

Ausbreitung von Erschütterungen in Gebäuden

1 Einführung

Über die Ausbreitung von Erschütterungen in grossen Gebäuden ist wenig bekannt. Für Erschütterungs- und Körperschallprognosen wäre es interessant, ein Modell für die Ausbreitung zu haben. Anhand von Daten von einer Messkampagne soll im Nachhinein empirisch untersucht werden, ob eine Modellierung möglich wäre und wie zuverlässige Resultat dabei herauskämen. Die weit verbreitete Annahme, dass Erschütterungen innerhalb eines grossen Gebäudes mit zunehmender Distanz zur Quelle abnehmen, soll geprüft werden.

2 Messungen im Toni Areal



Bild 1 Toni Molkerei heute



Bild 2 Viadukt der SBB und Pfingstweidstrasse

In der ehemaligen Milchverarbeitungs Fabrik an der Duttweilerstrasse in Zürich (Toni Areal) - Bild 1 - soll ein neues Zentrum für Bildung und Kultur (ZHdK – Zürcher Hochschule der Künste) entstehen. Die neue Nutzung des Gebäudes sieht neben Lehr-, Schul- und Seminarräumen auch den Einbau von Konzertsälen, Musikräumen, Tonstudios und Kinos vor.

Auf zwei Seiten des Gebäudes befinden sich Strassen mit grossem Schwerverkehrsaufkommen (Pfingstweidstrasse und Duttweilerstrasse). In unmittelbarer Nähe des Areals führt auf der Höhe des 5. OG die stark befahrene SBB-Strecke Zürich HB – Zürich Oerlikon vorbei. Die Strecke wird von S-Bahn Zügen, Intercity Zügen und von Güterzügen befahren.

Für eine Prognose des zu erwartenden Körperschalls wurden 3 Messkampagnen durchgeführt. In Phase 1 wurden Erschütterungs- und Körperschallmessungen in einem Raum durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass die von der Eisenbahn verursachten Erschütterungen an gewissen Stellen schwach wahrnehmbar sind (0.2 – 0.6 mm/s). Der Körperschall ist gut wahrnehmbar. Die Erschütterungen vom Strassenverkehr liegen weit unterhalb dieses Wertes.

In Phase 2 wurden Erschütterungsmessungen an 55 Messpunkten, die für die zukünftige Nutzung besonders sensitiv sind, durchgeführt. Dafür wurden die Zugdurchfahrten in der Nacht (20 Uhr bis 8 Uhr morgens) gemessen. Damit konnten andere mögliche Erschütterungsquellen (z.B. von der Zwischennutzung im Gebäude) minimiert werden, zudem verkehren in der Nacht auch öfter als am Tag Güterzüge. Mit den Resultaten dieser Messungen sollte eine Körperschallprognose erstellt werden. Es hat sich gezeigt, dass die Daten sehr stark streuen und die Körperschallprognose mit einer grossen Sicherheitsmarge beaufschlagt werden musste.

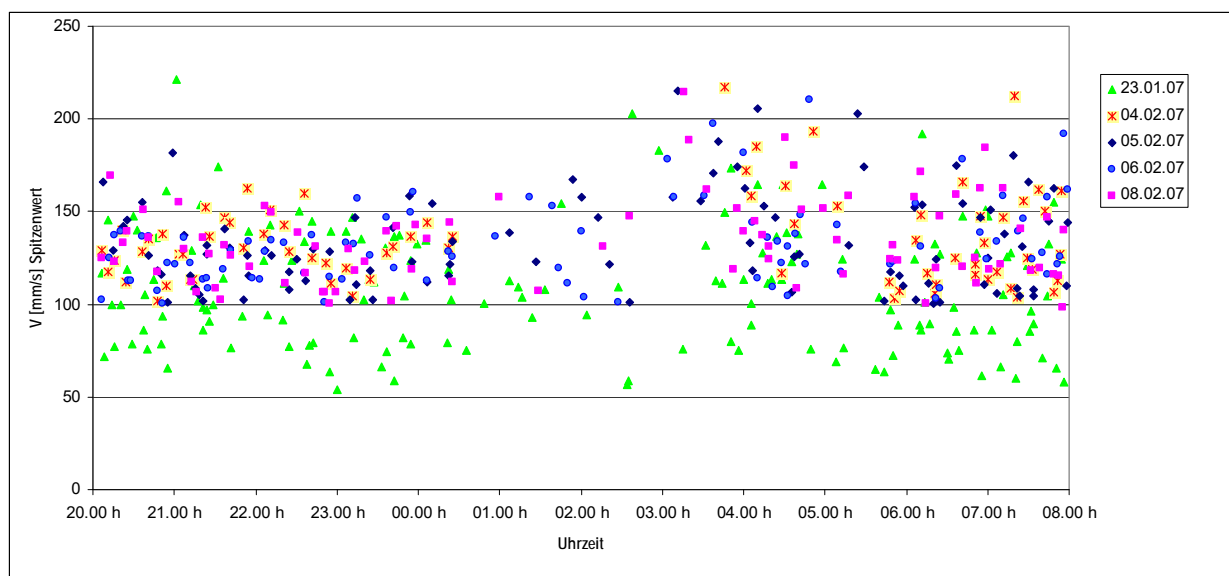
In Phase 3 wurde eine kombinierte Erschütterungs- und Körperschallmessung an 20 Messpunkten durchgeführt um die Prognose zu präzisieren und die Sicherheitsmarge zu verkleinern, bzw. zu rechtfertigen. Die im Zusammenhang mit den Messungen von Phase 2 angefallenen Erschütterungsmessungen sollen im Folgenden analysiert werden.

2.1 Messanordnung / Messreihen

Die Auslösung der Registrierung (Erkennen der Zugdurchfahrt) erfolgte mit einem Referenzsensor am Fusse des Viadukts in ca. 16 m Distanz zu einem Pfeiler, auf der Höhe einer Weiche. Bezogen auf das Gebäude steht der Referenzsensor im 3. OG. Alle jeweils angeschlossenen Kanäle im Gebäude (bis zu 12 Kanäle, nur vertikale Richtung) wurden ausschliesslich durch den Referenzsensor getriggert und synchron aufgezeichnet.

3 Statistische Auswertung der Daten

Die Messungen erfolgten in den Nächten zwischen Werktagen in einem Zeitraum von 3 Wochen. Eine Analyse der Messungen des Referenzsensors ergibt, dass sich die Erschütterungen während der verschiedenen Messperioden kaum unterscheiden. Allerdings ist die Anzahl der Züge variabel (75 -160). Grafik 1 zeigt die typische Verteilung der Züge während 5 Messperioden.



Grafik 1: Verteilung der Züge und Spitzenwert am Referenzsensor

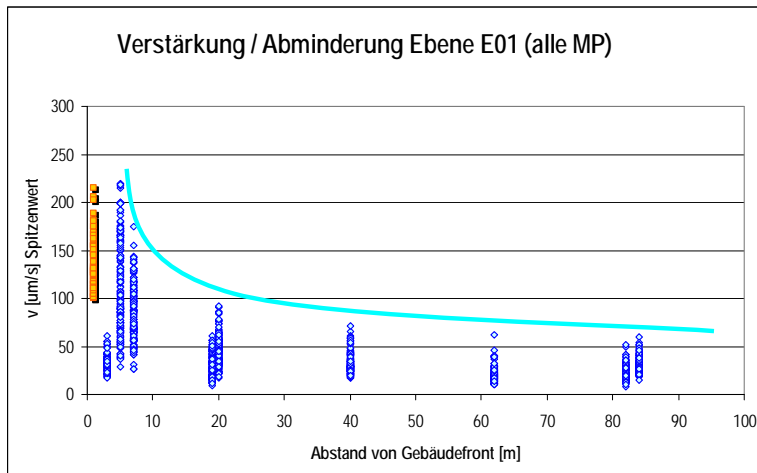
Auffällig ist die Häufung von Zügen mit starker Erschütterung in den Nachtstunden von ca. 3 Uhr bis 5 Uhr.

3.1 Messungen im Gebäude

Für jeden Messpunkt werden in der Folge die Maxima jeder Zugsdurchfahrt mit der jeweiligen Messung des Referenzsensors verglichen. Als Ergebnis wird die Abminderung bzw. Verstärkung an den einzelnen Messorten grafisch dargestellt.

3.1.1 Messpunkte auf Ebene 01

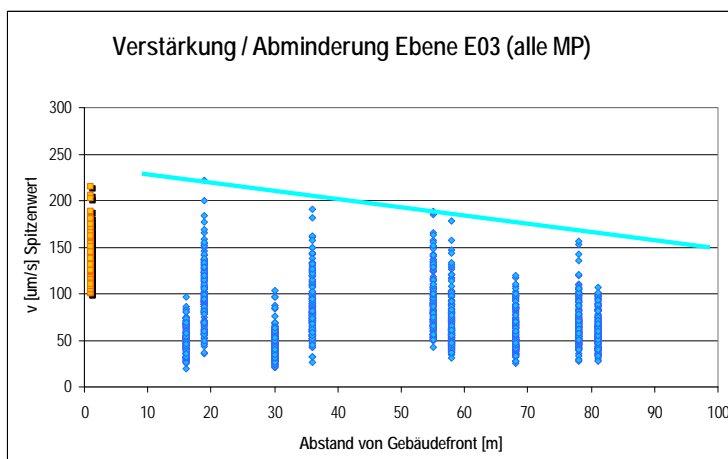
Die Grafik 2 zeigt die Zusammenstellung der Messpunkte der Ebene 01 – gelb der Referenzsensor auf Ebene 03. In Ebene 01 lässt sich eine exponentielle Abminderung mit zunehmender Distanz von den Geleisen feststellen.



Grafik 2: Messungen in Ebene E01 (blau) und Referenz auf Ebene E03

3.1.2 Messpunkte auf Ebene 03

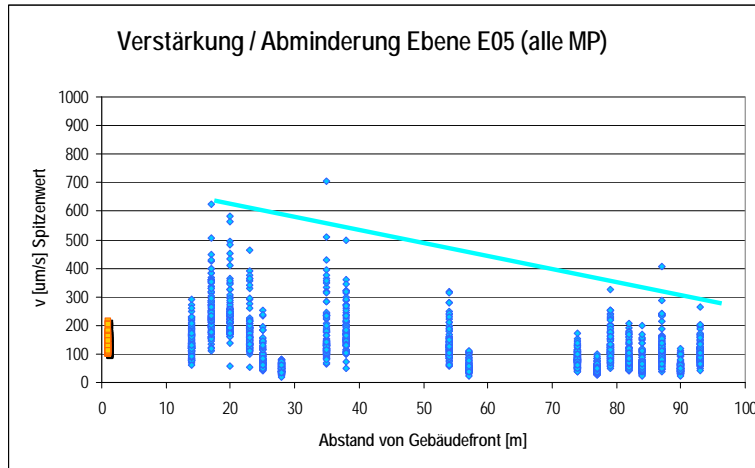
Die Grafik 3 zeigt die Zusammenstellung der Messpunkte der Ebene 03 – gelb der Referenzsensor auf derselben Ebene. Auf Ebene 03 ist die Abminderung linear – die Streuung ist aber bereits grösser.



Grafik 3: Messungen in Ebene E03 (blau) und Referenz auf Ebene E03

3.1.3 Messpunkte auf Ebene 05

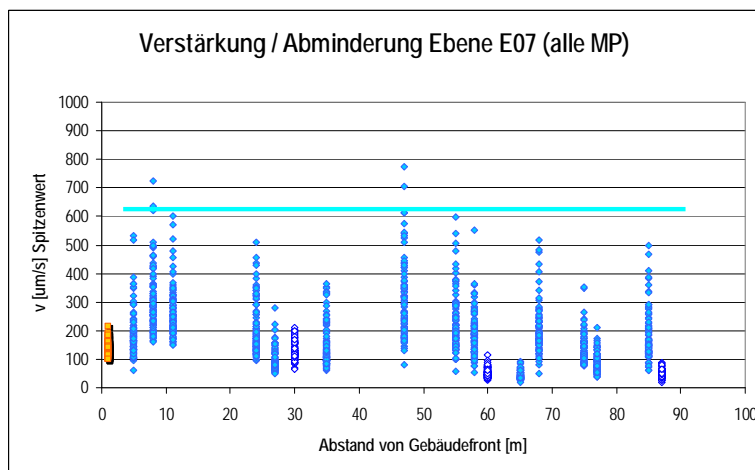
Die Grafik 4 zeigt die Zusammenstellung der Messpunkte der Ebene 05 – gelb der Referenzsensor auf Ebene 03. Auf der der Bahn zugewandten Seite ergeben sich gegenüber der Ebene E03 Verstärkungen von einem Faktor 3. Auf der der Bahn abgewandten Seite des Gebäudes werden etwa dieselben Werte erreicht wie beim Referenzsensor. Dazwischen liegt eine lineare Abminderung, mit einer sehr grossen Streuung.



Grafik 4: Messungen in Ebene E05 (blau) und Referenz auf Ebene E03

3.1.4 Messpunkte auf Ebene 07

Die Grafik 5 zeigt die Zusammenstellung der Messpunkte der Ebene 07 – gelb der Referenzsensor auf Ebene 03. Es ergeben sich gegenüber der Ebene E03 Verstärkungen von einem Faktor 3. Es kann keine klare Abminderung auf der der Bahn abgewandten Seite festgestellt werden. Einzig im Turm (Südseite des Gebäudes) scheint eine systematische Abminderung ohne Ausreisser vorzuliegen. Der Turm ist wesentlich steifer als der Rest des Gebäudes ausgebildet.



Grafik 5: Messungen in Ebene E07 (blau), Messpunkte im Turm (blau – weiss), Referenz auf Ebene E03

4 Analyse der Messungen an typischen Messpunkten

Die graphische Darstellung für 4 typische Standorte folgt in Grafik 6-8. Als typische Messung auf Ebene E03 dient der Referenzsensor. Die Standorte sind in Bild 3 dargestellt.

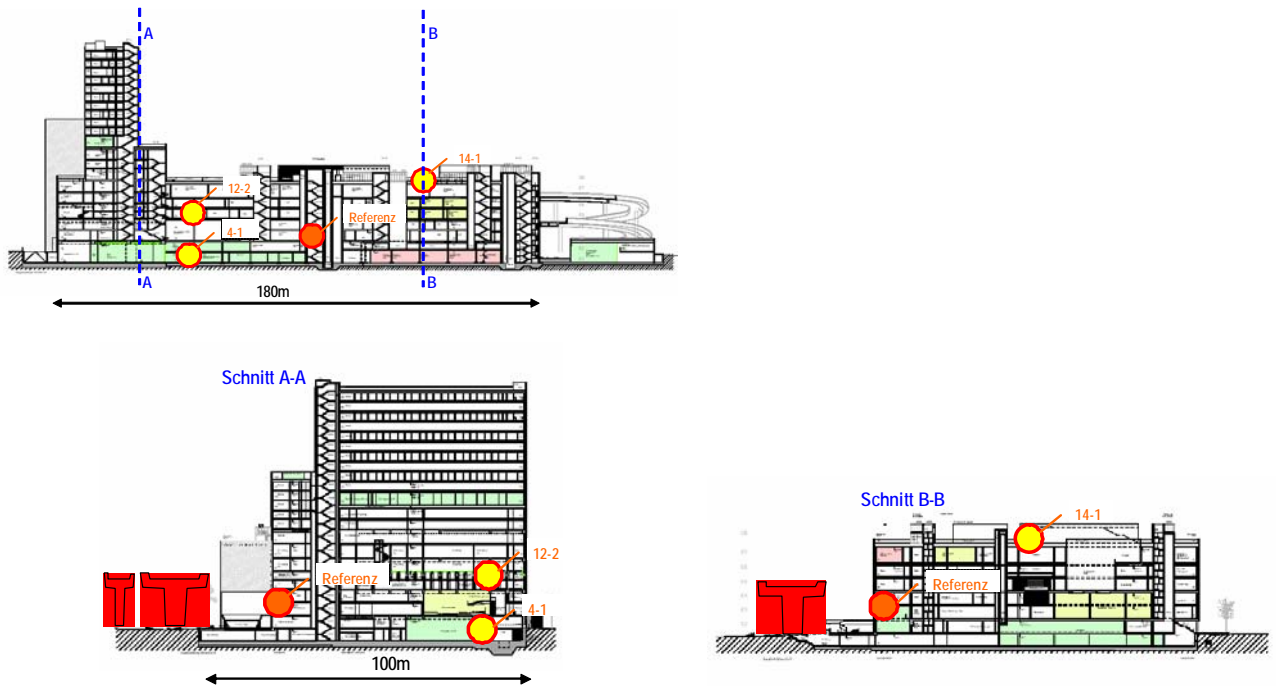
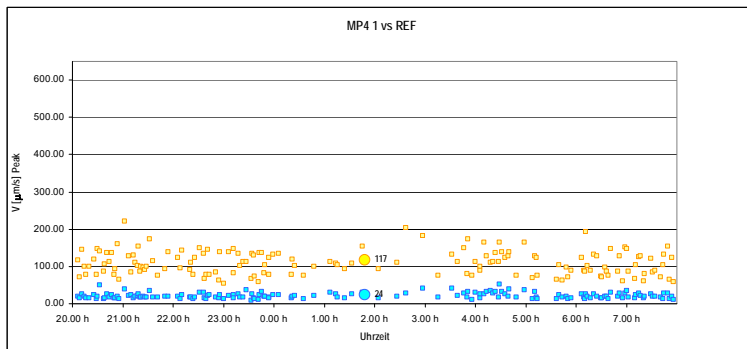
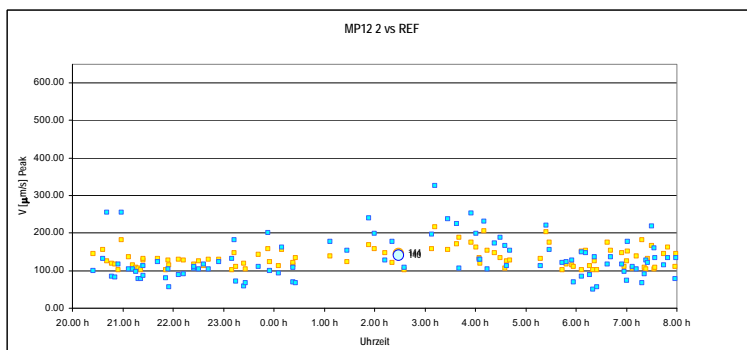


Bild 3 Schnitt durch das Gebäude (nach Umbau), Eisenbahnlinie rot



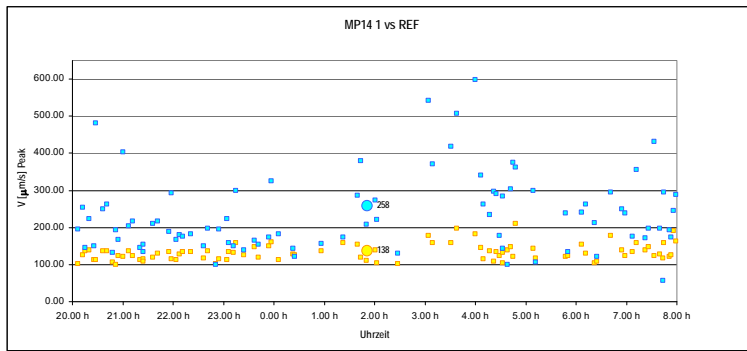
Grafik 6 Messpunkt 4-1 auf Ebene E01 (blau)

Der Messpunkt 4-1 befindet sich im Untergeschoss auf der der Eisenbahn entgegengesetzten Seite. Die Spitzenwerte an diesem Standort sind ca. 5 x geringer gegenüber dem Referenzsensor. Es besteht kaum ein Zusammenhang zwischen der Stärke der Anregung und der Erschütterung an diesem Standort.



Grafik 7 Messpunkt 12-2 auf Ebene E05 (blau)

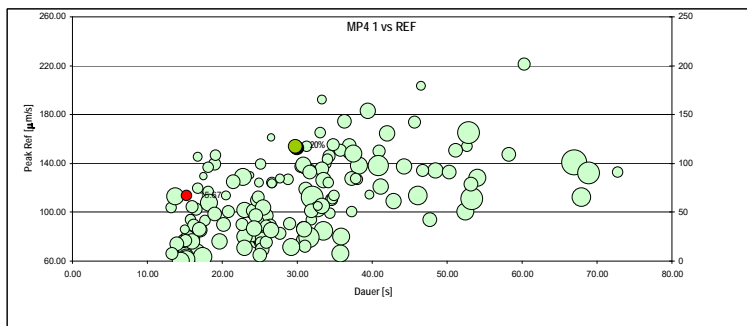
Messpunkt 12-2 befindet sich im fünften Obergeschoss auf Höhe der Geleise, ebenfalls auf der der Eisenbahn abgewandten Seite. Die Spitzenwerte an diesem Standort sind in Durchschnitt gleich gross wie beim Referenzsensor, es gibt aber eine offensichtliche Überhöhung während der Nachtstunden.



Grafik 8 Messpunkt 14-1 auf Ebene E07 (blau)

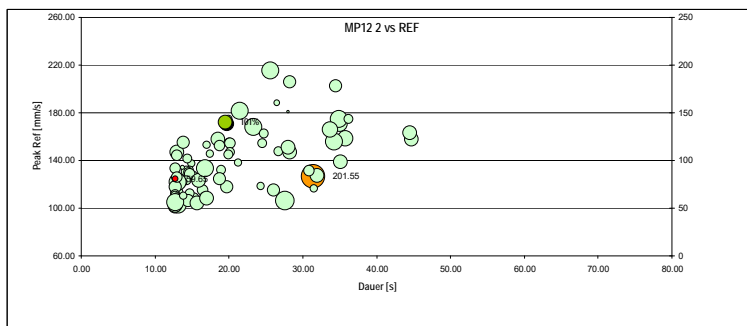
Messpunkt 14-1 befindet sich im siebten Obergeschoss, etwa in Gebäudemitte. Die Spitzenwerte sind an diesem Standort fast doppelt so gross wie beim Referenzsensor. Die Überhöhung für einzelne Ereignisse liegt bei einem Faktor 3. Bei einem Grossteil der Ereignisse findet aber keine Erhöhung statt.

Die Überhöhungen können teilweise mit der Dauer der Anregung erklärt werden. In den folgenden Grafiken ist die Überhöhung in Funktion der Dauer der Aufzeichnung (X-Achse) und des Spitzenwertes beim Referenzsensor (Y-Achse) dargestellt. Die Verstärkung, bzw. Abminderung ist in Form des Kreisdurchmessers (unterschiedlich skaliert) abgebildet.



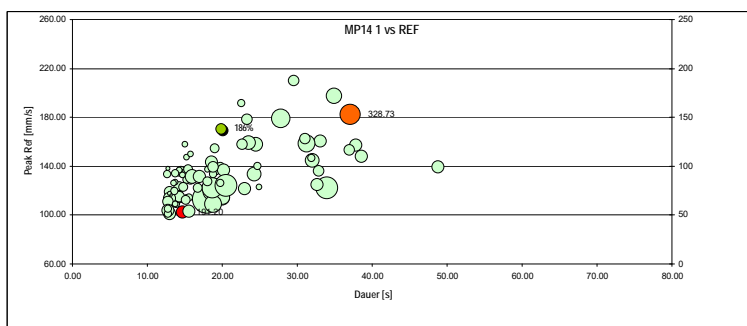
Grafik 9 Messpunkt 4-1 auf Ebene E01

Bei Messpunkt 4-1 kann eine Abhängigkeit zwischen Einwirkdauer und Abminderung beobachtet werden. Länger andauernde Einwirkung führt zu einer stärkeren Erschütterung (=grössere Punkte).



Grafik 10 Messpunkt 12-2 auf Ebene E05

Bei Messpunkt 12-2 scheint diese Abhängigkeit nicht ausgeprägt vorhanden zu sein.



Grafik 11 Messpunkt 14-1 auf Ebene E07

Bei Messpunkt 14-1 ist die Abhängigkeit vorhanden.

Eindeutig ist der Trend, dass längere Signale einen höheren Spitzenwert aufweisen. Lange Registrierungen können 3 Ursachen haben:

- langsam fahrende Züge,
- 2 sich kreuzende Züge (was vermutlich beim Messpunkt 4-1 der Fall ist) oder
- lange Züge.

5 Zeitverläufe und Amplitudenspektra

5.1 Messpunkt 4-1 (Ebene E03)

Der Vergleich (Bild 4) zeigt die Durchfahrt eines kurzen Zuges (in Grafik 9 rot markiert). Die Verstärkung beträgt 19 % (also eine Abminderung um den Faktor 5). Beim Spektrum werden offenbar alle Frequenzen gleichmässig abgemindert.

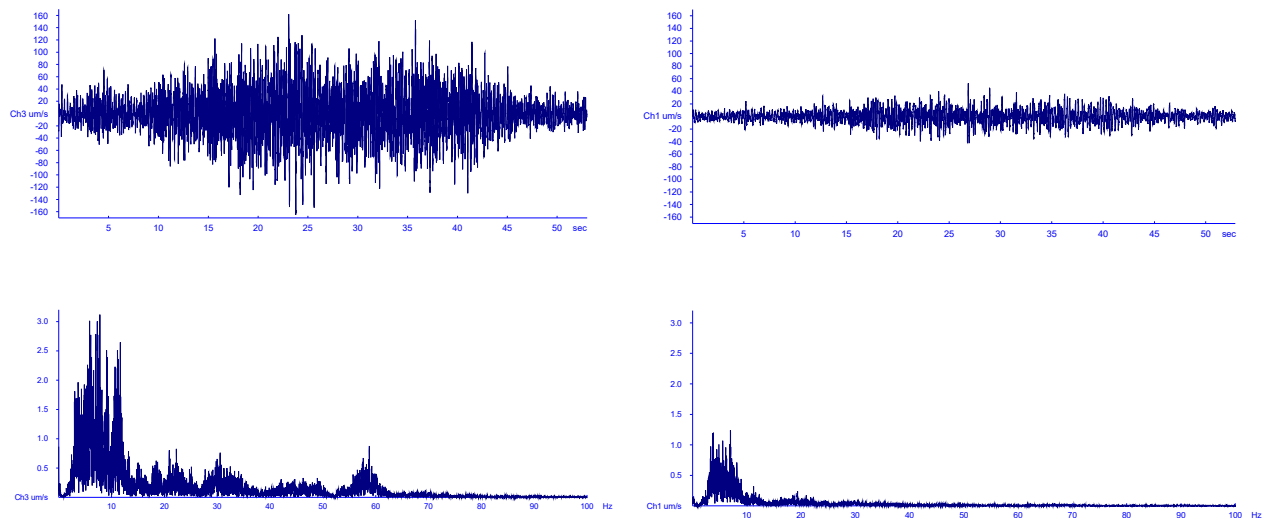


Bild 4: Referenzsensor (links) und Messpunkt MP 4-1 (rechts) –Zeitverlauf (oben) und Spektrum (unten)

5.1.1 Messpunkt 12-2 (Ebene E05)

Der erste Vergleich (Bild 5) zeigt die Durchfahrt eines kurzen Zuges (in Grafik 10 rot markiert). Die Verstärkung beträgt 60%, also unterdurchschnittlich.

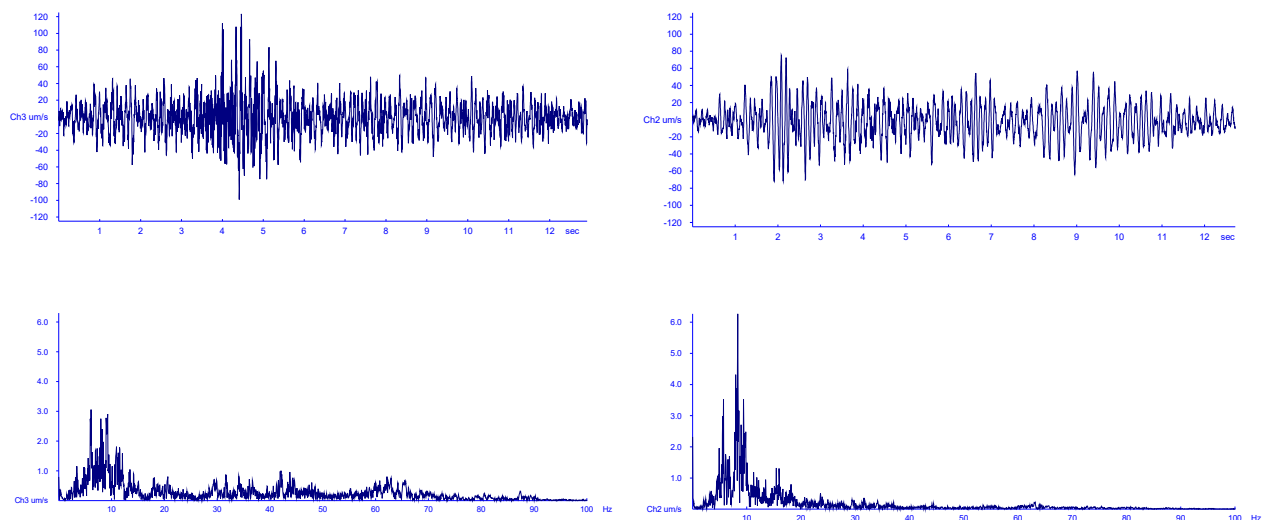


Bild 5: Referenzsensor (links) und Messpunkt MP 12-2 (rechts) –Zeitverlauf (oben) und Spektrum (unten)

Der zweite Vergleich (Bild 6) zeigt die Durchfahrt eines langen Zuges – vermutlich Intercity (in Grafik 10 orange markiert). Die Verstärkung beträgt 200%, das Doppelte vom Durchschnitt. Es scheint, dass nur ein Wagen (oder die Lokomotive) für die übermäßige Verstärkung verantwortlich ist. Das Antwortspektrum zeigt zwei Eigenfrequenzen des Bodens.

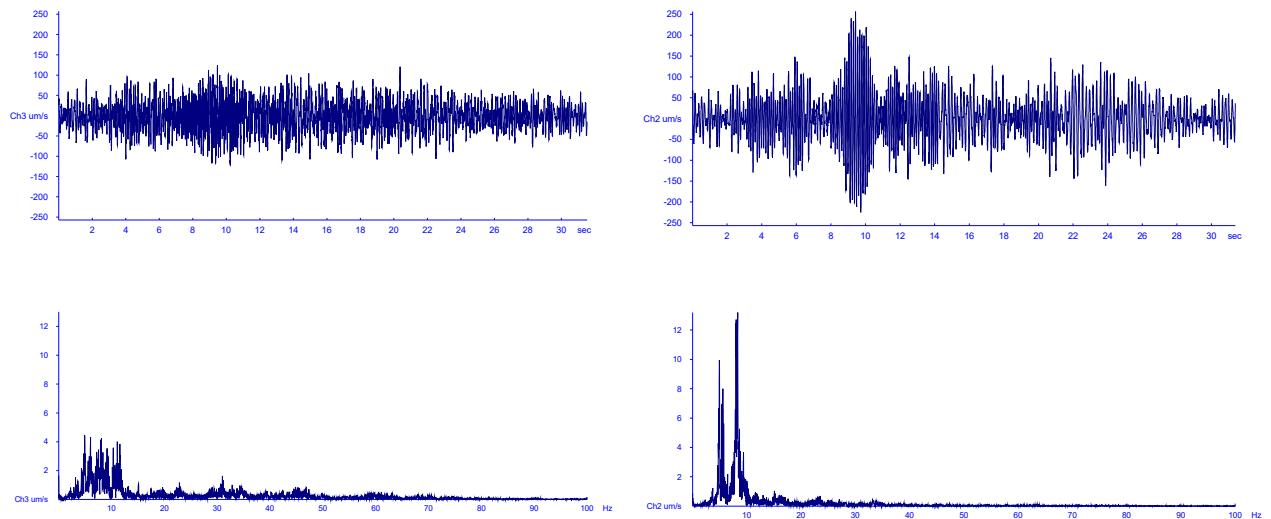


Bild 6: Referenzsensor (links) und Messpunkt MP 12-2 (rechts) –Zeitverlauf (oben) und Spektrum (unten)

5.1.2 Messpunkt 14-1 (Ebene E07)

Der erste Vergleich (Bild 7) zeigt die Durchfahrt eines kurzen Zuges – sehr wahrscheinlich einer Doppelstock S-Bahn (in Grafik 11 rot markiert). Die Verstärkung beträgt 192%, was ziemlich genau dem Durchschnitt an diesem Messpunkt entspricht.

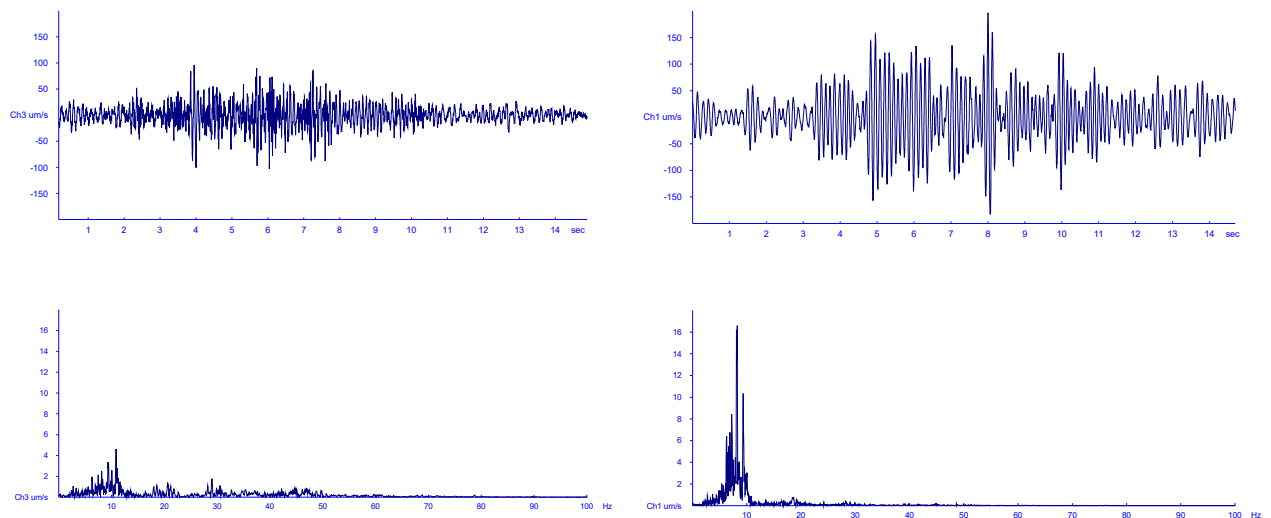


Bild 7: Referenzsensor (links) und Messpunkt MP 14-1 (rechts) –Zeitverlauf (oben) und Spektrum (unten)

Der zweite Vergleich (Bild 8) zeigt die Durchfahrt eines langen Zuges – sehr wahrscheinlich ein Güterzug (in Grafik 11 orange markiert). Die Verstärkung beträgt 330%. Offensichtlich ist die Verstärkung sehr variabel und hängt von der Frequenz der anregenden Erschütterung ab. Amplitudenspektrum der Züge ist unterschiedlich; das Antwortspektrum zeigt die Eigenfrequenz des Bodens.

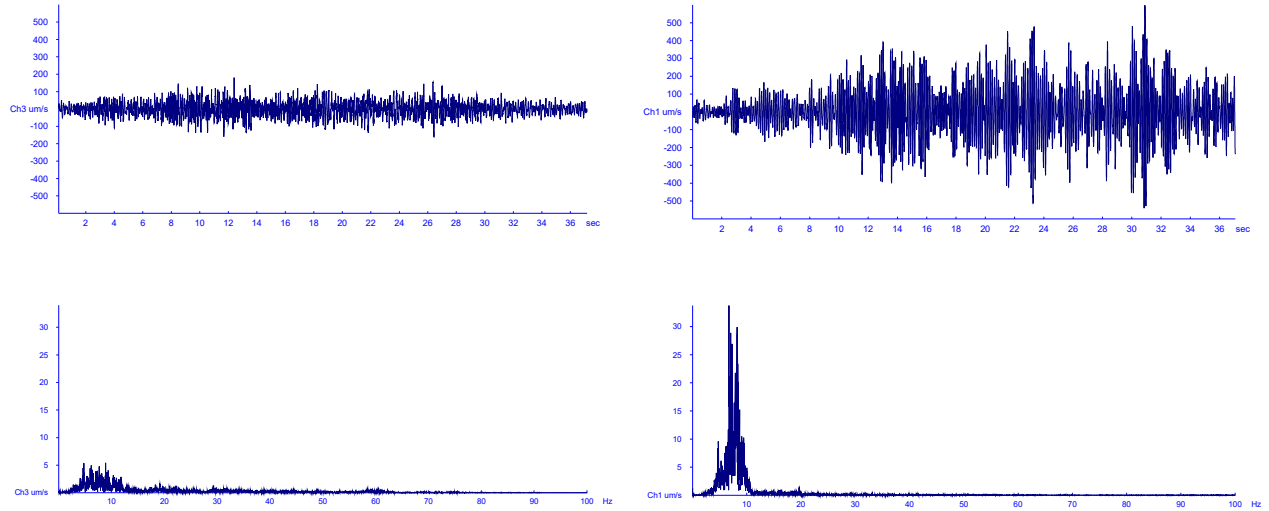
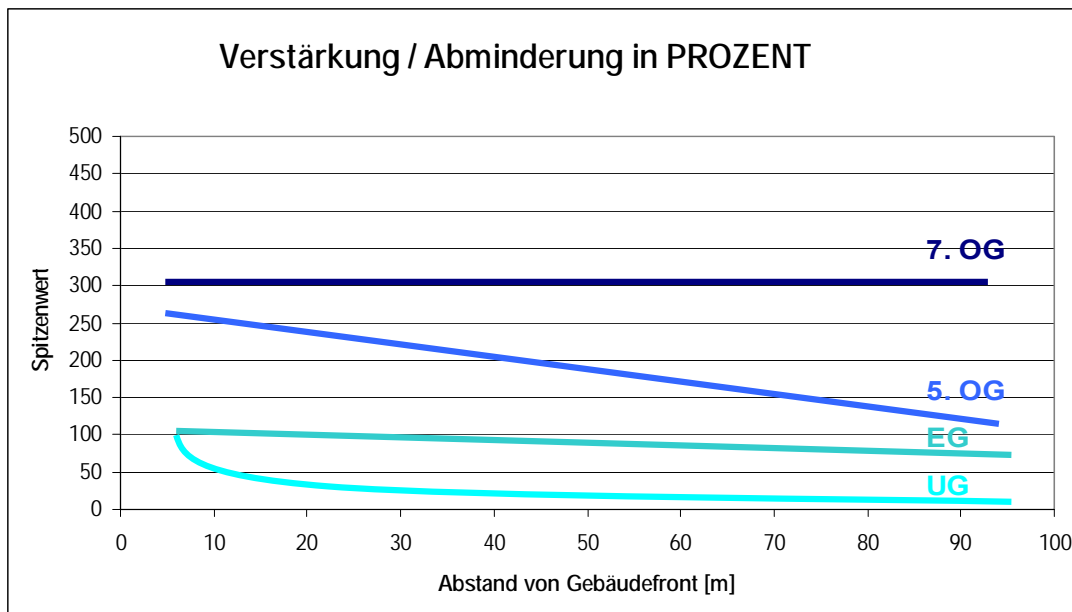


Bild 8: Referenzsensor (links) und Messpunkt MP 14-1 (rechts) –Zeitverlauf (oben) und Spektrum (unten)

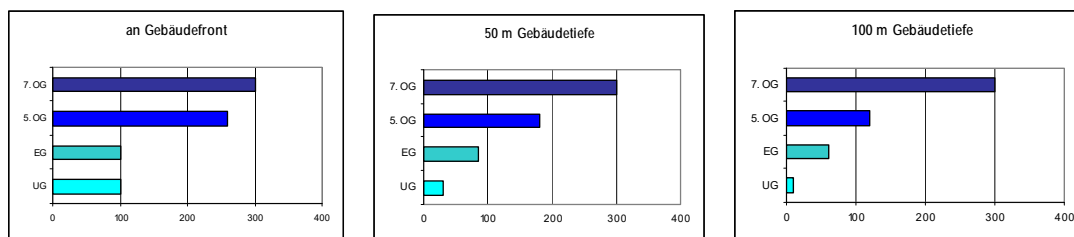
6 Schlussfolgerungen

Die Verstärkung / Abminderung ist von sehr vielen Parametern abhängig – insbesondere von einzelnen individuellen Zügen (nicht nur Zugtypen). Eine Modellierung scheint wenig erfolgversprechend. Die konkreten Messungen an den interessanten Stellen sind sicher präziser und einfacher durchzuführen, zudem scheint eine Modellierung ohne Messungen zur Verifizierung beinahe unmöglich zu sein.

Eine exponentielle Abminderung – wie im Freifeld - findet in einem grossen Gebäude nur im Untergeschoss, das direkt mit dem Erdreich verbunden ist, statt. In den mittleren Stockwerken darf noch mit einer linearen Abminderung der Erschütterung in Funktion von der Distanz zur Quelle gerechnet werden, allerdings findet auch eine Verstärkung nahe der Quelle statt. In den oberen Stockwerken lässt sich kaum mehr eine Abminderung in Funktion zur Distanz der Quelle feststellen. Die Verstärkung ist zunehmend für jedes Stockwerk (siehe Grafiken 12 und 13).



Grafik 12 Abminderung in Funktion vom Abstand von der Erschütterungsquelle (Gebäudefront = 100%)



Grafik 13 Verstärkung in den Verschiedenen Stockwerken (Gebäudefront, EG = 100%)