

Erschütterungsemissionen bei Weichen

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplomingenieurs der Studienrichtung
Bauingenieurwissenschaften - Konstruktiver Ingenieurbau

von
Manfred Bauer, BSc

erstellt am Institut für Betonbau
an der Technischen Universität Graz

Betreuer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Flesch
Mitbetreuer: Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Werner Theiler

Graz, im März 2011

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei jenen Personen bedanken, die mich während meiner Studienzeit begleitet und unterstützt haben. Allen voran danke ich meinem Betreuer, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rainer Flesch sowie Herrn Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Werner Theiler für die ausgezeichnete Betreuung bei der Erstellung meiner Masterarbeit.

Neben den Mitarbeitern des Betonbauinstituts danke ich auch jenen des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft für sämtliche Recherchen im Rahmen meiner Messreihen.

Ebenfalls ein besonderer Dank gilt tappauf.consultants mit sämtlichen Mitarbeitern, meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meiner Verlobten Sigrid.

Graz, im März 2011

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als angegebene Quellen nicht benutzt und die aus den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Ich versichere, dass ich diese Arbeit bisher weder im In- noch im Ausland einem Beurteiler oder einer Beurteilerin in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, März 2011



Unterschrift

Erschütterungsemissionen bei Weichen

Untersuchungen zur verbesserten Modellierung von Weichen bei Erschütterungsprognosen

Kurzfassung

Titel: Erschütterungsemissionen bei Weichen

Schlagwörter: Weiche, Herzstück, Linienquelle, Punktquelle, Erschütterungsproblematik, Emission, Transmission, Immission, Verstärkungsfaktor, Terzbandspektrum, Erschütterungsprognosen, ÖNORM S 9012

Durch das Befahren von Weichen wird die Erschütterungsemission verstärkt. Es wird untersucht, wie groß diese Verstärkung in Abhängigkeit von der Ausrichtung und Distanz des Messpunktes zur Weiche ist und ab welcher Entfernung keine Erhöhung mehr auftritt. Weiters wird eine genaue Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der Verstärkung durchgeführt.

Durch die Untersuchungen in der Arbeit können für zukünftige Erschütterungsprognosen Weichen präziser modelliert werden.

Abstract

Titel: Vibration problems at switches

Keywords: Switch, frog, line source, point source, vibration problems, emission, transmission, influence of pollutants, stiffness factor, third octave spectrum, vibration prognosis, ÖNORM S 9012

Traffic on switches increases railway vibration. This increase of the vibration is examined depending on the distance and direction to the switch.

This paper defines a model for the increase of vibration depending on frequency issues.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung und Motivation	1
2	Erschütterungen infolge Schienenverkehr	2
2.1	Allgemeines.....	2
2.2	Emission von Erschütterungen	4
2.3	Transmission von Erschütterungen.....	4
2.3.1	Wellentypen	4
2.3.2	Dämpfung.....	6
2.3.3	Punktquelle und Linienquelle	6
2.3.4	Verstärkung von Erschütterungen.....	8
2.4	Transmission im Gebäude - Immission von Erschütterungen.....	10
2.5	Reduktion von Erschütterungen.....	12
2.5.1	Reduktion der Erschütterungsemission am Fahrweg (Quelle).....	13
2.5.2	Beeinflussung der Ausbreitung im Baugrund (Übertragungsweg).....	15
2.5.3	Maßnahmen am Bauwerk (Immissionsort)	15
3	Wahrnehmung und Beurteilung von Erschütterungen	16
3.1	Die bewertete Schwingbeschleunigung $a_w(t)$	16
3.2	Beurteilung der Einwirkung von Schwingungsimmissionen des landgebundenen Verkehrs auf den Menschen - ÖNORM S 9012 (2010-02-01)	17
3.2.1	Wahrnehmung von Erschütterungsimmissionen.....	18
3.2.2	Beurteilung der Erschütterungsimmissionen.....	18
3.2.3	Beurteilung der sekundären Luftschallimmissionen	22
3.2.4	Extrapolation und Prognose.....	24
3.3	Beurteilungsänderungen durch den Normenumstieg von ÖNORM S 9012 (Ausgabe 1996) auf die gültige ÖNORM S 9012 (Ausgabe 2010)	25
3.3.1	Beurteilung nach ÖNORM S 9012 (1996-08-01)	25
3.3.2	Vergleich der einzuhaltenden Grenzwerte beider Ausgaben.....	27

Erschütterungsemissionen bei Weichen

Untersuchungen zur verbesserten Modellierung von Weichen bei Erschütterungsprognosen

3.3.3 Zusammenfassung der Beurteilungsänderungen	31
4 Weichen	32
4.1 Allgemeines.....	32
4.2 Einteilung von Weichen, Kreuzungen und Kreuzungsweichen.....	32
4.2.1 Einfache Weiche	32
4.2.2 Doppelweiche.....	33
4.2.3 Bogenweiche.....	33
4.2.4 Scheitelklothoidenweiche.....	33
4.2.5 Kreuzungen und Kreuzungsweichen	33
4.3 Weichenbezeichnung.....	34
4.4 Weichenelemente	34
4.4.1 Zunge und Backenschiene.....	34
4.4.2 Herzstück mit Flügelschienen	35
4.4.3 Radlenker.....	36
4.4.4 Weitere Weichenelemente	36
5 Erschütterungsmessung - praktischer Teil.....	37
5.1 Messsystem	37
5.2 Messdurchführung	37
5.3 Messorte	38
5.3.1 Messreihe 1: Bereich Kalsdorf	39
5.3.2 Messreihe 2: Bereich Eggendorf.....	41
5.3.3 Messreihe 3: Bereich Ebenfurth.....	43
5.3.4 Messreihe 4: Bereich Leoben	44
5.3.5 Messreihe 5: Bereich Baden	47
5.3.6 Messreihe 6: Bereich St. Valentin.....	48
5.4 Erschütterungsauswertung	51
5.4.1 Messreihe 1: Bereich Kalsdorf	52
5.4.2 Messreihe 2: Bereich Eggendorf.....	52
5.4.3 Messreihe 3: Bereich Ebenfurth.....	54

Erschütterungsemissionen bei Weichen

Untersuchungen zur verbesserten Modellierung von Weichen bei Erschütterungsprognosen

5.4.4	Messreihe 4: Bereich Leoben	55
5.4.5	Bestandsmessungen.....	58
6	Literaturrecherche	59
6.1	Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr <i>vgl. [12]</i>	60
6.2	VDI Berichte 1941 - starres Herzstück <i>vgl. [23]</i>	61
6.3	13. Symposium - Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr <i>vgl. [24]</i>	62
6.4	13. Symposium - Erschütterungs- und Körperschallprognose <i>vgl. [24]</i>	64
6.5	VDI Berichte 1941 - bewegliches Herzstück <i>vgl. [23]</i>	65
7	Das neue Weichenmodell für die VIBRA 2 Berechnung	68
7.1	Terzbandspektrum für Entfernungen von ca. 16 m.....	68
7.2	Terzbandspektrum für Entfernungen von ca. 32 m.....	70
7.3	Terzbandspektrum für Entfernungen > 40 m	71
7.4	Parallelmessungen und 45° Messungen.....	72
7.5	Einfluss der Fahrtrichtung beim Befahren von Weichen	73
7.6	Zusammenfassung.....	74
8	Ergebnisse aus Messungen mit beweglichen Herzstücken	76
9	Ergebnisse aus Messungen im Bereich besohlter Schwellen..	79
9.1	Schwellenbesohlung auf gerader Strecke.....	79
9.2	Weiche auf besohlenen Schwellen	80
10	Fazit	81
11	Verzeichnisse	83
11.1	Quellen- und Literaturverzeichnis	83
11.2	Abbildungsverzeichnis	86
11.3	Tabellenverzeichnis	90

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung und Motivation

Erschütterungen und der damit in Verbindung stehende Erschütterungsschutz sind sehr wichtige und vor allem interessante Themengebiete im Bauingenieurwesen. Diese mechanischen Schwingungen entstehen neben Schienen- und Straßenverkehr durch Bautätigkeiten oder durch Maschinen in der Produktion. Dabei muss auf der einen Seite versucht werden, die Erschütterungsemissionen möglichst gering zu halten, auf der anderen Seite müssen die auftretenden Erschütterungen so reduziert werden, dass diese durch Menschen nicht bzw. nur als gering störend wahrgenommen werden oder bei Gebäuden keine Schäden verursachen.

Durch das Befahren von Weichen bei Schienenverkehrswegen kommt es zu einer Verstärkung der Erschütterungsemission. Für den Ausbau bzw. die Erneuerung ist es erforderlich, Erschütterungsprognosen zu erstellen. Mit den Untersuchungen dieser Arbeit soll es möglich sein, bei Erschütterungsprognosen Weichen, bezüglich Ausrichtung und Entfernung des betroffenen Objektes zur Weiche und der Frequenzabhängigkeit der Verstärkung, noch präziser zu modellieren.

Schwingungen, vor allem Resonanzeffekte, haben mich bereits in der HTL begeistert. Das große Interesse am Themengebiet Baudynamik wurde vor allem durch die Vorlesung „Baudynamik und Erdbeben“ im Masterstudium weiters gesteigert. Da ich auch in Zukunft beruflich im Bereich der Dynamik tätig sein möchte, habe ich mich zum Masterarbeitsthema „Erschütterungsemissionen bei Weichen“ sofort motivieren können und von der ersten Sekunde bis zur Fertigstellung der Arbeit mit Begeisterung daran gearbeitet.

2 Erschütterungen infolge Schienenverkehr

2.1 Allgemeines

Prinzipiell erzeugt jede rollende Last Erschütterungen. Erschütterungen werden in den Untergrund eingeleitet und breiten sich anschließend als Schwingungen aus. Während der Ausbreitung wird der Frequenzgehalt verändert und die Erschütterungen erfahren außerdem eine Dämpfung. Die Schwingungsanregung und die Abstrahlung bezeichnet man als Emission und die Übertragung der Schwingungen wird als Transmission bezeichnet. *vgl. [24]*

Fundamente von Gebäuden werden durch Erschütterungen zum Schwingen angeregt. Durch den Effekt der Ankopplung werden die Schwingungen im Allgemeinen deutlich reduziert. Über die Fundamente werden auch Wände und Decken zum Schwingen angeregt. Bei Decken kommt es infolge des Eigenschwingverhaltens zu einer deutlichen Verstärkung der Erschütterungen. Weit gespannte, weiche Decken mit einer tiefen Eigenfrequenz sind im Allgemeinen als kritischer einzustufen als steife, kurz gespannte Decken mit einer hohen Eigenfrequenz. Den Eintrag der Schwingungen in die Struktur von Gebäuden sowie die Wahrnehmung durch Personen bezeichnet man als Immission. *vgl. [24]*

Bild 2-1 *vgl. [24]* zeigt den Verlauf der Erschütterungsausbreitung infolge Schienenverkehr, sowie die Abnahme der Schwinggeschwindigkeit mit Zunahme der Distanz.

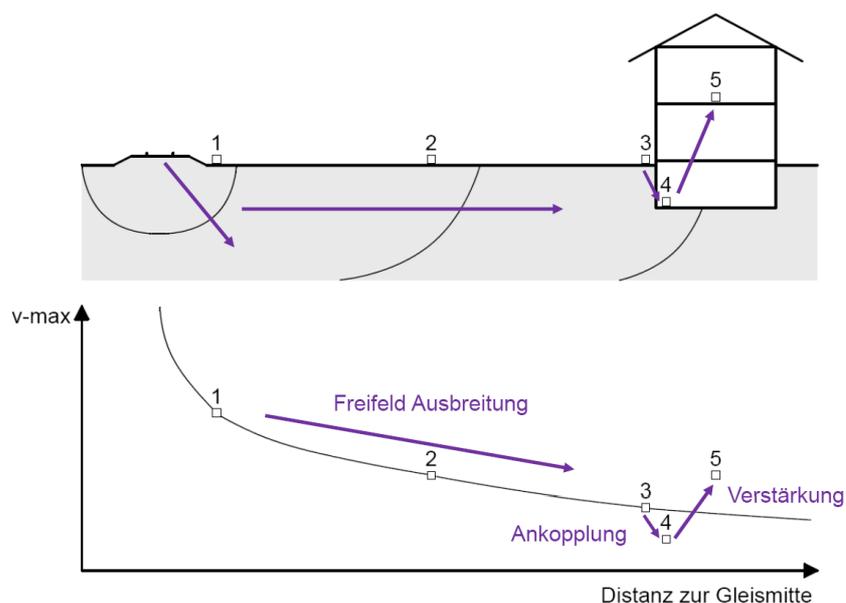


Bild 2-1 Ausbreitung von Erschütterungen *vgl. [24]*

Mit dem Computerprogramm Vibra 2 ist es möglich, frequenzabhängige Prognosen für Erschütterungen und sekundären Luftschall durch Multiplikation von Spektren zu erstellen.

Folgende frequenzabhängige Funktionen werden dazu benötigt:

- Normspektrum
- Freifeldspektrum
- Fundamentspektrum
- Geschossspektrum
- Körperschallspektrum

Bild 2-2 *vgl. [15]* zeigt die Spektren, die zur Prognoseerstellung im Computerprogramm Vibra 2 benötigt werden.

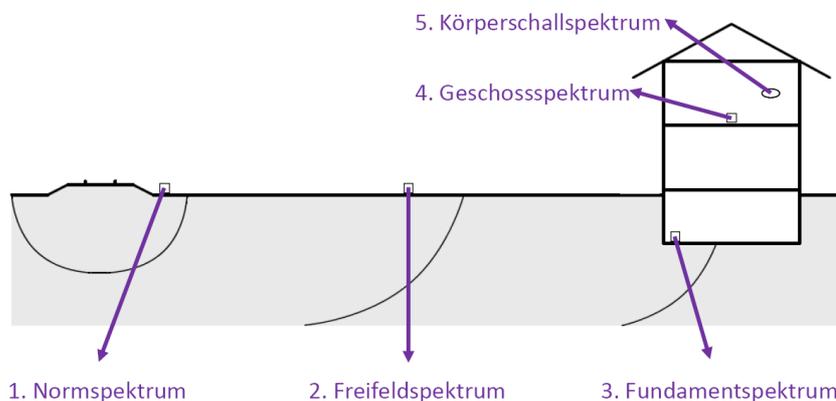


Bild 2-2 Vibra 2 Modell *vgl. [15]*

Durch Multiplikation des Normspektrums mit dem Freifeldspektrum, dem Fundamentspektrum und dem Geschossspektrum kann das Erschütterungsspektrum für Räume in Gebäuden berechnet werden. Durch eine weitere Multiplikation mit einem Körperschallspektrum können sekundäre Luftschallimmissionen errechnet werden.

In der Praxis werden Quellspektren und Transferspektren definiert. Die Quellspektren sind Geschwindigkeitsspektren, die in einer bestimmten Distanz zur Quelle je Zugtyp definiert sind und außerdem Gleisbesonderheiten, wie Weichen oder Stöße beinhalten. Die Transferspektren berücksichtigen unter anderem die Lage des Gleises (Damm oder Einschnitt). Durch Multiplikation des Quellspektrums mit dem Transferspektrum kann somit das Erschütterungsspektrum für verschiedene Bereiche gewonnen werden. *vgl. [15]*

Das bis dato oft verwendete frequenzunabhängige Spektrum für den Einfluss von Weichen soll für zukünftige Prognosen durch präzisere, frequenzabhängige Spektren aus dieser Masterarbeit ersetzt werden.

2.2 Emission von Erschütterungen

Die wesentlichen Schwingungen infolge Schienenverkehr entstehen durch Unregelmäßigkeiten im Fahrzeug-Gleissystem. Im Folgenden werden mehrere Mechanismen zur Schwingungserregung beschrieben: *vgl. [1]*

- Lotrechte Biegeschwingungen und Tauchschwingungen der belasteten Radsätze im Frequenzbereich zwischen 45 und 90 Hz.
- Unregelmäßige Fahrzeugbewegungen wie Nicken, Schlingern, Tauchen, Rollen oder Drehen. Die Amplituden der Schwingungen sind meist relativ niedrig, wobei die dynamischen Kräfte meist Frequenzen < 10 Hz aufweisen.
- Erregung infolge bestimmter Fahrzeugeigenschaften, wie z.B. Radunregelmäßigkeiten, Fahrzeuglängen oder Fahrzeuggewicht.
- Erregung infolge bestimmter Oberbaueigenschaften, wie z.B. Oberbauunregelmäßigkeiten. Dazu zählen Laschen, Weichen oder Kreuzungen sowie Hohlstellen im Schotteroberbau.

Weiters beeinflussen Geschwindigkeit, Topografie (ebenes Gelände, Einschnitt oder Damm) sowie die Bodeneigenschaften im Bereich der Quelle die Größe der Emissionen. Im Kapitel 2.3.3 und Kapitel 2.3.4 wird auf weitere wichtige Punkte der Erschütterungsemission näher eingegangen.

2.3 Transmission von Erschütterungen

2.3.1 Wellentypen

Bei der Wellenausbreitung von Erschütterungen im elastischen, isotropen Halbraum kann nach folgenden Wellentypen unterschieden werden: *vgl. [1]*

- P-Wellen (Kompressionswellen)
- S-Wellen (Scherwellen)
- Rayleigh-Wellen
- Love-Wellen

P-Wellen und S-Wellen sind Raumwellen, Rayleigh-Wellen und Love-Wellen sind Oberflächenwellen. P-Wellen haben die größte Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und schwingen in Ausbreitungsrichtung. S-Wellen und Love-Wellen schwingen quer und Rayleigh-Wellen schwingen quer und längs zur Fortpflanzungsrichtung. Für die Erschütterungsausbreitung im Boden, verursacht durch Schienenverkehrsemissionen, übernehmen Rayleigh-Wellen, welche große Ähnlichkeit mit Wasserwellen haben, den größten Teil der Energieübertragung. Der Energieanteil von Kompressionswellen und

Scherwellen ist deutlich geringer. Love-Wellen sind für diese Problematik nur wenig bedeutend. vgl. [1]

Bild 2-3 [11] zeigt die Darstellung verschiedener Wellentypen.

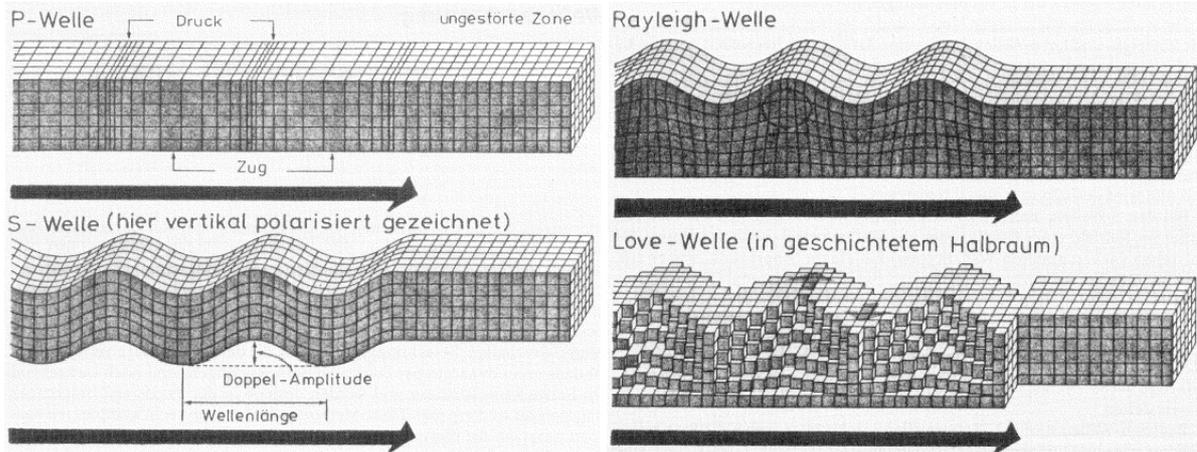


Bild 2-3 Darstellung der verschiedenen Wellentypen [11]

Bei den für die Erschütterungsausbreitung bedeutenden Rayleigh-Wellen wird die Energie in oberflächennahen Bereichen übertragen. Die Tiefe einer Rayleigh-Welle entspricht etwa der Wellenlänge. Bild 2-4 [11] zeigt die normierten Amplituden in Abhängigkeit der Tiefe für Rayleigh-Wellen.

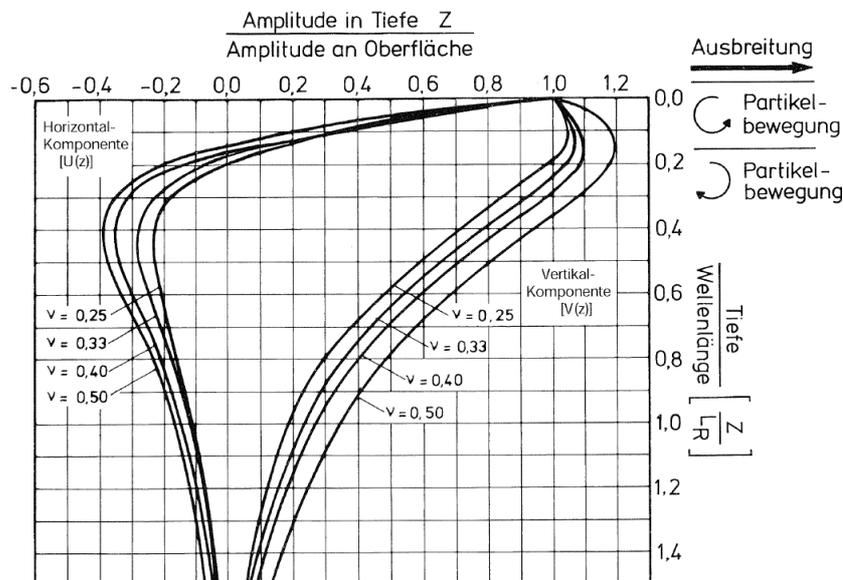


Bild 2-4 Normierte Amplituden in Abhängigkeit der Tiefe für Rayleigh-Wellen [11]

Aufgrund von Schichtungen im Boden kommt es häufig zu Reflexionen und Refraktionen, die zu komplexen Wellenbildern führen. Weiters beeinflussen Korngerüst, Porenwasser und die Porenluft das Ausbreitungsverhalten.

2.3.2 Dämpfung

Erschütterungen werden während ihrer Ausbreitung gedämpft. Dabei unterscheidet man zwischen Materialdämpfung und geometrischer Dämpfung. Die Reduktion bei der geometrischen Dämpfung hängt damit zusammen, dass sich die eingeleitete Energie auf immer größere Ausbreitungsfläche verteilt. Bei der Materialdämpfung kommt es zu einem Energieverlust durch innere Reibung. vgl. [1]

Rayleigh-Wellen haben im Vergleich zu Kompressionswellen und Scherwellen die kleinste geometrische Dämpfung. Bild 2-5 [1] zeigt die Wellenausbreitung eines kreisförmig, vertikal schwingenden Fundamentes auf elastischem Halbraum. Weiters werden die Dämpfungsexponenten für die geometrische Dämpfung dargestellt.

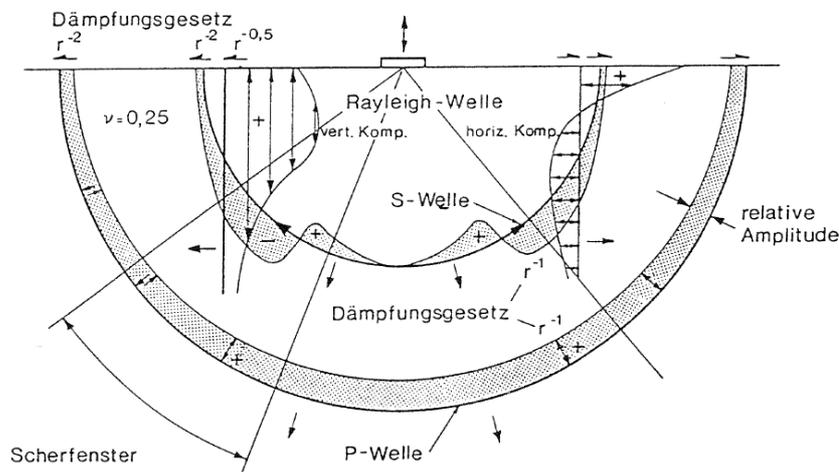


Bild 2-5 Wellenausbreitung [1]

Nach Formel 2-1 können die in einer bestimmten Referenzdistanz zur Quelle auftretenden Erschütterungen für weitere Entfernungen berechnet werden. vgl. [15]

$$v = v_0 * \left(\frac{r_0}{r}\right)^n \quad 2-1$$

v	Schwinggeschwindigkeit im Abstand zur Quelle
v ₀	Schwinggeschwindigkeit in Referenzdistanz zur Quelle
r ₀	Referenzdistanz zur Quelle
r	Abstand zur Quelle
n	Dämpfungsexponent für geometrische und materielle Dämpfung

2.3.3 Punktquelle und Linienquelle

Bild 2-6 zeigt die unterschiedliche Erschütterungsausbreitung infolge einer Linienquelle im Vergleich zu einer Punktquelle.

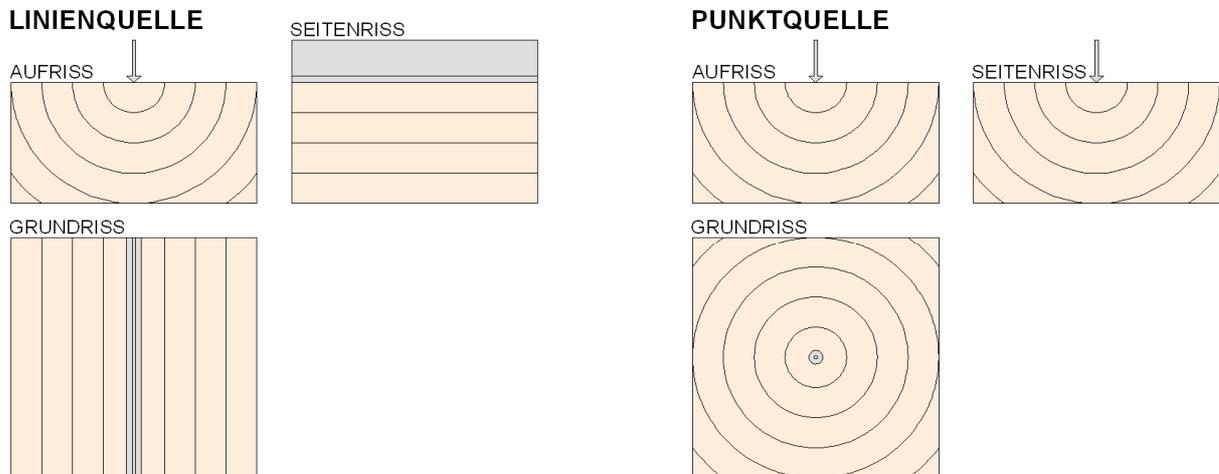


Bild 2-6 Ausbreitung von Linienquellen und Punktquellen

Allgemein ähneln in Bewegung befindende Züge einer Linienquelle. Fährt ein Zug über eine Weiche, wird in diesem Bereich die Erschütterungsemission verstärkt. Beim Befahren von Weichen entstehen vor allem bei hohen Geschwindigkeiten und hohen Achslasten an der Fahrkantenunterbrechung vor der Spitze von starren Herzstücken erhebliche Vertikalkräfte durch dynamische Belastungen. Durch das Anlaufen der Radsätze an den Radlenkern infolge des Sinuslaufes entstehen weitere stoßartige Horizontalkräfte. Diese zusätzliche Last ähnelt einer Punktquelle. *vgl. [13]*

Bei beweglichen Herzstücken wird die Fahrkantenunterbrechung geschlossen. Mittels Messungen quer und parallel zu den Gleisen wird im Rahmen dieser Masterarbeit bei einfachen Weichen mit starren oder beweglichen Herzstücken diese „Punktquelle“ inkl. der evtl. auftretenden Erschütterungsreduktion im Bereich beweglicher Herzstücke untersucht.

Tabelle 2-1 [27] zeigt vier wichtige Formeln der Schwingungsausbreitung infolge Linienquellen und Punktquellen mit angegebenem Dämpfungsexponent für die geometrische Dämpfung am elastischen, isotropen Halbraum für Wellen an der Oberfläche.

Wellenart	Abminderung bei Punktquellen	Abminderung bei Linienquellen
Raumwelle an der Oberfläche	$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^2$	$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^1$
Oberflächenwelle	$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{0.5}$	$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^0$

Tabelle 2-1 Wellenausbreitung an der Oberfläche (geometrische Dämpfung) [27]

Punktquellen nehmen im Gegensatz zu Linienquellen mit Zunahme der Entfernung aufgrund der geometrischen Dämpfung deutlich schneller ab.

Bild 2-7 [27] veranschaulicht diese Abminderung infolge geometrischer Dämpfung.

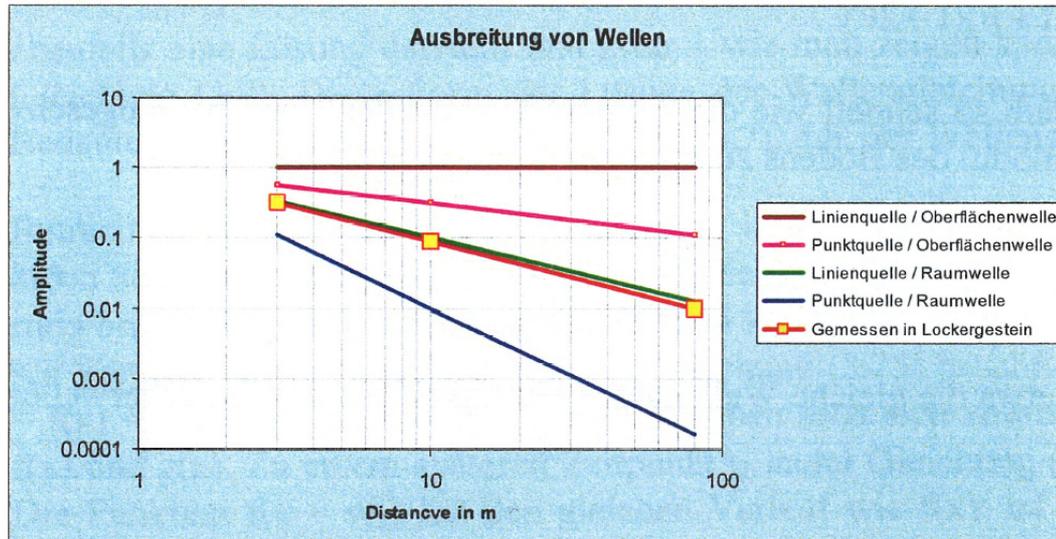


Bild 2-7 Abminderung von Oberflächen- und Raumwellen an der Oberfläche [27]

2.3.4 Verstärkung von Erschütterungen

Wenn die Erregerfrequenz im Bereich der Eigenfrequenz eines Systems liegt, treten bei schwingungsfähigen Systemen Erschütterungsverstärkungen auf. Am Modell des gedämpften Einmassenschwingers, der aus Masse, einer Feder und einem Dämpfer besteht, können Verstärkungen nach Formel 2-2 sehr einfach berechnet und beschrieben werden. Das Maximum der Verstärkung wird am Modell des Einmassenschwingers bei Systemen mit geringer Dämpfung nach Formel 2-3 berechnet: vgl. [1]

$$V = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2 * \xi * \beta)^2}} \quad 2-2$$

$$V_{\beta=1} = \frac{1}{2 * \xi} \quad 2-3$$

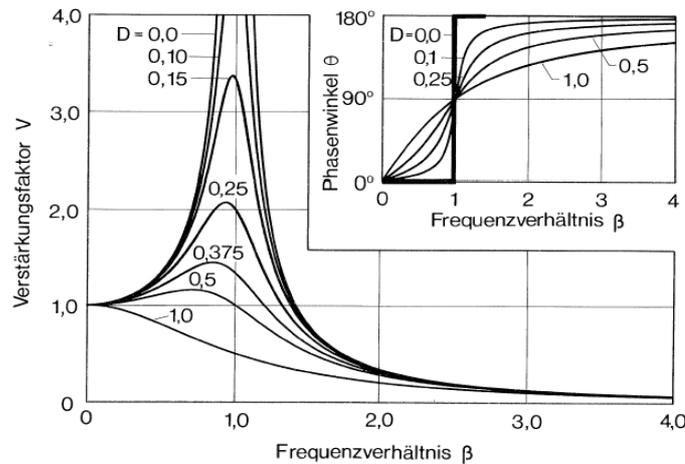
V Verstärkungsfaktor

ξ Dämpfungszahl

β Verhältnis zwischen Erregerfrequenz und Eigenfrequenz

Bei einem Stahlbetonbauteil mit einer üblichen Dämpfungszahl (Prozentsatz der kritischen Dämpfung) von ca. 0,05 kann sich eine Verstärkung bis zu einem Faktor von 10 ergeben. Je geringer die Dämpfungszahl ist, desto größere Verstärkungen sind möglich.

Bild 2-8 [11] zeigt die Resonanzkurven und Phasenverschiebung für verschiedene Dämpfungszahlen. Die Dämpfungszahl wird in dieser Abbildung als D bezeichnet.


Bild 2-8 Resonanzkurven und Phasenverschiebung [11]

Es ist also erforderlich, die Anregungsfrequenzen sowie die Eigenfrequenzen der einzelnen schwingungsfähigen Medien zu kennen, um plausible Erschütterungsprognosen erstellen zu können.

Reisezüge mit Doppelfederungen haben im Allgemeinen eine Eigenschwingfrequenz von ca. 1 Hz bis 2 Hz. Bei Drehgestellen mit ungefederten Massen liegt diese zwischen 5 Hz und 10 Hz. Neben den Eigenschwingfrequenzen der Züge hat auch der Oberbau großen Einfluss auf die Erschütterungsemission. Die Eigenfrequenz von Schienen in Kombination mit Holzschwellen oder Betonschwellen liegt bei ca. 50 Hz und bei festen Fahrbahnen bei rund 80 Hz. Auch Böden mit bestimmten Schichtdicken weisen Eigenfrequenzen auf. *vgl. [2]*

Folgende Formeln werden zur Berechnung der Bodeneigenfrequenz benötigt: *vgl. [1]*

$$f_{Kr} = \frac{v_s}{4 * H} \text{ bzw. } \frac{v_p}{4 * H} \quad 2-4$$

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad 2-5$$

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} * \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2*\nu)}} \quad 2-6$$

f_{Kr}	Kritische Frequenz einer Bodenschicht
v_s	Scherwellengeschwindigkeit für den eindimensionalen Fall
v_p	Primärwellengeschwindigkeit für den eindimensionalen Fall
H	Schichtdicke
G	G-Modul
E	E-Modul
ρ	Dichte
ν	Querdehnungszahl

Unterhalb der kritischen Frequenz einer Bodenschicht tritt praktisch keine Dämpfung auf. Bild 2-9 [2] zeigt die Grundeigenfrequenzen für Bodenschichten mit verschiedener Stärke.

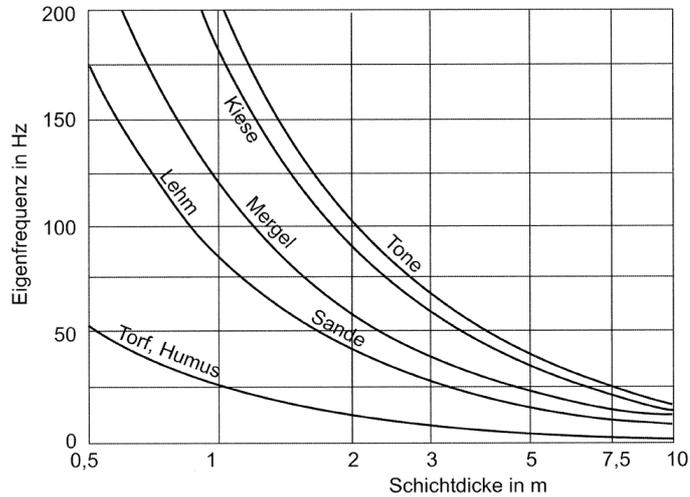


Bild 2-9 Grundeigenfrequenzen für Bodenschichten mit verschiedener Stärke [2]

Allgemein betrachtet nehmen die Amplituden hoher Frequenzen mit Zunahme der Distanz deutlich schneller ab als jene mit tiefen Frequenzen. In Bild 2-10 [1] wird der Einfluss der Entfernung auf die Terzspektren anhand einer Messung von Zügen in Hirschaid gezeigt. Bei dieser Auswertung erkennt man deutlich die stärkere Dämpfung im hohen Frequenzbereich.

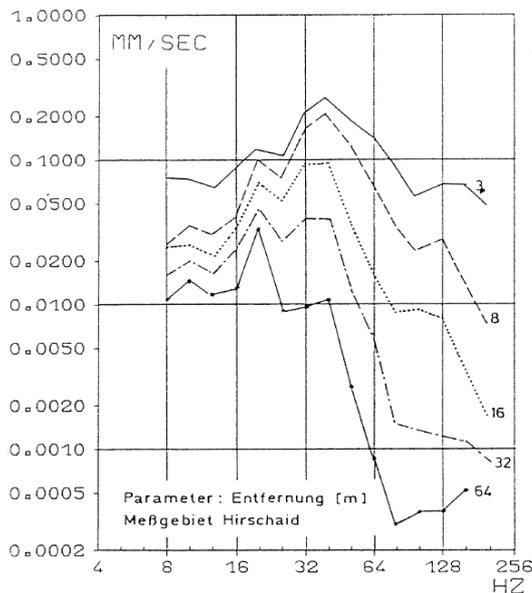


Bild 2-10 Einfluss der Entfernung auf die Terzspektren [1]

2.4 Transmission im Gebäude - Immission von Erschütterungen

Erschütterungen im Untergrund regen Fundamente an, zu schwingen. Durch den Effekt der Ankopplung werden Schwingungen im Allgemeinen deutlich reduziert.

Bild 2-11 [22] zeigt Übertragungsfaktoren vom Boden auf das Fundament. Die untere Kurve kann schweren Gebäuden, die obere Kurve leichten Gebäuden zugeordnet werden. Die stärkste Abnahme tritt in dieser Abbildung im Bereich zwischen 40 Hz und 70 Hz auf.

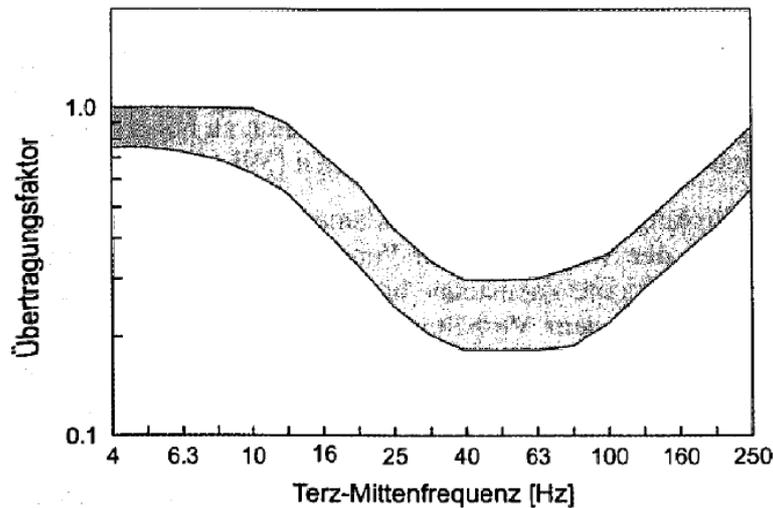


Bild 2-11 Übertragungsfaktor vom Boden auf das Fundament [22]

Bild 2-12 [15] zeigt eine Mittelwertfunktion für Einfamilienhäuser aus 9 Messungen. Die stärkste Abnahme tritt bei dieser Funktion bei einer Terzbandfrequenz von 25 Hz auf.

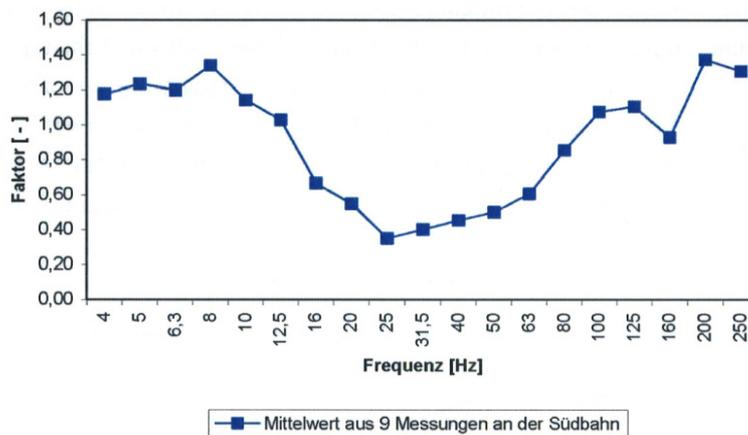


Bild 2-12 Übertragungsfaktor vom Boden auf das Fundament - Einfamilienhäuser [15]

Die Eigenschaften von Gebäuden haben erheblichen Einfluss auf die wahrgenommenen Erschütterungen. Zu den maßgebenden Gebäudeparametern zählen:

- Art des Fundamentes (Streifenfundament, Plattenfundament)
- Masse des Gebäudes (Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus, Hochhaus)
- Material der tragenden Wände (Mauerwerk, Holz, Stahl, Stahlbeton)
- Steifigkeit des Gebäudes (Massivbauweise, Holzbauweise)
- Deckensystem (Holzdecke, Teilmontagedecke, Stahlbeton Plattendecke, Gewölbe)
- Spannweite der Decken

Vor allem bei Decken von Gebäuden kann es zu erheblichen Verstärkungen der im Fundament eingeleiteten Erschütterungen kommen. Wenn die eingeleitete Erregerfrequenz im Bereich der Eigenfrequenz einer Decke liegt, treten deutliche Verstärkungen auf.

Die Eigenfrequenz einer Decke kann in der Baudynamik mittels Ausschwingversuch bestimmt werden. Dabei wird die Decke mittels Impulsanregung, beispielsweise durch Anheben der Fersen und plötzliches Absetzen auf die Decke zum Schwingen angeregt. Die Decke schwingt anschließend in der Eigenfrequenz aus.

2.5 Reduktion von Erschütterungen

Erschütterungen aus dem Schienenverkehr können durch Maßnahmen an der Quelle, entlang des Übertragungsweges und an den zu schützenden Bauwerken reduziert werden. Erforderlich werden diese Maßnahmen, wenn die zulässigen Richtwerte überschritten sind oder für prognostizierte Situationen überschritten sein werden. Für die Reduktion der Erschütterungsemission am Fahrweg und bei sämtlichen Maßnahmen am Bauwerk wird ein schwingungsfähiges System ausgebildet, bei dem zur Reduktion der Kraftübertragung die Eigenfrequenz möglichst weit unterhalb der Anregungsfrequenz liegt. vgl. [12]

Bild 2-13 [12] zeigt die Kräfteübertragung V_T am Beispiel des Einmassenschwingers bezogen auf eine konstante Erregerkraft. Die Dämpfungszahl wird in dieser Abbildung als D und das Verhältnis zwischen Erregerfrequenz und Eigenfrequenz als η bezeichnet.

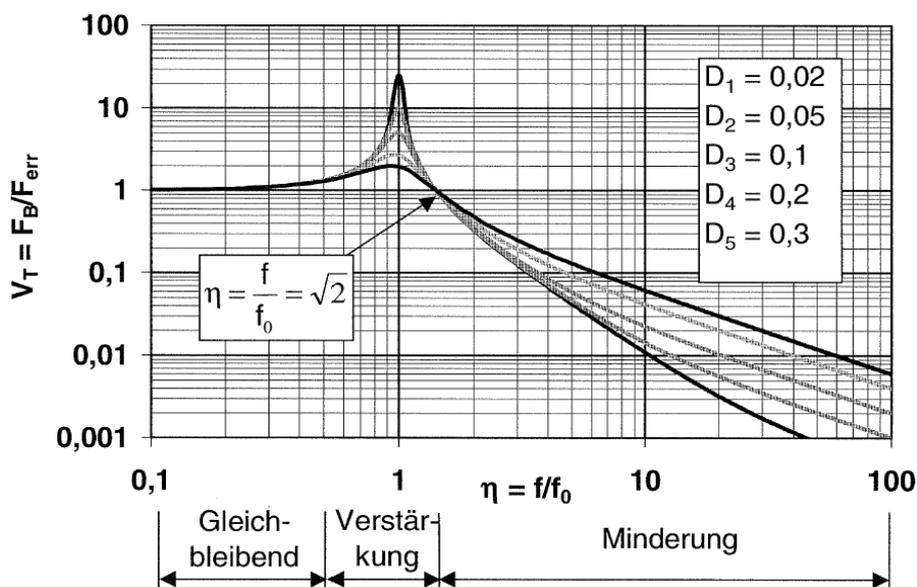


Bild 2-13 Kraftübertragung V_T beim Einmassenschwinger [12]

2.5.1 Reduktion der Erschütterungsemission am Fahrweg (Quelle)

Die Anregung lässt sich durch folgende Maßnahmen reduzieren: vgl. [12]

- Einbau von beweglichen Herzstücken (Reduktion der Erschütterungen um ca. 40 %)
- Veränderung der Fahrgeschwindigkeit
- Schleifen der Schienenoberfläche bzw. Vermeidung von Flachstellen durch optimal eingestellten Gleit- und Schleuderschutz (Reduktion der Erschütterungen um ca. 20 %)
- Regelmäßiges Durcharbeiten des Schotterbettes zur Vermeidung hohlliegender Schwellen (Reduktion der Erschütterungen um ca. 40 %)
- Vermeidung von Stößen und Weichen im Bereichen mit naheliegender Wohnbebauung
- Einbau von Masse-Feder-Systemen

Bei unterirdischen Strecken sind Maßnahmen zur Reduktion besonders effektiv. Bewährt hat sich dabei der Einbau von Masse-Feder-Systemen, welche den gesamten Oberbau elastisch lagern. Bild 2-14 [22], Bild 2-15 [22], Bild 2-16 [22], Bild 2-17 [22] und Bild 2-18 [22] zeigen Möglichkeiten zur elastischen Lagerung des Fahrweges.

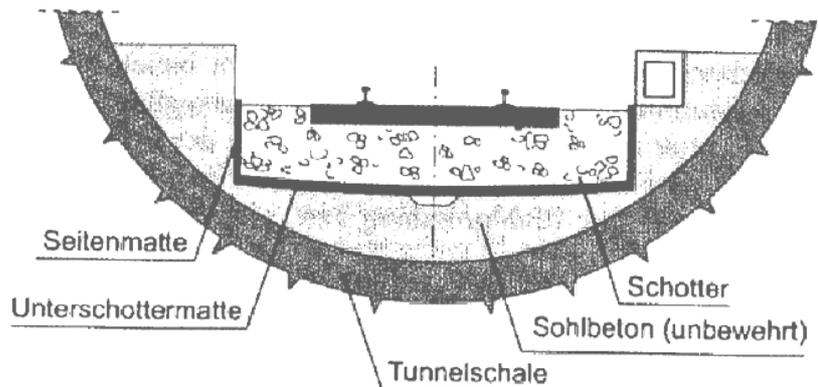


Bild 2-14 Schotteroberbau im Tunnel mit Unterschottermatte (Prinzipskizze) [22]

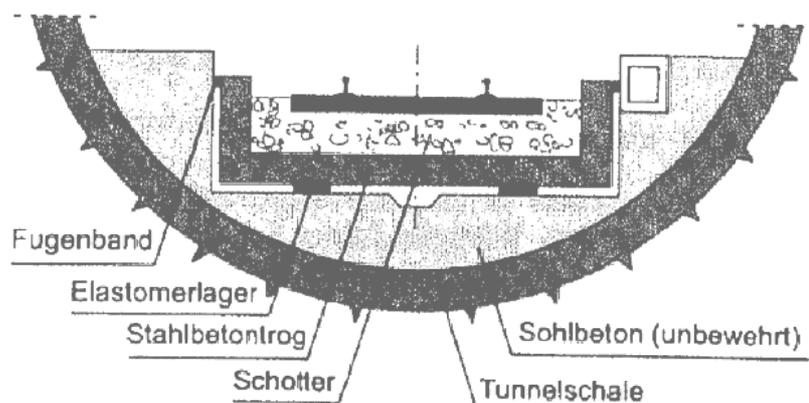


Bild 2-15 Schotteroberbau in Trogbauweise im Tunnel als Masse-Feder-System mit Elastomer-Streifen (Prinzipskizze) [22]

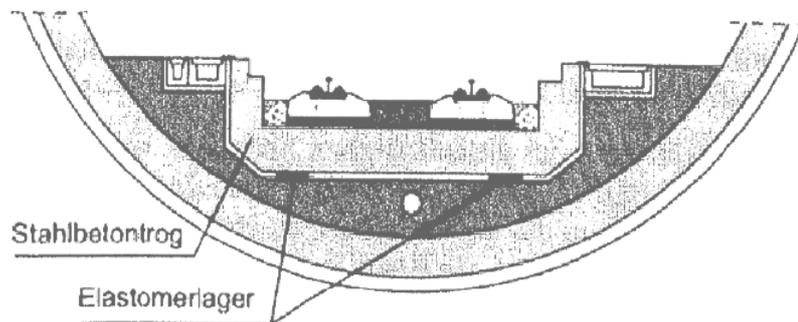


Bild 2-16 Feste Fahrbahn in Trogbauweise im Tunnel mit Masse-Feder-System aus elastischen Streifenlagern (Prinzipskizze) [22]

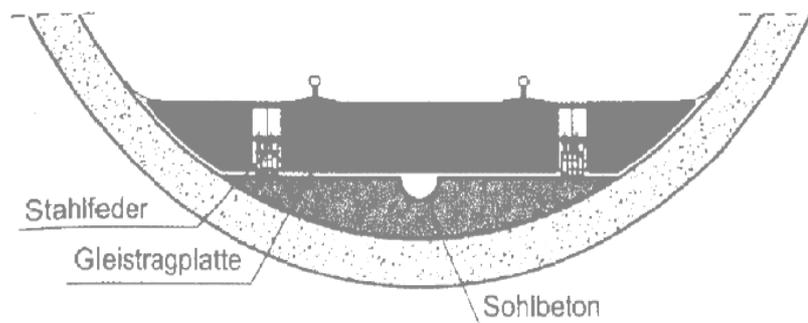


Bild 2-17 Schotterloser Oberbau auf Stahlschraubenfedern als schweres Masse-Feder-System (Prinzipskizze) [22]

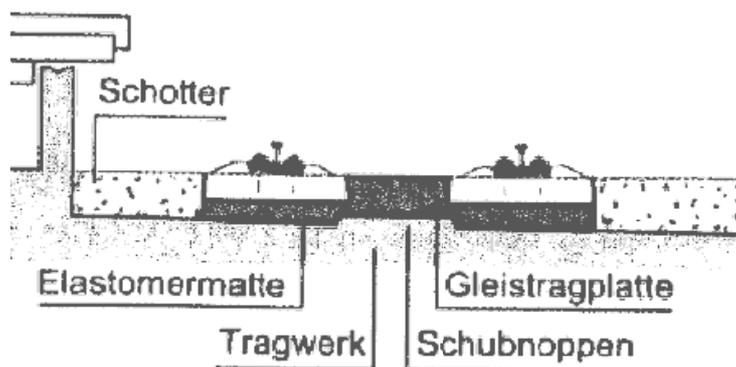


Bild 2-18 Feste Fahrbahn auf vollflächigen Elastomerlagern (Prinzipskizze) [22]

Die bei Schotteroberbau und fester Fahrbahn sich einstellenden Hauptanregungsfrequenzen weisen Unterschiede auf. Feste Fahrbahnen sind bei tieffrequenten Erschütterungen wegen der geringeren Gleisfehler und der günstigeren Achslastverteilung schwingungsärmer als der Schotteroberbau. Bei hohen Frequenzen sind die Erschütterungen der festen Fahrbahn stärker. vgl. [22]

2.5.2 Beeinflussung der Ausbreitung im Baugrund (Übertragungsweg)

Die Wellenausbreitung kann durch Hindernisse infolge von Reflexion, Beugung und Interferenz gestört werden. Zum Einsatz kommen sehr steife Wandelemente, gasgefüllte Kissen oder Elastomer-Matten, die in Bodenschlitzen verlegt werden. Der Einsatz derartiger Elemente ist noch wenig erprobt. *vgl. [12]*

2.5.3 Maßnahmen am Bauwerk (Immissionsort)

Eine Möglichkeit zur Reduktion der Immissionen ist die dynamische Abstimmung des Bauwerkes. Das bedeutet, dass Steifigkeitseigenschaften der Fundamente und Decken bzw. Dämpfungsmechanismen so ausgebildet werden, dass Erschütterungen im Gebäude erheblich gedämmt werden. Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion ist die elastische Lagerung des Gebäudes. Mittels elastischer Lagerelemente zwischen Kontaktfläche des Gebäudes und dem Baugrund wird die direkte Einleitung der Schwingungen verhindert. *vgl. [12]*

Bild 2-19 [29] zeigt eine wegen der einfachen Ausführung häufig verwendete vollflächige, elastische Lagerung eines Gebäudes.

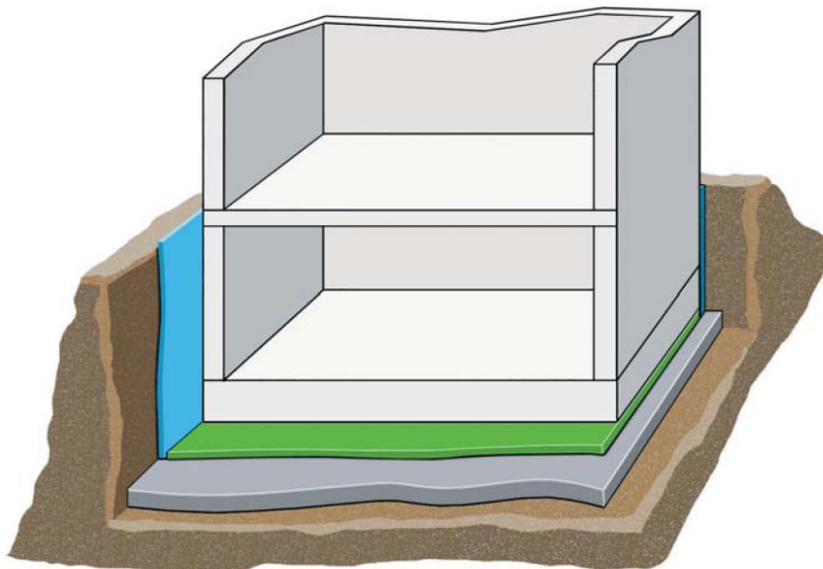


Bild 2-19 Vollflächige Lagerung [29]

3 Wahrnehmung und Beurteilung von Erschütterungen

Erschütterungen werden von Menschen einerseits durch spürbare Schwingungen, andererseits durch sekundären Luftschall wahrgenommen. Sekundärer Luftschall, auch Körperschall genannt, entsteht durch Bewegungen von Decken und Wänden, wobei dabei Druckwellen erzeugt werden, die als Dröhnen wahrgenommen werden.

Bild 3-1 [11] zeigt die maßgeblichen Bereiche für Erschütterungen und sekundären Luftschall.

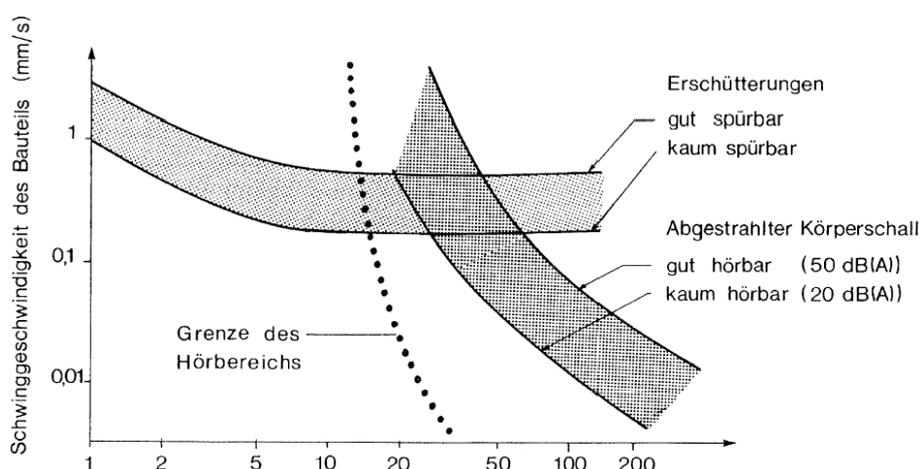


Bild 3-1 Wahrnehmung von Erschütterungen und Körperschall [11]

Grundlage für die Beurteilung der Erschütterungen bildet die bewertete Schwingbeschleunigung $a_w(t)$ gemäß ÖNORM ISO 2631-2.

3.1 Die bewertete Schwingbeschleunigung $a_w(t)$

Schwingungen jeweils gleicher Größe des Schwingweges, der Schwinggeschwindigkeit oder der Schwingbeschleunigung, jedoch unterschiedlichen Frequenzinhaltes, lösen beim Menschen Wahrnehmungen verschiedener Stärke aus. *vgl.* [12]

Für die Bewertung von Schwingungen in Gebäuden im Hinblick auf Wahrnehmbarkeit und Wohlbefinden des Menschen werden bewertete Schwingungswerte bevorzugt. Die mit der entsprechenden Bewertungsfunktion ermittelten Werte beschreiben die zulässige Belastung durch Vergleich mit Richtwerten für einen Ort innerhalb eines Gebäudes, an dem sich Menschen aufhalten können. *vgl.* [9]

ISO 2631-2 definiert die Bewertungsfunktion W_m , die im Frequenzbereich von 1 Hz bis 80 Hz für sämtliche Körperhaltungen anwendbar ist. Es wird dabei eine Bewertungsfunktion für die Schwingbeschleunigung angegeben. Im nationalen Anhang befindet sich weiters eine Bewertungsfunktion für die Schwinggeschwindigkeit.

Bild 3-2 [9] zeigt eine schematische Darstellung der Bewertungsfunktion W_m mit der Schwinggeschwindigkeit als Eingangsgröße.

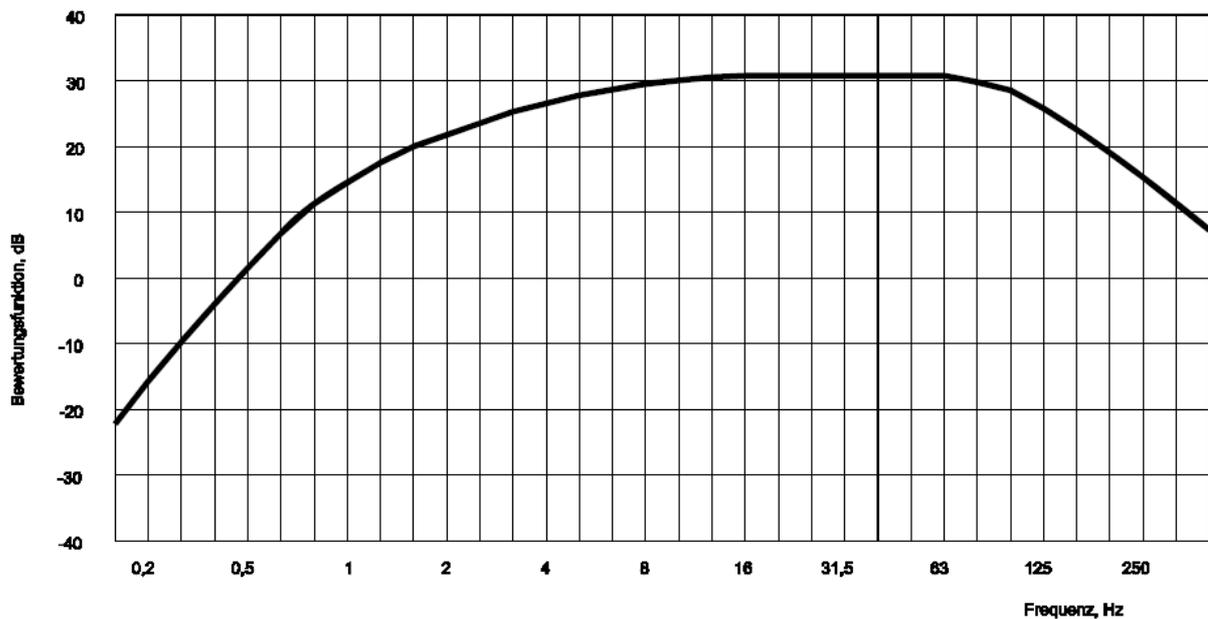


Bild 3-2 Schematische Darstellung der Bewertungsfunktion W_m mit der Schwinggeschwindigkeit als Eingangsgröße [9]

3.2 Beurteilung der Einwirkung von Schwingungsimmissionen des landgebundenen Verkehrs auf den Menschen - ÖNORM S 9012 (2010-02-01)

Die Beurteilung von Immissionen in Gebäuden mit Wohnnutzung oder Arbeitsplätzen erfolgt abgestuft, entsprechend der Flächenwidmung für 6 Gebietskategorien. Es werden Richtwerte für zwei Qualitätsstufen des Immissionsschutzes angegeben:

- guter Schutz vor Erschütterungen und sekundärem Luftschall,
- ausreichender Schutz vor Erschütterungen und sekundärem Luftschall.

Für die Gebietskategorien 1 bis 4, in denen Wohnnutzung vorgesehen ist, werden auch Richtwerte für die Nachtzeit (22 Uhr bis 6 Uhr) zur Sicherung der Nachtruhe angegeben. Für Gebietskategorie 5 – 6 sind die Richtwerte für Tag und Nacht gleich.

3.2.1 Wahrnehmung von Erschütterungsimmissionen

Die Fühlschwelle für den wachen Menschen liegt bei einer bewerteten Schwingbeschleunigung von ca. 3,57 mm/s². Sie ist aber außerordentlich stark von der Aufmerksamkeit und der jeweiligen Aktivität sowie den Umgebungseinflüssen abhängig. Vor allem beim schlafenden Menschen liegt die Fühlschwelle wesentlich höher. Tabelle 3-1 [6] zeigt den Zusammenhang zwischen der W_m-bewerteten Schwingbeschleunigung und der subjektiven Wahrnehmung.

W _m -bewertete Schwingbeschleunigung in mm/s ²	Beschreibung der Wahrnehmung
3,57	nicht spürbar
7,14	„Fühlschwelle“ gerade spürbar
14,3	schwach spürbar
28,6	spürbar
57,1	„Weckschwelle“ deutlich spürbar
113	stark spürbar
228	
446	
893	
1790	sehr stark spürbar
3570	

Tabelle 3-1 Zusammenhang zwischen der W_m-bewerteten Schwingbeschleunigung und der subjektiven Wahrnehmung [6]

3.2.2 Beurteilung der Erschütterungsimmissionen

Beurteilungs-Erschütterungsmaximum E_{max}

Zur Berechnung des Beurteilungs-Erschütterungsmaximums E_{max} sind einige Begriffsbestimmungen und Formeln erforderlich, die im Folgenden beschrieben werden.

Aus dem Momentanwert der W_m-bewerteten Beschleunigung a_w(t) berechnet sich die W_m-bewertete Schwingbeschleunigung a_w mittels exponentieller Integration.

$$a_w(t_0) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^{t_0} [a_w(t)]^2 e^{\left[\frac{t-t_0}{\tau}\right]} dt} \tag{3-1}$$

- a_w(t) Momentanwert der W_m-bewerteten Beschleunigung
- τ = 1 s Integrationskonstante
- t Zeit (Integrationszeit)
- t₀ Beobachtungszeitpunkt

Der Vorbeifahrts-Erschütterungsscheitelwert $a_{w,s}$ errechnet sich aus dem Maximum der resultierenden W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung a_w während der Vorbeifahrt eines Verkehrsmittels. Aus den $a_{w,s}$ -Werten für die Züge einer Zuggattung i oder der Kraftfahrzeuge einer KFZ-Type i , die im Messzeitraum vorbeigefahren sind, kann das Erschütterungsmaximum $E_{max,i}$ berechnet werden.

$$E_{max,i} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum a_{w,s,i}^2} \tag{3-2}$$

- $E_{max,i}$ Erschütterungsmaximum
- n Anzahl der Züge
- $a_{w,s,i}$ Vorbeifahrts-Erschütterungsscheitelwert für die Züge einer Zuggattung i oder der Kraftfahrzeuge einer KFZ-Type i

Für Ereignisse, die den Registrier-Schwellwert nicht erreicht haben und somit nicht registriert worden sind, ist der kleinste während der Messperiode erfasste $a_{w,s}$ -Wert einzusetzen.

Das größte Erschütterungsmaximum, sprich der größte $E_{max,i}$ -Wert, stellt das Beurteilungs-Erschütterungsmaximum E_{max} dar. Durch das Beurteilungs-Erschütterungsmaximum E_{max} wird die Belästigung durch einzelne Spitzenwerte der Immissionen begrenzt und so z.B. die Weckreaktion in Wohngebäuden vermieden.

Eine Einstufung erfolgt nach den Richtwerten in der Tabelle 3-2 [6].

Gebiets-kategorie	Bezeichnung	E_{max} für ausreichenden Erschütterungsschutz		E_{max} für guten Erschütterungsschutz	
		Tag	Nacht	Tag	Nacht
1	Ruhegebiet, Kurgebiet, Krankenhaus	188	18,8	94	9,4
2	Wohngebiet in Vororten, Wochenendhaus-Gebiet, ländliches Wohngebiet, Schulen	250	18,8	125	9,4
3	städtisches Wohngebiet, Gebiet für Bauten land- und forstwirtschaftlicher Betriebe mit Wohnungen	250	18,8	125	9,4
4	Kerngebiet, Gebiet für Betriebe ohne Erschütterungs- und Lärmemission	310	25,0	188	12,5
5	Gebiet für Betriebe mit geringer Erschütterungs- und Lärmemission ^a	380		250	
6	Gütererzeugungs- und Dienstleistungsstätten ^a	500		380	

^a Ausgewiesene Ruheräume sind getrennt zu betrachten, jedoch ist eine Einordnung in die Gebietskategorie 4 anzustreben.

Tabelle 3-2 Richtwerte des maximal zulässigen Beurteilungs-Erschütterungsmaximum E_{max} [6]

Beurteilungs-Erschütterungsdosis E_r

Zur Berechnung der Beurteilungs-Erschütterungsdosis E_r sind einige Begriffsbestimmungen und Formeln erforderlich, die im Folgenden beschrieben werden.

Zunächst ist die Vorbeifahrts-Erschütterungsdosis E_v zu bestimmen, welche eine energieäquivalente W_m -bewertete Schwingbeschleunigung einer Vorbeifahrt mit der Einwirkdauer t_e darstellt.

$$E_v = \sqrt{\frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} a_w^2(t) dt} \quad 3-3$$

E_v	Vorbeifahrts-Erschütterungsdosis
t_e	Einwirkdauer, in der am Messpunkt eine resultierende W_m -bewertete Schwingbeschleunigung $a_w > 3,57 \text{ mm/s}^2$ während einer Vorbeifahrt überschritten wird. Die Angabe der Einwirkdauer erfolgt gerundet auf ganze Sekunden. Für $a_{w,s} \leq 3,57 \text{ mm/s}^2$ gilt $t_e = 0 \text{ s}$.
$a_w(t)$	Momentanwert der W_m -bewerteten Beschleunigung

Für jede Zugattung i bzw. KFZ-Type i ist anschließend der energieäquivalente Mittelwert der bewerteten Schwingbeschleunigung $a_{w,i}$ aus den einzelnen Vorbeifahrten n während des Messzeitraumes zu berechnen.

$$a_{w,i} = \sqrt{\frac{1}{t_i} \sum_{j=1}^n E_{v,j}^2 \cdot t_{e,j}}$$

mit 3-4

$$t_i = \sum_{j=1}^n t_{e,j}$$

Daraus ergibt sich der energieäquivalente Mittelwert $a_{w,eq}$ für den Beurteilungszeitraum T_r aus sämtlichen Zugattungen bzw. KFZ-Typen.

$$a_{w,eq} = \sqrt{\frac{1}{T_E} \sum_{i=1}^n a_{w,i}^2 \cdot \frac{t_i \cdot m_i}{n_i}}$$

mit 3-5

$$T_E = \sum_{i=1}^n \frac{t_i \cdot m_i}{n_i}$$

Beurteilungs-Erschütterungsdosis E_r

$$E_r = a_{w,eq} \sqrt{\frac{T_E}{T_r}} \tag{3-6}$$

- T_r Zeitraum, der für die Beurteilung herangezogen wird (z.B. Nachtzeitraum mit 8 Stunden)
- T_E Einwirkungsdauer aller Züge oder Kraftfahrzeuge während des Beurteilungszeitraumes. Für den Zeitabschnitt Nacht ist für $T_E < 450$ s der Wert $T_E = 450$ s einzusetzen.
- m_i Anzahl der Züge der Zuggattung i bzw. KFZ-Type i während des Beurteilungszeitraumes T_r
- n_i Anzahl der Züge der Zuggattung i bzw. KFZ-Type i während des Messzeitraumes

Die für den Regelfahrplan bei Zugverkehr bzw. des jährlichen durchschnittlichen täglichen Verkehrs (JDTV) bei Straßenverkehr des Beurteilungszeitraumes berechnete Beurteilungs-Erschütterungsdosis E_r ist nach Tabelle 3-3 [6] einzustufen.

Gebiets-kategorie	Bezeichnung	Richtwert für ausreichenden Erschütterungsschutz		Richtwert für guten Erschütterungsschutz	
		Tag	Nacht	Tag	Nacht
1	Ruhegebiet, Kurgebiet	1,65	1,59	0,85	0,84
2	Wohngebiet in Vororten, Wochenendhaus-Gebiet, ländliches Wohngebiet	2,2	1,59	1,12	0,84
3	städtisches Wohngebiet, Gebiet für Bauten land- und forstwirtschaftlicher Betriebe mit Wohnungen	2,2	1,59	1,12	0,84
4	Handel, Verwaltung ohne wesentliche Emission, Wohnungen), Gebiet für Betriebe ohne Erschütterungsemission	2,7	2,1	1,65	1,09
5	Gebiet für Betriebe (gewerbliche und industrielle Gütererzeugung und Dienstleistungsstätten) mit geringer Erschütterungsemission ^a	3,2		2,2	
6	Gütererzeugungs- und Dienstleistungsstätten mit großer Erschütterungsemission ^a	5,0		3,2	

^a Ausgewiesene Ruheräume sind getrennt zu betrachten, jedoch ist eine Einordnung in die Gebietskategorie 4 anzustreben.

Tabelle 3-3 Richtwerte der maximal zulässigen Beurteilungs-Erschütterungsdosis E_r [6]

3.2.3 Beurteilung der sekundären Luftschallimmissionen

Mittlerer A-bewerteter Maximalpegel $L_{A,max,m}$

Die Beurteilung erfolgt mittels dem mittleren A-bewerteten Maximalpegel $L_{A,max,m}$, der einen energetischen Mittelwert der A-bewerteten Maximalpegel von n Zügen einer Zuggattung oder n Fahrzeugen einer KFZ-Type darstellt.

$$L_{A,max,m} = 10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{A,max,i}}{10}} \quad \text{in dB} \quad 3-7$$

- $L_{A,max,m}$ mittlerer A-bewerteter Maximalpegel
- n Anzahl der Züge einer Zuggattung oder Fahrzeuge einer KFZ-Type
- $L_{A,max,j}$ maximaler A-bewerteter Schalldruckpegel, der bei der Vorbeifahrt eines Zuges oder Kraftfahrzeuges mit der Anzeigedynamik „slow“ gemessen wird

Der mittlere A-bewertete Maximalpegel $L_{A,max,m}$ der lautesten Zuggattung oder KFZ-Type darf die Richtwerte von Tabelle 3-4 [6] für ausreichenden Schallschutz und in Tabelle 3-5 [6] für guten Schallschutz nicht überschreiten.

Gebiets-Kategorie	Mittlerer A-bewerteter Maximalpegel			
	Tag an Werktag	Abend an Werktag	Tag und Abend an Sonn- und Feiertag	Nacht
	6:00 Uhr bis 19:00 Uhr	19:00 Uhr bis 22:00 Uhr	6:00 Uhr bis 22:00 Uhr	22:00 Uhr bis 6:00 Uhr
1	40	35	35	30 ^a
2	45	40	40	35 ^a
3	45	40	40	35 ^a
4	50	45	45	40 ^a
5	50	50	50	50
6	65	65	65	65

^a Wenn ÖPNV-Verkehrsmittel in der Nacht eine etwa vierstündige Betriebspause einhalten, dürfen die Werte der Abendzeiten auch für die restlichen Nachtzeiten als Beurteilungskriterien herangezogen werden.

Tabelle 3-4 Beurteilungskriterien für den mittleren A-bewerteten Maximalschallpegel für ausreichenden Schallschutz, in dB [6]

Gebiets-Kategorie	Mittlerer A-bewerteter Maximalpegel			
	Tag an Werktag	Abend an Werktag	Tag und Abend an Sonn- und Feiertag	Nacht
	6:00 Uhr bis 19:00 Uhr	19:00 Uhr bis 22:00 Uhr	6:00 Uhr bis 22:00 Uhr	22:00 Uhr bis 6:00 Uhr
1	35	30	30	25 ^a
2	40	35	35	30 ^a
3	40	35	35	30 ^a
4	45	40	40	35 ^a
5	45	45	45	45
6	65	65	65	65

^a Wenn ÖPNV-Verkehrsmittel in der Nacht eine etwa vierstündige Betriebspause einhalten, dürfen die Werte der Abendzeiten auch für die restlichen Nachtzeiten als Beurteilungskriterien herangezogen werden.

Tabelle 3-5 Beurteilungskriterien für den mittleren A-bewerteten Maximalschallpegel für guten Schallschutz, in dB [6]

A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschallpegel $L_{A,eq}$

Zur Berechnung des A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels $L_{A,eq}$ sind einige Begriffsbestimmungen und Formeln erforderlich, die im Folgenden beschrieben werden.

Der mittlere energetische Schallereignispegel $L_{A,E,m}$ ist ein energetischer Mittelwert der A-bewerteten Schallereignispegel von n Ereignissen.

$$L_{A,E,m} = 10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{A,E,i}}{10}} \quad \text{in dB} \quad 3-8$$

$L_{A,E,m}$	A-bewerteter mittlerer energetischer Schallereignispegel
n	Anzahl der Züge einer Zuggattung oder Fahrzeuge einer KFZ-Type
$L_{A,E,i}$	Pegel, der bei einer Dauer von 1 s den gleichen Energieinhalt wie ein gesamtes Ereignis mit schwankendem Schalldruckpegel und seiner Andauer hat

Der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel einer Zuggattung bzw. KFZ-Type $L_{A,eq,i}$ ist der errechnete Schallpegel, der bei ununterbrochener Andauer den gleichen Energieinhalt, wie die Vorbeifahrt, hätte.

$$L_{A,eq,i} = L_{A,E,m,i} + 10 \lg \frac{n}{3600 T_r} \quad \text{in dB} \quad 3-9$$

$L_{A,eq,i}$	A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschallpegel einer Zuggattung bzw. KFZ-Type
$L_{A,E,m,i}$	A-bewerteter mittlerer energetischer Schallereignispegel
n	Anzahl der Züge einer Zuggattung oder Fahrzeuge einer KFZ-Type
T_r	Beurteilungszeitraum in Stunden

Der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ errechnet sich somit aus der Summe der A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ aller Zuggattungen i bzw. KFZ-Typen i .

$$L_{A,eq} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_{A,eq,i}}{10}} \quad \text{in dB} \quad 3-10$$

$L_{A,eq}$	A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschallpegel
$L_{A,eq,i}$	A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschallpegel einer Zuggattung i bzw. einer KFZ-Type i

Der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{A,eq}$ des gesamten Verkehrs darf die Richtwerte von Tabelle 3-6 [6] für ausreichenden Schallschutz und von Tabelle 3-7 [6] für guten Schallschutz nicht überschreiten.

Gebietskategorie	A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschallpegel	
	Tag und Abend	Nacht
1	25	20
2	30	25
3	35	30
4	35	30
5	35	35
6	55	55

Tabelle 3-6 Beurteilungskriterien für den A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel für ausreichenden Schallschutz, in dB [6]

Gebietskategorie	A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschallpegel	
	Tag und Abend	Nacht
1	20	15
2	25	20
3	30	25
4	30	25
5	30	30
6	50	50

Tabelle 3-7 Beurteilungskriterien für den A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel für guten Schallschutz, in dB [6]

3.2.4 Extrapolation und Prognose

Änderung des Verkehrsaufkommens (Verkehrsprognosen)

Bei einer Änderung des Verkehrsaufkommens sind die entsprechenden Einwirkzeiten den neuen Verkehrszahlen einer Zuggattung oder KFZ-Type anzupassen.

Änderung der Fahrgeschwindigkeiten bei schienengebundenen Verkehrsmitteln

Bei einer Änderung der Fahrgeschwindigkeit steigt für die übliche Schotterbettausführung die Erschütterungsintensität mit der Quadratwurzel der Fahrgeschwindigkeit u . Eine Veränderung der Fahrgeschwindigkeit von u_1 auf u_2 kann durch den Faktor b bei der E_{\max} - und E_r - Wertermittlung berücksichtigt werden.

$$b = \sqrt{\frac{u_2}{u_1}} \quad 3-11$$

u_1 Fahrgeschwindigkeit alt

u_2 Fahrgeschwindigkeit neu

Extrapolationen sind nur bis zu einem Geschwindigkeitsverhältnis von maximal 2 nach der Formel 3-11 zulässig. Für darüber hinausgehende Extrapolationen oder für Fahrgeschwindigkeiten über 200 km/h sind Untersuchungen durchzuführen.

3.3 Beurteilungsänderungen durch den Normenumstieg von ÖNORM S 9012 (Ausgabe 1996) auf die gültige ÖNORM S 9012 (Ausgabe 2010)

3.3.1 Beurteilung nach ÖNORM S 9012 (1996-08-01)

Die ÖNORM S 9012 (Ausgabe 1996) beinhaltet die Beurteilung der Einwirkung von Schienenverkehrsmissionen auf den Menschen in Gebäuden. Im Folgenden wird kurz zusammengefasst, wie die Auswertung nach Ausgabe 1996 erfolgt.

Statt der W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung wird in dieser Norm mit Hilfe der Bewerteten Schwingstärke K_B die Beziehung zwischen der durch eine Messung erhaltenen Schwinggeschwindigkeiten bzw. Schwingbeschleunigungen und dem subjektiven Eindruck der menschlichen Wahrnehmung hergestellt. vgl. [4]

Tabelle 3-8 [6] zeigt den Zusammenhang zwischen der W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung und der vormaligen Bewerteten Schwingstärke K_B .

W_m -bewertete Schwingbeschleunigung, in mm/s^2	Bewertete Schwingstärke K_B
3,57	0,1
7,14	0,2
14,3	0,4
28,6	0,8
57,1	1,6
113	3,15
228	6,3
446	12,5
893	25
1790	50
3570	100

Tabelle 3-8 Zusammenhang zwischen W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung und der vormaligen bewerteten Schwingstärke K_B [6]

Die Beurteilung der Maximalimmissionen der stärksten Zugtype erfolgt mittels des Schwingstärke-Scheitelwertes.

$$K_{B,S,j} = \sqrt{\frac{1}{T_{E,j}} \sum_{i=1}^n t_{E,i} \cdot K_{B,R,max,i}^2} \quad 3-12$$

$K_{B,S,j}$ Schwingstärke-Scheitelwert einer Zugtype j

$t_{E,i}$ Einwirkungszeit der jeweiligen Zugvorbeifahrt bei $K_{B,R,max,i} \geq 0,1$
($K_{B,R,max,i} < 0,1 \Rightarrow t_E = 1 \text{ s}$)

$K_{B,R,max,i}$ räumlich resultierender Schwingstärkevektor der jeweiligen Zugvorbeifahrt

$T_{E,j}$ Summe der Einwirkungszeiten einer Zugtype j

Der Schwingstärke-Scheitelwert $K_{B,S}$ der stärksten Zugtype darf die in Tabelle 3-9 [5] angegebenen Werte nicht überschreiten. Dieser Schwingstärke-Scheitelwert ist vergleichbar mit dem in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Beurteilungs-Erschütterungsmaximum E_{max} .

Gebiets-kategorie	Bezeichnung	$\bar{K}_{B,S}$ für ausreichenden Erschütterungsschutz		$\bar{K}_{B,S}$ für guten Erschütterungsschutz	
		Tag	Nacht	Tag	Nacht
1	Ruhegebiet, Kurgebiet, Krankenhaus	≤ 6,0	≤ 0,6	≤ 3,0	≤ 0,3
2	Wohngebiet in Vororten, Wochenendhausgebiet, ländliches Wohngebiet, Schulen	≤ 8,0	≤ 0,6	≤ 4,0	≤ 0,3
3	städtisches Wohngebiet, Gebiet für Bauten land- und forstwirtschaftlicher Betriebe mit Wohnungen	≤ 8,0	≤ 0,6	≤ 4,0	≤ 0,3
4	Kerngebiet, Gebiet für Betriebe ohne Lärmemission	≤ 10,0	≤ 0,8	≤ 6,0	≤ 0,4
5	Gebiet für Betriebe mit geringer Lärmemission	≤ 12,0		≤ 8,0	

Tabelle 3-9 Höchstwerte für $K_{B,S}$ gemäß ÖNORM S 9012 (Ausgabe 1996) [5]

Die Berechnung der Beurteilungsschwingstärke K_r , die vergleichbar mit der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Beurteilungs-Erschütterungsdosis E_r ist, erfolgt nach der Formel 3-13.

$$K_r = \sqrt{\frac{1}{\sum T_E} (T_{E,F} * K_{B,S,F}^2 + T_{E,R} * K_{B,S,R}^2 + T_{E,G} * K_{B,S,G}^2 + T_{E,D} * K_{B,S,D}^2)} \quad 3-13$$

- $\sum T_E$ Summe der Einwirkungsdauer aller Zugtypen
- $T_{E,j}$ Summe der Einwirkungsdauer aller Züge einer Zugtype
- $K_{B,S,j}$ Mittlerer Schwingstärke-Scheitelwert einer Zugtype
- j Unterteilung in Fernreisezüge, Regionalzüge, Güterzüge und Dienstzüge

Die maximal zulässige Beurteilungsschwingstärke $K_{r,TE}$ errechnet sich nach der Formel 3-14.

$$K_{r,TE} = \frac{a}{\sqrt{T_E}} \quad 3-14$$

Die Werte für a sind Tabelle 3-10 [5] zu entnehmen. Für $T_E < 10$ s gilt am Tag $T_E = 10$ s und für $T_E > 4000$ s gilt $T_E = 4000$ s. Für $T_E < 450$ s gilt in der Nacht $T_E = 450$ s und für $T_E > 2000$ s gilt $T_E = 2000$ s.

Gebiets-kategorie	Bezeichnung	^a für ausreichenden Erschütterungsschutz		^a für guten Erschütterungsschutz	
		Tag	Nacht	Tag	Nacht
1	Ruhegebiet, Kurgebiet, Krankenhaus	18,98	12,72	9,49	6,36
2	Wohngebiet in Vororten, Wochenendhausgebiet, ländliches Wohngebiet, Schulen	25,30	12,72	12,65	6,36
3	städtisches Wohngebiet, Gebiet für Bauten land- und forstwirtschaftlicher Betriebe mit Wohnungen	25,30	12,72	12,65	6,36
4	Kerngebiet, Gebiet für Betriebe ohne Lärmemission	31,62	16,98	18,98	8,49
5	Gebiet für Betriebe mit geringer Lärmemission	37,96		25,30	

Tabelle 3-10 Konstanten a gemäß ÖNORM S 9012 (Ausgabe 1996) [5]

3.3.2 Vergleich der einzuhaltenden Grenzwerte beider Ausgaben

Die Grenzwerte für das Erschütterungsmaximum können nach beiden Normen direkt miteinander verglichen werden, wenn jene Grenzwerte aus Tabelle 3-9 [5] mit einem Faktor von 35,7 multipliziert werden.

Damit die maximal zulässige Beurteilungsschwingstärke $K_{r,TE}$ mit der maximal zulässigen Beurteilungs-Erschütterungsdosis E_r verglichen werden kann, müssen jene Werte der Ausgabe 2010 bearbeitet werden.

$$K_{r,TE} \xleftrightarrow{\text{Vergleich}} \frac{E_r \sqrt{T_r}}{35,7 \sqrt{T_E}} \quad 3-15$$

T_r Zeitraum, der für die Beurteilung herangezogen wird (z.B. Nachtzeitraum mit 8 Stunden)

T_E Einwirkungsdauer aller Züge oder Kraftfahrzeuge während des Beurteilungszeitraums. Für den Zeitabschnitt Nacht ist für $T_E < 450$ s der Wert $T_E = 450$ s einzusetzen.

Bild 3-3 bis Bild 3-8 zeigen Darstellungen der maximal zulässigen Beurteilungsschwingstärke $K_{r,TE}$ im Vergleich zur maximal zulässigen Beurteilungs-Erschütterungsdosis E_r für die Gebietskategorien 1 bis 4.

Bild 3-3 zeigt die zulässigen Höchstwerte als Funktion der Gesamteinwirkungsdauer für guten Erschütterungsschutz und Bild 3-4 für ausreichenden Erschütterungsschutz für die Gebietskategorie 1 (Ruhegebiet, Kurgebiet, Krankenhaus).

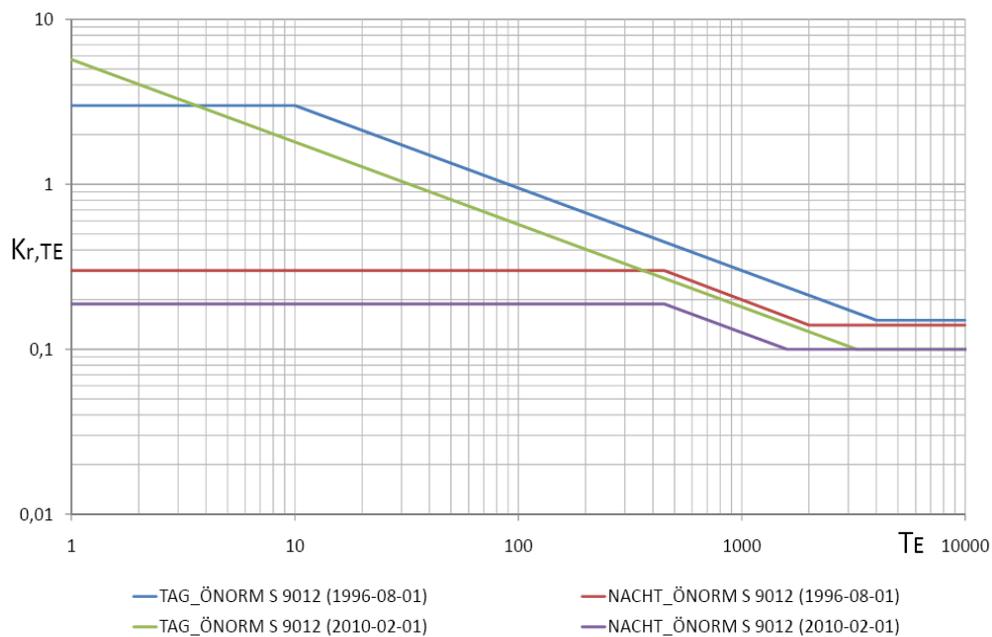


Bild 3-3 Beurteilung der Gesamteinwirkung für guten Erschütterungsschutz für die Gebietskategorie 1

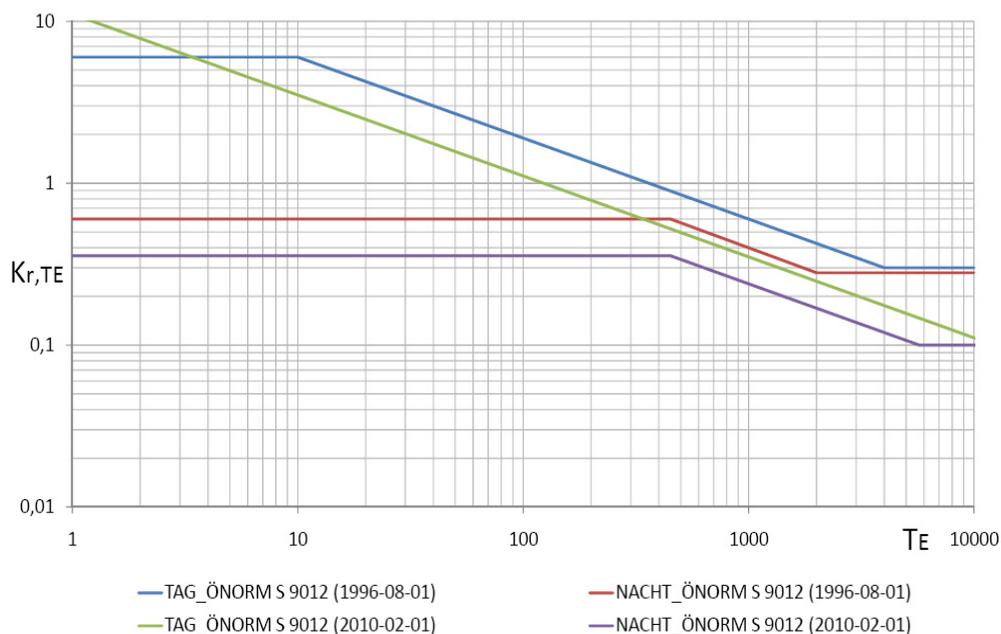


Bild 3-4 Beurteilung der Gesamteinwirkung für ausreichenden Erschütterungsschutz für die Gebietskategorie 1

Bild 3-5 zeigt die zulässigen Höchstwerte als Funktion der Gesamteinwirkungsdauer für guten Erschütterungsschutz und Bild 3-6 für ausreichenden Erschütterungsschutz für die Gebietskategorien 2 bis 3 (Wohngebiet in Vororten, Wochenendhaus-Gebiet, ländliches Wohngebiet, Schulen bzw. städtisches Wohngebiet, Gebiet für Bauten land- und forstwirtschaftlicher Betriebe mit Wohnungen).

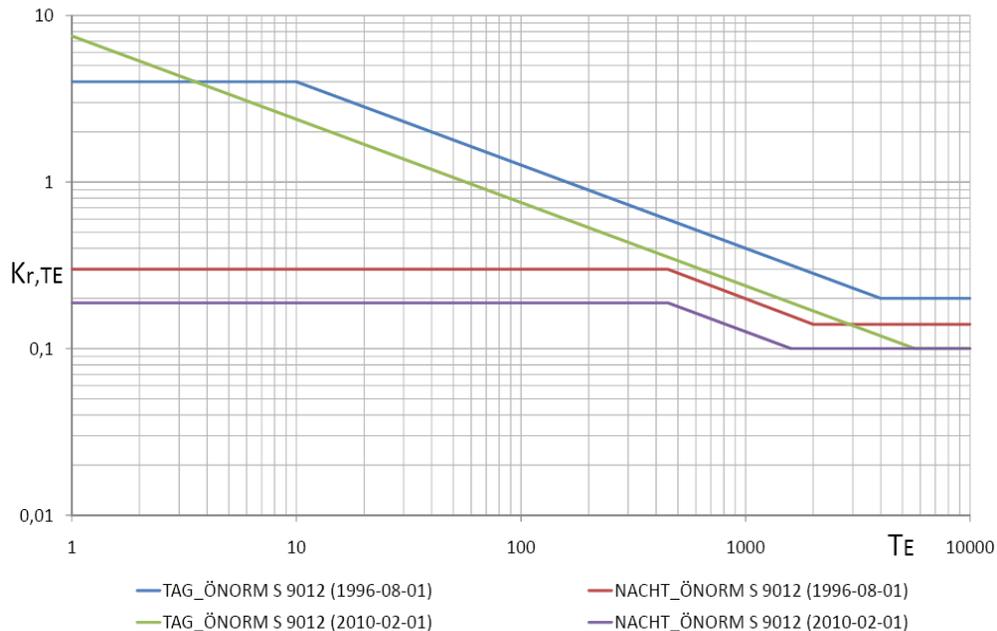


Bild 3-5 Beurteilung der Gesamteinwirkung für guten Erschütterungsschutz für die Gebietskategorien 2 bis 3

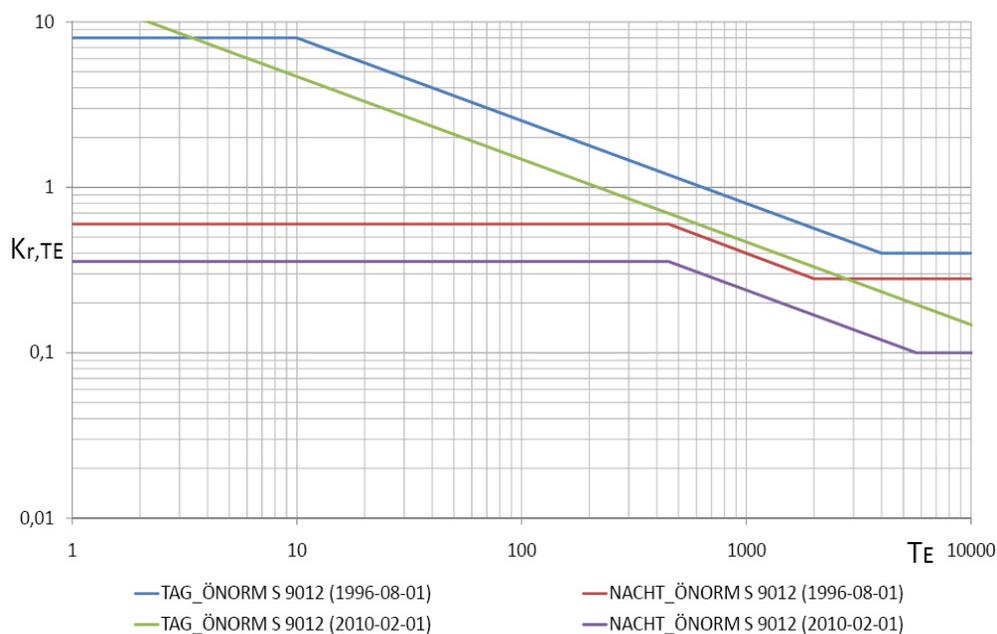


Bild 3-6 Beurteilung der Gesamteinwirkung für ausreichenden Erschütterungsschutz für die Gebietskategorien 2 bis 3

Bild 3-7 zeigt die zulässigen Höchstwerte als Funktion der Gesamteinwirkungsdauer für guten Erschütterungsschutz und Bild 3-8 für ausreichenden Erschütterungsschutz für die Gebietskategorie 4 (Kerngebiet, Gebiet für Betriebe ohne Erschütterungs- und Lärmemissionen).

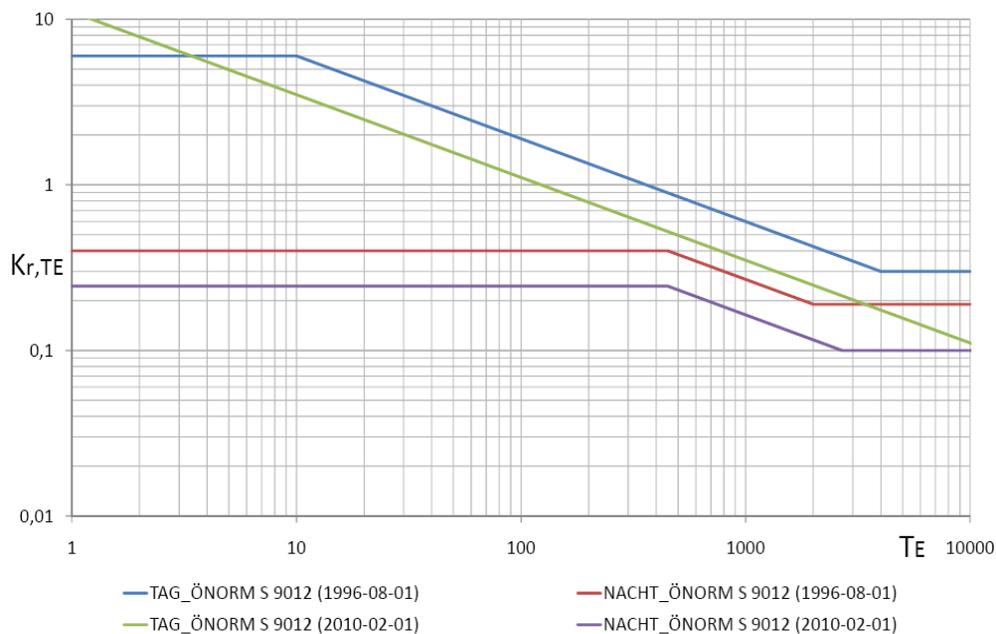


Bild 3-7 Beurteilung der Gesamteinwirkung für guten Erschütterungsschutz für die Gebietskategorie 4

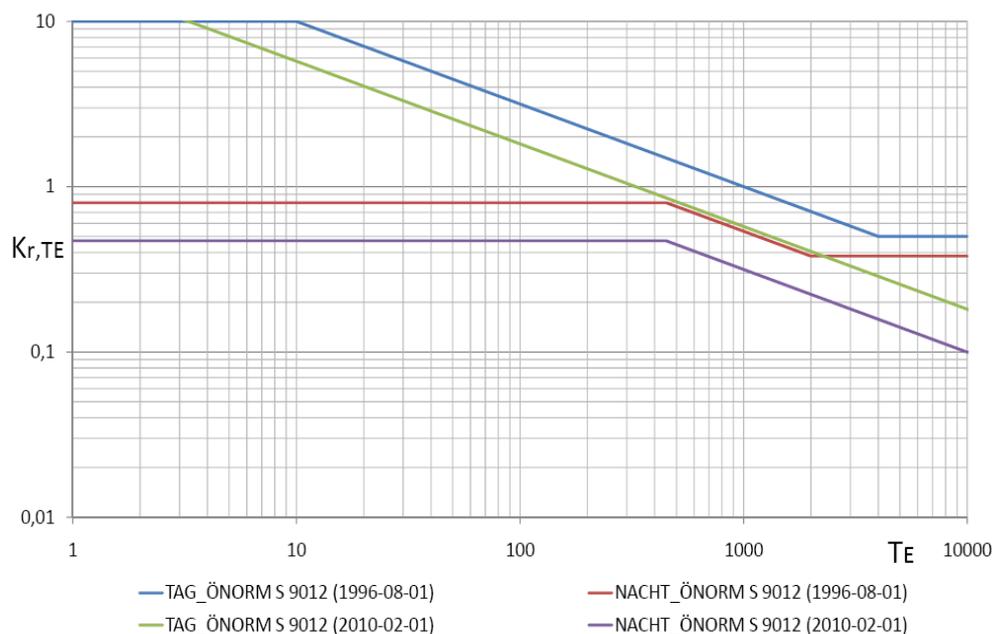


Bild 3-8 Beurteilung der Gesamteinwirkung für ausreichenden Erschütterungsschutz für die Gebietskategorie 4

Vorwiegend erfolgt die Auswertung von Erschütterungsmessungen für Gebiete, die in Gebietskategorie 1, 2, 3 oder 4 eingeordnet werden können. Aus diesem Grund wird auf die restlichen Kategorien nicht näher eingegangen.

3.3.3 Zusammenfassung der Beurteilungsänderungen

Nach ÖNORM S 9012 (Ausgabe 2010) sind einerseits geringere Grenzwerte einzuhalten, andererseits ergeben sich in dieser Norm durch das neue Mittelungsverfahren auch geringere Werte auf der Einwirkungsseite. Die nach Ausgabe 1996 höheren Grenzwerte gelten für das „typische Erschütterungsmaximum“ der Zugvorbeifahrten, während die Grenzwerte nach Ausgabe 2010 für den „typischen Erschütterungsdurchschnitt“ von Vorbeifahrten gelten.

Bei der Berechnung und Beurteilung des sekundären Luftschalls ergeben sich keine nennenswerten Änderungen.

4 Weichen

4.1 Allgemeines

Weichen haben die Aufgabe, einen Übergang von einem zum anderen Gleis ohne Unterbrechung der Fahrt zu gewährleisten. Wenn man allgemein von Weichen spricht, sind häufig neben Weichen auch Kreuzungen und Kreuzungsweichen gemeint. Die Lebensdauer einer Weiche beträgt auf Betonschwellen ca. 30 Jahre und auf Holzschwellen ca. 20 Jahre. *vgl. [2]*

4.2 Einteilung von Weichen, Kreuzungen und Kreuzungsweichen

4.2.1 Einfache Weiche

Einfache Weichen (EW) werden entsprechend der Blickrichtung vom Weichenanfang zum Weichenende in einfache Linksweichen und einfache Rechtsweichen unterteilt. *vgl. [2]* Bild 4-1 [2] zeigt eine einfache Linksweiche.

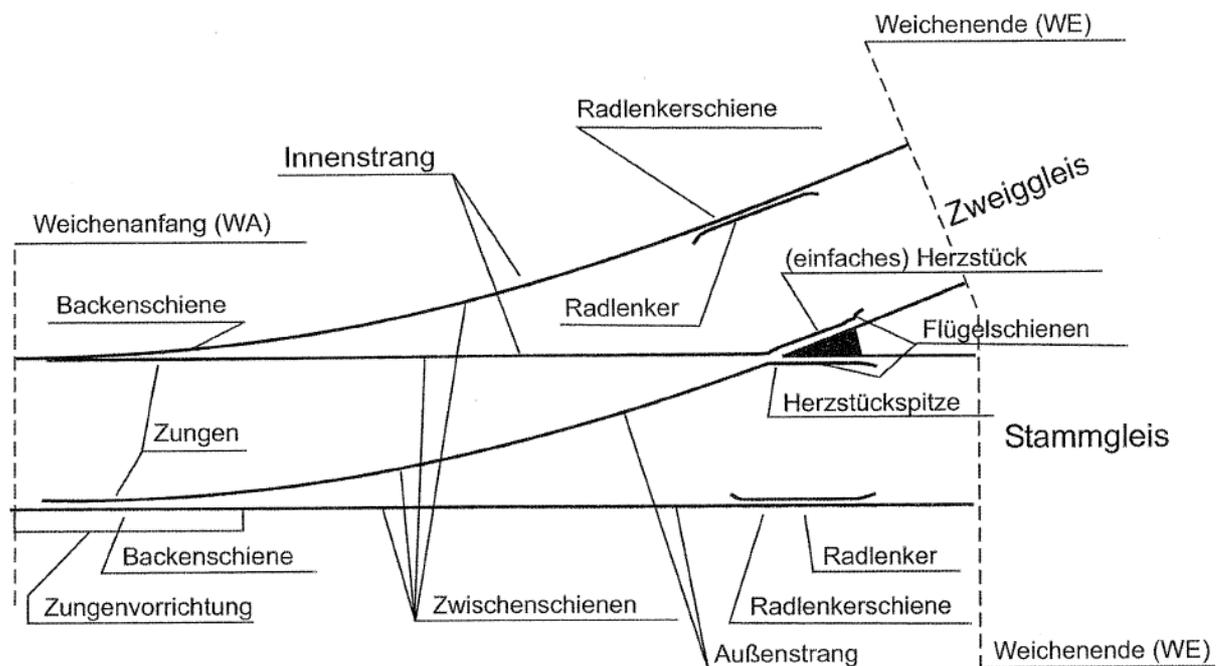


Bild 4-1 Einfache Linksweiche [2]

4.2.2 Doppelweiche

Bei Doppelweichen (DW) zweigen vom Stammgleis zwei weitere Gleise ab. Entsprechend der Blickrichtung vom Weichenanfang zum Weichenende entscheidet die erste Abzweigrichtung, ob es sich um eine linke bzw. rechte Doppelweiche handelt. *vgl. [2]* Bild 4-2 [2] zeigt eine schematische Darstellung einer Doppelweiche.

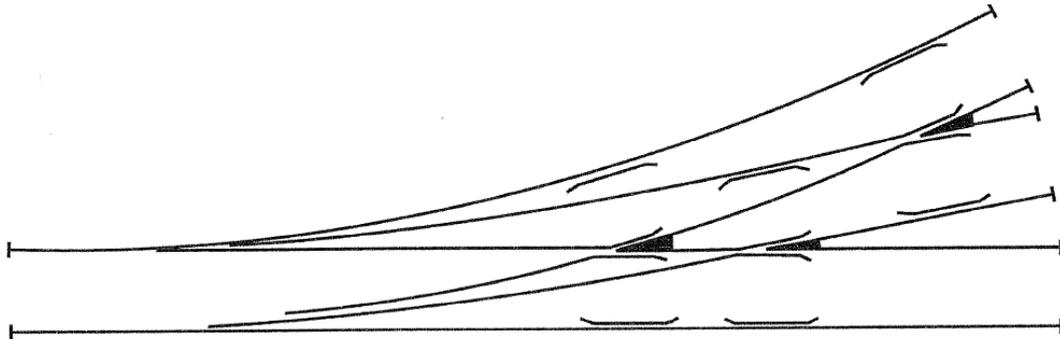


Bild 4-2 Schematische Darstellung einer Doppelweiche [2]

4.2.3 Bogenweiche

Bei Bogenweichen ist neben dem Zweiggleis auch das Stammgleis gebogen. Diese Weichen werden in Innenbogenweichen (IBW) und Außenbogenweichen (ABW) unterschieden. Bei Innenbogenweichen befinden sich die Bogenmittelpunkte des Stamm- und Zweiggleises auf derselben Seite. Ist das nicht der Fall, handelt es sich um eine Außenbogenweiche. *vgl. [2]*

4.2.4 Scheitelklothoidenweiche

Die Scheitelklothoidenweiche hat im Gegensatz zu normalen Kreisbogenweichen im abzweigenden Strang statt eines Kreisbogens eine Klothoide. Diese ermöglicht eine schnellere Überfahrt von Fahrzeugen. Weiters ist diese Weiche um zirka 15 % kürzer, was wiederum die Erzeugung erleichtert. *vgl. [2]*

4.2.5 Kreuzungen und Kreuzungsweichen

Bei Kreuzungen kann im Gegensatz zu Kreuzungsweichen beim Kreuzen zweier Gleise wegen nicht vorhandener Verbindungsgleise die Richtung des Fahrweges nicht geändert werden. Kreuzungsweichen mit einem Verbindungsgleis bezeichnet man als einfache Kreuzungsweiche (EKW). Sie ermöglichen drei Fahrmöglichkeiten. Kreuzungsweichen mit zwei Verbindungsgleisen bezeichnet man als doppelte Kreuzungsweiche (DKW). Sie ermöglichen vier Fahrmöglichkeiten. *vgl. [2]*

Bild 4-3 [2] zeigt eine schematische Darstellung einer doppelten Kreuzungsweiche mit Zungen, die innerhalb des Kreuzungsviereckes liegen.

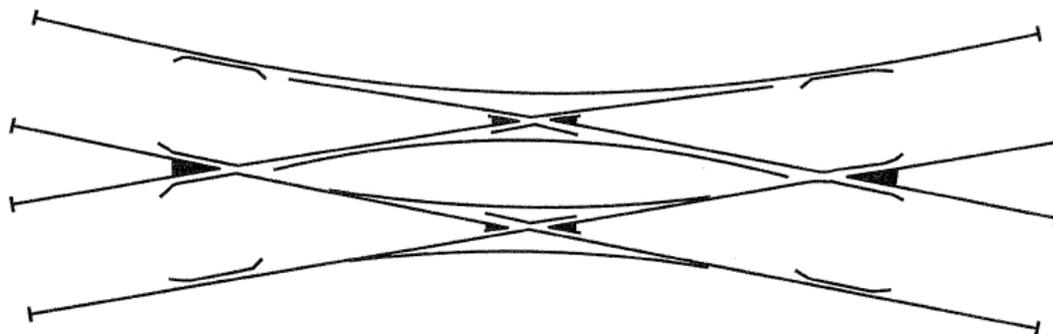


Bild 4-3 Schematische Darstellung einer doppelten Kreuzungsweiche [2]

4.3 Weichenbezeichnung

Aus der Bezeichnung einer Weichen können wichtige Informationen über geometrische und bauliche Ausführung entnommen werden. Anhand eines Beispiels wird die abgekürzte Schreibweise kurz erläutert. *vgl. [13]*

EW 60 – 500 – 1:12 – r – FZ (H)

EW	einfache Weiche
60	Schienenform: UIC 60 mit einem Gewicht von 60 kg/m
500	Radius: 500 m
1:12	Weichenneigung (Winkel zwischen Stammgleisachse und der Tangente an der Bogenachse am Weichenende)
r	Abzweigungsrichtung: Rechtsweiche
FZ	Zungenart: Federzunge
(H)	Schwellenart: Hartholzschwelle

4.4 Weichenelemente

4.4.1 Zunge und Backenschiene

Zunge und Backenschiene bilden die Zungenvorrichtung. Damit die Räder möglichst stoßfrei geführt werden können, greift der spitze Teil der Zunge etwas unter den Kopf der Backenschiene. Beim Innenstrang des Stammgleises greift die gerade Zunge in die gebogene Backenschiene, beim Außenstrang des Zweiggleises greift die gebogene Zunge in die gerade Backenschiene. Trotz dieser Maßnahme ergibt sich ein kleiner unvermeidbarer Anlaufwinkel der Zunge gegenüber der Backenschiene. *vgl. [2]*

Der spitze Teil am Anfang der Zunge wird als Zungenspitze und das Ende der Zunge bezeichnet man als Zungenwurzel. Zungen liegen auf Gleitstühlen, wobei die Aufschlagweite 15 bis 16 cm beträgt. Eine Unterteilung kann beispielsweise nach den Bauarten getroffen werden: *vgl. [2]*

- Gelenkzungen
- Federzungen mit Zungenplatten
- Federschienenzungen
- Federzungen ohne Zungenplatte

Gelenkzungen und Federzungen mit Zungenplatten gelten heute als technisch überholt. Bild 4-4 [13] zeigt einen Anschluss einer Weichenzunge an die Backenschiene.

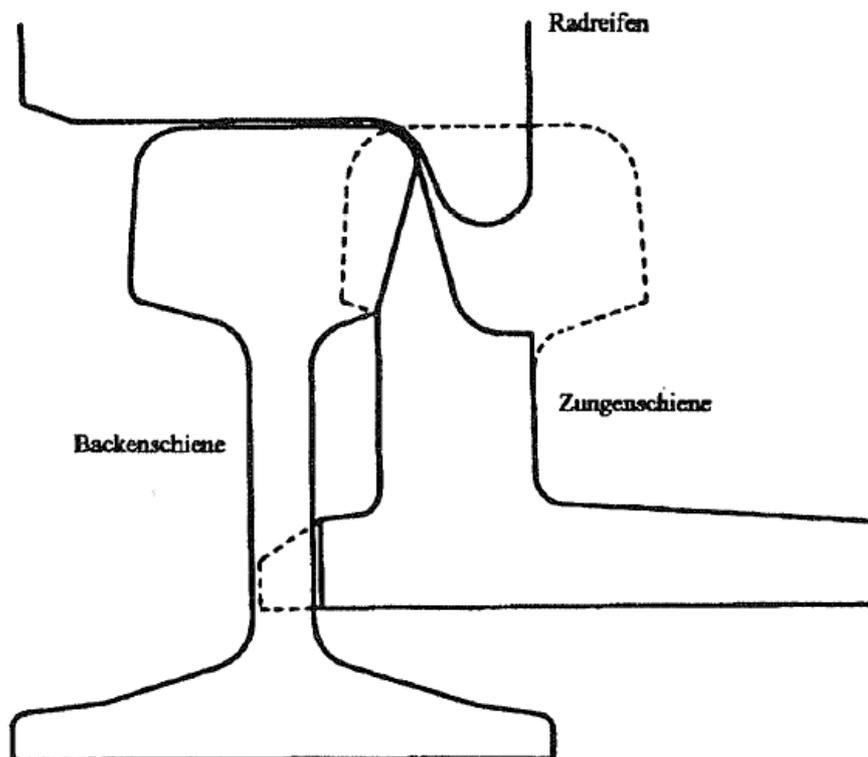


Bild 4-4 Anschluss einer Weichenzunge an die Backenschiene [13]

4.4.2 Herzstück mit Flügelschienen

Damit der Spurkranz eines Rades im Bereich von Weichen unbeeinträchtigt durchlaufen kann, wird die Lauffläche der Schienen unterbrochen. Das Herzstück bildet die Schnittstelle dieser Unterbrechung. Flügelschienen haben die Aufgabe, die Räder über die Herzstücklücke und die schwache Herzstückspitze zu tragen. *vgl. [2]*

Bild 4-5 [13] zeigt ein einfaches, starres Herzstück mit Herzstücklücke und Flügelschienen.

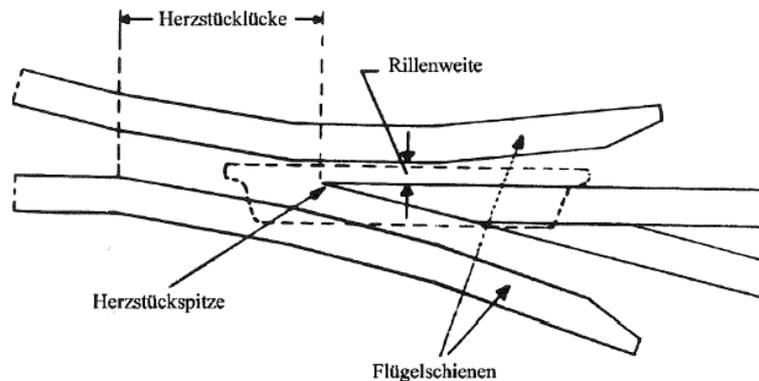


Bild 4-5 Herzstück mit Herzstücklücke und Flügelschienen [13]

Für Geschwindigkeiten über 160 km/h (Entwurfsgeschwindigkeit 200 km/h) werden Herzstücke mit beweglichen Spitzen eingebaut, welche die Fahrkantenunterbrechung schließen. Dabei unterscheidet man Herzstücke mit federnd beweglicher Spitze und Herzstücke mit gelenkig beweglicher Spitze. Bei federnd beweglichen Spitzen werden diese vom Weichenantrieb elastisch in die beiden Betriebszustände gebogen. Dieser Typ ist instandsetzungsfreundlich und wird aus diesem Grund häufig verwendet. Weichen mit federnd beweglichen Spitzen sind bei einigen Weichentypen länger als Weichen mit starren Herzstücken. Wenn die Gleisgeometrie nicht verändert werden soll, werden beim Tausch von starren Herzstücken gegen bewegliche, gelenkig bewegliche Herzstückspitzen wegen des geringeren Platzbedarfs gegenüber federnd beweglichen Spitzen eingesetzt. *vgl. [14]*

4.4.3 Radlenker

Zur sicheren Führung der Radsätze über die Herzstücklücke werden gegenüber der Lücke jedes festen Herzstückes Radlenker angeordnet. *vgl. [2]*

4.4.4 Weitere Weichenelemente

Weitere wichtige Weichenelemente können aus folgender Auflistung entnommen werden: *vgl. [2]*

- Weichenverschlüsse
- Weichenheizung
- bei konventionellen Weichenumstellsystemen ein mechanisches Verbindungsgestänge
- bei großen Weichen ein hydraulischer Weichenantrieb
- evtl. Zungenrollvorrichtung
- evtl. Fahrkantenoptimierung (FAKOP)
- evtl. Weichendiagnosesysteme

5 Erschütterungsmessung- praktischer Teil

5.1 Messsystem

Für die Erschütterungsmessungen wurde das Messgerät MR 2002 von SYSCOM verwendet. Die wichtigsten Kenndaten sind:

- Aufnehmer: Triaxiale bzw. uniaxiale Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer
- Abtastfrequenz: 800 Messwerte pro Sekunde
- Frequenz: 1 bis 315 Hertz
- Amplitude: 0,0001 mm/s bis 115 mm/s

Bild 5-1 zeigt das Messgerät MR 2002 von SYSCOM. Rechts im Bild befindet sich der Recorder und links ein triaxialer Schwinggeschwindigkeitssensor.



Bild 5-1 Messgerät MR 2002 von SYSCOM mit triaxialem Geschwindigkeitssensor

5.2 Messdurchführung

Bei der Messung wurden neben triaxialen Geschwindigkeitssensoren auch uniaxiale Geschwindigkeitssensoren verwendet, welche ausschließlich vertikale Schwinggeschwindigkeiten aufzeichnen. Mit jedem Recorder können maximal drei uniaxiale bzw. ein triaxialer Sensor zeitgleich verwendet werden. In der Regel standen sechs uniaxiale und ein triaxialer Geschwindigkeitssensor zur Verfügung.

Die analog aufgezeichneten Signale wurden im A/D Wandler mit der maximalen Abtastfrequenz von 800 Messwerten pro Sekunde digital umgewandelt und gespeichert.

Das Messprotokoll jeder Messreihe beinhaltet:

- Genaue Uhrzeit jeder Zugvorbeifahrt
- Zugtyp (Unterteilung in Fernreisezüge, Regionalzüge, Güterzüge und Dienstzüge)
- Gleis
- Richtung
- Geschwindigkeit

5.3 Messorte

Für die Bestimmung der Messorte wurde mittels GIS Steiermark und Niederösterreich Atlas nach passenden Weichen gesucht. Auf folgende Punkte wurde dabei besonders Wert gelegt:

- Ebenes, freies Gelände:
Dämme und Einschnitte bzw. Gebäude oder sonstige Hindernisse würden die Ergebnisse beeinflussen und die Messreihen wären somit schwer miteinander vergleichbar. Die Messpunkte sollen in der in Bild 5-2 dargestellten Anordnung installiert werden können.
- Nur eine Weiche im Bereich der Messung:
Es muss sichergestellt sein, dass Weichen im unmittelbaren Umkreis keinen Einfluss auf die Erschütterungsmessungen haben.
- Einfache Weichen (EW):
Bei einfachen Weichen ist das Stammgleis gerade und die gesamte Weiche besitzt nur ein Herzstück. Erschütterungen aus diesem Standardfall sind miteinander vergleichbar.
- Mindestens zweigleisige Strecke:
Die Erschütterungsverstärkung zufolge Weichen errechnet sich aus den Erschütterungen vom Gleis mit Weiche dividiert durch jene vom Gleis ohne Weiche.
- Keine Stoßlücken im Bereich der Messpunkte:
Stoßlücken würden zusätzliche Erschütterungen verursachen und die Ergebnisse verfälschen.
- Asphalt ist für die Messpunktaufstellungen besonders günstig:
Einfache Installation der Messgeräte auf Asphalt führt zu einer deutlichen Zeitersparnis.
- Keine Lärmschutzwand:
Lärmschutzwände bilden eine Sichtbehinderung bei der Protokollführung.
- Mindestens eine Messung im Bereich eines beweglichen Herzstückes:
Dabei wird die Erschütterungsreduktion im Vergleich zu starren Herzstücken untersucht.

Bild 5-2 zeigt eine in der Regel sinnvolle Messpunktanordnung. Für die Abstände zwischen den Messpunkten wurde ein Raster von 16 m gewählt. Die Aufstellung der Messpunkte parallel zu den Gleisen wird als Parallelmessung, die Aufstellung quer und mit einer horizontalen Neigung von 45° zu den Gleisen wird im Folgenden als Quermessung bezeichnet.

Weiters haben die Messpunkte bei der Parallelmessung vor der Weichenüberfahrt eines Zuges ein Minus und jene nach der Überfahrt ein Plus in der Bezeichnung.

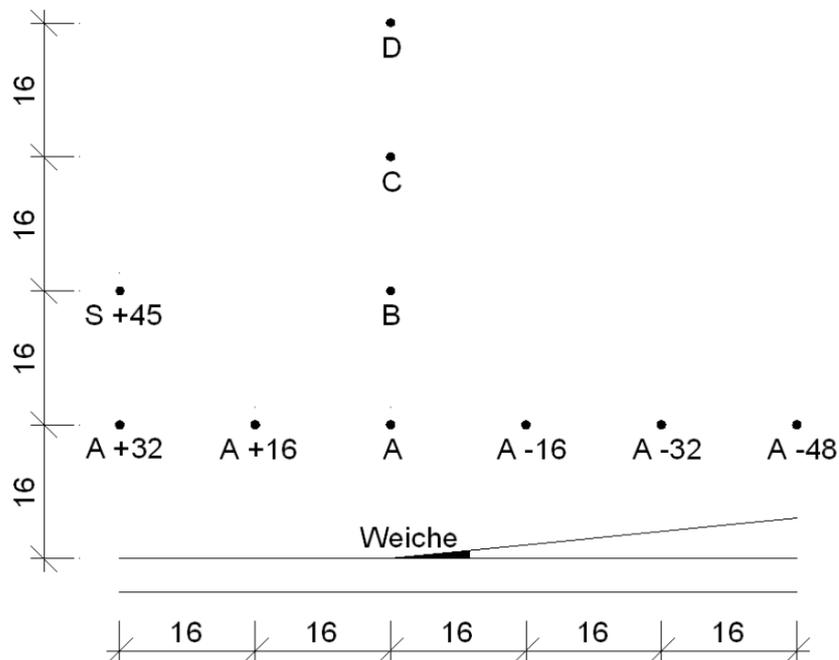


Bild 5-2 Messpunktanordnung

5.3.1 Messreihe 1: Bereich Kalsdorf

Die Weiche von Messreihe 1 liegt auf der Südbahn zwischen Graz und Spielfeld bei km 225,725 und dient als Überfahrtsmöglichkeit auf das Ausziehgleis für den Terminal Werndorf. Die Betonschwellen und die UIC 60 Schienen wurden 2001 verlegt. Dieser vorwiegend einseitig belasteten Weiche und dem Bereich vor und nach der Weichenüberfahrt kann nur ein schlechter Zustand zufolge Gleislagequalität zugestanden werden. In dieses Bereich gibt es keine anlagebedingte Langsamfahrstelle. *vgl. [17], vgl. [18]*

Die Gleislage umfasst den geometrischen Zustand des Gleises, also Höhenlage, Seitenlage, Spurweite und gegenseitige Höhenlage der Schienen. Die Gleislagequalität beschreibt den Zustand der Gleislage. *vgl. [13]*

Bei dieser Messreihe wurden die Parallelmessung und die Quermessung zeitgleich in einem Schritt durchgeführt. Die einfache Weiche mit starrem Herzstück liegt auf dem mittleren Gleis des dreigleisigen, stoßlückenfreien Streckenabschnittes. Die für die Auswertung verwendeten Züge fahren auf dem mittleren und von den Messpunkten aus entferntesten Gleis. Es handelt sich um ebenes Gelände ohne Lärmschutzwände. Weitere Weichen südlich und nördlich der Messpunkte haben wegen der großen Entfernung keinen Einfluss auf die Messergebnisse.

Bild 5-3 zeigt die drei Gleise der Messreihe 1 mit einer einfachen Weiche im Bereich des mittleren Gleises.



Bild 5-3 Gleise mit Weiche im Bereich des mittleren Gleises

Bild 5-4 zeigt das starre Herzstück der Weiche aus Bild 5-3.



Bild 5-4 Herzstück aus Messreihe 1 - Kalsdorf

Bild 5-5 vgl. [20] zeigt die Messpunktanordnung der Messreihe 1.



Bild 5-5 Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 1 - Kalsdorf vgl. [20]

Bild 5-6 zeigt die 4 Straßenmesspunkte.



Bild 5-6 Messpunktanordnung der Messreihe 1 - Kalsdorf parallel zu den Gleisen

5.3.2 Messreihe 2: Bereich Eggendorf

Die Erschütterungsmessung im Bereich Eggendorf auf der Pottendorfer - Linie wurde nach den in Bild 5-2 skizzierten Anordnungen durchgeführt. Die einfache Weiche mit starrem Herzstück liegt auf dem von den Messpunkten aus entfernteren Gleis des zweigleisigen, stoßlückenfreien Streckenabschnittes. Es handelt sich um ebenes Gelände ohne Lärmschutzwände und die Gleise liegen auf Holzschwellen. Die Gleislagequalität im Bereich dieser Messreihe ist nicht bekannt.

Bild 5-7 zeigt die Gleise im Bereich der Messreihe 2.



Bild 5-7 Gleise im Bereich der
Messreihe 2 - Eggendorf

Bild 5-8 zeigt das starre Herzstück der Weiche.



Bild 5-8 Herzstück aus Messreihe 2 -
Eggendorf

Bild 5-9 *vgl. [21]* zeigt die Messpunktanordnung der Messreihe 2 für die Parallelmessung.



Bild 5-9 Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 2 - Eggendorf (Parallelmessung) vgl. [21]

Bild 5-10 vgl. [21] zeigt die Messpunktanordnung der Messreihe 2 für die Quermessung.



Bild 5-10 Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 2 - Eggendorf (Quermessung) vgl. [21]

Bild 5-11 zeigt die 6 Straßenmesspunkte.



Bild 5-11 Messpunktanordnung der Messreihe 2 - Eggendorf parallel zu den Gleisen

5.3.3 Messreihe 3: Bereich Ebenfurth

Bei der Erschütterungsmessung im Bereich Ebenfurth auf der Pottendorfer - Linie wurden die Messgeräte nach den in Bild 5-14 vgl. [21] dargestellten Anordnungen installiert. Für diese Messreihe standen im Gegensatz zu den anderen Messungen nur 3 uniaxiale und ein triaxialer Schwinggeschwindigkeitssensor zur Verfügung.

Die einfache Weiche mit starrem Herzstück liegt auf dem von den Messpunkten aus entfernteren Gleis des zweigleisigen Streckenabschnittes, wobei die Gleislagequalität im Bereich dieser Messreihe nicht bekannt ist. Es handelt sich um ebenes Gelände ohne Lärmschutzwände. Die Weiche mit Stammgleis und Abzweiggleis liegt auf Holzschwellen. Das Gleis ohne Weiche liegt auf Betonschwellen. Aus diesem Grund werden die Messergebnisse nicht weiter verwendet und dienen ausschließlich als Information.

Bild 5-12 zeigt die Gleise im Bereich der Messreihe 3.



Bild 5-12 Gleise im Bereich der
Messreihe 3 - Ebenfurth

Bild 5-13 zeigt das starre Herzstück der Weiche.



Bild 5-13 Herzstück aus Messreihe 3 -
Ebenfurth

Bild 5-14 vgl. [21] zeigt die Messpunktanordnung der Messreihe 3.

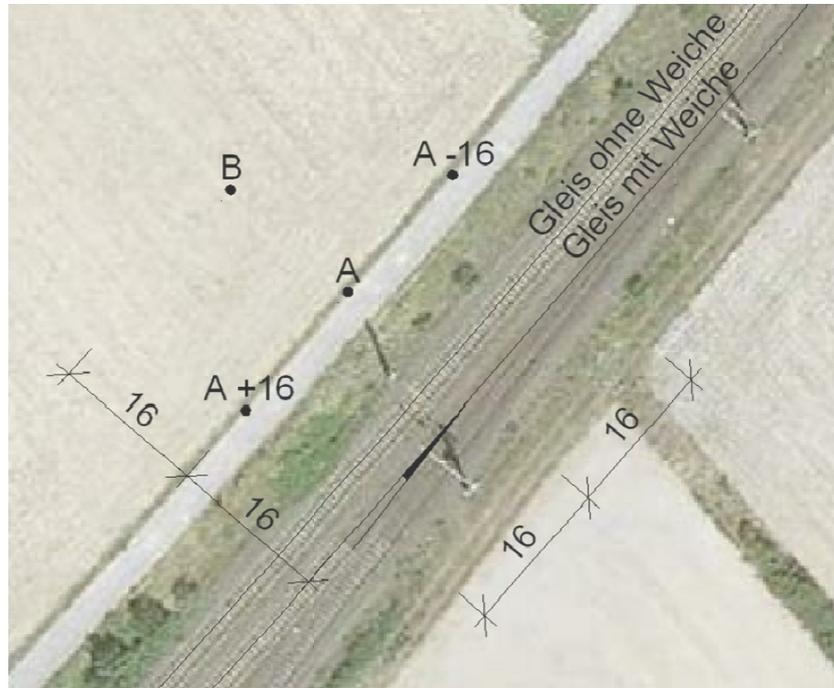


Bild 5-14 Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 3 - Ebenfurth vgl. [21]

Bild 5-15 zeigt die 3 Straßenmesspunkte.



Bild 5-15 Messpunktanordnung der Messreihe 3 - Ebenfurth parallel zu den Gleisen

5.3.4 Messreihe 4: Bereich Leoben

Die Weiche von Messreihe 4 liegt auf der Strecke zwischen Bruck an der Mur und St. Michael Ost bei km 13,000. Die einfache Weiche mit starrem Herzstück ist auf dem von den Messpunkten aus näheren Gleis des zweigleisigen Streckenabschnittes situiert und zweigt in ein Verladegleis eines lokalen Gewerbebetriebes ab. Dieser Abschnitt wurde im Jahre 2004 mittels Unterbausanierung und Neulage der Oberbaukomponenten reinvestiert.

Im Zuge der Gleisneulage wurden UIC 60 Schienen auf Betonschwellen verlegt. Dieser Weiche kann nur ein schlechter Zustand zufolge Gleislagequalität zugestanden werden. Allgemein ist der betrachtete Streckenabschnitt jedoch in einem guten Zustand, da sich die Gleislage gleichmäßig über diesen Abschnitt darstellt und so schädliche Einzelfehler ausgeschlossen werden können. Weiters gibt es in dieses Bereich keine anlagebedingte Langsamfahrstelle. *vgl. [17], vgl. [18]*

Damit eine größere Anzahl von Zügen erfasst werden konnte, wurde diese Messung im Gegensatz zu Messreihe 1 bis 3 an zwei Tagen durchgeführt. Am ersten Tag wurden Erschütterungen normal zu den Gleisen und am zweiten Tag parallel zu den Gleisen gemessen. Die, nach den in Bild 5-2 skizzierten Anordnungen, wurden außerdem leicht abgeändert. Für die Quermessung wurde ein zusätzlicher Messpunkt in 80 m Entfernung zum Herzstück und bei der Parallelmessung in 64 m Entfernung nach der Weichenüberfahrt installiert. Neben ebenem Gelände sind keine Lärmschutzwände vorhanden und im Bereich dieses Streckenabschnittes gibt es keine Stoßlücken.

Bild 5-16 zeigt die Gleise im Bereich der Messreihe 4.



Bild 5-16 Gleise im Bereich der
Messreihe 4 - Leoben

Bild 5-17 zeigt das starre Herzstück der Weiche.



Bild 5-17 Herzstück aus Messreihe 4 -
Leoben

Bild 5-18 zeigt die Messpunktanordnung der Parallelmessung.



Bild 5-18 Messpunktanordnung der Messreihe 4 - Leoben parallel zu den Gleisen

Bild 5-19 vgl. [20] zeigt die Messpunktanordnung der Messreihe 4 für die Parallelmessung.

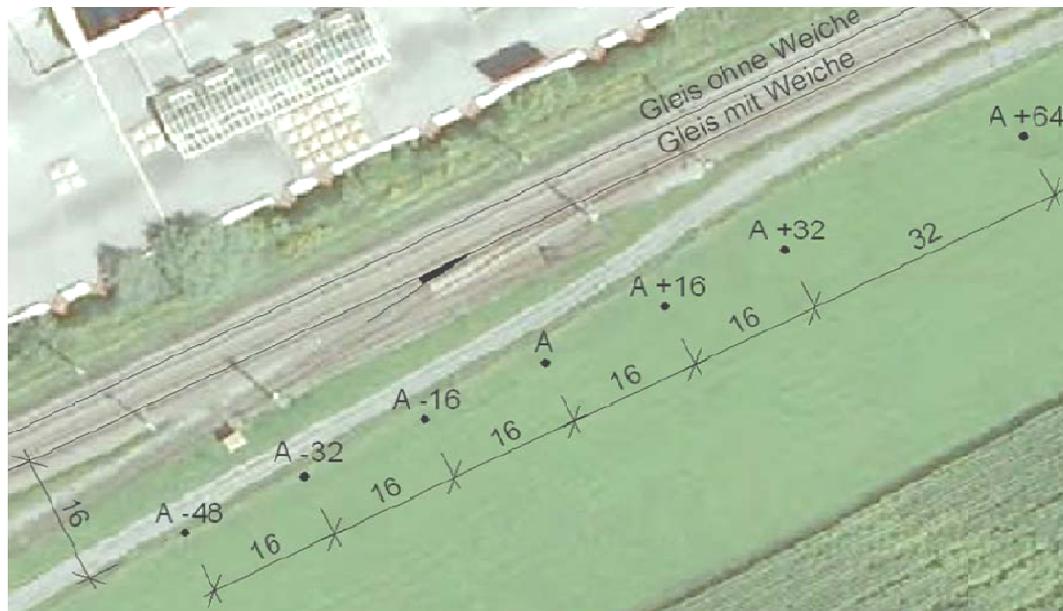


Bild 5-19 Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 4 - Leoben (Parallelmessung)
vgl. [20]

Bild 5-20 vgl. [20] zeigt die Messpunktanordnung der Messreihe 4 für die Quermessung.



Bild 5-20 Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 4 - Leoben (Quermessung)
vgl. [20]

5.3.5 Messreihe 5: Bereich Baden

Die Weichen der Überleitstelle von Messreihe 5 befinden sich auf der Südbahn von Wien nach Spielfeld und liegen zwischen BHF Baden und BHF Bad Vöslau bei km 26,800. Die Gleisneulage im Bereich der Weichen wurde über eine Länge von 175 m im Jahre 2002 durchgeführt und lässt den Schluss zu, dass dieses Jahr dem Einbaualter der Weichen entspricht. Die Abschnitte vor und nach den Weichen sind allesamt 1993 erneuert worden. Im Folgenden wird das Gleis, welches einen geringeren Abstand zu den Messpunkten aufweist, als Gleis 1 und das entferntere Gleis als Gleis 2 bezeichnet. Die Züge auf Gleis 1 fahren Richtung Nordosten (Wien) und jene auf Gleis 2 fahren Richtung Südwesten (Graz). Der gesamte Bereich der Messreihe 5 ist mit Betonschwellen und UIC 60 Schienen ausgeführt. Eine Besonderheit dieser Überleitstelle betrifft die Weichen auf Gleis 2, da diese auf besohlenen Schwellen verlegt wurden. Auch im Bereich zwischen diesen Weichen wurden besohlte Betonschwellen verwendet. Eine weitere Besonderheit der Überleitstelle bildet eine der zwei Weichen auf Gleis 1, welche mit einem beweglichen Herzstück versehen wurde. Zusammengefasst ist die Gleislage im Bereich der Überleitstelle in einem einwandfreien Zustand. Durch die durchgeführte Planinstandhaltung kann ebenfalls auf einen guten Zustand des Gleises ohne Einzelfehler zufolge Unterbauschädigungen und Schädigungen des Oberbaues geschlossen werden. *vgl. [17], vgl. [18]*

Die Gleise liegen auf einem zirka 4,5 m hohen Damm und haben im Bereich der Messpunkte keine Stoßlücken. Weiters befinden sich am Damm Lärmschutzwände. Die Geschwindigkeitssensoren wurden nach den in Bild 5-22 eingezeichneten Positionen parallel zu den Gleisen installiert. Eine Installation quer zu den Gleisen war wegen des verbauten Geländes nicht möglich. Trotz des 4,5 m hohen Dammes und des verbauten Geländes wurde diese Messreihe wegen ihrer Besonderheiten (teilweise Schwellenbesohlung, starre und bewegliche Herzstücke) ausgewählt.

Bild 5-21 zeigt die Gleise mit den vier Weichen der Messreihe 5 mit Blickrichtung Wien.



Bild 5-21 Gleise mit den vier Weichen der Messreihe 5 - Baden

Bild 5-22 vgl. [21] zeigt die Messpunktanordnung der Messreihe 5.

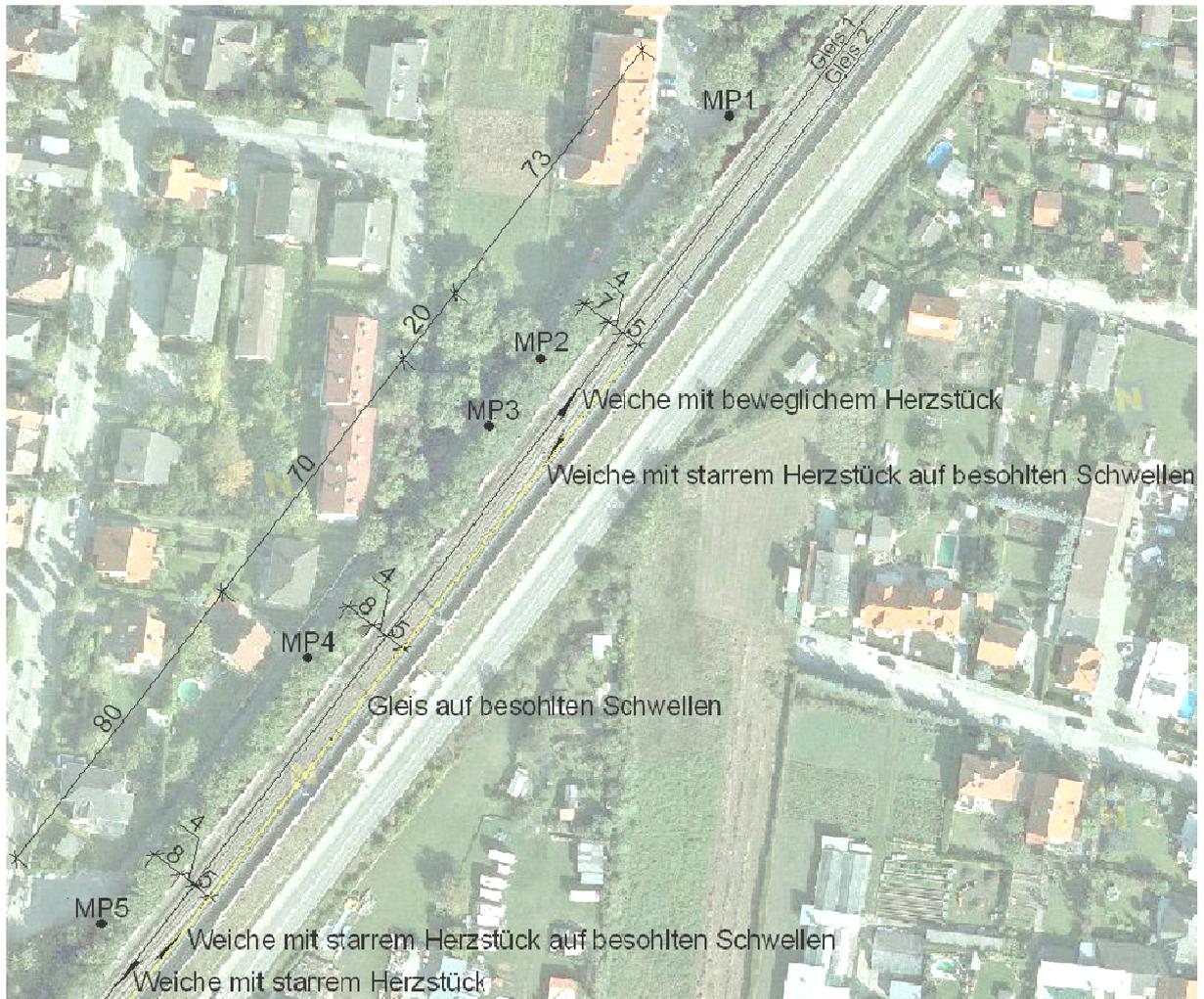


Bild 5-22 Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 5 - Baden vgl. [21]

5.3.6 Messreihe 6: Bereich St. Valentin

Auf der innerösterreichischen Westbahn zwischen St. Valentin und Ennsdorf bei Enns befindet sich der bei km 164,580 untersuchte Abschnitt für Messreihe 6. Dieser Abschnitt weist eine gute Gleislagequalität auf. vgl. [17], vgl. [18]

Neben ebenem Gelände sind auf der östlichen Seite des Messabschnittes Lärmschutzwände vorhanden. Die vier betrachteten Gleise des fünfgleisigen Streckenabschnittes liegen auf Betonschwellen und haben keine Stoßlücken. Die zwei betrachteten Weichen sind mit beweglichen Herzstücken ausgestattet.

Die Geschwindigkeitssensoren wurden nach den in Bild 5-26 eingezeichneten Positionen installiert. Mit der gewählten Messpunktanordnung war es möglich, mit den nur an einem Tag

zur Verfügung stehenden Messgeräten, die Erschütterungen von zwei Weichen mit beweglichen Herzstücken zeitgleich zu messen.

Im Folgenden werden die Gleise mit Zunahme ihrer Entfernung zu den Messpunkten aufsteigend von Gleis 1 bis Gleis 4 bezeichnet. Für Messpunkt 1 erfolgte ein Vergleich zwischen Gleis 3 mit Weiche und Gleis 4 ohne Weiche. Für Messpunkt 2 erfolgte ein Vergleich zwischen Gleis 2 mit Weiche und Gleis 1 ohne Weiche.

Bild 5-23 zeigt die Gleise im Bereich der Messreihe 6 mit Blickrichtung Süden.



Bild 5-23 Gleise im Bereich der Messreihe 6 - St. Valentin

Bild 5-24 zeigt die südlich liegende, erschütterungstechnisch untersuchte Weiche mit beweglichem Herzstück auf Gleis 3.



Bild 5-24 Bewegliches Herzstück auf
Gleis 3 aus Messreihe 6 -
St. Valentin

Bild 5-25 zeigt die nördlich liegende, erschütterungstechnisch untersuchte Weiche mit beweglichem Herzstück auf Gleis 2.



Bild 5-25 Bewegliches Herzstück auf
Gleis 2 aus Messreihe 6 -
St. Valentin

Bild 5-26 vgl. [21] zeigt die Messpunktanordnung der Messreihe 6.

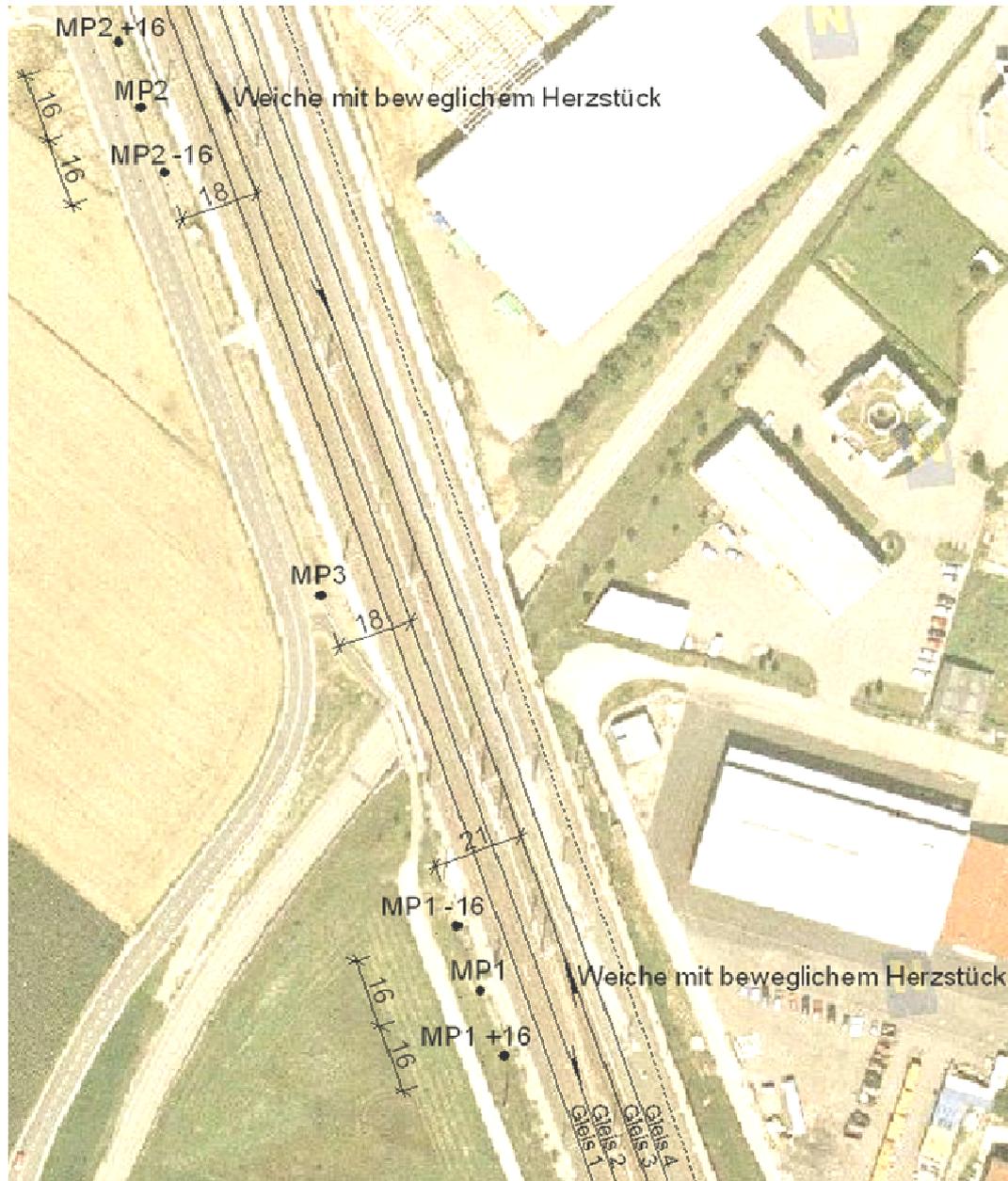


Bild 5-26 Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 6 - St. Valentin vgl. [21]

Die Messungen der ausgewählten Weichen der Messreihe 1 bis 6 wurden an Bestandsstrecken durchgeführt. Die Verstärkung der Erschütterungsemission wird bei Neubaustrecken direkt nach dem Weicheneinbau sowie direkt nach Instandhaltungsmaßnahmen wie z.B. eines Weichenaustausches geringer ausfallen. Solche Untersuchungen sind zukünftig durchzuführen.

5.4 Erschütterungsauswertung

Die Auswertung der Messdaten erfolgte mit der Auswertesoftware VIEW 2002. Neben der Auswertung im Zeitbereich und Frequenzbereich kann mit VIEW 2002 auch nach nationalen Normen, wie nach ÖNORM S 9012 (siehe Kapitel 3.2), ausgewertet werden.

Bild 5-27 zeigt ein typisches Zeitverlaufsignal einer Zugvorbeifahrt ohne Weicheneinfluss, Bild 5-28 zeigt ein typisches Signal mit Weicheneinfluss aus der Messreihe 2 - Eggendorf. Auf der vertikalen Achse ist die Schwinggeschwindigkeit in mm/s dargestellt und auf der horizontalen Achse die Zeit in s.

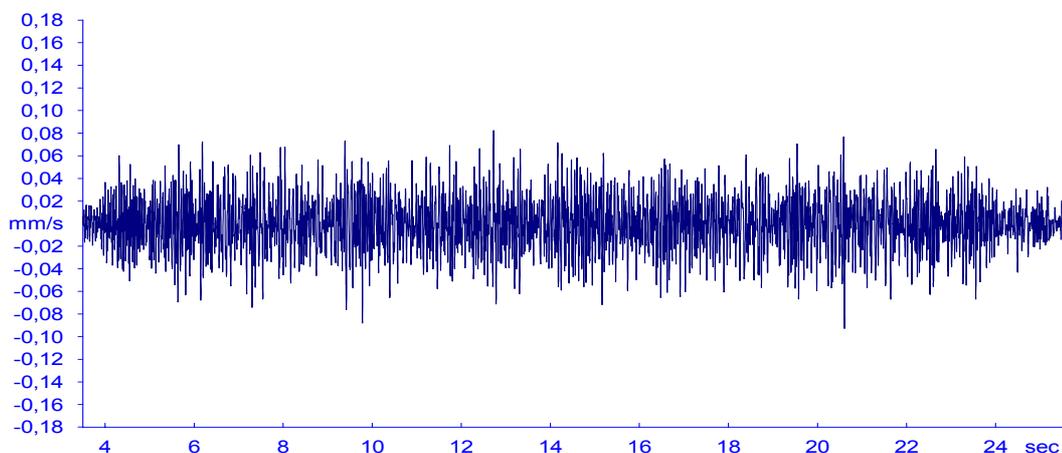


Bild 5-27 Typisches Zeitverlaufsignal ohne Weicheneinfluss

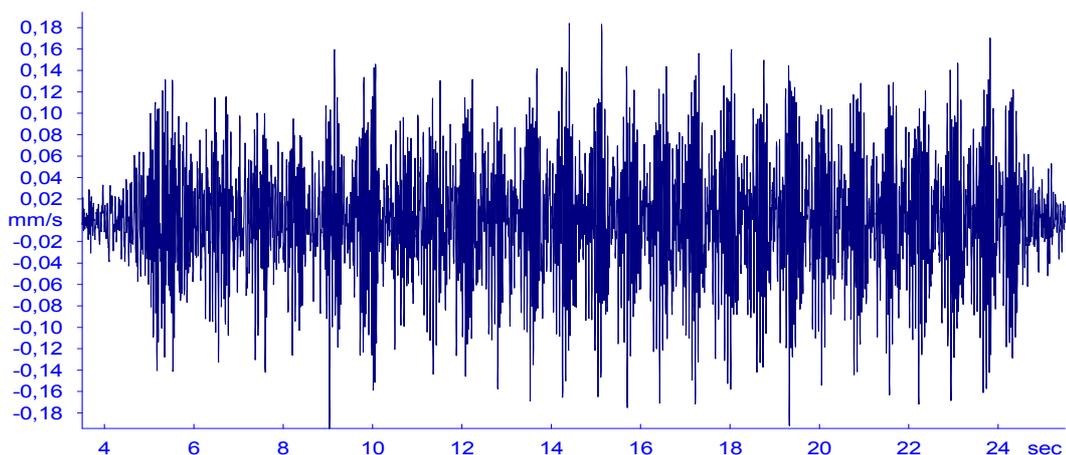


Bild 5-28 Typisches Zeitverlaufsignal mit Weicheneinfluss

Für die Auswertung wurden nur jene Züge herangezogen, die im ähnlichen Geschwindigkeitsbereich gefahren sind. Aus diesem Grund konnte auf eine Geschwindigkeitsnormierung verzichtet werden. Die Erschütterungsverstärkung bei Weichen errechnet sich aus den Erschütterungen vom Gleis mit Weiche dividiert durch jene vom Gleis ohne Weiche.

5.4.1 Messreihe 1: Bereich Kalsdorf

Bild 5-29 zeigt die Verstärkungsfaktoren der Quermessung für die in schlechten Zustand zufolge Gleislagequalität befindende Weiche der Messreihe 1.

Neben den prinzipiell hohen Verstärkungsfaktoren ist ein deutliches Maximum der Verstärkung bei der Terzbandfrequenz von 32 Hz im weichennahen Bereich erkennbar. In diesem Frequenzbereich dürfte die Eigenfrequenz des Systems Oberbau-Unterbau-Boden liegen. Durch die impulsförmige Anregung bei einer Weichenüberfahrt kommt es zu Schwingungen im Eigenfrequenzbereich dieses Systems.

Weiters ist eine starke Abnahme der Verstärkung der hohen Frequenzen mit Zunahme der Distanz erkennbar.

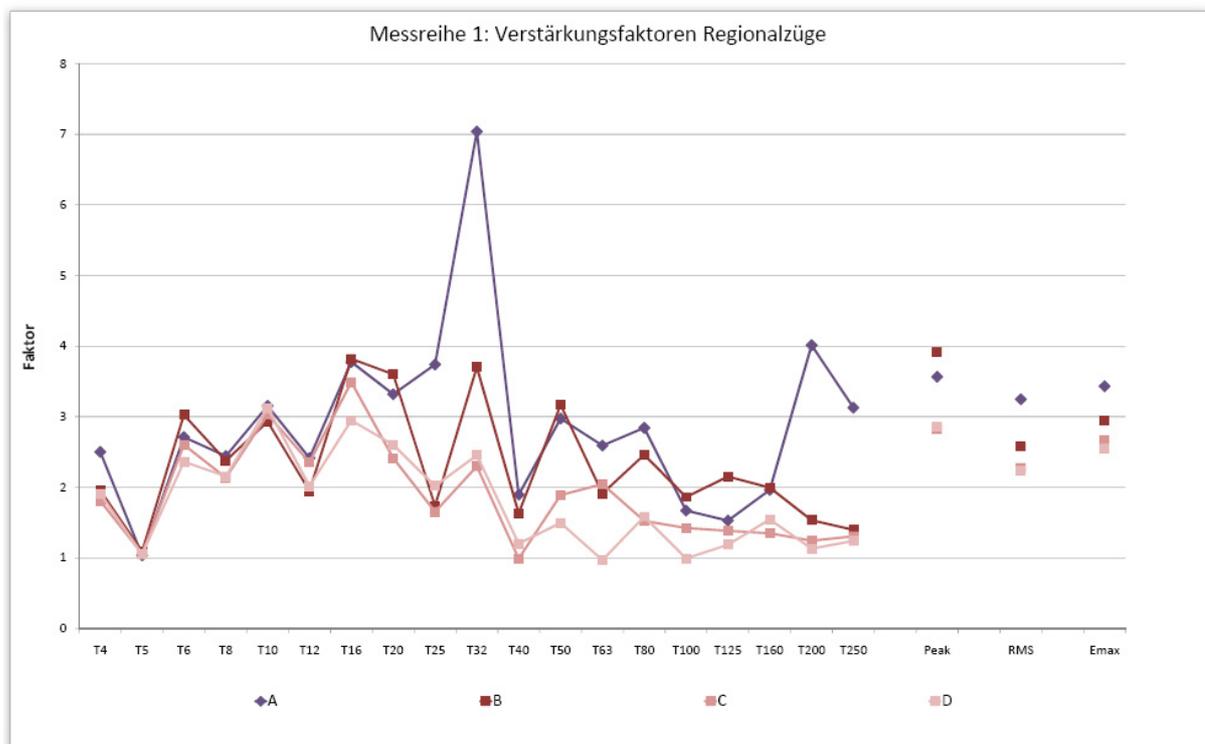


Bild 5-29 Verstärkungsfaktoren aus Messreihe 1 - Kalsdorf

5.4.2 Messreihe 2: Bereich Eggendorf

Bild 5-30 und Bild 5-31 zeigen die Verstärkungsfaktoren der Quermessung für die Weiche der Messreihe 2 getrennt für Regional- und Güterzüge. Die Gleislagequalität im Bereich dieser Messreihe ist nicht bekannt. Ein Maximum der Verstärkung ist bei den Terzbandfrequenzen von 25 Hz und 32 Hz erkennbar. In diesen Frequenzbereichen dürfte die Eigenfrequenz des Systems Oberbau-Unterbau-Boden liegen. Weiters ist nur eine leichte Abnahme der Verstärkung mit Zunahme der Distanz erkennbar.

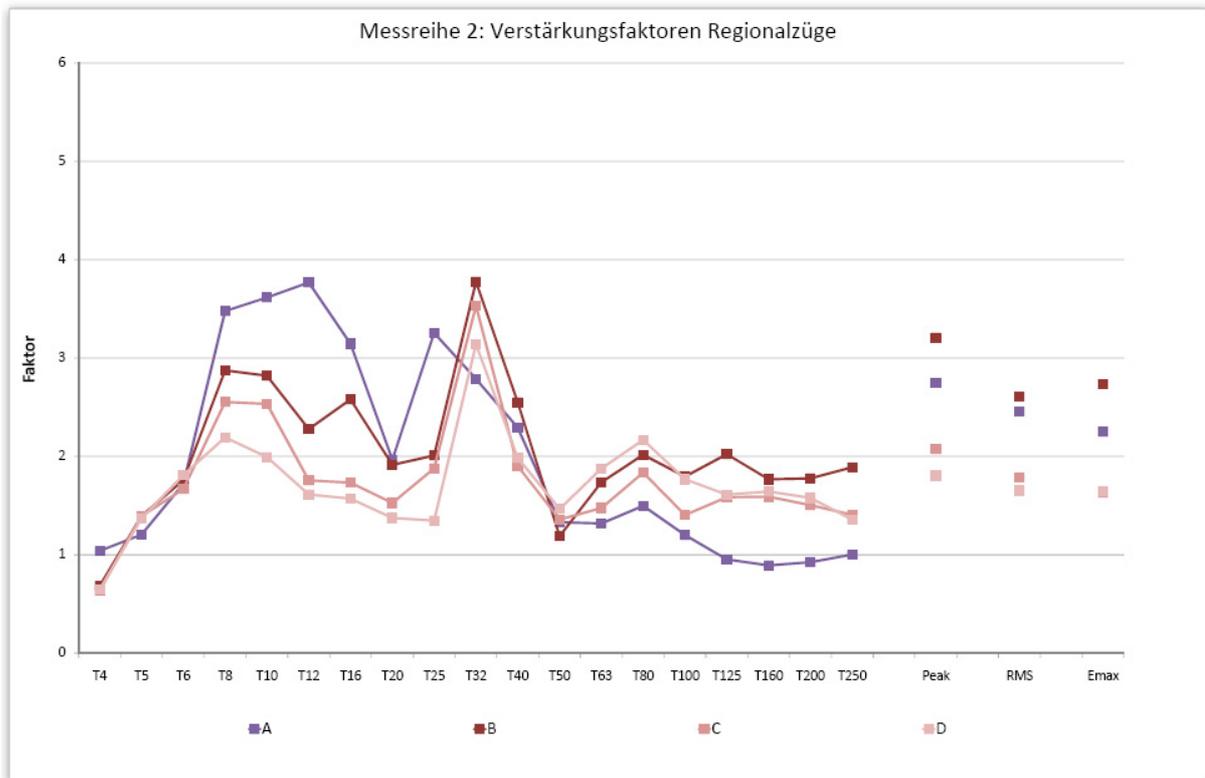


Bild 5-30 Verstärkungsfaktoren der Regionalzüge aus Messreihe 2 - Eggendorf

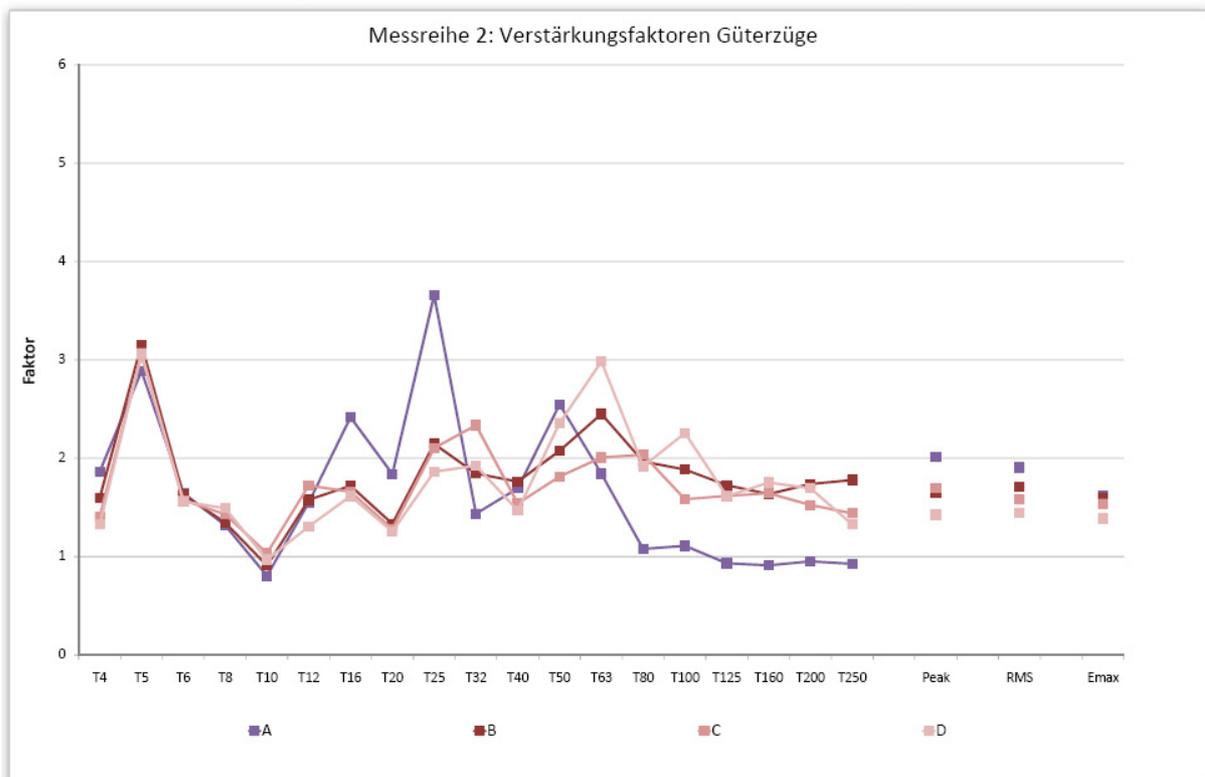


Bild 5-31 Verstärkungsfaktoren der Güterzüge aus Messreihe 2 - Eggendorf

Bild 5-32 zeigt eine Zusammenfassung der Verstärkungsfaktoren aus der Quermessung für die Messreihe 2.

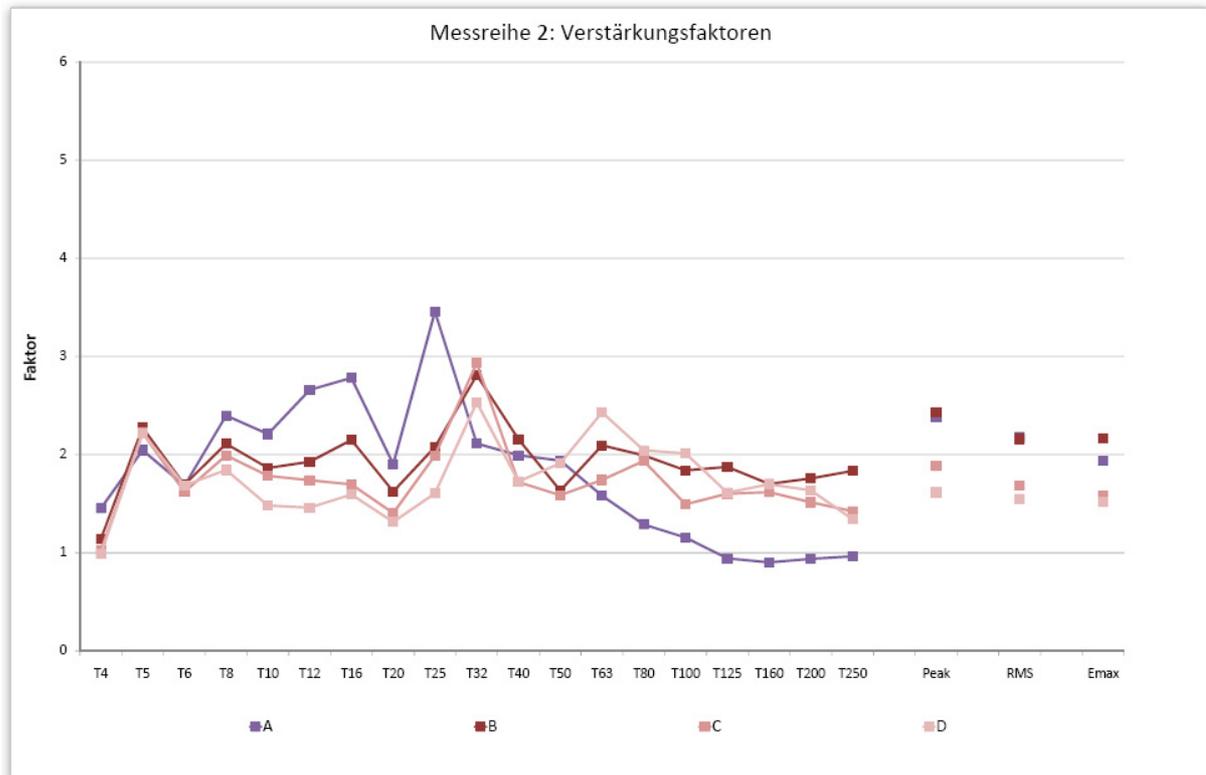


Bild 5-32 Zusammenfassung der Verstärkungsfaktoren aus Messreihe 2 - Eggendorf

5.4.3 Messreihe 3: Bereich Ebenfurth

Bild 5-33 zeigt die Verstärkungsfaktoren der Quermessung für die Weiche der Messreihe 3. Züge, die auf Betonschwellen über das Gleis ohne Weiche fahren, verursachen ähnliche Erschütterungen wie jene Züge, die auf Holzschwellen über das Gleis mit Weiche fahren. Die Gleislagequalität im Bereich dieser Messreihe ist nicht bekannt.

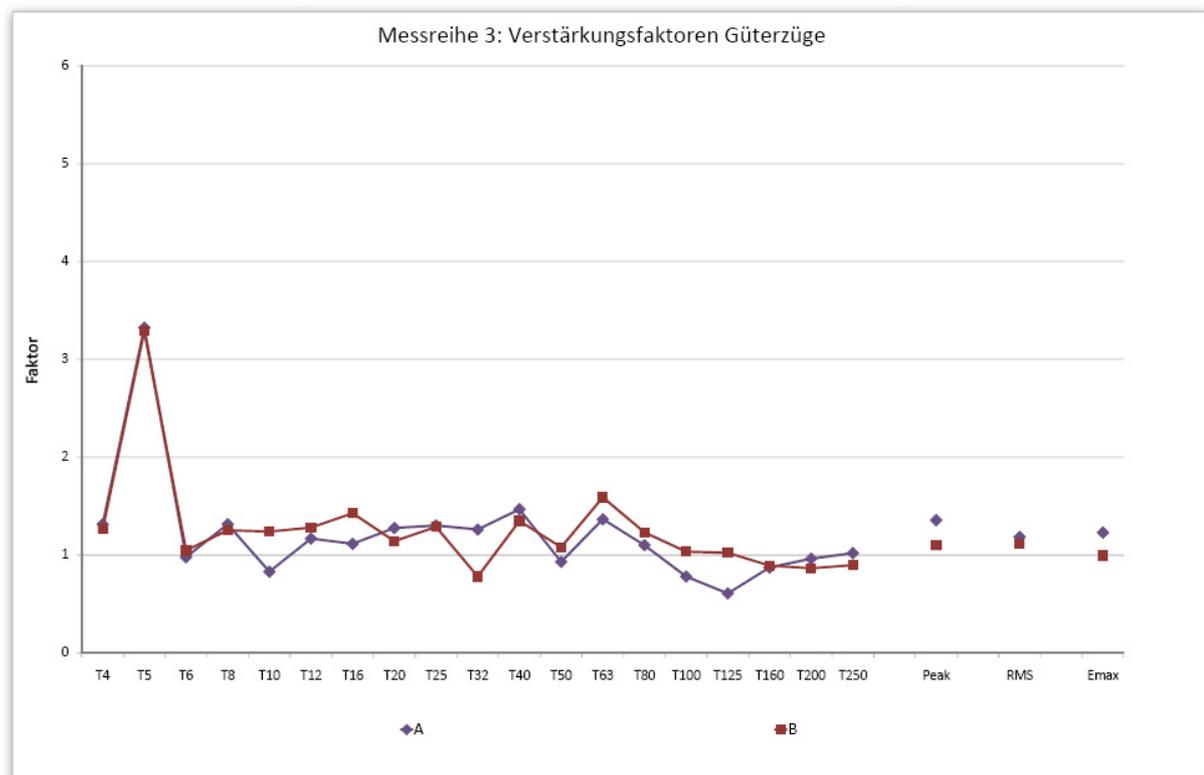


Bild 5-33 Verstärkungsfaktoren aus Messreihe 3 - Ebenfurth

5.4.4 Messreihe 4: Bereich Leoben

Bild 5-34, Bild 5-35 und Bild 5-36 zeigen die Verstärkungsfaktoren der Quermessung für die in schlechten Zustand zufolge Gleislagequalität befindende Weiche der Messreihe 4 getrennt für Fernreise-, Regional- und Güterzüge.

Neben den prinzipiell sehr hohen Verstärkungsfaktoren, welche auf die schlechte Gleislagequalität zurückzuführen sind, ist ein deutliches Maximum der Verstärkung bei den Terzbandfrequenzen von 32 Hz und 40 Hz im weichennahen Bereich erkennbar. In diesen Frequenzbereichen dürfte die Eigenfrequenz des Systems Oberbau-Unterbau-Boden liegen. Durch die impulsförmige Anregung bei einer Weichenüberfahrt kommt es zu Schwingungen im Eigenfrequenzbereich dieses Systems.

Weiters ist eine deutliche Abnahme der Verstärkung der hohen Frequenzen mit Zunahme der Distanz erkennbar.

Bild 5-37 zeigt eine Zusammenfassung der Verstärkungsfaktoren aus der Quermessung für die Messreihe 4.

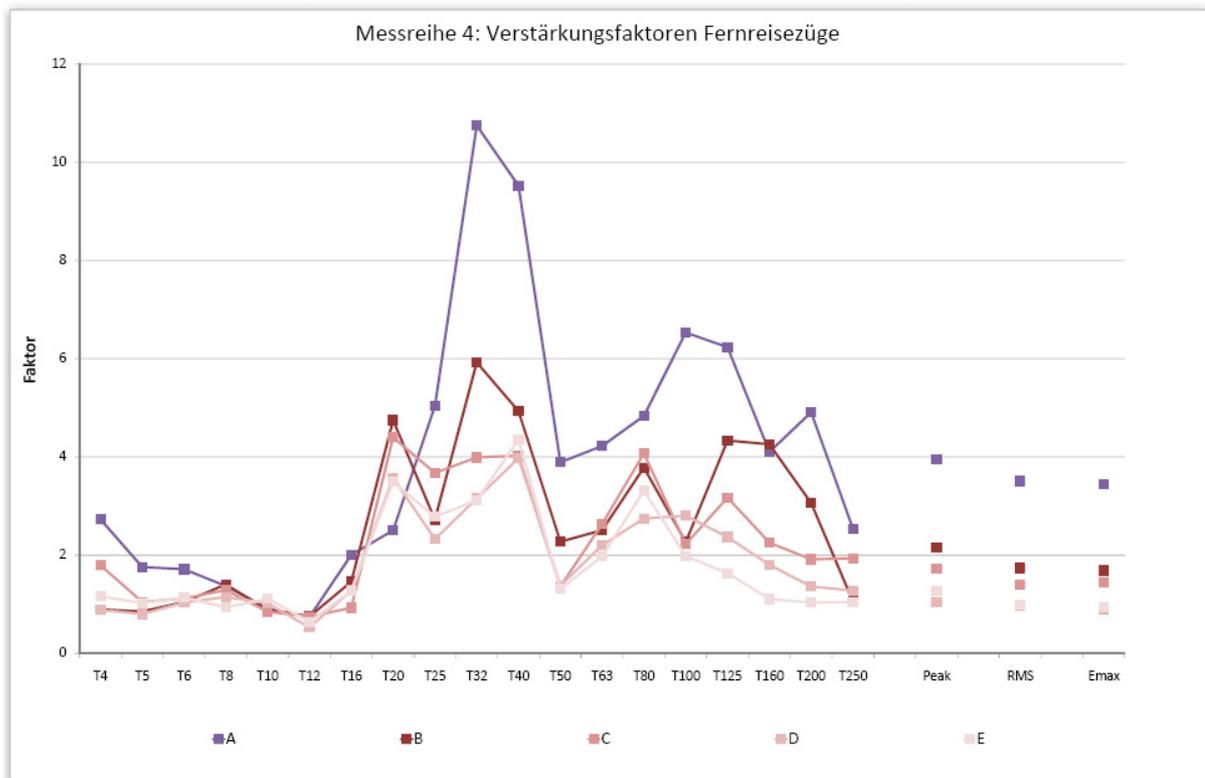


Bild 5-34 Verstärkungsfaktoren der Fernreisezüge aus Messreihe 4 - Leoben

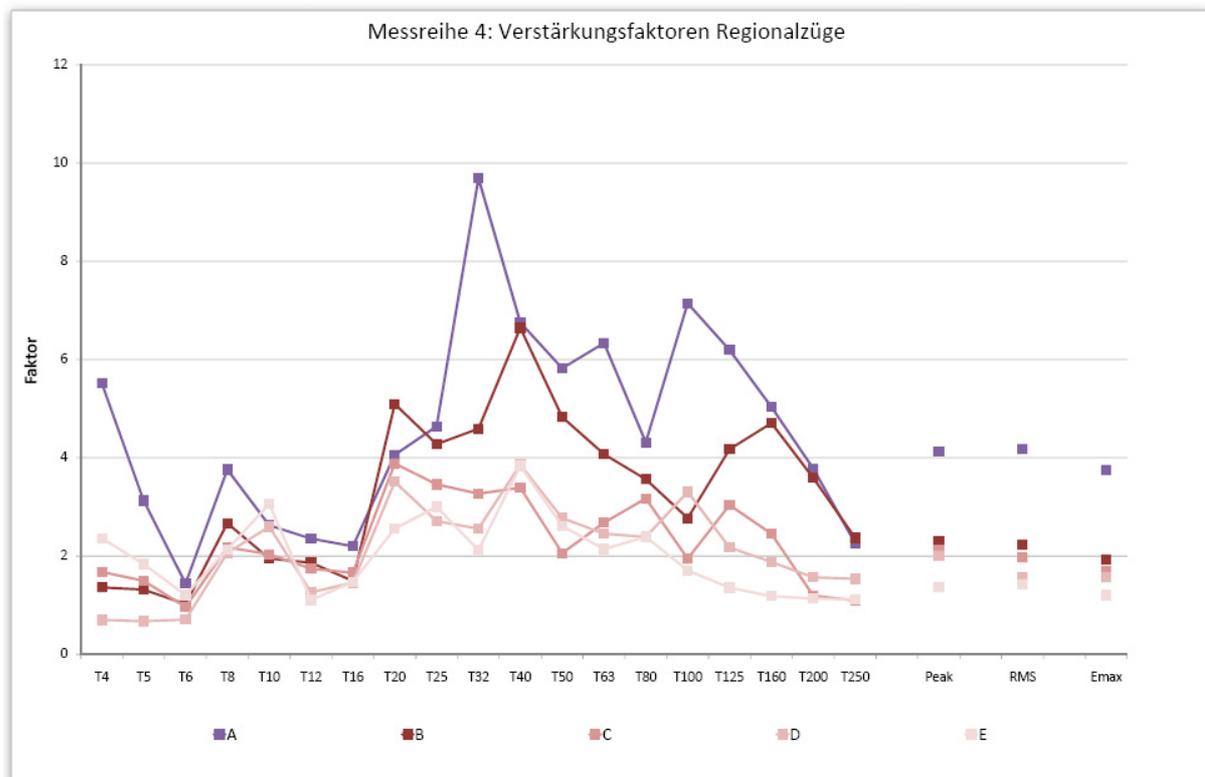


Bild 5-35 Verstärkungsfaktoren der Regionalzüge aus Messreihe 4 - Leoben

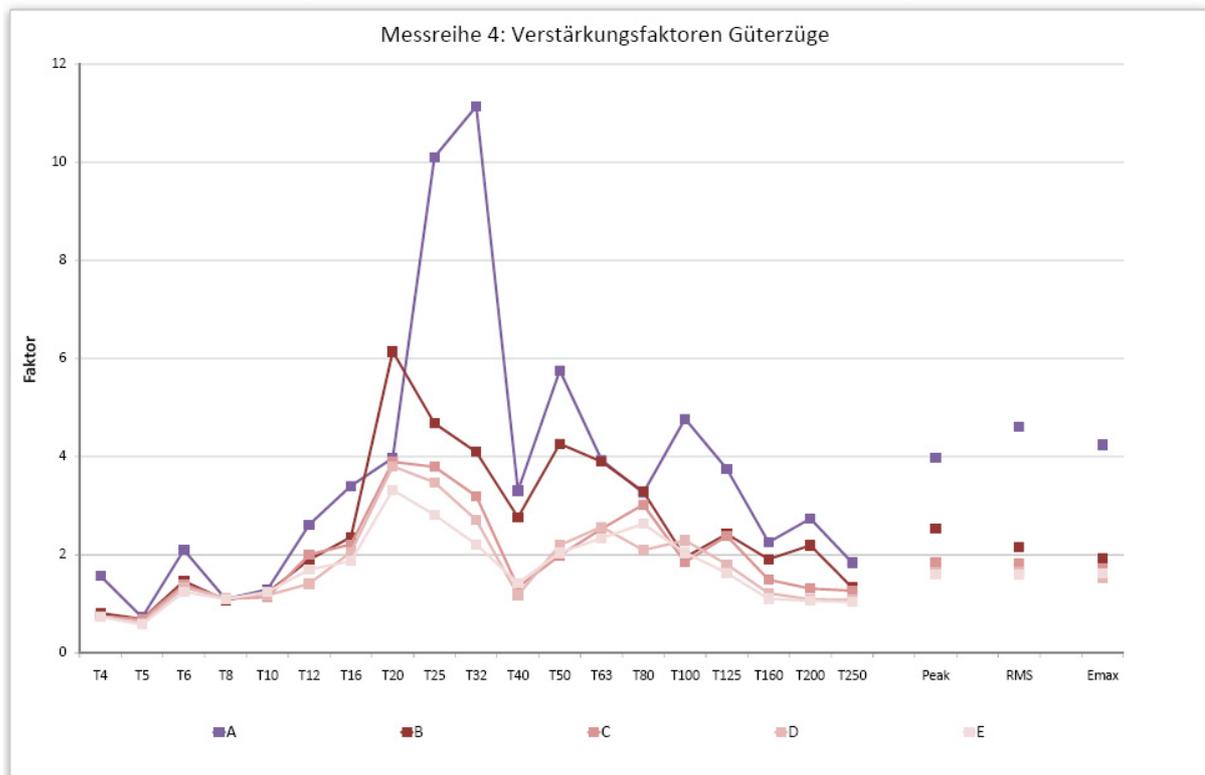


Bild 5-36 Verstärkungsfaktoren der Güterzüge aus Messreihe 4 - Leoben

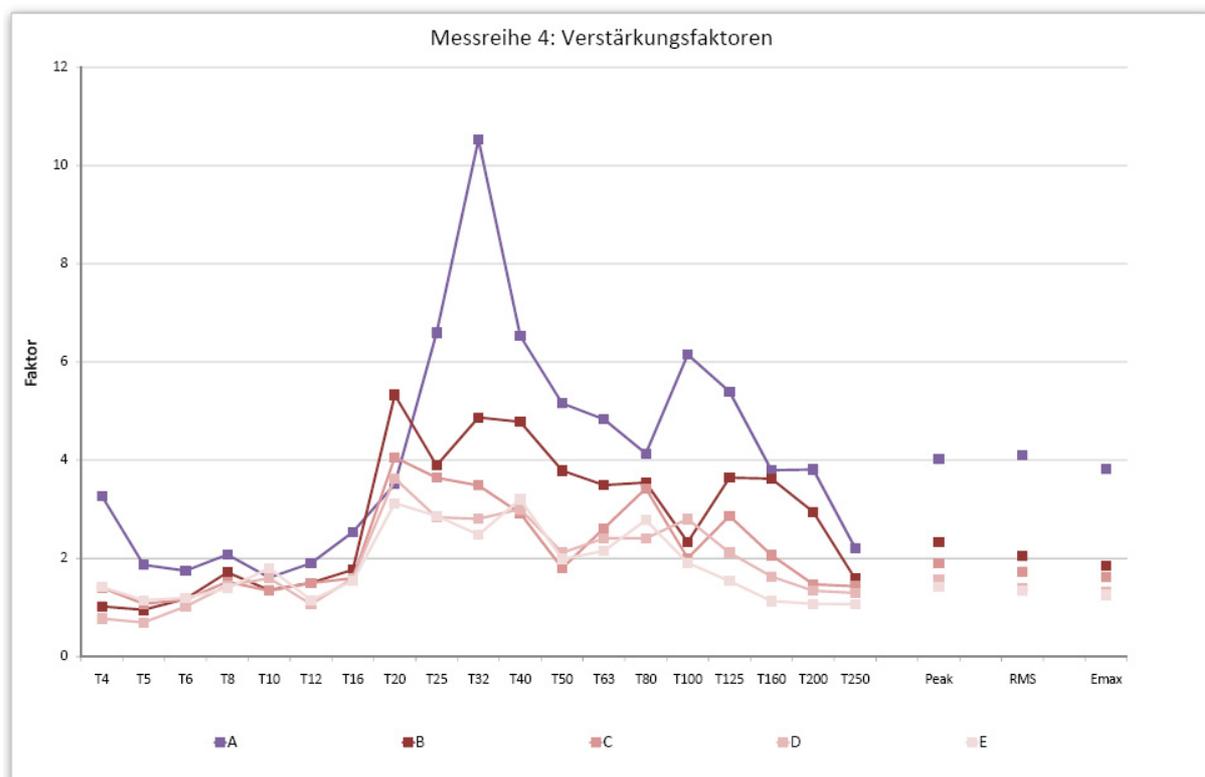


Bild 5-37 Zusammenfassung der Verstärkungsfaktoren aus Messreihe 4 - Leoben

5.4.5 Bestandsmessungen

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden neben den Auswertungen der 6 Messreihen auch Auswertungen von bestehenden Messungen durchgeführt. Die verwendeten Messungen wurden dabei von mir im Zuge meiner Tätigkeit bei tappauf.consultants in den Monaten August bis September 2009 bzw. im April 2010 durchgeführt.

Bei den ersten speziell für diese Masterarbeit durchgeführten Auswertungen wurden Messdaten vom Bereich Bessemergasse in Graz verwendet. Der erste Messpunkt war dabei im Keller eines Mehrfamilienhauses in 16 m Entfernung zu einer einfachen Weiche mit starrem Herzstück installiert. Der zweite Messpunkt war im Keller eines Bürogebäudes in 30 m Entfernung zu einer einfachen Weiche mit starrem Herzstück installiert.

Bei weiteren speziell für diese Masterarbeit durchgeführten Auswertungen wurden Messdaten von Messungen in Gloggnitz und am Semmering verwendet. In Gloggnitz war der Messpunkt vor einem Einfamilienhaus in einer Entfernung von 32 m zu einer einfachen Weiche mit starrem Herzstück installiert. Am Semmering war der Messpunkt im Freifeld in 5 m Entfernung zu einer Stoßlücke installiert. Die Auswertung der Stoßlücke gibt Aufschluss über Ähnlichkeiten der Erschütterungsverstärkung von Weichen und Stoßlücken.

Für die Bestandsmessungen war es teilweise erforderlich, Abstandsnormierungen durchzuführen. Beispielsweise beträgt am Semmering der Abstand vom Messpunkt zum ersten betrachteten Gleis 5 m und zum zweiten rund 10 m. Damit die Erschütterungsemission dieser Gleise miteinander verglichen werden kann, wurden die Werte nach Formel 2-1 abstandsnormiert.

Für die Dämpfungsexponenten der geometrischen und materiellen Dämpfung wurden Faktoren zwischen 0,4 und 2,2, je nach Frequenzterzband, verwendet. Es handelt sich dabei um ein büointernes Modell von tappauf.consultants, das zurzeit noch in Entwicklung ist. vgl. [16]

6 Literaturrecherche

Im Zuge dieser Masterarbeit wurden zahlreiche Unterlagen auf der Suche nach Angaben über den Einfluss von Weichen durchforstet. Im Kapitel 6 werden die dabei gefundenen Informationen zusammengefasst. Dabei werden jedoch nur jene Ergebnisse dargestellt, die als brauchbar eingestuft werden können. Es ist festzuhalten, dass sich die Angaben aus der Literatur deutlich unterscheiden und zum Teil auch widersprechen. Als Beispiel für diese Widersprüche kann genannt werden, dass bei Weichen mit beweglichen Herzstücken in [26] eine Reduktion der Erschütterungsemission bis zu 67 % im Vergleich zu Standardweichen messbar ist. Währenddessen wird in [23] beschrieben, dass bewegliche Herzstücke zur Reduktion von Erschütterungen nicht geeignet sind.

Bei Haupt- und Nebenbahnen ist die Errichtung bahnfremder Objekte bis zu einer Entfernung von 12 m von der Mitte des äußersten Gleises verboten. vgl. [25] In der Literatur ist der Weicheneinfluss meist für Distanzen von rund 8 m angegeben. Da Gebäude mit diesem geringen Abstand in Österreich in der Bauverbotszone stehen würden, wurde bei dieser Masterarbeit für die Parallelmessungen und den ersten Messpunkt der Quermessungen ein Abstand von ca. 16 m definiert. Nur selten werden bzw. wurden Objekte in geringeren Abständen zum Gleis errichtet.

Weiters wird der Weicheneinfluss in der Literatur oft in Dezibel angegeben. Die meisten Prognosemodelle arbeiten jedoch nicht logarithmisch mit Addition und Subtraktion, sondern mit Multiplikation und Division (siehe Kapitel 2.1). Üblicherweise wird nur das Endergebnis für den Sekundärschall in Dezibel angegeben. Auch bei den Beurteilungsgrößen für Erschütterungen handelt es sich um keine logarithmischen Werte. Deshalb werden in den in dieser Masterarbeit definierten Spektren Faktoren verwendet.

Mit der Formel 6-1 erfolgt die Umrechnung von Dezibel in Faktoren.

$$a = b^{\frac{x}{20}} \qquad 6-1$$

a	Faktor
b	Basis (10 bei Schall)
x	Dezibel

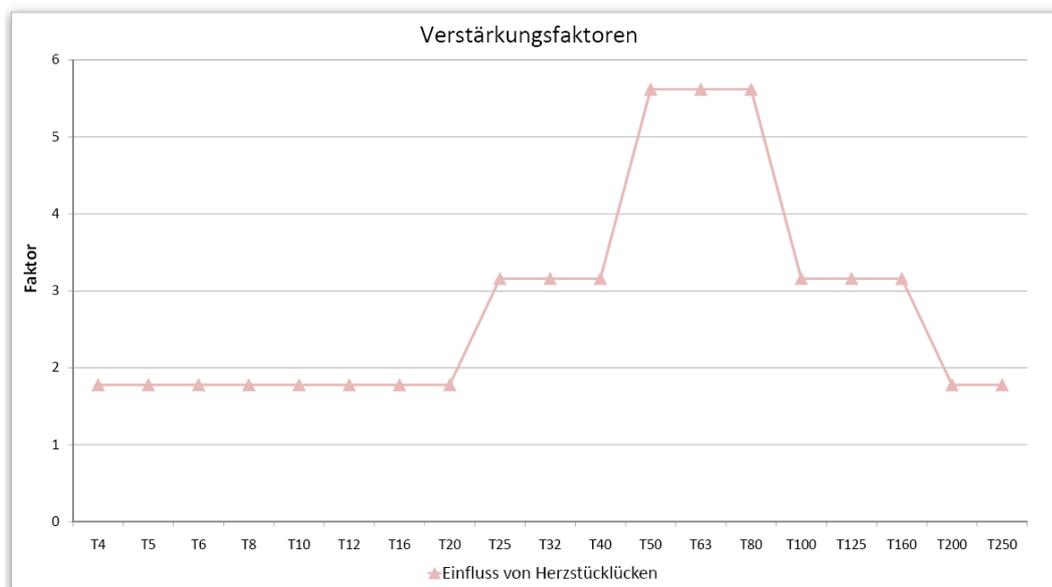
6.1 Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr vgl. [12]

Tabelle 6-1 [12] zeigt einen Auszug der Tendenzen mittlerer relativer Einflüsse in Dezibel im Bereich Rad/Schiene.

Nr	Parameter, Maßnahme		(Lv 1) in dB					
			Oktav-Mittenfrequenzen					
			8	16	31	63	125	250
2	Bereich Rad/Schiene	Flachstellen	10	10	10	15	10	5
		Schienenfahrlächen (ohne ausgeprägte Flachstellen)	*	*	-6	-12	-11	-14
		Schweißstellen	5	5	5	5	5	5
		Herzstücklücken	5	5	10	15	10	5
		Stützpunktstand (75 cm (90 cm))	-5	-5	-5	-5	-5	-5
		Schienengewicht / -profil	*	*	*	*	*	*

Tabelle 6-1 Mittlere relative Einflüsse in Dezibel im Bereich Rad/Schiene [12]

Bild 6-1 vgl. [12] zeigt eine Darstellung des in [12] angegebenen Einflusses von Herzstücklücken über den maßgebenden Frequenzbereich in Faktoren. Die Umrechnung von Dezibel in Faktoren erfolgte nach der Formel 6-1.



Aspekt	T4	T5	T6	T8	T10	T12	T16	T20	T25	T32	T40	T50	T63	T80	T100	T125	T160	T200	T250
Einfluss von Herzstücklücken	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	3,16	3,16	3,16	5,62	5,62	5,62	3,16	3,16	3,16	1,78	1,78

Bild 6-1 Einfluss von Herzstücklücken vgl. [12]

Beschreibung:

Die in Bild 6-1 vgl. [12] dargestellten Funktionswerte liegen im untersten und obersten Frequenzbereich bei einem Faktor von 1,8 und steigen im Terzbandfrequenzbereich von 32 Hz und 125 Hz auf über 3,2. Im Bereich von 60 Hz tritt die maximale Verstärkung mit einem Faktor von 5,6 auf.

Einschätzung:

Diese Verstärkungsfunktion ist aus meiner Sicht sehr hoch. Auffällig dabei ist, dass hohe Verstärkungen erst im Bereich zwischen 45 und 90 Hz auftreten. Da hohe Frequenzen mit Zunahme der Entfernung rasch gedämpft werden, kann davon ausgegangen werden, dass diese Verstärkungsfunktion direkt für den Bereich Rad/Schiene bzw. für geringe Entfernungen zur Herzstücklücke gelten. Die Funktion liegt deshalb meist über dem in dieser Masterarbeit für Entfernungen von rund 16 m definierten Weicheneinflussspektrum (siehe Bild 7-1).

6.2 VDI Berichte 1941 - starres Herzstück vgl. [23]

In [23] werden die Ergebnisse von zahlreichen Messungen in der Schweiz dargestellt. Zusätzliche werden zwei idealisierte Modelle, ein altes und ein neues Modell, vorgestellt. Die Werte sind in Dezibel angegeben und wurden für das neue Modell nach der Formel 6-1 in Faktoren umgerechnet.

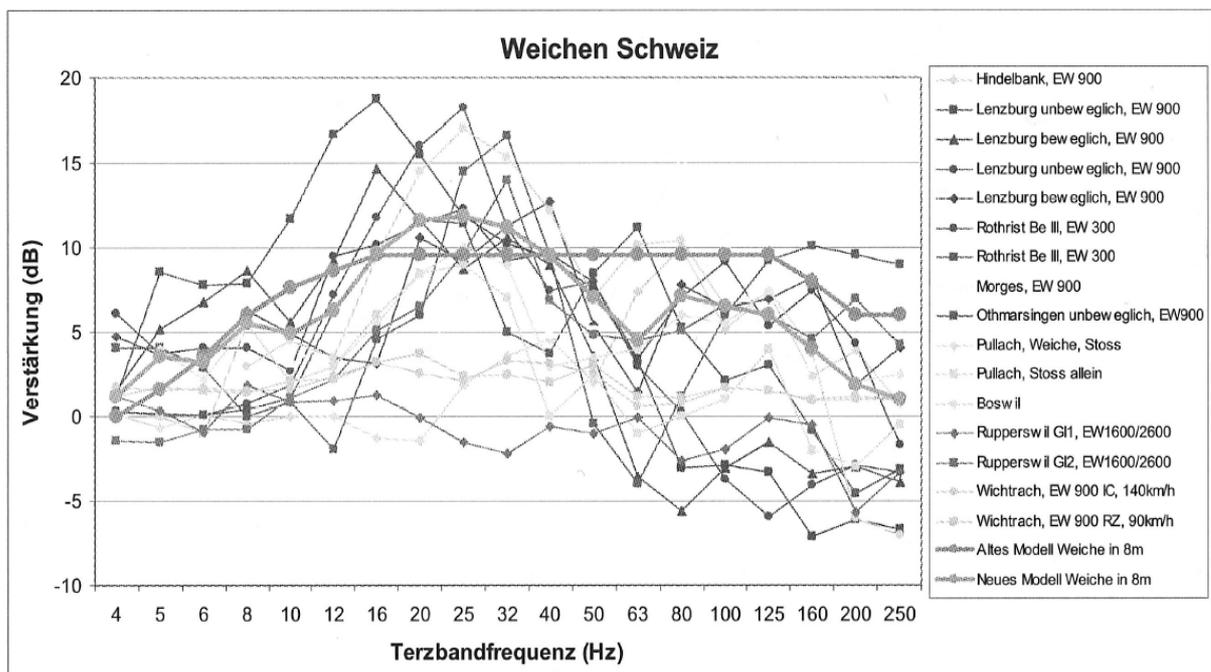
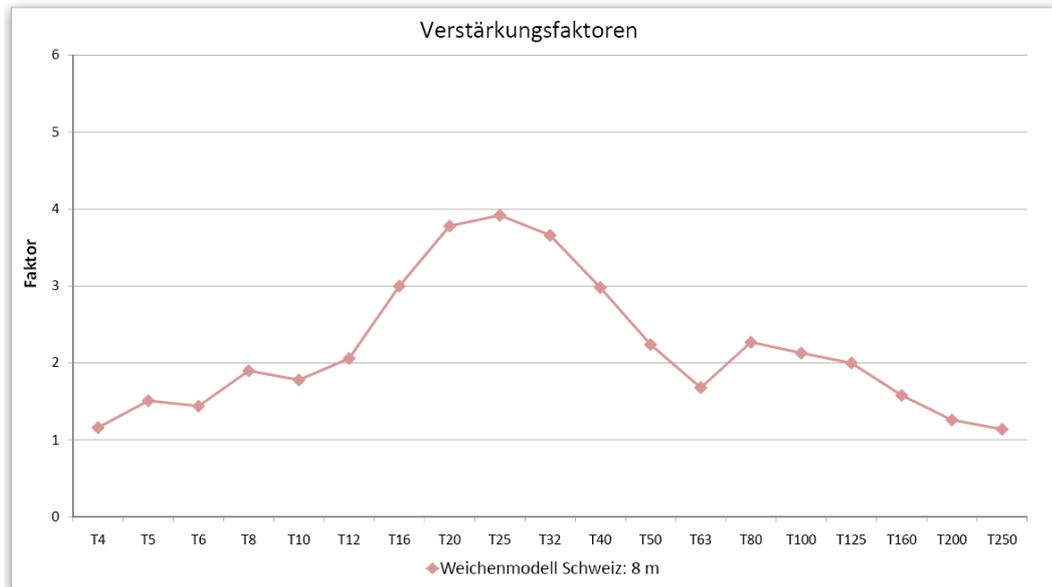


Bild 6-2 Modellierung der Verstärkung von Weichen gemessen in der Schweiz [23]

Bild 6-3 *vgl. [23]* zeigt die Darstellung des neuen Weichenmodells für die Schweiz in Faktoren.



Aspekt	T4	T5	T6	T8	T10	T12	T16	T20	T25	T32	T40	T50	T63	T80	T100	T125	T160	T200	T250
Weichenmodell Schweiz: 8 m	1,16	1,51	1,44	1,90	1,78	2,06	3,00	3,78	3,92	3,66	2,98	2,24	1,68	2,27	2,13	2,00	1,58	1,26	1,14

Bild 6-3 Weichenmodell Schweiz *vgl. [23]*

Beschreibung:

Die Verstärkungsfunktionen des in Bild 6-3 *vgl. [23]* dargestellten Weicheneinflusspektrums gelten für Entfernungen von ca. 8 m. Die Funktionswerte steigen bis 12 Hz von 1,2 auf 2,1. Bei der Terzbandfrequenz von 25 Hz tritt die maximale Verstärkung mit einem Faktor von 3,9 auf. Bei höheren Frequenzen ab 50 Hz liegt die Verstärkung bei ca. 2. Weiters kann man aus Bild 6-2 *[23]* deutlich erkennen, dass die Ergebnisse der einzelnen Messungen stark variieren.

Einschätzung:

Meiner Meinung nach ist diese Verstärkungsfunktion hoch, was damit zu tun haben kann, dass diese Verstärkungen bei Entfernungen von ca. 8 m auftreten. Die Funktion liegt meist über dem in dieser Masterarbeit für Entfernungen von rund 16 m definierten Weicheneinflusspektrum (siehe Bild 7-1).

6.3 13. Symposium - Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr *vgl. [24]*

Bild 6-4 *vgl. [24]* zeigt die Modellierung der Verstärkung über den maßgebenden Frequenzbereich für eine Weiche auf Schotter. Dabei wurden die gemessenen

Erschütterungswerte nach dem Einbau der Weiche durch jene vor dem Weicheneinbau dividiert.

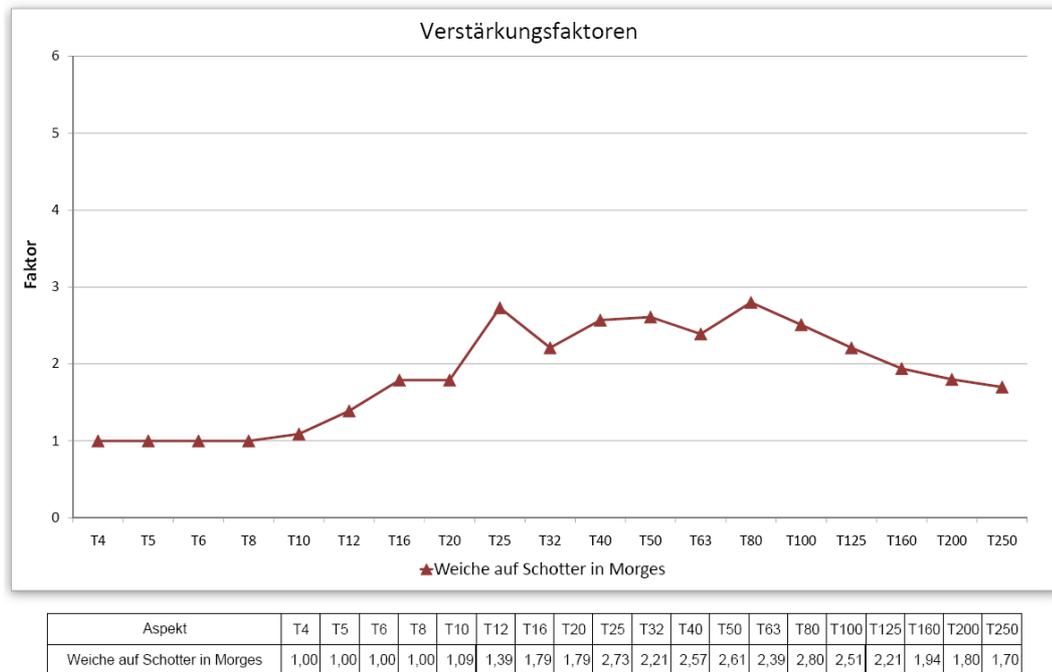


Bild 6-4 Weiche auf Schotter vgl. [24]

Beschreibung:

In Bild 6-4 vgl. [24] wird ein Weicheneinflussspektrum für eine Weiche auf Schotter in Morges dargestellt. Bis zu einer Terzbandfrequenz von 8 Hz gibt es lt. diesem Modell keine Verstärkung. Die Funktionswerte steigen anschließend bis 25 Hz auf 2,7 und bleiben im Frequenzbereich bis 125 Hz über dem Faktor 2.

Einschätzung:

Diese Verstärkungsfunktion liegt im maßgebenden Frequenzbereich unter dem in dieser Masterarbeit für Entfernungen von rund 16 m definierten Weicheneinflussspektrum (siehe Bild 7-1). Die niedrigen Faktoren könnten aus meiner Sicht damit zusammenhängen, dass eine kurze Zeitspanne zwischen Weicheneinbau und Messung vorliegt und die Weiche deshalb einen sehr guten Zustand aufweist.

Weiters könnte der Gleiszustand vor dem Einbau der Weiche nicht optimal gewesen sein. Bei Erneuerung des Oberbaus kommt es generell zu Verbesserungen im niederfrequenten Bereich. Die niedrigen Faktoren würden somit bedeuten, dass sich erschütterungstechnisch im niederfrequenten Bereich die verbesserten Oberbaueigenschaften mit der Weiche ähnlich dem alten Oberbau verhalten würden.

6.4 13. Symposium - Erschütterungs- und Körperschallprognose vgl. [24]

Bild 6-5 [24] zeigt die Verstärkung in Faktoren von mehreren gemessenen Weichen und einer Stoßlücke.

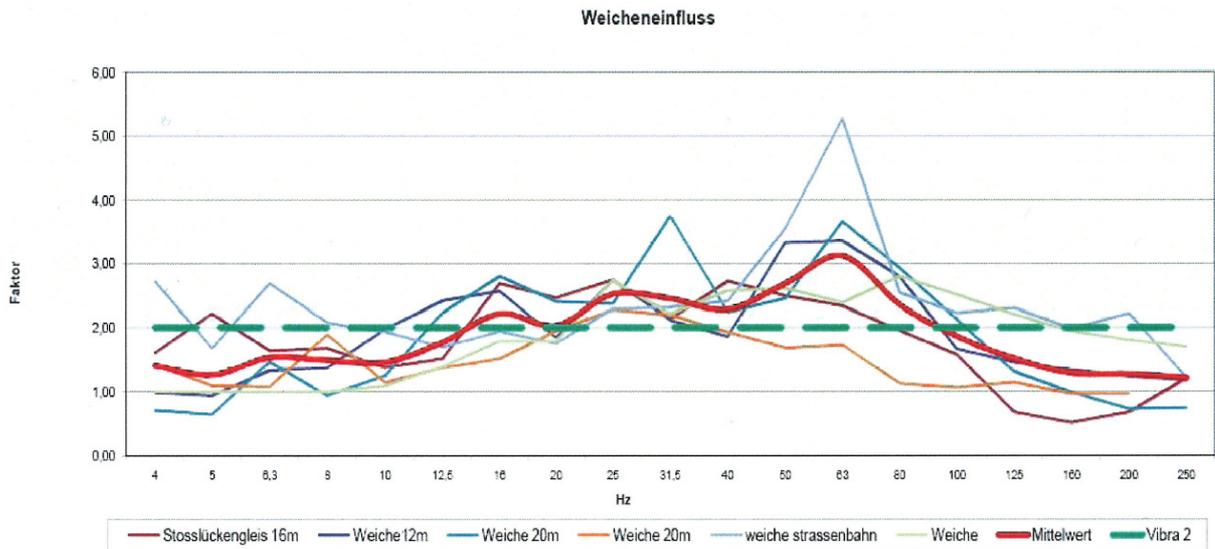
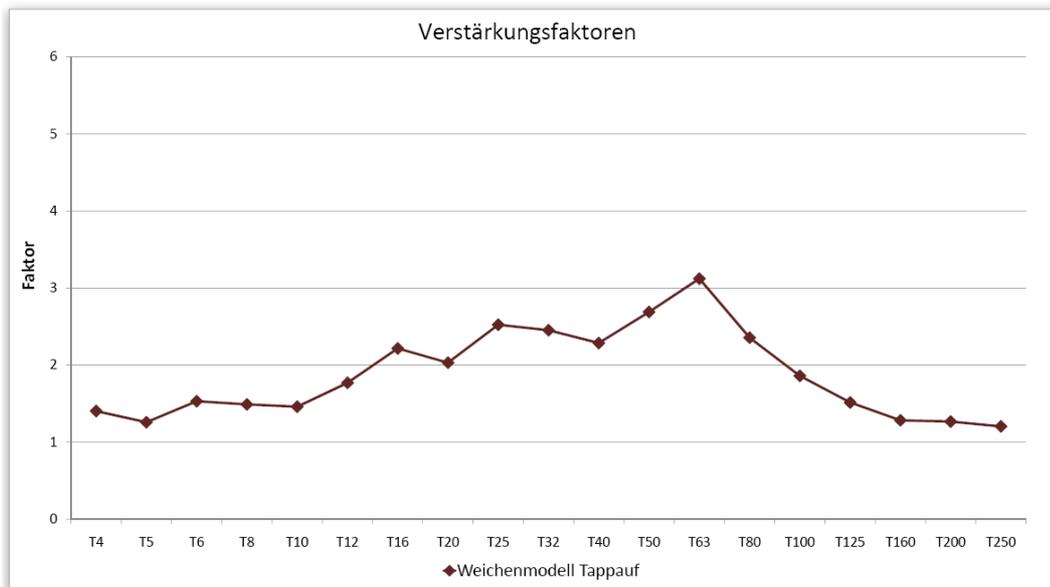


Bild 6-5 Einfluss von Weichen und einer Stoßlücke [24]

Bild 6-6 vgl. [24] zeigt den Mittelwert der Verstärkung von mehreren Weichen und einer Stoßlücke über den maßgebenden Frequenzbereich in Faktoren.



Aspekt	T4	T5	T6	T8	T10	T12	T16	T20	T25	T32	T40	T50	T63	T80	T100	T125	T160	T200	T250
Weichenmodell Tappauf	1,4	1,3	1,5	1,5	1,5	1,8	2,2	2,0	2,5	2,5	2,3	2,7	3,1	2,4	1,9	1,5	1,3	1,3	1,2

Bild 6-6 Mittelwert des Einflusses von Weichen und einer Stoßlücke vgl. [24]

Beschreibung:

In Bild 6-6 *vgl. [24]* wird ein Einflusspektrum für Weichen und Stoßlücken auf Basis zahlreicher Messungen vorgestellt. Bis zu einer Terzbandfrequenz von 12 Hz bleibt entsprechend diesem Modell die Verstärkung unter dem Faktor 2. Die Funktionswerte liegen zwischen 16 Hz und 80 Hz über dem Faktor 2, wobei das Maximum bei 63 Hz liegt. Oberhalb der Terzbandfrequenz von 100 Hz sinkt der Faktor rasch unter 1,5.

Einschätzung:

Diese Verstärkungsfunktion liegt in einem großen Frequenzbereich unter dem in dieser Masterarbeit für Entfernungen von rund 16 m definierten Weicheneinflusspektrum. Im Terzbandfrequenzbereich von 63 Hz liegt diese Funktion deutlich über der Funktion im definierten Spektrum (siehe Bild 7-1). Diese hohen Faktoren sind meiner Meinung nach auf eine Messung im Bereich einer Weiche mit fester Fahrbahn zurückzuführen.

Feste Fahrbahnen sind bei tieffrequenten Erschütterungen wegen der geringeren Gleisfehler und der günstigeren Achslastverteilung schwingungsärmer als der Schotteroberbau. Bei hohen Frequenzen sind jedoch die Erschütterungen der festen Fahrbahn stärker. *vgl. [22]*

6.5 VDI Berichte 1941 - bewegliches Herzstück *vgl. [23]*

Bild 6-7 [23] zeigt eine Abschätzung der Dämmwirkung von beweglichen zu unbeweglichen Herzstücken.

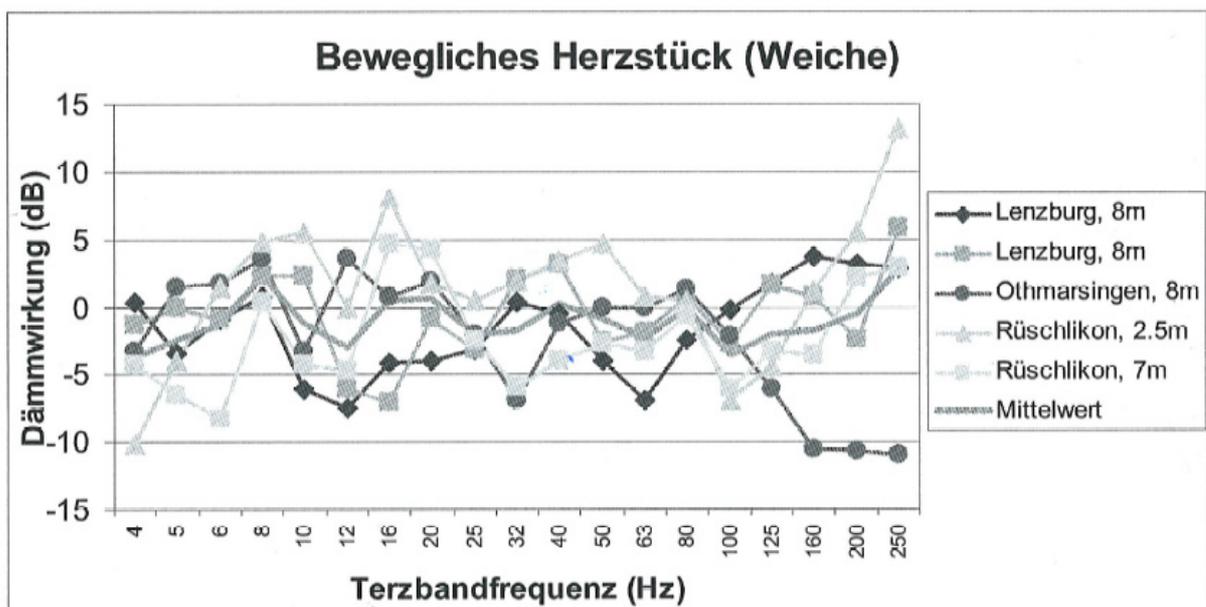
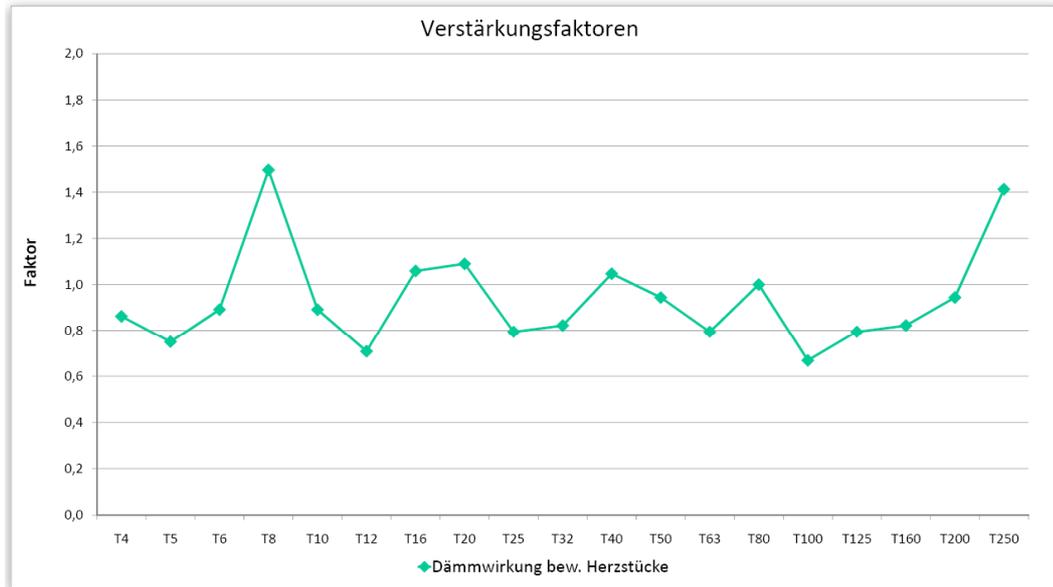


Bild 6-7 Dämmwirkung von beweglichen zu unbeweglichen Herzstücken [23]

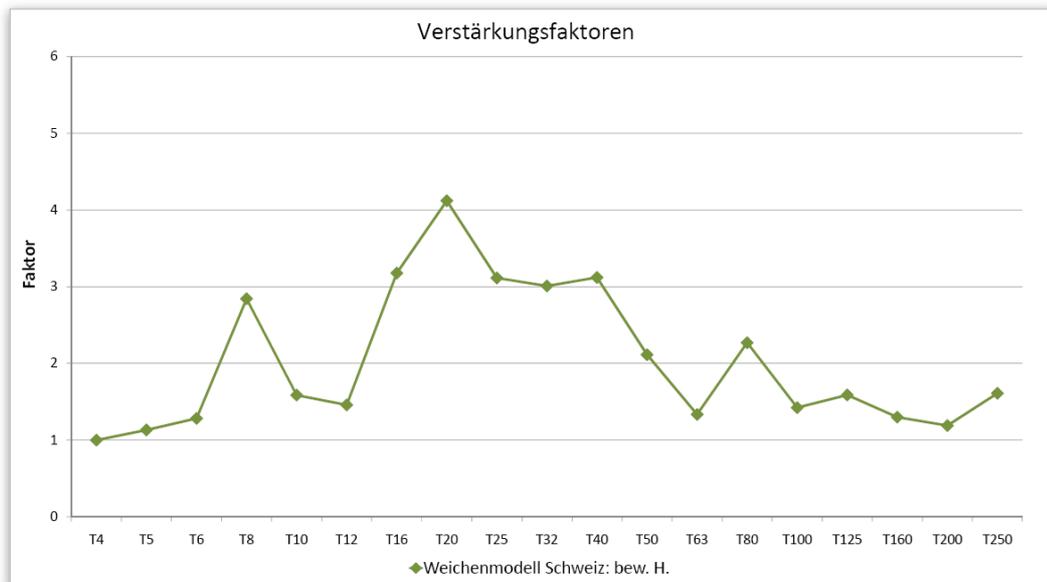
Bild 6-8 vgl. [23] zeigt diese Dämmwirkung in Faktoren. Die Umrechnung von Dezibel in Faktoren erfolgte nach der Formel 6-1.



Aspekt	T4	T5	T6	T8	T10	T12	T16	T20	T25	T32	T40	T50	T63	T80	T100	T125	T160	T200	T250
Dämmwirkung bew. Herzstücke	0,86	0,75	0,89	1,50	0,89	0,71	1,06	1,09	0,79	0,82	1,05	0,94	0,79	1,00	0,67	0,79	0,82	0,94	1,41

Bild 6-8 Dämmwirkung in Faktoren vgl. [23]

Bild 6-9 vgl. [23] zeigt die Verstärkung beweglicher Herzstücke über den maßgebenden Frequenzbereich in Faktoren. Die errechnete Dämmwirkung von Bild 6-8 vgl. [23] wurde dabei mit jenen Faktoren vom Weichenmodell Schweiz von Bild 6-3 vgl. [23] multipliziert.



Aspekt	T4	T5	T6	T8	T10	T12	T16	T20	T25	T32	T40	T50	T63	T80	T100	T125	T160	T200	T250
Weichenmodell Schweiz: bew. H.	1,00	1,13	1,28	2,84	1,59	1,46	3,18	4,12	3,11	3,01	3,12	2,11	1,33	2,27	1,42	1,59	1,30	1,19	1,61

Bild 6-9 Weichenmodell Schweiz - bewegliche Herzstücke vgl. [23]

Beschreibung:

Die in Bild 6-9 *vgl. [23]* dargestellte Verstärkungsfunktion gilt für Entfernungen von rund 8 m. Im Terzbandfrequenzbereich von 8 Hz, 16 Hz, 20 Hz, 40 Hz und 250 Hz tritt eine leichte Erhöhung der Erschütterungen im Vergleich zu starren Herzstücken auf. Eine deutliche Reduktion der Verstärkung kann im Terzbandfrequenzbereich von 12 Hz und 100 Hz festgestellt werden. Weiters kann man aus Bild 6-7 *[23]* deutlich erkennen, dass die Ergebnisse der einzelnen Messungen stark variieren.

Einschätzung:

Die Verstärkungsfunktion ist meiner Einschätzung nach hoch. Die Reduktion der Schwingungen ist in diesem Modell zufolge beweglicher Herzstücke zwischen 25 Hz und 80 Hz eher gering, wobei es in mehreren Terzbandfrequenzbereichen sogar zu einer Erhöhung kommt. Die Funktion liegt meist über dem in dieser Masterarbeit für Entfernungen von rund 16 m definierten Weicheneinflussspektrum für bewegliche Herzstücke (siehe Bild 8-1).

Der Einsatz von beweglichen Herzstücken ist entsprechend diesem Modell zur Erschütterungsreduktion bei Eisenbahnstrecken nicht geeignet. *vgl. [23]*

7 Das neue Weichenmodell für die VIBRA 2 Berechnung

In den folgenden Terzbandspektren werden der Mittelwert, der auch als arithmetisches Mittel bezeichnet wird, und der Zentralwert, auch Median genannt, dargestellt. Der Mittelwert ist definiert als Summe aller Werte durch die Anzahl der Werte. Beim Zentralwert hingegen liegt immer eine Hälfte der Zahlen über und eine Hälfte der Zahlen unter dem Median. Anhand eines kleinen Beispiels wird der Unterschied kurz erläutert.

Bei den Zahlen 1, 2, 3, 8, 11 liegt der Mittelwert dieser Zahlen bei 5. Der gegenüber Ausreißern robuste Zentralwert liegt bei 3.

7.1 Terzbandspektrum für Entfernungen von ca. 16 m

Für das neue Weichenmodell mit Entfernungen von rund 16 m normal zu den Gleisen wurden sämtliche in diesem Bereich liegende Auswertungen aus den Messreihen 1 bis 4, den Bestandsmessungen sowie sämtliche Daten aus der Literatur zusammengefasst. Für die Berechnung des Mittelwertes und Zentralwertes wurden alle Verstärkungsfunktionen, exklusive der aus der Messreihe 3 - Ebenfurth und der vom Semmering mit einer Stoßlücke in 5 m Entfernung, verwendet. Die idealisierte Linie wurde unter Berücksichtigung des Zentralwertes und des Mittelwertes, sowie der schlechten Gleislagequalität bei Messreihe 1 und Messreihe 4 bestimmt.

Bild 7-1 zeigt sämtliche Verstärkungsfunktionen mit Entfernungen von ca. 16 m, sowie Zentralwert, Mittelwert und idealisierte Linie. Man kann deutlich erkennen, dass die Verstärkungsfunktionen aus der Messreihe 1 - Kalsdorf und der Messreihe 4 – Leoben, vor allem aber im Terzbandfrequenzbereich von 32 Hz, über den sonstigen Funktionen liegen, was auf die schlechte Gleislagequalität zurückzuführen ist.

Die Messungen der ausgewählten Weichen wurden an Bestandsstrecken durchgeführt. Die Verstärkung der Erschütterungsemission wird bei Neubaustrecken direkt nach dem Weicheneinbau sowie direkt nach Instandhaltungsmaßnahmen, wie z.B. eines Weichenaustausches, geringer ausfallen. Solche Untersuchungen sind zukünftig durchzuführen.

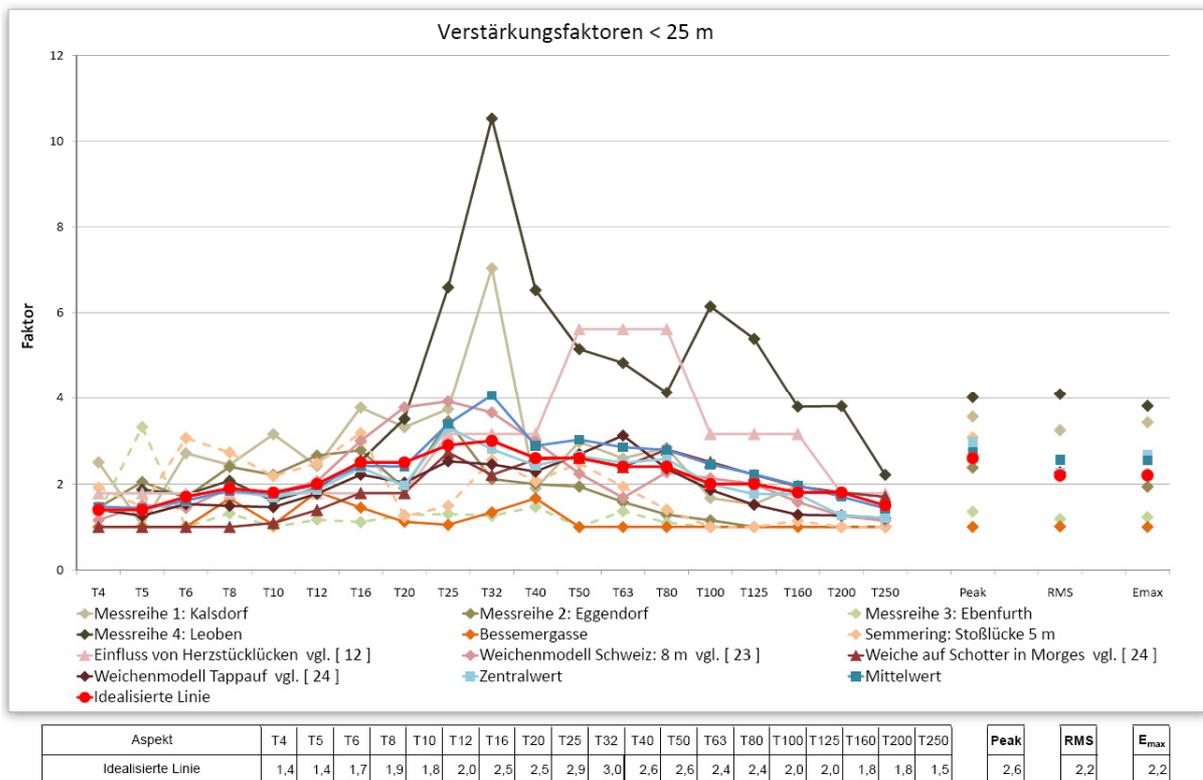


Bild 7-1 Verstärkungsfaktoren < 25 m - Zusammenfassung

Bild 7-2 zeigt eine Gegenüberstellung der idealisierten Linie aus Bild 7-1 mit den Daten aus der Literatur. Die Funktionen aus der Literatur stimmen mit der idealisierten Linie gut überein.

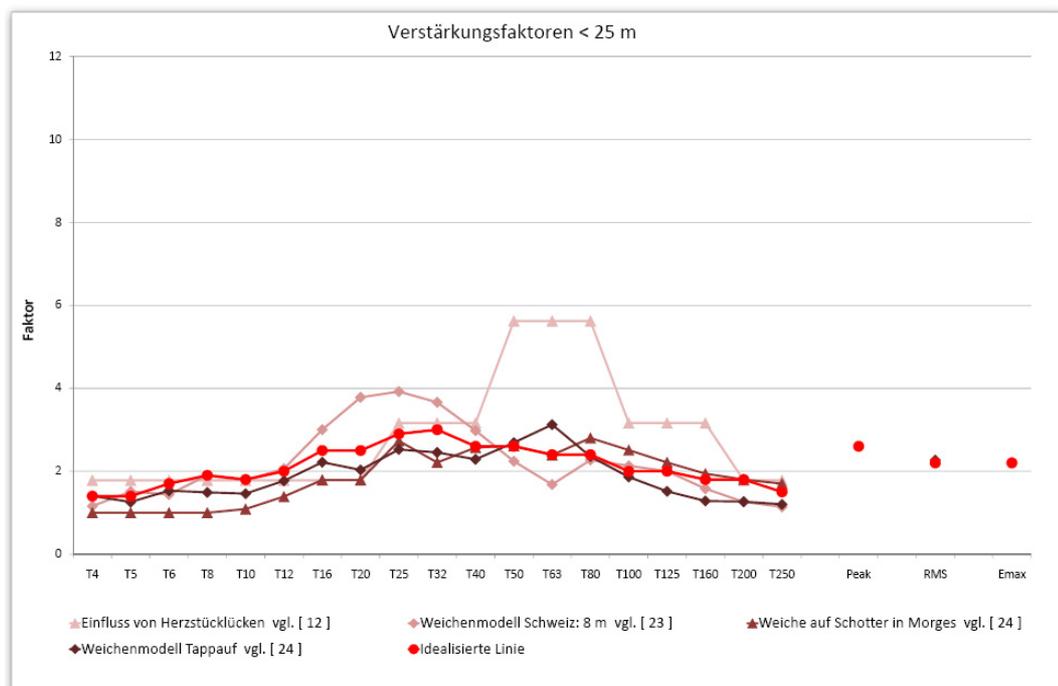


Bild 7-2 Verstärkungsfaktoren < 25 m - Zusammenfassung Literatur

7.2 Terzbandspektrum für Entfernungen von ca. 32 m

Für das neue Weichenmodell mit Entfernungen von rund 32 m normal zu den Gleisen wurden sämtliche in diesem Bereich liegende Auswertungen aus den Messreihen 1 bis 4 und den Bestandsmessungen zusammengefasst. Die Werte aus Messreihe 3 - Ebenfurth wurden bei der Berechnung der Mittelwerte nicht verwendet. Die idealisierte Linie wurde unter Berücksichtigung des Zentralwertes und des Mittelwertes sowie der schlechten Gleislagequalität bei Messreihe 1 und Messreihe 4 bestimmt.

Bild 7-3 zeigt sämtliche Verstärkungsfunktionen mit Entfernungen von ca. 32 m sowie Zentralwert, Mittelwert und idealisierte Linie. Man kann erkennen, dass die Verstärkungsfunktionen aus der Messreihe 1 - Kalsdorf und der Messreihe 4 - Leoben meist über den sonstigen Funktionen liegen, was auf die schlechte Gleislagequalität zurückzuführen ist.

Es wird darauf hingewiesen, dass Messungen an Neubaustrecken direkt nach dem Weicheneinbau oder direkt nach Instandhaltungsmaßnahmen, wie z.B. eines Weichenaustausches, zukünftig durchzuführen sind.

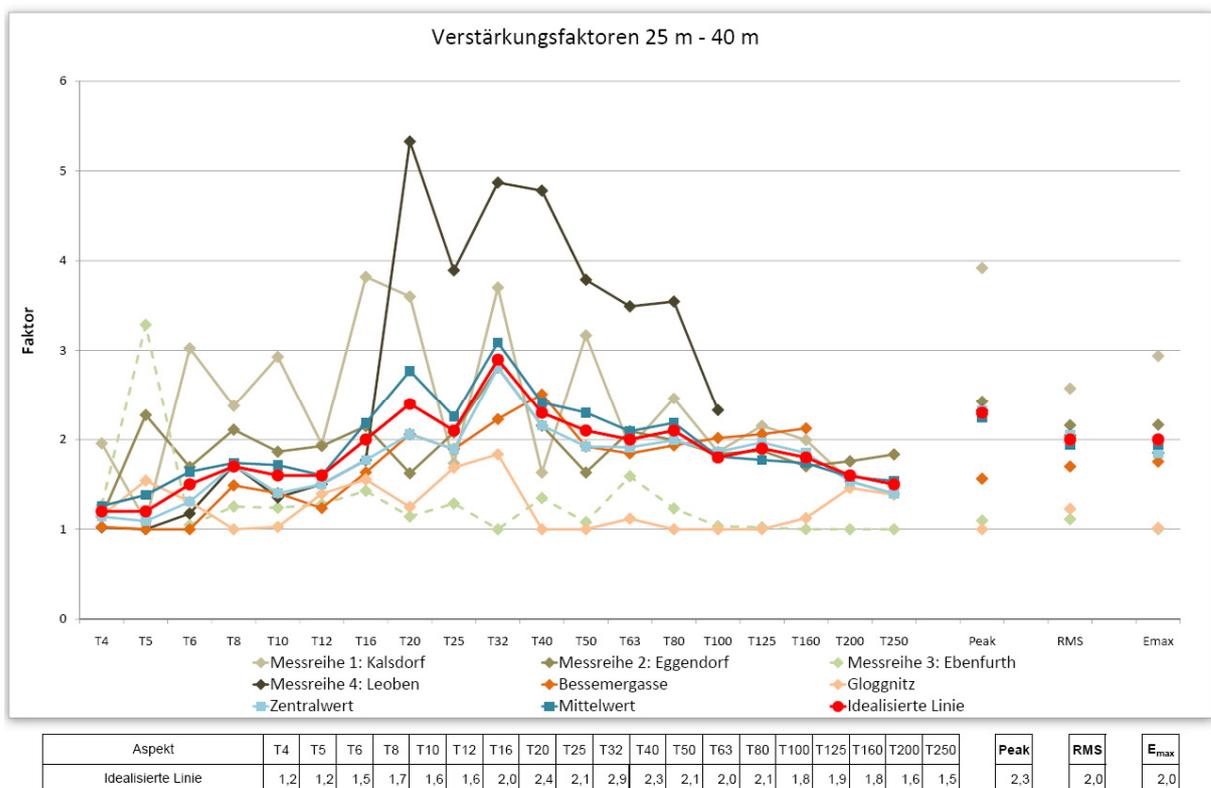


Bild 7-3 Verstärkungsfaktoren 25 m bis 40 m - Zusammenfassung

7.3 Terzbandspektrum für Entfernungen > 40 m

Für das neue Weichenmodell mit Entfernungen > 40 m normal zu den Gleisen wurden sämtliche in diesem Bereich liegende Auswertungen aus den Messreihen 1, 2 und 4 zusammengefasst. Für die Berechnung des Mittelwertes und Zentralwertes wurden alle Verstärkungsfunktionen verwendet. Die idealisierte Linie wurde unter Berücksichtigung des Zentralwertes und des Mittelwertes sowie der schlechten Gleislagequalität bei Messreihe 1 und Messreihe 4 bestimmt.

Bild 7-4 zeigt sämtliche Verstärkungsfunktionen mit Entfernungen > 40 m, sowie Zentralwert, Mittelwert und idealisierte Linie. Man kann erkennen, dass die Verstärkungsfunktionen aus der Messreihe 1 - Kalsdorf und der Messreihe 4 - Leoben teilweise über den sonstigen Funktionen liegen, was auf die schlechte Gleislagequalität zurückzuführen ist.

Es wird darauf hingewiesen, dass Messungen an Neubaustrecken direkt nach dem Weicheneinbau oder direkt nach Instandhaltungsmaßnahmen, wie z.B. eines Weichenaustausches, zukünftig durchzuführen sind.

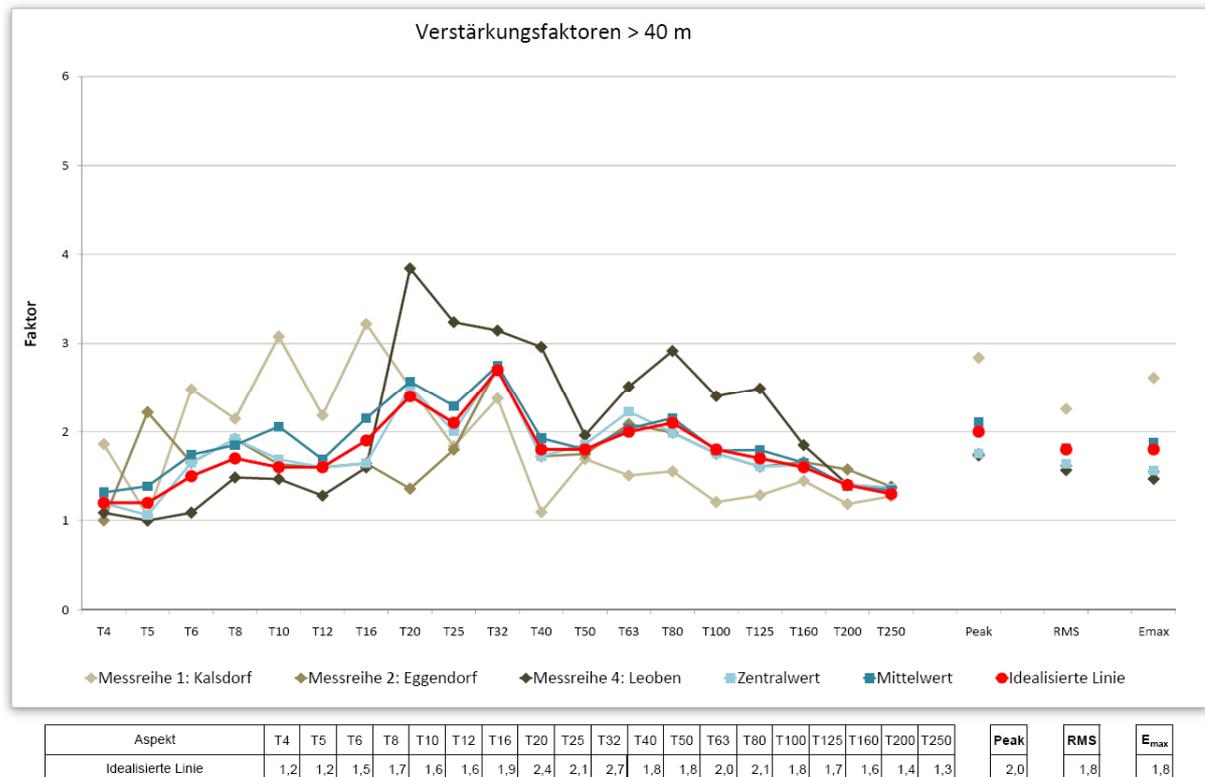


Bild 7-4 Verstärkungsfaktoren > 40 m - Zusammenfassung

7.4 Parallelmessungen und 45° Messungen

Für die Parallelmessungen werden die Verstärkungen der RMS Werte für alle Messpunkte zwischen 48 m vor und 64 m nach der Weichenüberfahrt, jeweils in ca. 16 m Entfernung zum Gleis mit Weiche, dargestellt. Die Werte aus Messreihe 3 - Ebenfurth wurden bei der Berechnung des Mittelwertes nicht verwendet. Die idealisierten Punkte wurden unter Berücksichtigung des Mittelwertes sowie der schlechten Gleislagequalität bei Messreihe 1 und Messreihe 4 bestimmt.

Bild 7-5 zeigt die Verstärkungsfaktoren aus der Parallelmessung. Bei den entferntesten Messpunkten erkennt man, dass keine Verstärkung auftritt. Der idealisierte Wert bei Punkt A aus der Parallelmessung ist ident mit jenem aus der Quermessung und beträgt 2,2. Die Abnahme der Verstärkung vor und nach der Weichenüberfahrt ist ähnlich.

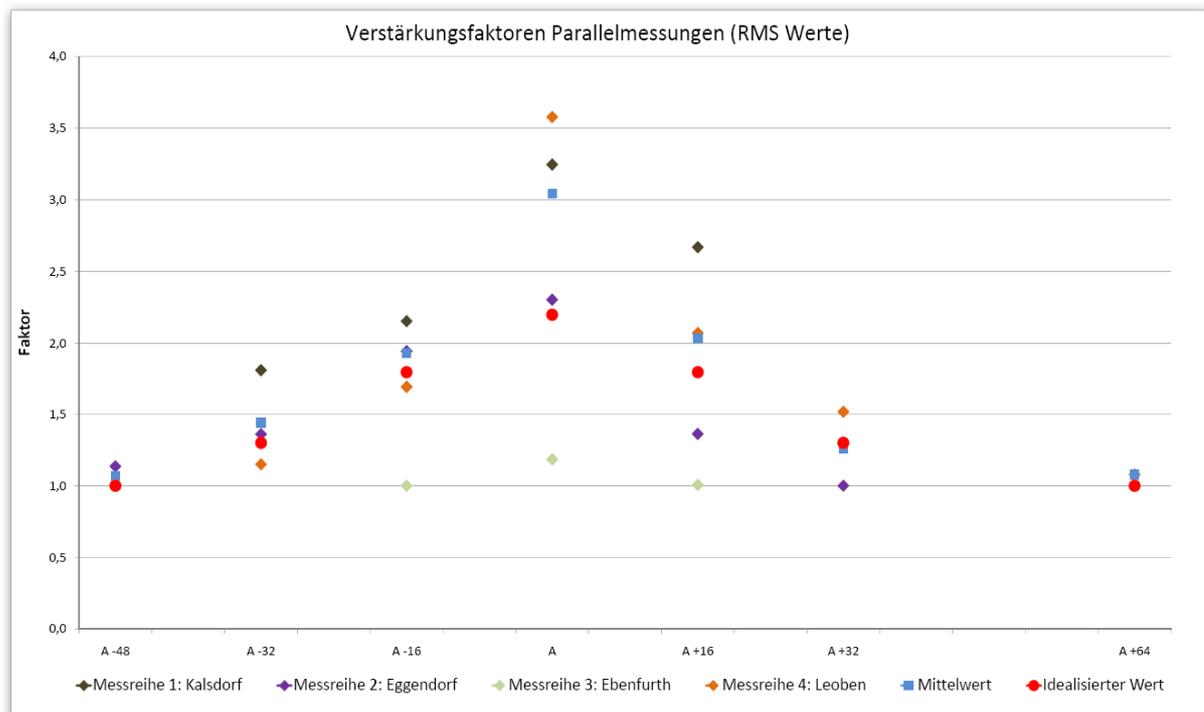


Bild 7-5 RMS Werte - Parallelmessung

Auch für die 45° Messungen werden die Verstärkungen der RMS Werte dargestellt. Bild 7-6 zeigt diese Faktoren. Die idealisierten Punkte wurden unter Berücksichtigung des Mittelwertes und der schlechten Gleislagequalität bei Messreihe 4 bestimmt.

Der idealisierte Wert bei Punkt A +16 aus der 45° Messung ist ident mit jenem aus der Parallelmessung und beträgt 1,8. Bei einer Entfernung von rund 45 m zum Herzstück beträgt der Faktor 1,4. Im Vergleich dazu beträgt die Verstärkung des RMS Wertes bei den Quermessungen für Entfernungen von rund 32 m 2,0. Bei der Parallelmessung hat der idealisierte Wert bei Punkt A +32 einen Faktor von 1,3.

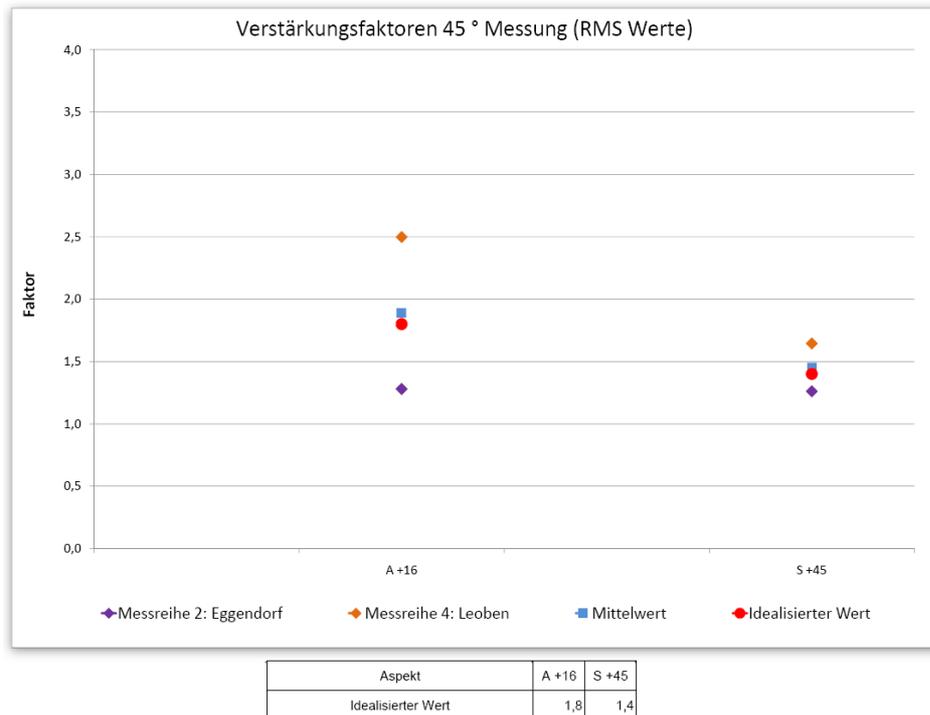


Bild 7-6 RMS Werte - 45° Messung

Die Messungen der ausgewählten Weichen wurden an Bestandsstrecken durchgeführt. Die Verstärkung der Erschütterungsemission wird bei Neubaustrecken direkt nach dem Weicheneinbau sowie direkt nach Instandhaltungsmaßnahmen, wie z.B. eines Weichenaustausches, geringer ausfallen. Solche Untersuchungen sind zukünftig durchzuführen.

7.5 Einfluss der Fahrtrichtung beim Befahren von Weichen

Bei Messreihe 3 - Ebenfurth fahren sämtliche Regionalzüge mit wechselnder Fahrtrichtung über eine Weiche mit starrem Herzstück. Aus dieser Messreihe wird es somit möglich, mit den auf dem Abzweiggleis fahrenden Zügen einen Vergleich der Erschütterungen in Abhängigkeit von der Fahrtrichtung aufzuzeigen.

Bild 7-7 zeigt das Terzbandspektrum mit den Funktionen der Regionalzüge Richtung Weichenanfang bzw. Richtung Weichenende.

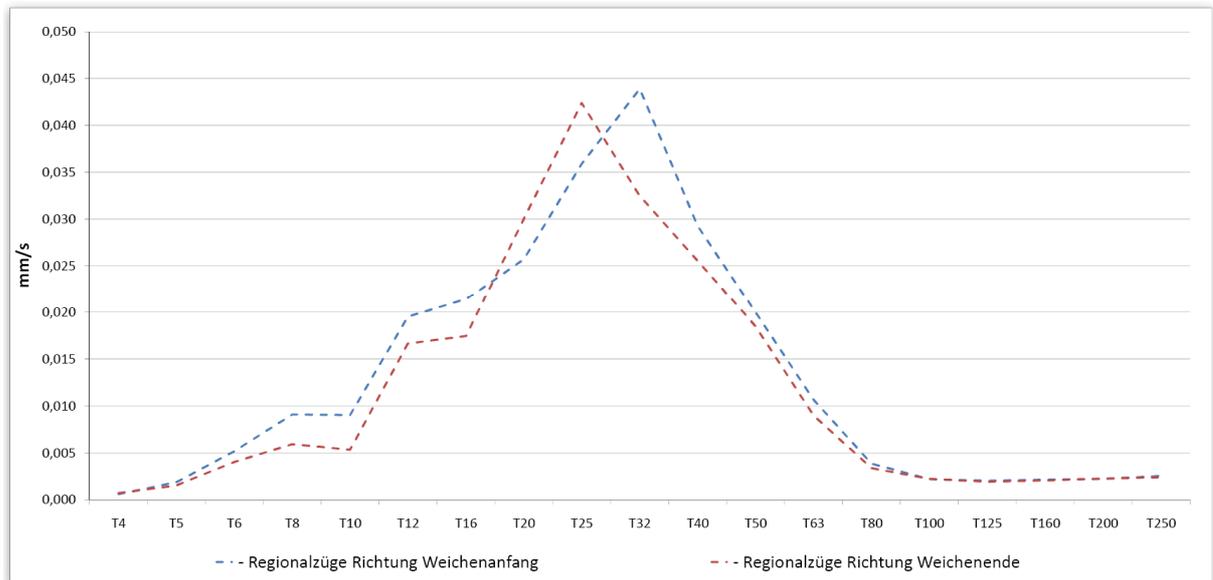


Bild 7-7 Fahrtrichtungsabhängige Verstärkung

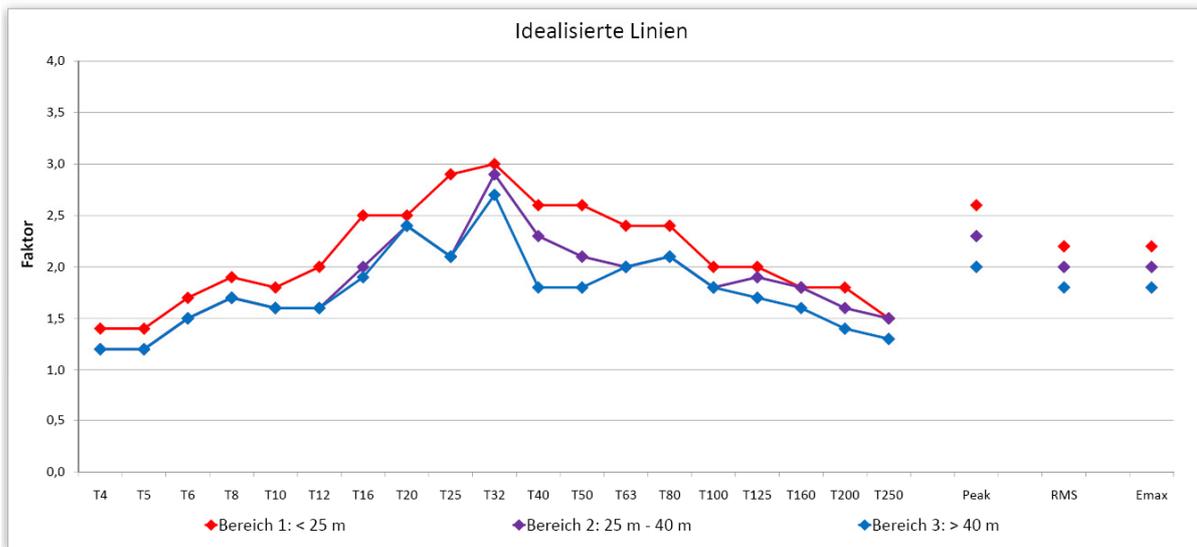
Die Regionalzüge, die bei Messreihe 3 - Ebenfurth über eine Weiche mit starrem Herzstück fahren, verursachen unabhängig von ihrer Fahrtrichtung ähnliche Erschütterungen.

7.6 Zusammenfassung

Für Distanzen > 50 m wird im Vibra Standard Parametersatz der Einfluss von Weichen als nicht relevant angesehen. Bis zu einer Entfernung von 15 m werden Weichen mit einem frequenzunabhängigen Faktor von 2, also einer Verdoppelung der Erschütterungen, berücksichtigt. Für Entfernungen zwischen 15 m und 50 m wird linear interpoliert. vgl. [28]

Bild 7-8 zeigt eine Darstellung sämtlicher idealisierter Linien aus Kapitel 7. Die gewonnenen Ergebnisse dieser Masterarbeit entsprechen somit nicht den bekannten Erfahrungen des rasch abnehmenden Einflusses der im Bereich von Weichen zusätzlich auftretenden Erschütterungsemission. Entsprechend den Auswertungen dieser Arbeit ist es erforderlich, die Schwingungen für sämtliche Gebäude mit Abständen > 40 m quer zur Weiche mit der idealisierten Linie für den Bereich > 40 m zu multiplizieren.

Das Abklingen der Verstärkung ist, wie in Bild 7-8 dargestellt, im weichennahen Bereich deutlich größer als im weichenfernen Bereich. Weiters ist eine zu erwartende Abnahme der Verstärkungsfunktionen im hohen Frequenzbereich gegenüber den tiefen Frequenzen mit Zunahme der Distanz nur teilweise erkennbar.



Aspekt	T4	T5	T6	T8	T10	T12	T16	T20	T25	T32	T40	T50	T63	T80	T100	T125	T160	T200	T250	Peak	RMS	E _{max}
Bereich 1: < 25 m	1,4	1,4	1,7	1,9	1,8	2,0	2,5	2,5	2,9	3,0	2,6	2,6	2,4	2,4	2,0	2,0	1,8	1,8	1,5	2,6	2,2	2,2
Bereich 2: 25 m - 40 m	1,2	1,2	1,5	1,7	1,6	1,6	2,0	2,4	2,1	2,9	2,3	2,1	2,0	2,1	1,8	1,9	1,8	1,6	1,5	2,3	2,0	2,0
Bereich 3: > 40 m	1,2	1,2	1,5	1,7	1,6	1,6	1,9	2,4	2,1	2,7	1,8	1,8	2,0	2,1	1,8	1,7	1,6	1,4	1,3	2,0	1,8	1,8
Bereich 2 / Bereich 1	86%	86%	88%	89%	89%	80%	80%	96%	72%	97%	88%	81%	83%	88%	90%	95%	100%	89%	100%	88%	91%	91%
Bereich 3 / Bereich 2	100%	100%	100%	100%	100%	100%	95%	100%	100%	93%	78%	86%	100%	100%	100%	89%	89%	88%	87%	87%	90%	90%

Bild 7-8 Zusammenfassung idealisierter Linien

Das Modell für rund 16 m deckt sich zufolge zahlreicher Erschütterungsauswertungen im Bereich von Weichen mit guter und schlechter Gleislagequalität gut mit den Erfahrungswerten der Literatur und kann für die Vibra 2 Berechnung verwendet werden.

Die Modelle für Entfernungen > 25 m, wie sie in Bild 7-8 dargestellt werden, sowie die Daten aus den Parallelmessungen und 45° Messungen sind nicht repräsentativ für Weichen im Bereich guter Gleislagequalität bei Neubaustrecken oder nach Instandhaltungsmaßnahmen. Die Modelle bilden eine sehr gute Abschätzung für Bestandsstrecken mit schlechter Gleislagequalität.

Im Sommer 2011 wird von tappauf.consultants eine weitere Weichenmessung im Bereich einer Neubaustrecke durchgeführt werden.

8 Ergebnisse aus Messungen mit beweglichen Herzstücken

Im Rahmen der Masterarbeit wurden Messungen mit Entfernungen von rund 16 m im Bereich beweglicher Herzstücke durchgeführt. Bild 8-1 zeigt die Verstärkungsfunktionen dieser Messungen, sowie Zentralwert, Mittelwert und idealisierte Linie. Weiters wird eine Funktion aus der Literatur für Entfernungen von ca. 8 m dargestellt, welche vor allem im niederfrequenten Bereich deutlich über den aus Messreihe 5 - Baden und Messreihe 6 - St. Valentin gemessenen Faktoren liegt.

Die Werte bei Messreihe 6 - St. Valentin betreffend Züge mit Geschwindigkeiten > 160 km/h wurden bei der Berechnung der Mittelwerte nicht verwendet. Die idealisierte Linie wurde unter Berücksichtigung des Zentralwertes und des Mittelwertes bestimmt.

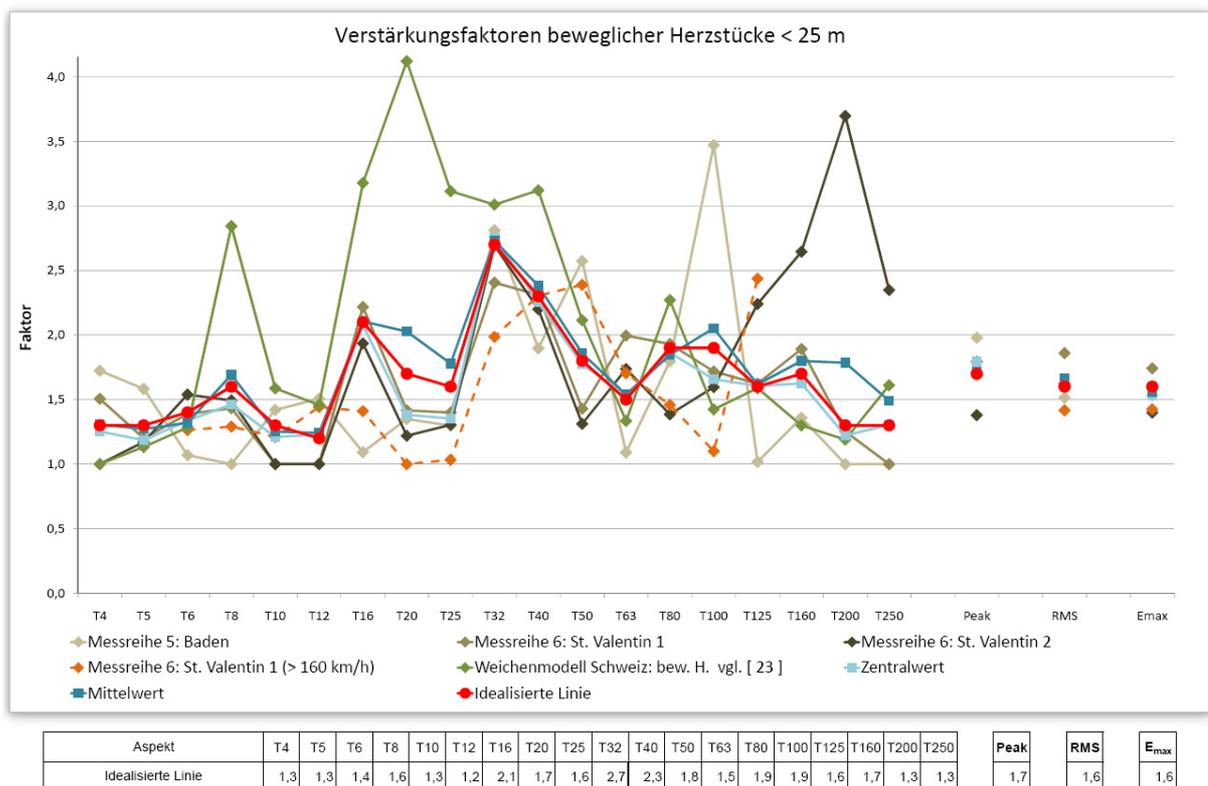
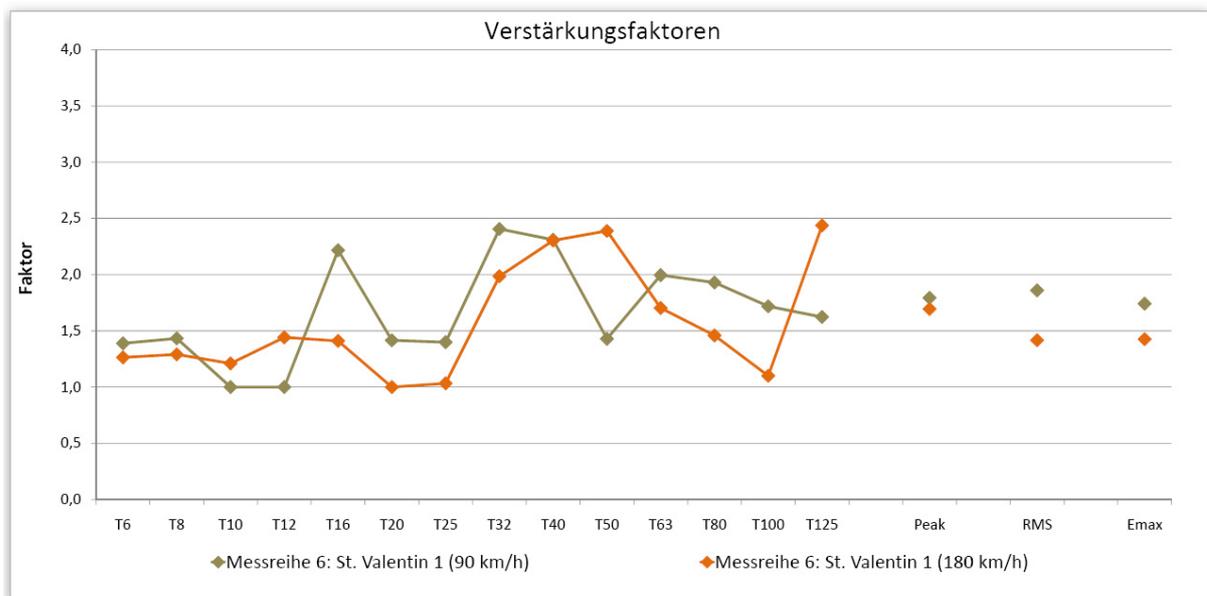


Bild 8-1 Verstärkungsfaktoren < 25 m - bewegliche Herzstücke - Zusammenfassung

Bei Messreihe 6 - St. Valentin 1 fuhren Fernreisezüge mit zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten über eine Weiche mit beweglichem Herzstück. Die schnellen fuhren mit Geschwindigkeiten von ca. 180 km/h und die langsameren waren mit ca. 90 km/h unterwegs.

Bild 8-2 zeigt einen Vergleich der Erschütterungsverstärkungen dieser Fernreisezüge. Der Weicheneinfluss ist bei schnellen Zügen erstaunlicherweise in mehreren Terzbandfrequenzen zwischen 6 Hz und 125 Hz niedriger als bei langsamen Zügen. Nur in den Terzbandfrequenzbereichen von 10 Hz, 12 Hz, 50 Hz und 125 Hz treten bei den schnellen Zügen höhere Verstärkungen auf.

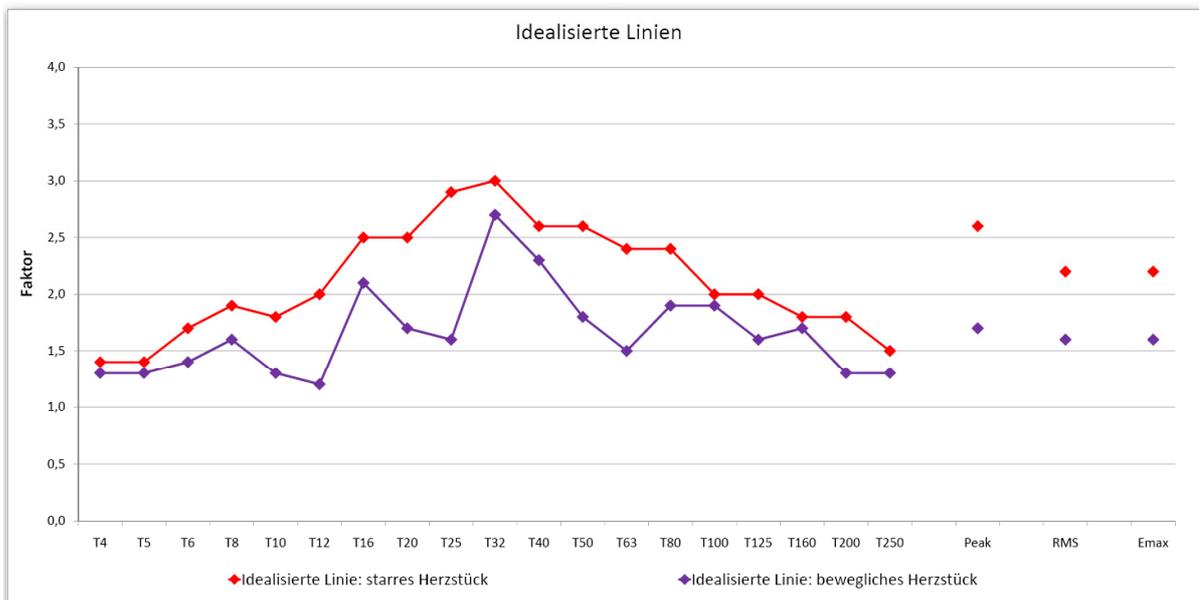


Aspekt	T6	T8	T10	T12	T16	T20	T25	T32	T40	T50	T63	T80	T100	T125	Peak	RMS	E _{max}
Messreihe 6: St. Valentin 1 (90 km/h)	1,39	1,43	1,00	1,00	2,22	1,42	1,40	2,41	2,31	1,43	2,00	1,93	1,72	1,62	1,79	1,86	1,74
Messreihe 6: St. Valentin 1 (180 km/h)	1,26	1,29	1,21	1,44	1,41	1,00	1,03	1,99	2,30	2,39	1,70	1,46	1,10	2,44	1,69	1,42	1,43
180 km/h / 90 km/h	91%	90%	121%	144%	64%	71%	74%	83%	100%	167%	85%	76%	64%	150%	94%	76%	82%

Bild 8-2 Verstärkungsfaktoren < 25 m - bewegliches Herzstück - schnelle Züge im Vergleich zu langsamen Zügen

Bild 8-3 zeigt eine Gegenüberstellung der idealisierten Linie aus Bild 8-1 mit jener aus Bild 7-1 für starre Herzstücke, jeweils für Abstände von rund 16 m. Die Verstärkungsfunktion bei beweglichen Herzstücken liegt im gesamten maßgebenden Frequenzbereich unter jener mit starren Herzstücken, wobei die größten Verbesserungen in den Terzbandfrequenzbereichen von 12 Hz, 25 Hz und 63 Hz auftreten.

Bewegliche Herzstücke sind nach den Auswertungen dieser Masterarbeit zur Erschütterungsreduktion, wie in Bild 8-3 dargestellt, geeignet. Sie verstärken die Erschütterungsemissionen weniger als Weichen mit starren Herzstücken.



Aspekt	T4	T5	T6	T8	T10	T12	T16	T20	T25	T32	T40	T50	T63	T80	T100	T125	T160	T200	T250	Peak	RMS	E _{max}
Idealisierte Linie: starres Herzstück	1,4	1,4	1,7	1,9	1,8	2,0	2,5	2,5	2,9	3,0	2,6	2,6	2,4	2,4	2,0	2,0	1,8	1,8	1,5	2,6	2,2	2,2
Idealisierte Linie: bewegliches Herzstück	1,3	1,3	1,4	1,6	1,3	1,2	2,1	1,7	1,6	2,7	2,3	1,8	1,5	1,9	1,9	1,6	1,7	1,3	1,3	1,7	1,6	1,6
Starres Herzstück / bewegliches Herzstück	93%	93%	82%	84%	72%	60%	84%	68%	55%	90%	88%	69%	63%	79%	95%	80%	94%	72%	87%	65%	73%	73%

Bild 8-3 Idealisierte Linien - bewegliche Herzstücke im Vergleich zu starren Herzstücken

Tabelle 8-1 zeigt eine Zusammenfassung sämtlicher Peak, RMS und E_{max} Verstärkungen für starre und bewegliche Herzstücke aus den Auswertungen dieser Masterarbeit. Dabei werden alle Ergebnisse mit Abständen von ca. 16 m, ca. 32 m und > 40 m quer zur Gleisachse dargestellt.

Aspekt	Weichen mit starren Herzstücken für Entfernungen von ca. 16 m			Weichen mit beweglichen Herzstücken für Entfernungen von ca. 16 m			Weichen mit starren Herzstücken für Entfernungen von ca. 32 m			Weichen mit starren Herzstücken für Entfernungen > 40 m		
	Peak	RMS	E _{max}	Peak	RMS	E _{max}	Peak	RMS	E _{max}	Peak	RMS	E _{max}
Messreihe 1: Kalsdorf	3,56	3,25	3,43				3,92	2,58	2,94	2,84	2,26	2,61
Messreihe 2: Eggendorf	2,38	2,18	1,94				2,43	2,16	2,17	1,75	1,62	1,55
Messreihe 3: Ebenfurth	1,36	1,18	1,23				1,10	1,11	1,00			
Messreihe 4: Leoben	4,02	4,10	3,82				2,33	2,05	1,85	1,73	1,57	1,47
Messreihe 5: Baden				1,98	1,52	1,53						
Messreihe 6: St. Valentin 1				1,79	1,86	1,74						
Messreihe 6: St. Valentin 2				1,38	1,62	1,40						
Bessemergasse	1,00	1,01	1,00				1,56	1,70	1,75			
Gloggnitz							1,00	1,23	1,02			
Semmering: Stoßlücke 5 m	3,08	2,25	2,24									
Idealisierte Werte	2,6	2,2	2,2	1,7	1,6	1,6	2,3	2,0	2,0	2,0	1,8	1,8

Tabelle 8-1 Zusammenfassung der Peak, RMS und E_{max} Verstärkungen

9 Ergebnisse aus Messungen im Bereich besohlter Schwellen

In diesem Kapitel wird untersucht, ob und welche Erschütterungsverbesserung durch die im Bereich der Messreihe 5 - Baden vorhandenen Schwellenbesohlung auftritt.

9.1 Schwellenbesohlung auf gerader Strecke

Bild 9-1 zeigt die Verstärkungsfaktoren besohlter Schwellen. Für diese Darstellung wurden die Messergebnisse der Fernreisezüge, die mit durchschnittlich 120 km/h gefahren sind, verwendet. Zur Ermittlung der Faktoren wurde die Erschütterungsemission bei MP4 im Bereich besohlter Schwellen durch jene Erschütterungen bei MP1 im Bereich unbesohlter Schwellen dividiert.

In den Terzbandfrequenzbereichen von 25 Hz, 40 Hz und 50 Hz ist eine deutliche Verschlechterung zu erkennen. Im hohen und tiefen Frequenzbereich stellen sich Verbesserungen ein.

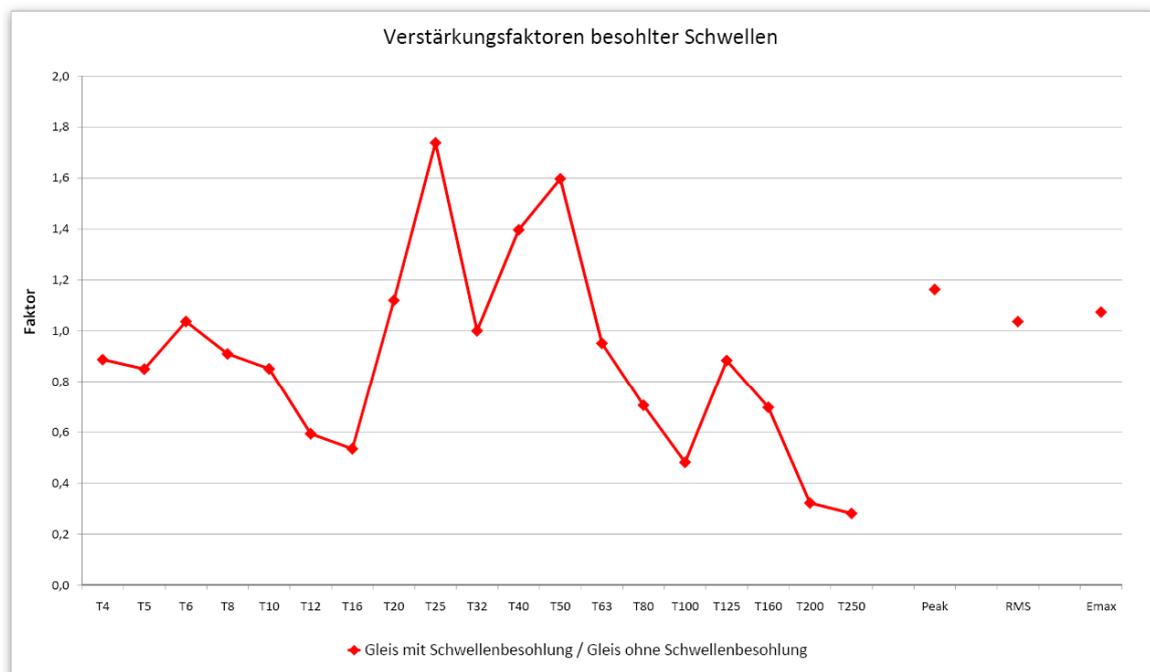
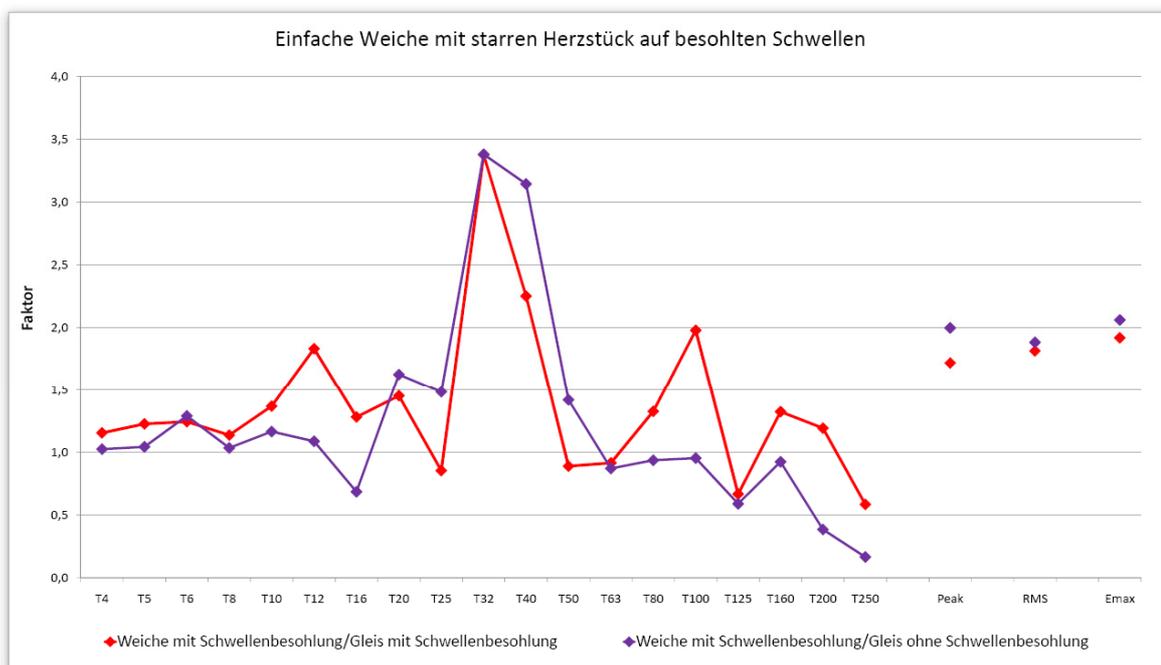


Bild 9-1 Verstärkungsfaktoren besohlter Schwellen

9.2 Weiche auf besohlenen Schwellen

Bild 9-2 zeigt einerseits die Verstärkung einer Weiche mit Schwellenbesohlung (MP3) zu einem Gleis mit Schwellenbesohlung (MP4), andererseits die Verstärkung dieser Weiche mit Schwellenbesohlung (MP3) zu einem Gleis ohne Besohlung (MP1). Für diese Darstellung wurden die Messergebnisse der Fernreisezüge, die mit durchschnittlich 120 km/h gefahren sind, verwendet.



Aspekt	T4	T5	T6	T8	T10	T12	T16	T20	T25	T32	T40	T50	T63	T80	T100	T125	T160	T200	T250	Peak	RMS	E _{max}
Weiche mit Schwellenbesohlung/Gleis mit Schwellenbesohlung	1,15	1,22	1,24	1,13	1,37	1,83	1,28	1,45	0,85	3,38	2,25	0,89	0,91	1,32	1,98	0,67	1,32	1,19	0,58	1,72	1,81	1,92
Weiche mit Schwellenbesohlung/Gleis ohne Schwellenbesohlung	1,02	1,04	1,29	1,03	1,16	1,09	0,68	1,62	1,48	3,38	3,14	1,42	0,87	0,93	0,95	0,59	0,92	0,38	0,16	2,00	1,88	2,06

Bild 9-2 Weiche mit starrem Herzstück auf besohlenen Schwellen

Schwellenbesohlungen sind nach den Auswertungen dieser Masterarbeit zur Erschütterungsreduktion, wie in Bild 9-1 und Bild 9-2 dargestellt, im Bereich der Terzbandfrequenzen von 4 Hz, 5 Hz, 8 Hz, 10 Hz, 12 Hz, 16 Hz und > 63 Hz geeignet.

10 Fazit

Das Modell für Bereich 1 aus Bild 10-1 deckt sich aufgrund zahlreicher Erschütterungsauswertungen von Weichen mit starren Herzstücken im Bereich guter und schlechter Gleislagequalität gut mit den Erfahrungswerten der Literatur und kann für die Vibra 2 Berechnung verwendet werden.

Die Modelle für Bereich 2 und Bereich 3 sowie die Daten aus den Parallelmessungen und 45° Messungen sind nicht repräsentativ für Weichen im Bereich guter Gleislagequalität bei Neubaustrecken oder nach Instandhaltungsmaßnahmen. Die Modelle bilden eine sehr gute Abschätzung für Bestandsstrecken mit schlechter Gleislagequalität.

Entsprechend diesen Auswertungen ist es erforderlich, die Schwingungen für sämtliche Gebäude mit Abständen > 40 m quer zur Weiche mit der idealisierten Linie für den Bereich 3 zu multiplizieren. Die gewonnenen Ergebnisse dieser Masterarbeit im Bereich von Weichen mit starren Herzstücken bei Bestandsstrecken entsprechen somit nicht den bekannten Erfahrungen des rasch abnehmenden Einflusses der zusätzlich auftretenden Erschütterungsemission.

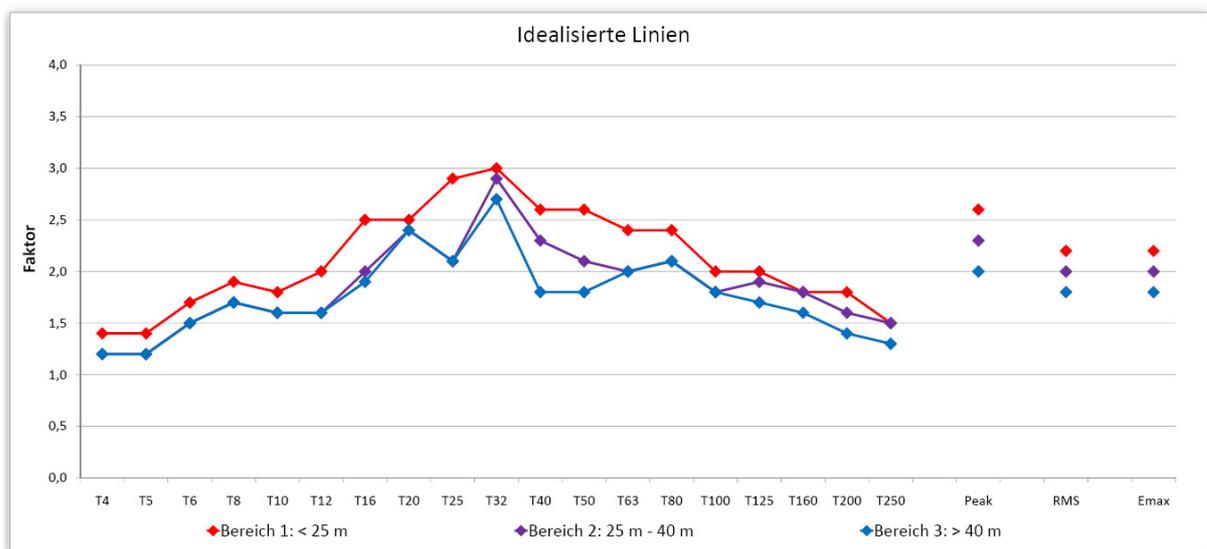


Bild 10-1 Zusammenfassung 1

Bild 10-2 zeigt eine Gegenüberstellung der idealisierten Linie für bewegliche Herzstücke mit jener aus Bild 10-1 für starre Herzstücke, jeweils für Abstände von rund 16 m. Die Verstärkungsfunktion bei beweglichen Herzstücken liegt im gesamten maßgebenden Frequenzbereich unter jener mit starren Herzstücken, wobei die größten Verbesserungen in den Terzbandfrequenzbereichen von 12 Hz, 25 Hz und 63 Hz auftreten.

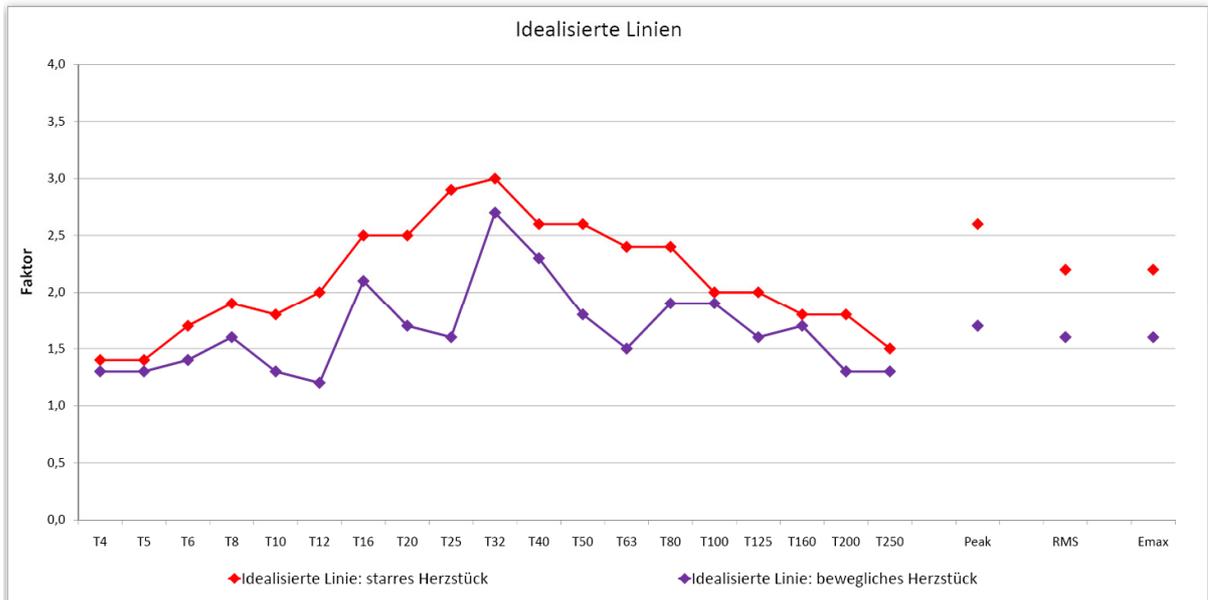


Bild 10-2 Zusammenfassung 2

Bewegliche Herzstücke sind nach den Auswertungen dieser Masterarbeit zur Erschütterungsreduktion, wie in Bild 10-2 dargestellt, geeignet. Sie verstärken die Erschütterungsemissionen weniger als Weichen mit starren Herzstücken.

Auch Schwellenbesohlungen sind nach den Auswertungen dieser Masterarbeit zur Erschütterungsreduktion, wie in Bild 9-1 und Bild 9-2 dargestellt, im Bereich der Terzbandfrequenzen von 4 Hz, 5 Hz, 8 Hz, 10 Hz, 12 Hz, 16 Hz und > 63 Hz geeignet.

Der ca. 1000 seitige Anhang wird wegen des Umfangs nicht beigelegt.

11 Verzeichnisse

11.1 Quellen- und Literaturverzeichnis

- [1] Flesch Rainer: „Baudynamik, praxisgerecht“
Band 1 - Berechnungsgrundlagen, Band 2 - Anwendungen und Beispiele
Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin 1993
- [2] Lichtberger Bernhard: „Handbuch Gleis“
Unterbau - Oberbau - Instandhaltung - Wirtschaftlichkeit
TZ - Verlag & Print GmbH, Rossdorf, Ausgabe 2010
- [3] ÖNORM S 9001: Mechanische Schwingungen - Erschütterungen
Allgemeine Grundsätze und Ermittlung von Schwingungsgrößen, Ausgabe 1978
- [4] ÖNORM S 9010: Bewertung der Einwirkungen mechanischer Schwingungen und
Erschütterungen auf den Menschen, Ausgabe 1982
- [5] ÖNORM S 9012: Beurteilung der Einwirkungen von Schienenverkehrsimmissionen auf
Menschen in Gebäuden
Schwingungen und sekundärer Luftschall, Ausgabe 1996
- [6] ÖNORM S 9012: Beurteilung der Einwirkungen von Schwingungsimmissionen des
landgebundenen Verkehrs auf den Menschen in Gebäuden
Schwingungen und sekundärer Luftschall, Ausgabe 2010
- [7] ÖNORM S 9020: Bauwerkserschütterungen, Sprengerschütterungen und
vergleichbare impulsförmige Immissionen, Ausgabe 1986
- [8] ÖNORM ISO 2631-1: Mechanische Schwingungen und Stöße - Bewertung der
Auswirkungen von Ganzkörperschwingungen auf den Menschen
Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Ausgabe 2007
- [9] ÖNORM ISO 2631-2: Mechanische Schwingungen und Stöße - Bewertung der
Auswirkungen von Ganzkörperschwingungen auf den Menschen
Teil 2: Schwingungen in Gebäuden (1Hz bis 80Hz), Ausgabe 2007
- [10] VDI - Richtlinie: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen
Ganzkörperschwingungen an Arbeitsplätzen in Gebäuden, Ausgabe 2006
- [11] Studer Jost A., Laue Jan, Koller Martin G.: „Bodendynamik“
Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze
Springer - Verlag Berlin Heidelberg, 3. Auflage, Ausgabe 2007

- [12] Krüger Friedrich: „Schall und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr“
Grundlagen der Schall- und Schwingungstechnik. Praxisorientierte Anwendung von
Schall- und Erschütterungsmaßnahmen.
Expert Verlag Renningen, 2. Auflage, Ausgabe 2006
- [13] Schiemann Wolfgang: „Schienenverkehrstechnik“
Grundlagen der Gleistrassierung
B. G. Teubner GmbH Verlag, 1. Auflage, Ausgabe 2002
- [14] Jochim Haldor und Lademann Frank: „Planung von Bahnanlagen“
Grundlagen - Planung - Berechnung
Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, Ausgabe 2009
- [15] Tappauf Benedikt: „Erschütterungen bei Eisenbahnstrecken“
Diplomarbeit am Institut für Betonbau
TU Graz, 2008
- [16] Tappauf Benedikt: „Durchschnittliche Dämpfungsexponenten“
Internes Dokument (Entwurf)
- [17] Hummitzsch Robert: „Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen“
Statistische Analyse des Gleisverhaltens zur Erstellung eines Prognosemodells
Dissertation, TU Graz, 2009
- [18] Holzfeind Jochen: „Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen“
Analyse des Gleisverhaltens am Einzelquerschnitt
Dissertation, TU Graz, 2009
- [19] Kramer Helmut: „Angewandte Baudynamik“
Grundlagen und Beispiele für Studium und Praxis
Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co.KG,
Ausgabe 2007
- [20] Geografisches Informationssystem-Steiermark
[http://gis1.stmk.gv.at/atlas/\(S\(npq5c3qvtg3eem45uzqoog55\)\)/init.aspx?karte=adr&ks=das&cms=da&massstab=800000](http://gis1.stmk.gv.at/atlas/(S(npq5c3qvtg3eem45uzqoog55))/init.aspx?karte=adr&ks=das&cms=da&massstab=800000)
Stand: Dezember 2010
- [21] Niederösterreich ATLAS
[http://www.intermap1.noel.gv.at/webgisatlas/\(S\(auhbf3553i3hhr55v2ufkc45\)\)/init.aspx?karte=atlas_bh](http://www.intermap1.noel.gv.at/webgisatlas/(S(auhbf3553i3hhr55v2ufkc45))/init.aspx?karte=atlas_bh)
Stand: Dezember 2010

- [22] Witt Karl Josef: „Grundbau Taschenbuch“, Teil 3
Gründungen und geotechnische Bauwerke
Ernst & Sohn Verlag, Ausgabe 2009
- [23] „VDI Berichte 1941“
Müller R.: Schwingungsreduktion bei Eisenbahnanlagen durch Unterschottermatte,
Schwellenbesohlung und bewegliches Weichenherzstück
VDI Verlag GmbH, Ausgabe 2006
- [24] 13. Symposium: „Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen“
Ziegler Consultants: „Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr“
tappauf.consultants: „Erschütterungs- und Körperschallprognose“
18. Juni 2010 an der EMPA-Dübendorf
- [25] Eisenbahngesetz 1957
Anrainerbestimmungen: § 42, Bauverbotsbereich
Stand: 11.05.2010
- [26] Steinhauser Wolfgang: „Erschütterungsschutz bei Eisenbahnlinien“
Diplomarbeit am Institut für Verkehrswesen
BOKU Wien
- [27] 12. Symposium: „Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen“
Ziegler Consultants: „Grundlagen der Baugrunddynamik“
5. Juni 2009 an der EMPA-Dübendorf
- [28] Computerprogramm Vibra
SBB / Ziegler Consultants: „Vibra Standard Parametersatz“
22.03.2009, Zürich
- [29] Getzner: „Elastische Lagerung von Gebäuden“
Werkstoffe für technische Innovationen
<http://www.getzner.com/downloads/broschueren/>
Stand: März 2011

11.2 Abbildungsverzeichnis

Bild 2-1	Ausbreitung von Erschütterungen <i>vgl. [24]</i>	2
Bild 2-2	Vibra 2 Modell <i>vgl. [15]</i>	3
Bild 2-3	Darstellung der verschiedenen Wellentypen <i>[11]</i>	5
Bild 2-4	Normierte Amplituden in Abhängigkeit der Tiefe für Rayleigh-Wellen <i>[11]</i>	5
Bild 2-5	Wellenausbreitung <i>[1]</i>	6
Bild 2-6	Ausbreitung von Linienquellen und Punktquellen	7
Bild 2-7	Abminderung von Oberflächen- und Raumwellen an der Oberfläche <i>[27]</i>	8
Bild 2-8	Resonanzkurven und Phasenverschiebung <i>[11]</i>	9
Bild 2-9	Grundeigenfrequenzen für Bodenschichten mit verschiedener Stärke <i>[2]</i>	10
Bild 2-10	Einfluss der Entfernung auf die Terzspektren <i>[1]</i>	10
Bild 2-11	Übertragungsfaktor vom Boden auf das Fundament <i>[22]</i>	11
Bild 2-12	Übertragungsfaktor vom Boden auf das Fundament - Einfamilienhäuser <i>[15]</i> .	11
Bild 2-13	Kraftübertragung V_T beim Einmassenschwinger <i>[12]</i>	12
Bild 2-14	Schotteroberbau im Tunnel mit Unterschottermatte (Prinzipskizze) <i>[22]</i>	13
Bild 2-15	Schotteroberbau in Trogbauweise im Tunnel als Masse-Feder-System mit Elastomer-Streifen (Prinzipskizze) <i>[22]</i>	13
Bild 2-16	Feste Fahrbahn in Trogbauweise im Tunnel mit Masse-Feder-System aus elastischen Streifenlagern (Prinzipskizze) <i>[22]</i>	14
Bild 2-17	Schotterloser Oberbau auf Stahlschraubenfedern als schweres Masse-Feder-System (Prinzipskizze) <i>[22]</i>	14
Bild 2-18	Feste Fahrbahn auf vollflächigen Elastomerlagern (Prinzipskizze) <i>[22]</i>	14
Bild 2-19	Vollflächige Lagerung <i>[29]</i>	15
Bild 3-1	Wahrnehmung von Erschütterungen und Körperschall <i>[11]</i>	16
Bild 3-2	Schematische Darstellung der Bewertungsfunktion W_m mit der Schwinggeschwindigkeit als Eingangsgröße <i>[9]</i>	17
Bild 3-3	Beurteilung der Gesamteinwirkung für guten Erschütterungsschutz für die Gebietskategorie 1	28
Bild 3-4	Beurteilung der Gesamteinwirkung für ausreichenden Erschütterungsschutz für die Gebietskategorie 1	28
Bild 3-5	Beurteilung der Gesamteinwirkung für guten Erschütterungsschutz für die Gebietskategorien 2 bis 3	29
Bild 3-6	Beurteilung der Gesamteinwirkung für ausreichenden Erschütterungsschutz für die Gebietskategorien 2 bis 3.....	29

Bild 3-7	Beurteilung der Gesamteinwirkung für guten Erschütterungsschutz für die Gebietskategorie 4.....	30
Bild 3-8	Beurteilung der Gesamteinwirkung für ausreichenden Erschütterungsschutz für die Gebietskategorie 4	30
Bild 4-1	Einfache Linksweiche [2].....	32
Bild 4-2	Schematische Darstellung einer Doppelweiche [2].....	33
Bild 4-3	Schematische Darstellung einer doppelten Kreuzungsweiche [2]	34
Bild 4-4	Anschluss einer Weichenzunge an die Backenschiene [13].....	35
Bild 4-5	Herzstück mit Herzstücklücke und Flügelschienen [13].....	36
Bild 5-1	Messgerät MR 2002 von SYSCOM mit triaxialem Geschwindigkeitssensor.....	37
Bild 5-2	Messpunktanordnung.....	39
Bild 5-3	Gleise mit Weiche im Bereich des mittleren Gleises.....	40
Bild 5-4	Herzstück aus Messreihe 1 - Kalsdorf	40
Bild 5-5	Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 1 - Kalsdorf <i>vgl.</i> [20].....	40
Bild 5-6	Messpunktanordnung der Messreihe 1 - Kalsdorf parallel zu den Gleisen	41
Bild 5-7	Gleise im Bereich der Messreihe 2 - Eggendorf	41
Bild 5-8	Herzstück aus Messreihe 2 - Eggendorf	41
Bild 5-9	Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 2 - Eggendorf (Parallelmessung) <i>vgl.</i> [21]	42
Bild 5-10	Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 2 - Eggendorf (Quermessung) <i>vgl.</i> [21]	42
Bild 5-11	Messpunktanordnung der Messreihe 2 - Eggendorf parallel zu den Gleisen	43
Bild 5-12	Gleise im Bereich der Messreihe 3 - Ebenfurth	43
Bild 5-13	Herzstück aus Messreihe 3 - Ebenfurth	43
Bild 5-14	Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 3 - Ebenfurth <i>vgl.</i> [21]	44
Bild 5-15	Messpunktanordnung der Messreihe 3 - Ebenfurth parallel zu den Gleisen	44
Bild 5-16	Gleise im Bereich der Messreihe 4 - Leoben	45
Bild 5-17	Herzstück aus Messreihe 4 - Leoben.....	45
Bild 5-18	Messpunktanordnung der Messreihe 4 - Leoben parallel zu den Gleisen	45
Bild 5-19	Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 4 - Leoben (Parallelmessung) <i>vgl.</i> [20]	46
Bild 5-20	Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 4 - Leoben (Quermessung) <i>vgl.</i> [20]	46
Bild 5-21	Gleise mit den vier Weichen der Messreihe 5 - Baden	47
Bild 5-22	Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 5 - Baden <i>vgl.</i> [21].....	48

Bild 5-23	Gleise im Bereich der Messreihe 6 - St. Valentin.....	49
Bild 5-24	Bewegliches Herzstück auf Gleis 3 aus Messreihe 6 - St. Valentin.....	49
Bild 5-25	Bewegliches Herzstück auf Gleis 2 aus Messreihe 6 - St. Valentin.....	49
Bild 5-26	Messpunktanordnung im Bereich der Messreihe 6 - St. Valentin <i>vgl. [21]</i>	50
Bild 5-27	Typisches Zeitverlaufsignal ohne Weicheneinfluss.....	51
Bild 5-28	Typisches Zeitverlaufsignal mit Weicheneinfluss.....	51
Bild 5-29	Verstärkungsfaktoren aus Messreihe 1 - Kalsdorf.....	52
Bild 5-30	Verstärkungsfaktoren der Regionalzüge aus Messreihe 2 - Eggendorf.....	53
Bild 5-31	Verstärkungsfaktoren der Güterzüge aus Messreihe 2 - Eggendorf.....	53
Bild 5-32	Zusammenfassung der Verstärkungsfaktoren aus Messreihe 2 - Eggendorf.....	54
Bild 5-33	Verstärkungsfaktoren aus Messreihe 3 - Ebenfurth.....	55
Bild 5-34	Verstärkungsfaktoren der Fernreisezüge aus Messreihe 4 - Leoben.....	56
Bild 5-35	Verstärkungsfaktoren der Regionalzüge aus Messreihe 4 - Leoben.....	56
Bild 5-36	Verstärkungsfaktoren der Güterzüge aus Messreihe 4 - Leoben.....	57
Bild 5-37	Zusammenfassung der Verstärkungsfaktoren aus Messreihe 4 - Leoben.....	57
Bild 6-1	Einfluss von Herzstücklücken <i>vgl. [12]</i>	60
Bild 6-2	Modellierung der Verstärkung von Weichen gemessen in der Schweiz <i>[23]</i>	61
Bild 6-3	Weichenmodell Schweiz <i>vgl. [23]</i>	62
Bild 6-4	Weiche auf Schotter <i>vgl. [24]</i>	63
Bild 6-5	Einfluss von Weichen und einer Stoßlücke <i>[24]</i>	64
Bild 6-6	Mittelwert des Einflusses von Weichen und einer Stoßlücke <i>vgl. [24]</i>	64
Bild 6-7	Dämmwirkung von beweglichen zu unbeweglichen Herzstücken <i>[23]</i>	65
Bild 6-8	Dämmwirkung in Faktoren <i>vgl. [23]</i>	66
Bild 6-9	Weichenmodell Schweiz - bewegliche Herzstücke <i>vgl. [23]</i>	66
Bild 7-1	Verstärkungsfaktoren < 25 m - Zusammenfassung.....	69
Bild 7-2	Verstärkungsfaktoren < 25 m - Zusammenfassung Literatur.....	69
Bild 7-3	Verstärkungsfaktoren 25 m bis 40 m - Zusammenfassung.....	70
Bild 7-4	Verstärkungsfaktoren > 40 m - Zusammenfassung.....	71
Bild 7-5	RMS Werte - Parallelmessung.....	72
Bild 7-6	RMS Werte - 45° Messung.....	73
Bild 7-7	Fahrtrichtungsabhängige Verstärkung.....	74
Bild 7-8	Zusammenfassung idealisierter Linien.....	75
Bild 8-1	Verstärkungsfaktoren < 25 m - bewegliche Herzstücke - Zusammenfassung....	76
Bild 8-2	Verstärkungsfaktoren < 25 m - bewegliches Herzstück - schnelle Züge im Vergleich zu langsamen Zügen.....	77

Bild 8-3	Idealisierte Linien - bewegliche Herzstücke im Vergleich zu starren Herzstücken .	
	78
Bild 9-1	Verstärkungsfaktoren besohlter Schwellen.....	79
Bild 9-2	Weiche mit starrem Herzstück auf besohlenen Schwellen	80
Bild 10-1	Zusammenfassung 1.....	81
Bild 10-2	Zusammenfassung 2.....	82

11.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Wellenausbreitung an der Oberfläche (geometrische Dämpfung) [27]	7
Tabelle 3-1	Zusammenhang zwischen der W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung und der subjektiven Wahrnehmung [6].....	18
Tabelle 3-2	Richtwerte des maximal zulässigen Beurteilungs-Erschütterungsmaximum E_{max} [6].....	19
Tabelle 3-3	Richtwerte der maximal zulässigen Beurteilungs-Erschütterungsdosis E_r [6]	21
Tabelle 3-4	Beurteilungskriterien für den mittleren A-bewerteten Maximalschallpegel für ausreichenden Schallschutz, in dB [6].....	22
Tabelle 3-5	Beurteilungskriterien für den mittleren A-bewerteten Maximalschallpegel für guten Schallschutz, in dB [6]	22
Tabelle 3-6	Beurteilungskriterien für den A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel für ausreichenden Schallschutz, in dB [6].....	24
Tabelle 3-7	Beurteilungskriterien für den A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegel für guten Schallschutz, in dB [6]	24
Tabelle 3-8	Zusammenhang zwischen W_m -bewerteten Schwingbeschleunigung und der vormaligen bewerteten Schwingstärke K_B [6].....	25
Tabelle 3-9	Höchstwerte für $K_{B,S}$ gemäß ÖNORM S 9012 (Ausgabe 1996) [5]	26
Tabelle 3-10	Konstanten a gemäß ÖNORM S 9012 (Ausgabe 1996) [5]	27
Tabelle 6-1	Mittlere relative Einflüsse in Dezibel im Bereich Rad/Schiene [12]	60
Tabelle 8-1	Zusammenfassung der Peak, RMS und E_{max} Verstärkungen.....	78