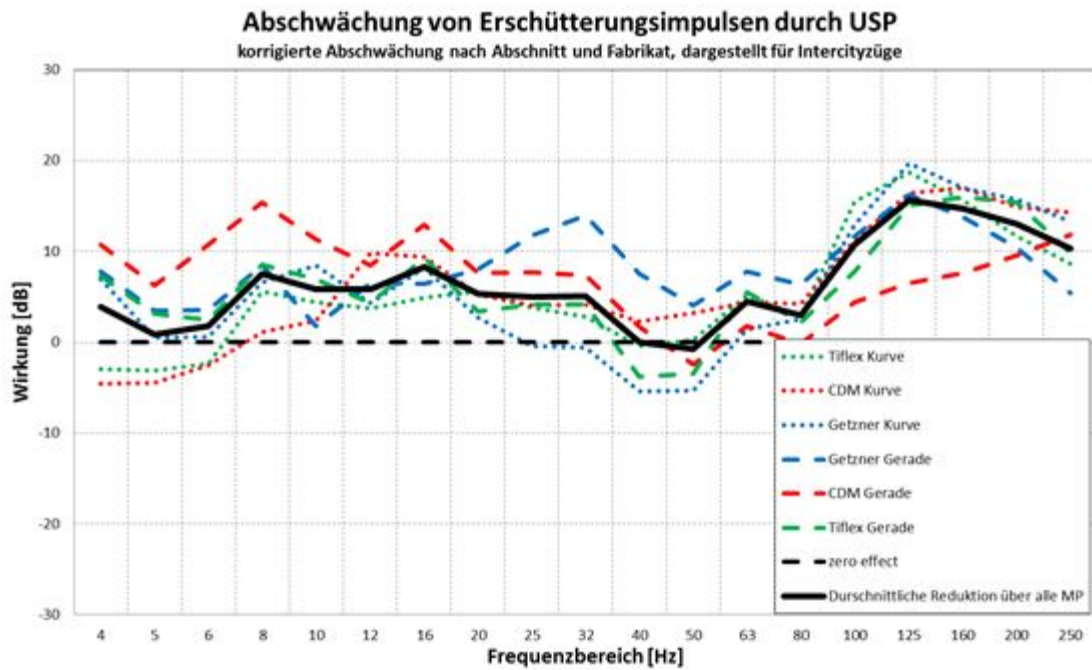
Abbildung 4.2.4.2.4 Durchschnittliche Abschwächung von Erschütterungsimpulsen in Abhängigkeit der Frequenz nach Zugskategorien.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit dem Einsatz von USP die Erschütterungsimpulse grundsätzlich abgeschwächt werden können. Die erzielte Reduktion ist im Bereich zwischen 80 Hz und 250 Hz für alle Zugskategorien am deutlichsten ausgeprägt. Auch im Bereich bis 32 Hz kann eine Reduktion aufgezeigt werden. Für den Frequenzbereich von 40-50 Hz wurden leicht negative Werte gefunden, welche auf eine mögliche, aber wenig ausgeprägte Verstärkung der Erschütterungsimpulse hindeuten. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Datengrundlage für den Referenzabschnitt in diesem Frequenzbereich verhältnismässig grosse Streuungen aufweist (siehe Abbildungen 4.2.2.1.1 bis 4.2.2.3.1).

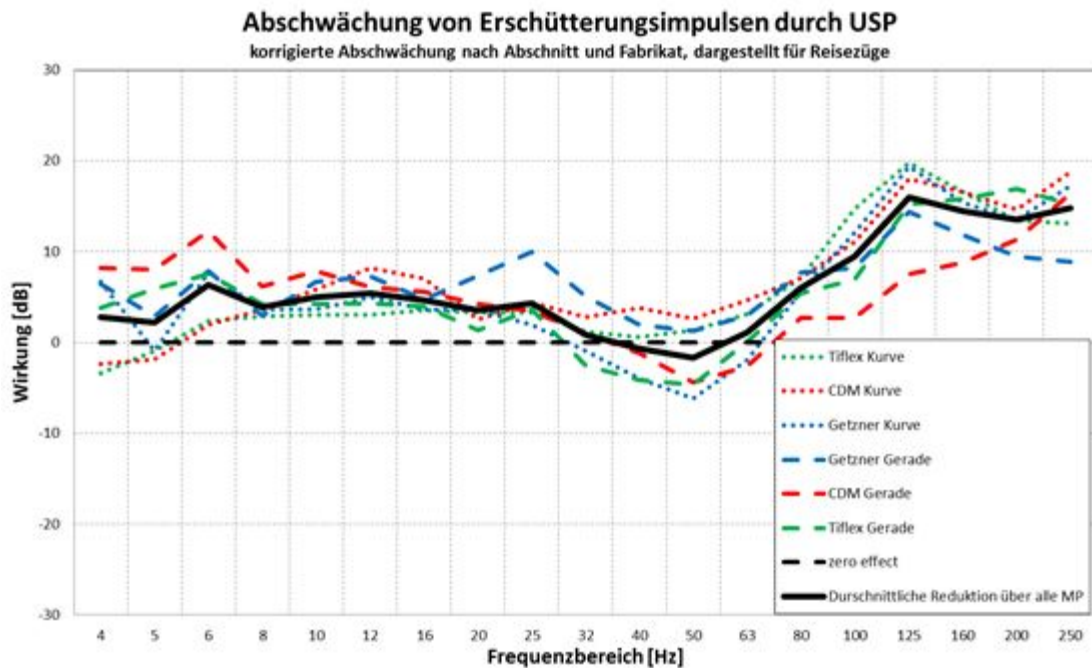
Die deutlichste Reduktion wurde für Intercityzüge festgestellt; für Reisezüge wurde eine leicht geringere Abschwächung ermittelt. Im Fall von Güterzügen, für welche die geringste Wirkung resultierte, liegt die Reduktion bis 32 Hz zwischen 1 – 3 dB und im Bereich zwischen 63 – 250 Hz bei 3.1 bis 9.7 dB.

Die Resultate aus der Analyse der Terzband-Spektren in Bezug auf die Reduktion von Erschütterungsimpulsen durch USP zeigen also die selben Trends, welche bereits aus der Analyse der v_{RMS} Werte gefunden wurden.

a)



b)



c)

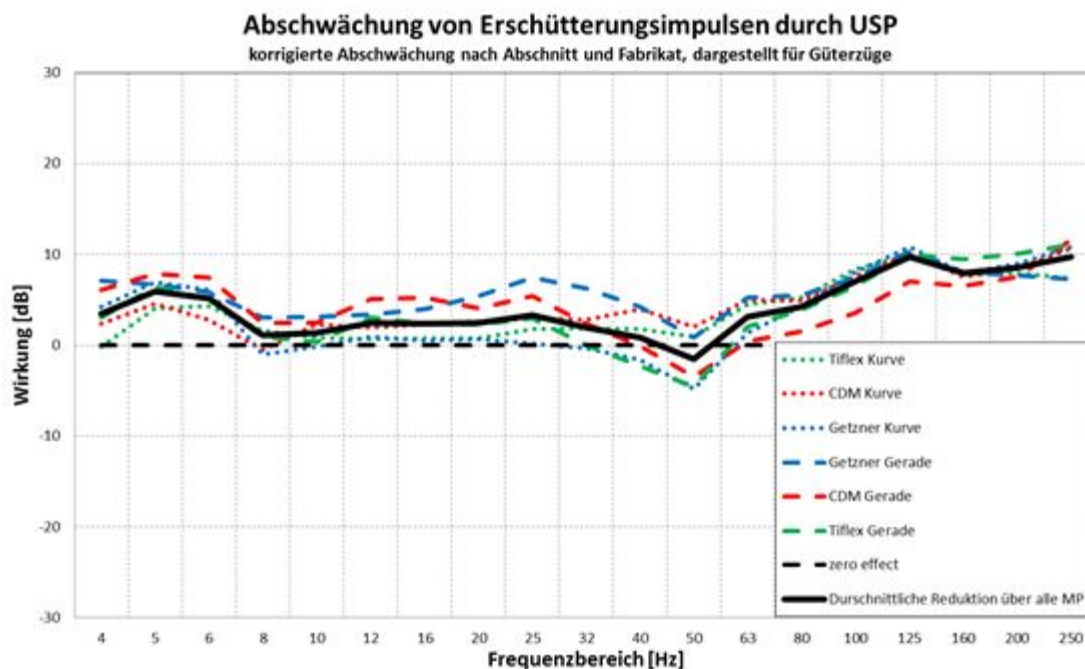


Abbildung 4.2.4.2.5 Durchschnittliche Abschwächung von Erschütterungsimpulsen in Abhängigkeit der Frequenz nach Abschnitt und Fabrikat für Intercityzüge (a), Reisezüge (b) und Güterzüge (c).

Die Analyse der frequenzabhängigen Reduktion der Erschütterungen in Bezug auf die einzelnen Test-Abschnitte bzw. Fabrikate lässt keine eindeutigen Schlüsse zu, aufgrund welcher ein bestimmtes Produkt als besonders wirksam bezeichnet werden kann. Es lassen sich aber Tendenzen erkennen. Die deutlichste Reduktion für alle Zugskategorien konnte im Bereich der Kurve mit dem Fabrikat von CDM erzielt werden, im Bereich der Geraden wurden Reduktionen in ähnlichem Ausmass für das Fabrikat von Getzner erreicht.

Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass einerseits die Datensätze der einzelnen Test-Abschnitte unterschiedliche, teilweise verhältnismässig grosse Streuungen aufweisen. In diesem Zusammenhang wurde festgehalten, dass Parameter wie beispielsweise die geophysikalischen Ausbreitungsbedingungen im Untergrund in eine Analyse der Messwerte miteinbezogen werden muss. Weitere Trends können wahrscheinlich identifiziert werden, sobald die abschliessende Auswertung der Messergebnisse der BAM vorliegen (vergleiche mit Kapitel 4.5).

4.3. Fahrbahntechnische Untersuchungen

4.3.1. Einsenkung

In den Referenzabschnitten ohne USP beträgt die mittlere Einsenkung 0.9 bis 1.2 mm. In den besohlenen Abschnitten nimmt die Gleiseinsenkung mit abnehmender Steifigkeit der USP zu, alle Abschnitte mit weichen USP weisen eine Einsenkung von über 2 mm auf (s. Abbildungen 4.3.1.1 und 4.3.4.2).

Die Einsenkungsdifferenz zwischen der Teststrecke und dem Nachbargleis zeigt die relativen Verhältnisse zwischen den einzelnen Testabschnitten mit höherer Plausibilität, da der Einfluss des Unterbaus auf die Messergebnisse teilweise kompensiert wird.

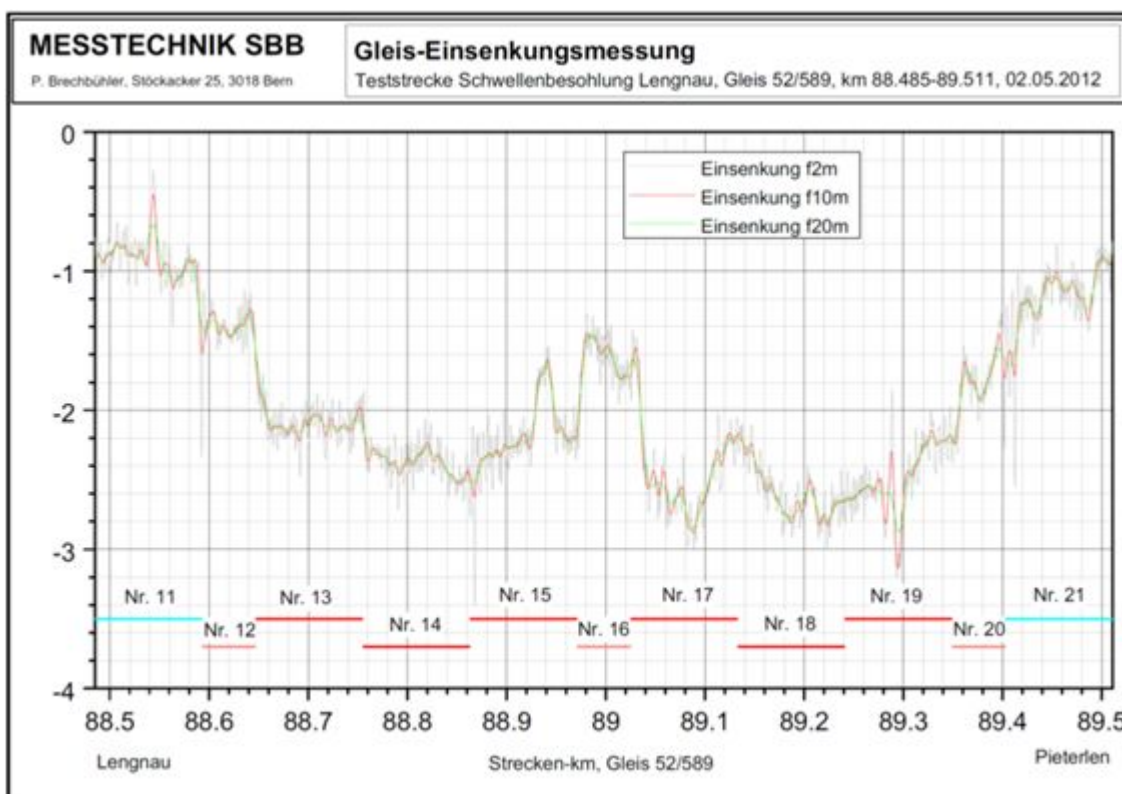


Abbildung 4.3.1.1 Einsenkungsmessung über alle Abschnitte, Teststrecke Gleis 52 (s. Abb. 4.3.1.2 für Abschnittsnummer Zuordnung).

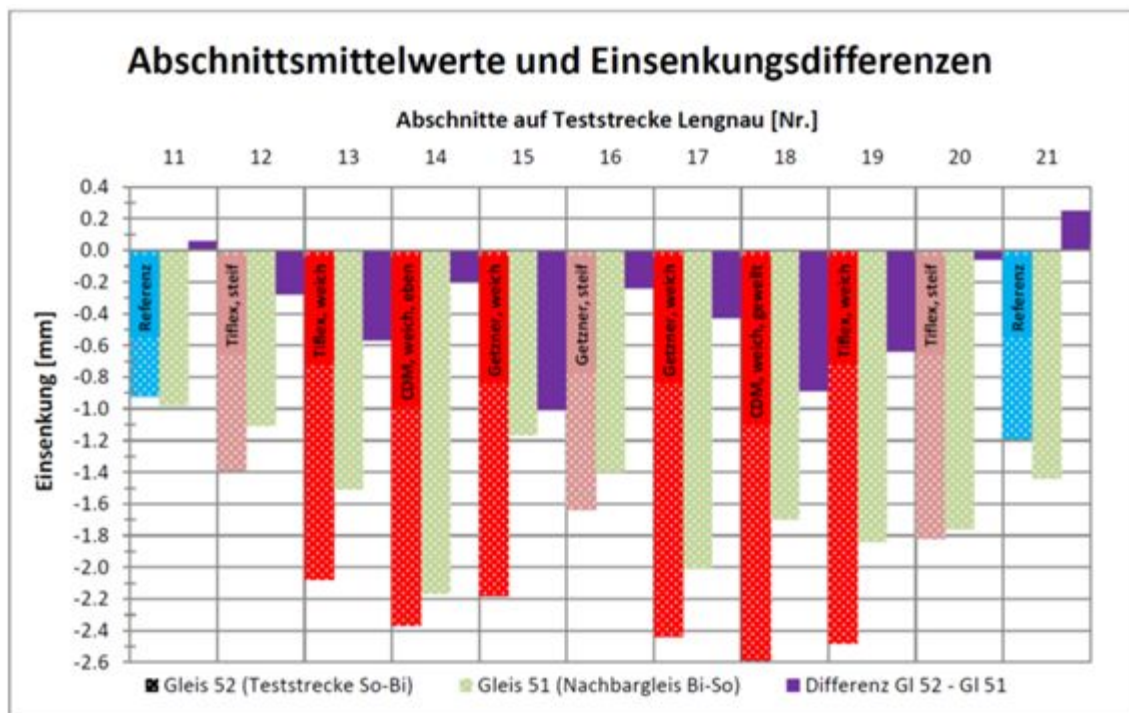


Abbildung 4.3.1.2 Abschnittsweise mittlere Einsenkung und Differenz zu Nachbargleis (Filter 2 m).

Die differenzierte Betrachtung unter Einbezug der Einsenkungswerte des Nachbargleises zeigt eine Erhöhung der Einsenkung gegenüber dem Mittelwert beider Referenzabschnitte von 0.2 bis 0.4 mm bei steifen USP und 0.6 bis 1.2 mm bei weichen USP.

4.3.2. Setzung

Die gemessenen Abschnitte können, was die Setzung betrifft, in drei Gruppen unterteilt werden:

- (i) AB 13 und 14: Geringe Setzung von rund 3.5 mm bei USP Tiflex weich und CMD weich.
- (ii) AB 12 und 15: Mittlere Setzung von 5 bis 6 mm bei USP Getzner weich und Tiflex steif.
- (iii) AB 11 und 16: Hohe Setzung von 8 bis 9.5 mm bei USP Getzner steif und im Referenzabschnitt.

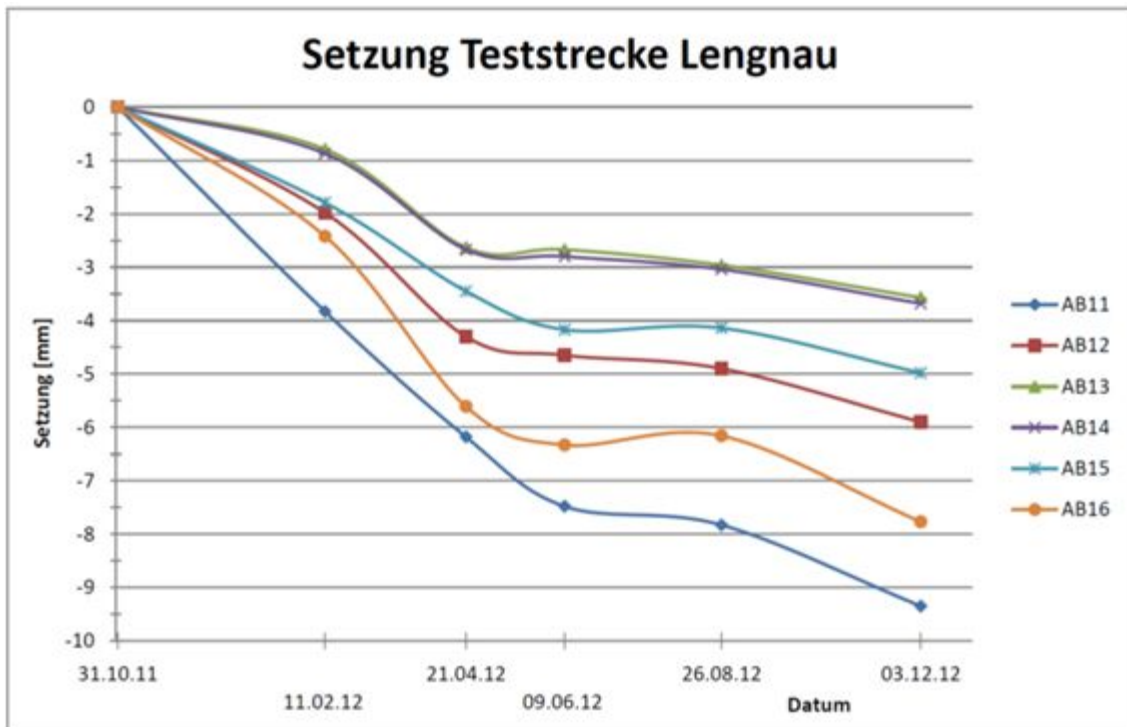


Abbildung 4.3.2.1 Setzung ab Inbetriebnahme.

Es zeigt sich ein deutliches Bild (s. Abbildung 4.3.2.1); der unbesohlte Referenzabschnitt weist eine hohe Setzung auf, die Abschnitte mit steifen USP liegen im Mittelfeld und die Abschnitte mit weichen USP haben das geringste Setzungsverhalten. Dabei senkt sich das Gleis im unbesohlenen Abschnitt fast dreimal stärker ab als in den Abschnitten mit weichen Schwellenbesohlungen.

Da die Setzung des Gleises nach einem Betriebsjahr noch keinen stabilen Zustand erreicht hat, wird empfohlen, nach zwei Betriebsjahren im Dezember 2013 eine weitere Messung durchzuführen.

4.3.3. Querverschiebewiderstand (QVW)

Die Abschnitte mit weichen Schwellenbesohlungen weisen im Mittel gegenüber den unbesohlenen Abschnitten über den gesamten Verschieberegion einen stark reduzierten QVW auf (s. Abbildung 4.3.3.1). Bei 2 mm Verschiebung erreichen die besohlenen Abschnitte auf gerader Strecke rund 40 bis 43 % des QVW des Referenzabschnitts.

Die QVW-Werte der besohlenen Abschnitte in der Geraden liegen nahe beisammen. Sie betragen bei 2 mm Verschiebung 15.79 kN im Abschnitt 13 (USP Tiflex, weich), 15.68 kN im Abschnitt 15 (USP Getzner, weich) resp. 14.86 kN (USP CDM, weich, eben). Die Differenz zwischen den Abschnitten beträgt also maximal nur ca. 6 % und liegt im Bereich der Standardabweichungen.

Die besohlenen Abschnitte in der Geraden weisen bei allen drei USP Fabrikaten einen höheren QVW auf als die besohlenen Abschnitte im Bogen. Die Differenz beträgt bei USP Tiflex 1.14 kN (8 %), bei USP CDM 2.90 kN (24 %) und bei USP Getzner 3.07 kN (24 %) – alle Werte bezogen auf 2 mm Verschiebung. In den Abschnitten 14 und 18 mit USP CDM sind nicht dieselben Produkte verbaut. Abschnitt 14 ist mit einer ebenen, Abschnitt 18 mit einer gewellten USP Ausführung ausgestattet.

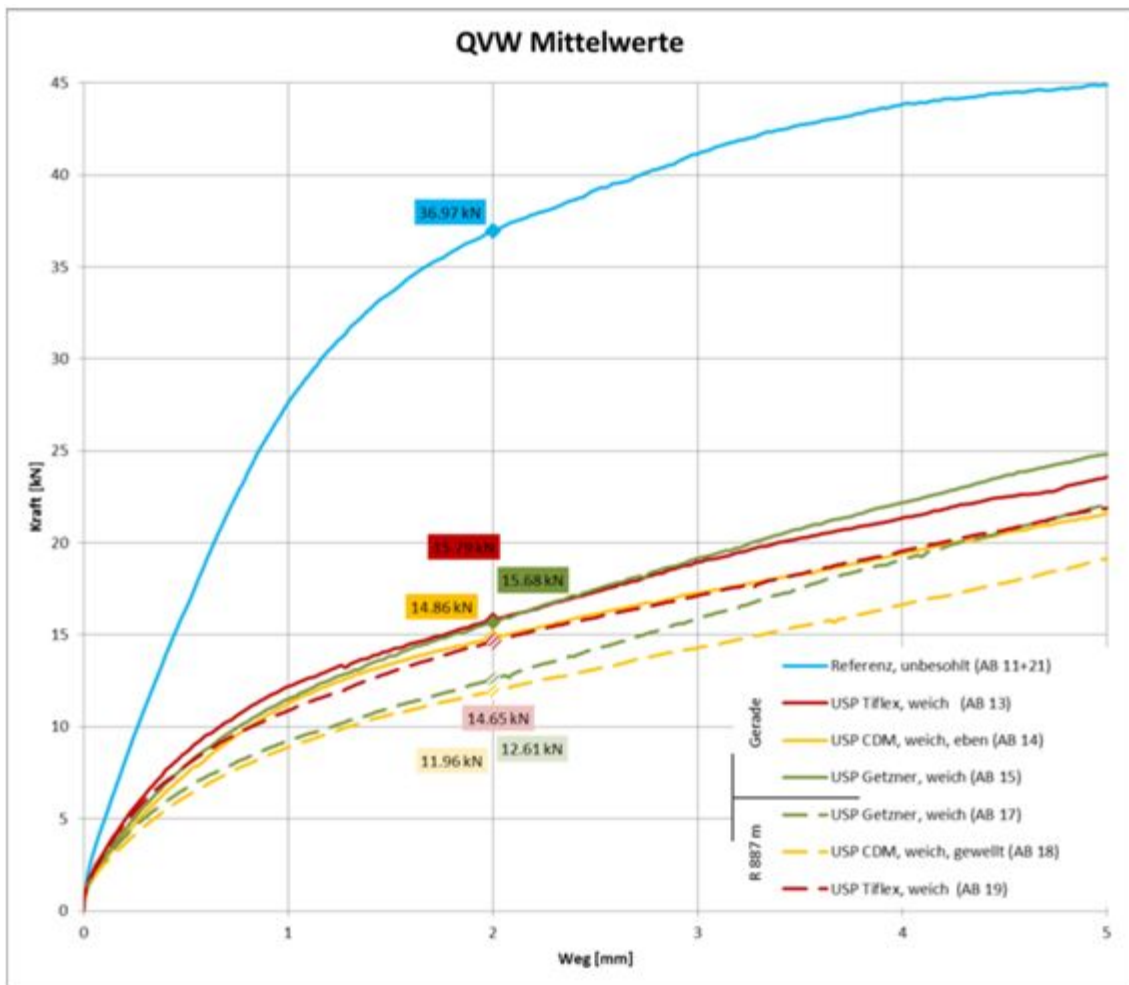


Abbildung 4.3.3.1 Mittelwerte QVW bis 5 mm seitliche Verschiebung.

4.3.4. Schwellen-Schwingungen

Im August 2012 wurden in den Abschnitten 11 bis 16 an den Schwellen mit je 8 Beschleunigungssensoren je Abschnitt die vertikalen Schwingungen gemessen. Während ca. 12 Stunden wurden alle Züge automatisch erfasst. Die Intercity Neigezüge (ICN) (s. Abbildung 4.3.4.1) und die EW IV / Re 460 Pendelzüge wurden ausgewertet. Es wurden die quadratischen Mittelwerte und das Frequenzspektrum der Beschleunigungen berechnet.

Die höchsten quadratischen Mittelwerte der Schwingungen (RMS-Werte) ergeben sich im Abschnitt 13 (USP Tiflex, weich). Die Abschnitte 11 (Referenz), 12 (USP Tiflex, steif) und 14 (USP CDM, weich) liegen im Mittelfeld. Bei den Abschnitten 15 und 16 (USP Getzner weich und steif) ergaben sich die tiefsten Amplituden der Schwingungen. Beim Frequenzspektrum liegen die höchsten Amplituden zwischen 600 und 1300 Hz. Der Frequenzgang ist aber stark von der Geschwindigkeit der Züge abhängig. Bei den Re 460 / EW IV Pendelzügen gibt es Resonanzerscheinungen.

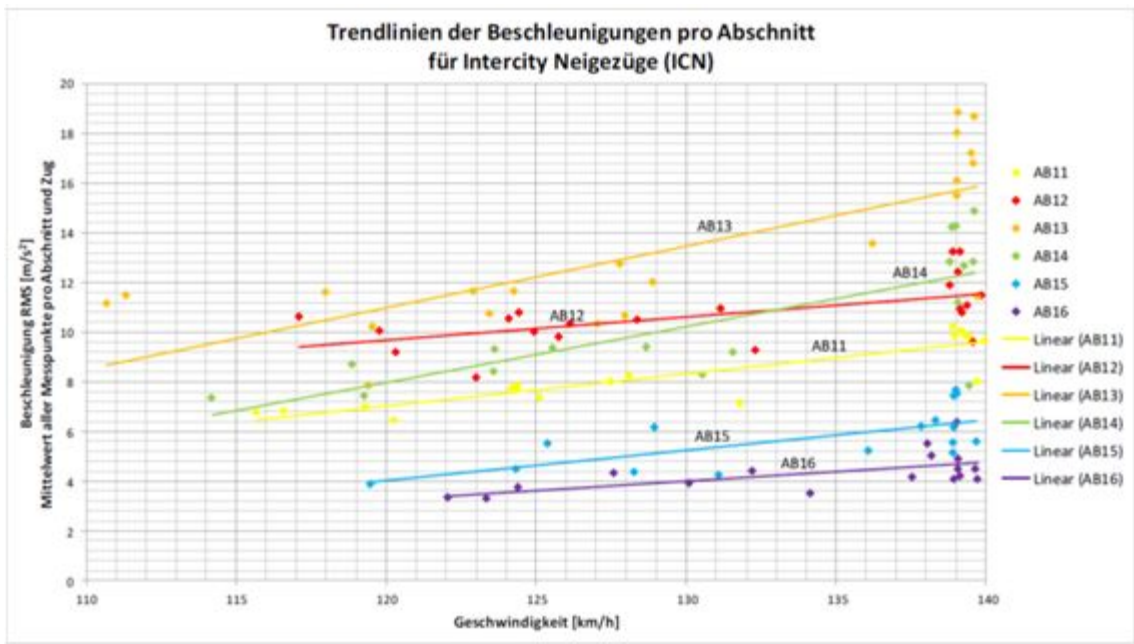


Abbildung 4.3.4.1 Trendlinien der Beschleunigungen pro Abschnitt für ICN.

Die Beschlungen beeinflussen die Frequenz der höchsten Amplitude. Im unbeschlungenen Referenzabschnitt (AB11) liegt sie bei 1250 resp. 1600 Hz (s. Abbildung 4.3.4.2). In den beschlungenen Abschnitten (AB12-AB16) liegt sie hingegen bei 630 Hz. Ausnahme ist einzig Abschnitt 13, wo sowohl 630 Hz als auch 1600 Hz die höchsten Amplituden haben.

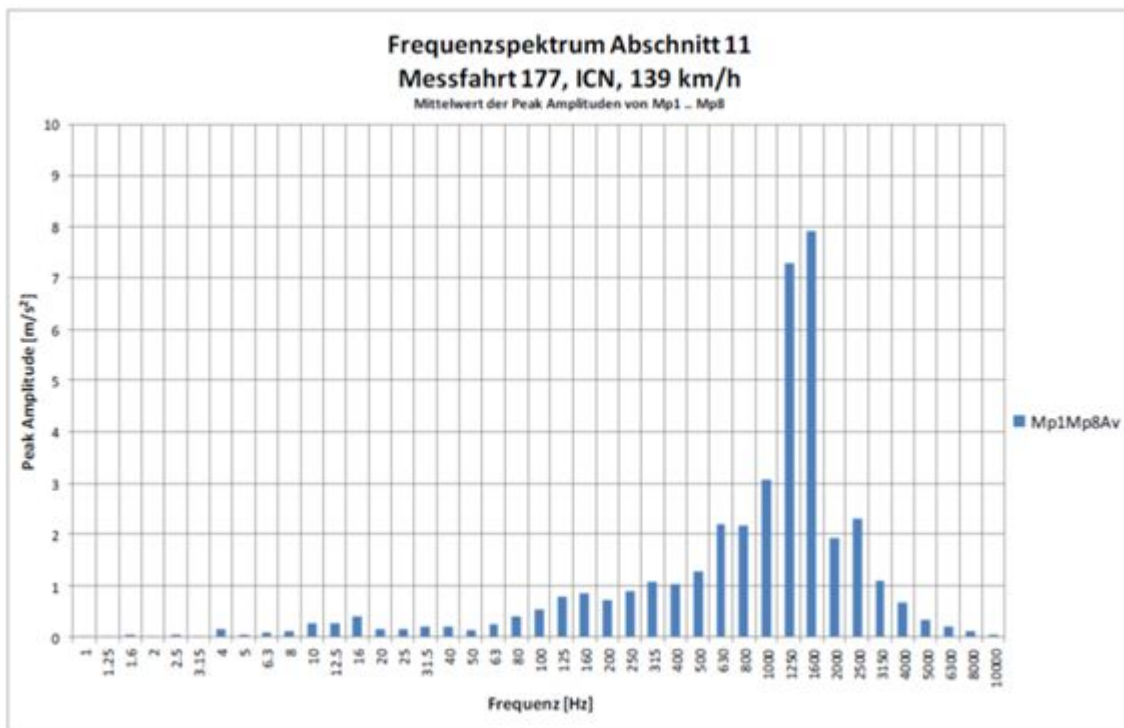


Abbildung 4.3.4.2 Abschnitt 11, Messfahrt 177, ICN 139 km/h.

4.4. Aussenlärmmessungen

4.4.1. Vergleich der SEL Werte

Die 3 Referenzmesspunkte R1, R2 und R3 weisen sehr kleine Unterschiede auf; die drei Messpunkte deuten homogene Verhältnisse/Messbedingungen an. Alle 3 Messpunkte können als Referenz verwendet werden. Bezüglich dem Vergleich zwischen den Wirkbereich und der Referenz wurden aus statistischen Gründen die 3 Referenzmesspunkte R1, R2 und R3 für die Referenz und K1, K2 sowie K3 für die Kurve bzw. G1, G2 und G3 für die Gerade zu einem Wert zusammengefasst.

Basierend auf den Ergebnissen der Aussenlärmmessungen, welche im Bericht [2] ausführlich dargestellt sind, wurden hinsichtlich dieses Syntheseberichts wichtigsten Resultate zusammengefasst. Dabei wurden im Fall der SEL Werte die Werte im Messbericht verwendet, welche auf $v = 80 \text{ km/h}$ normalisiert worden sind.

Aus den Messwerten, welche in der Kurve erhoben wurden, geht hervor, dass IC-Kompositionen die geringste Zunahme der SEL Werte aufweisen; gegenüber dem Referenzabschnitt wurde eine mittlere Zunahme von ca. 2.5 dBA ermittelt. Für Güterzüge beträgt die mittlere Zunahme in der Kurve ca. 4.0 dBA. Die grösste Zunahme mit ca. 5.0 dBA wurde für Reisezüge festgestellt.

In Bezug auf die unterschiedlichen Produkte, welche in der Kurve eingebaut wurden, zeigt das Fabrikat von CDM die grössten Zunahmen, während die Fabrikate von Tiflex und Getzner mit vergleichsweise geringeren Zunahmen als ungefähr gleichwertig betrachtet werden können.

Analoge Betrachtungen für die Wirkbereiche in der Geraden zeigen ähnliche Tendenzen; für IC-Kompositionen wurde mit ca. 2.0 dBA gegenüber dem Referenzabschnitt wiederum die geringste Zunahme festgestellt, während für Güterzüge eine Zunahme von ca. 4.0 dBA und für Reisezüge eine Zunahme von ca. 5.0 dBA ermittelt wurden. Es muss jedoch festgehalten werden, dass im Gegensatz zu den Messwerten im Bereich der Kurve für die unterschiedlichen Messpunkte in der Geraden (G1, G2 und G3) durchwegs grössere Unterschiede festzustellen sind.

Bezüglich der in der Gerade eingesetzten USP Produkte ist auffallend, dass das Fabrikat von Tiflex deutlich höhere Werte verursacht als die Fabrikate von CDM und Getzner. Die kleinsten Zunahmen wurden für das Fabrikat von Getzner festgestellt.

Ein systematischer Vergleich zwischen den Resultaten für die Kurve mit denjenigen für die Gerade zeigt, dass das Fabrikat von Tiflex in der Geraden für alle Zugskategorien deutlich höhere SEL werte aufweist. Die SEL Werte, welche auf den Abschnitten mit dem Fabrikat von CDM ermittelt wurden, sind mehrheitlich verhältnismässig einheitlich; grössere Abweichungen wurden lediglich für IC-Kompositionen festgestellt. Ein ähnlicher Trend kann für das Produkt von Getzner festgehalten werden; auf für dieses Produkt wurden mit Ausnahme von IC-Kompositionen mehrheitlich einheitliche Werte in Kurve und Gerade ausgewiesen.

Wertvolle Hinweis zur weitergehenden Charakterisierung der beobachteten Lärmzunahmen bieten die Frequenzspektren, welche im Zuge der Messungen aufgezeichnet wurden. Eine Auswahl an Frequenzspektren der Aussenlärmmessungen für jede Zugskategorie für die Wirkbereiche Kurve bzw. Gerade ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Wirkbereich Kurve

Wirkbereich Gerade

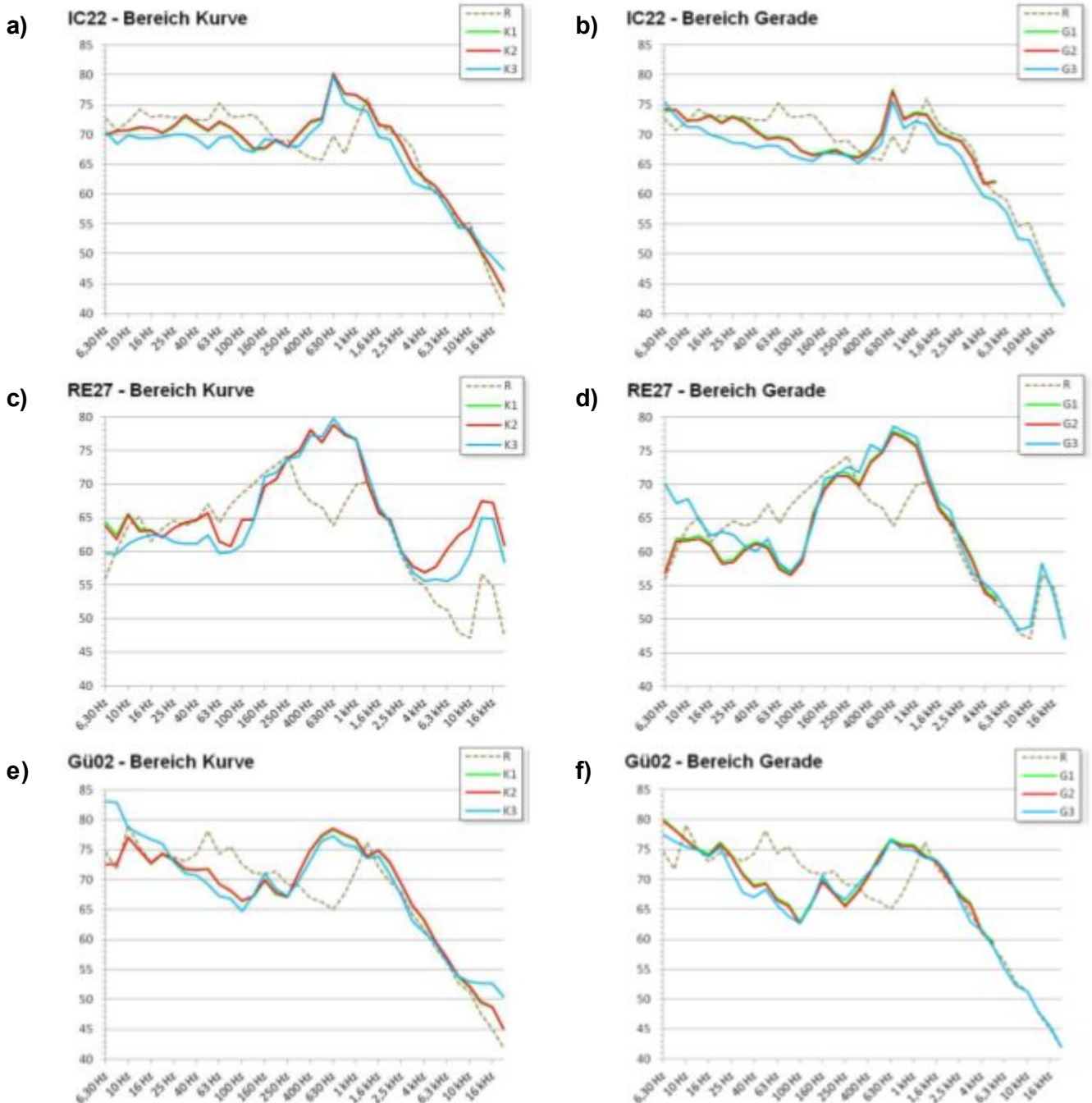


Abbildung 4.4.1.1 Ausgewählte Frequenzspektren von den Aussenlärmmessungen. Für jede Zugskategorie wurden die Frequenzspektren aus dem Bereich der Kurve bzw. aus der Gerade im Vergleich zum Referenzabschnitt dargestellt.

Unabhängig der Zugskategorie geht hervor, dass die Frequenzspektren für die Bereiche in der Kurve bzw. in der Gerade gegenüber dem Referenzbereich unterschiedlich verlaufen. Im Gegensatz zum Referenzbereich sind sowohl in der Kurve als auch in der Gerade deutliche Peaks bei 630 Hz festgestellt worden; die Zunahme der SEL Werte kann auf den Frequenzbereich zwischen 315 bis 1250 Hz zurückgeführt werden, wo in den spektralen Daten ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen ist. Im Frequenzbereich zwischen 25 bis 160 Hz hingegen wurde eine markante Abnahme des Schallpegels gegenüber dem Referenzabschnitt beobachtet.

Für alle Zugskategorien kann festgehalten werden, dass in Bezug auf die Frequenzspektren der Aussenlärmmessungen grundsätzlich ähnliche und vergleichbare Ergebnisse für sämtliche verwendeten USP Fabrikate resultiert sind.

4.5. Geophysikalische Untersuchungen

Die Resultate der geophysikalischen Untersuchungen durch die BAM lagen bis zum Zeitpunkt, als dieser Synthesebericht verfasst wurde, noch nicht vor. Die Messungen wurden im August 2013 abgeschlossen.

5. Interpretation und Diskussion

5.1. Vergleich mit Pratteln

In Pratteln wurde bereits Ende November 2006 eine Pilotstrecke für USP auf offener Strecke realisiert. Eingebaut wurde ein Fabrikat von Getzner (Typ SLS1010G, $C_{stat} = 0.1 \text{ N/mm}^3$). Eine Analyse der Dämmwirkung der Erschütterungen durch die besohlenen Betonschwellen wurde mit dem Bericht [4] „Schwellenbesohlung als E/KS-Schutz bei offener Strecke - Erschütterungsmessungen neben dem Gleis in Pratteln, Nov. 06, Feb. 07, Juni 07“ vom Februar 2008 abgeschlossen. Untersucht wurde unter anderem die Dämmwirkung von USP für hohe und tiefe Frequenzen der Erschütterung.

Für Geschwindigkeiten von ca. 100 km/h wurden für die Pilotstrecke in Pratteln Erschütterungsreduktionen im Bereich von 20% - 55 % festgestellt. Ein Vergleich mit den Resultaten der Auswertung von v_{RMS} Werten aus dem vorliegenden Synthesebericht zeigt, dass sich die Erschütterungsreduktionen bestätigen lassen:

Über alle Zugskategorien gemittelt wurden im vorliegenden Bericht Reduktionen von zwischen 15% - 45% (Normierung mit konstanten Faktoren) bzw. 8% - 39% (Normierung mit Modell) ermittelt.

Die durchschnittliche Reduktion in dBA kann in der vorliegenden Auswertung mit 5.47 dBA beziffert werden, was gegenüber dem Pilotprojekt in Pratteln leichte Steigerung bedeutet; die Reduktion wurde im Bericht zu Pratteln mit 4.58 dBA angegeben.

Bezüglich der Analyse der Terzbandspektren wurde für Pratteln eine Reduktion im Bereich bis 80Hz gefunden, für den Bereich zwischen 80 Hz und 160 Hz wurde eine Verstärkung festgestellt. Die entsprechende Analyse im vorliegenden Synthesebericht zeigt indes, dass nahezu über den gesamten erfassten Frequenzbereich eine Reduktion erzielt wurde. Einzig im Terzband bei 50 Hz wurde in der vorliegenden Auswertung eine leichte Verstärkung gefunden.

5.2. Aussenlärmessungen

Als Fazit der Auswertung der Aussenlärmessungen kann festgehalten werden, dass im Zusammenhang mit dem Einbau von USP eine nicht unerhebliche Zunahme des Lärmpegels zu verzeichnen ist.

Es liegen Anhaltspunkte vor, welche den Schluss zulassen, dass dieser Effekt möglicherweise durch den Einbau von harten Schienenzwischenlagen reduziert werden kann. Zudem muss geprüft werden, ob sich eine weitere Reduktion durch den Einbau von Schienenstegabsorbieren erreichen lässt; der Wirkungsbereich von solchen Schienenstegabsorbieren liegt im Frequenzbereich, in welchem im Zuge der hier ausgewerteten Daten die Zunahme des Lärmpegels identifiziert wurde.

6. Schlussfolgerungen

Eine Reduktion der Erschütterungen durch die eingebaute Schwellenbesohlung konnte festgestellt werden – sowohl gemessen an den v_{RMS} Werte als auch über den erfassten Frequenzbereich von 4 -250 Hz (Terzband-Spektren).

Die Reduktion der Erschütterungsimpulse beläuft sich bezogen auf alle Zugskategorien und gemessen an den v_{RMS} Werten auf zwischen 15% - 45% (Normierung mit konstanten Faktoren) bzw. 8% - 39% (Normierung mit Modell).

Betrachtungen für einzelne Zugskategorien sowie für die unterschiedlichen USP Fabrikate in der Kurve sowie auf der Geraden haben nicht zu eindeutigen Ergebnissen geführt, aufgrund welcher ein optimaler USP-Typ hätte identifiziert werden können. Gleichwohl lassen sich erste Tendenzen erkennen; die deutlichste Reduktion für alle Zugskategorien konnte im Bereich der Kurve mit dem Fabrikat von CDM erzielt werden, im Bereich der Geraden wurden Reduktionen in ähnlichem Ausmass für das Fabrikat von Getzner erreicht. Unter Berücksichtigung der Datengrundlage ist eine Beurteilung einzelner Fabrikate jedoch zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich, weil Parameter wie beispielsweise die geophysikalischen Ausbreitungsbedingungen im Untergrund die Messwerte auch teilweise zu beeinflussen vermögen. Mit den noch ausstehenden Messergebnissen der BAM zu den Ausbreitungsbedingungen können möglicherweise weitere Trends erkannt werden.

Die Analyse der Terzband-Spektren zeigt, dass die Wirkung im Frequenz-Bereich von 63 bis 250 Hz am stärksten ausgeprägt ist. Auch im Bereich zwischen 4 und 40 Hz wurde eine Wirkung festgestellt. Beim Terzband bei 50 Hz wurde unabhängig der Zugskategorie eine leichte Verstärkung ermittelt; diese Verstärkung beläuft sich über alle Züge gemittelt auf rund 1.3 dBA, während sich die durchschnittliche Reduktion über den gesamten Frequenzbereich (inklusive 50 Hz) auf rund 5.5 dBA beläuft.

Die Aussenlärm Messungen haben gezeigt, dass in sämtlichen Bereichen, in welchen USP eingebaut wurden, eine Zunahme der Lärmpegel festgestellt werden kann. Diese Zunahme ist am stärksten ausgeprägt für RZ (bis + 5.0 dBA), wohingegen für IC signifikant geringere Zunahmen gemessen wurden (bis + 2.5 dBA). Hinweis auf Rollmaterial bei RZ (ähnliche Beobachtungen im Raum Zürich für Niederflurkompositionen).

Die Zunahme beschränkt sich auf den Frequenzbereich zwischen 315 und 1250 Hz, zwischen 25 bis 160 Hz hingegen wurde eine markante Abnahme des Schallpegels gegenüber dem Referenzabschnitt beobachtet. Mögliche Lösungsansätze, um diese Zunahme des Lärmpegels eliminieren oder mindestens deutlich reduzieren zu können sind zum einen der Einbau einer härteren Schienenzwischenlage und zum anderen der Einsatz von Schienenstegabsorbern. Mit dem Einbau einer härteren Schienenzwischenlage lässt sich vermutlich eine generelle Reduktion der Lärmemissionen von rund 1-2 dBA erzielen, der Einsatz von Schienenstegabsorbern dürfte zu einer signifikanten Lärminderung im Frequenzbereich zwischen 315 – 1250 Hz führen.

Testreihen zur weiteren Optimierung von Schwellenbesohlung als Massnahme des Erschütterungsschutzes werden als notwendig erachtet.

7. Literatur

- [1] „Schwellenbesohlung auf offener Strecke – Messungen Pieterlen“. Ziegler Consultants, Zürich, 25.07.2012
- [2] „Aussenlärm-Messungen - Messbericht“. Planteam GHS, Sempach-Station, 25.08.2013
- [3] „USP Teststrecke Lengnau – Pieterlen: Einsenkungs-, Setzungs-, Querverschiebewiderstands- und Schwingungsmessung“. SBB Mess- und Diagnosetechnik, 24.7.2013
- [4] „Schwellenbesohlung als E/KS-Schutz bei offener Strecke - Erschütterungsmessungen neben dem Gleis in Pratteln, Nov. 06, Feb. 07, Juni 07“, BahnUmwelt-Center SBB, Bern, 28.02.2008

8. Anhang