

Experimentelle Bestimmung von Transferspektren für die Prognose von Eisenbahnerschütterungen

Cosmas Savary
Ziegler Consultants
Gladbachstr. 121
CH-8044 Zürich
savary@z-c.ch,
Tel +41 44 260 70 13

1 Einführung

Dieses Referat soll – im Sinne eines Erfahrungsaustauschs – Erkenntnisse im Zusammenhang mit Schwingungsanregung als Methode zur Prüfung und zur Prognose vermitteln. Zur Anregung können folgende Methoden zum Einsatz kommen:

Impulsartige Anregung:

- „Heel Drop“
- Sandsack
- Fallgewicht

Harmonische Anregung:

- Shaker

Andere Anregung:

- Rüttelplatte
- Sprengung
- Ambiente

Durch gezielte Auswertung der Daten und insbesondere durch den Vergleich mit Kenngrößen, die anhand von realen Erschütterungen ermittelt wurden, lassen sich die Methoden zur Prognose prüfen und verfeinern. Durch den Einsatz eines Fallgewichts zur Erprobung desselben bei Messungen von Eisenbahnerschütterungen sind wir auf interessante Zusammenhänge gestossen.

2 Vergleich der Methoden anhand eines Beispiels

Die verschiedenen Methoden werden anhand einer Anwendung verglichen: Die Eigenschaften eines zur elastischen Lagerung eines Gebäudes vorgeschlagenen Materials (Schutz vor Erschütterungen infolge Eisenbahnverkehr) sollen geprüft werden. Dabei soll die Eigenfrequenz des Materials und die Dämpfung bestimmt werden.

2.1 Versuchsanordnung

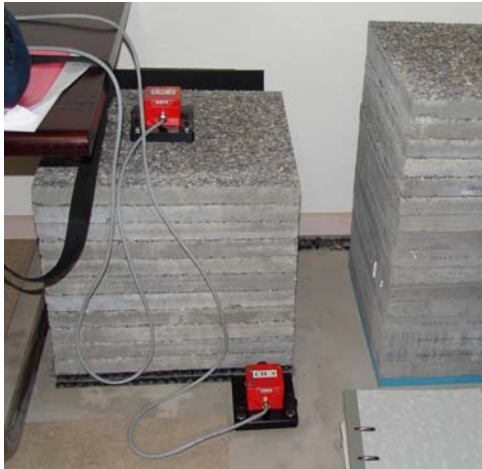


Bild 2.1a Prüfung von Dämmmaterial - Versuchsanordnung

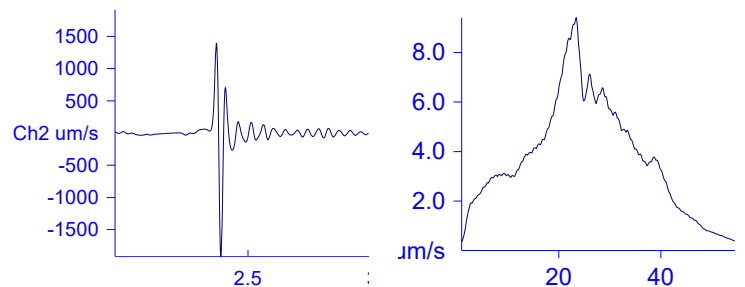
Das Material wurde auf dem Boden des Büros ausgelegt und mit Gartenplatten belastet (Simulation des Gewichts des Gebäudes). Ein Sensor wurde auf dem Fussboden angebracht, ein zweiter Sensor auf der obersten Platte.

Die Anregung des Systems erfolgte in der Mitte der Geschossdecke. Zur Messung wurden zwei MS2003+ uniaxial Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer eingesetzt. Die Signale wurden mit einem MR2002-CE aufgezeichnet und mit VIEW2002 ausgewertet.

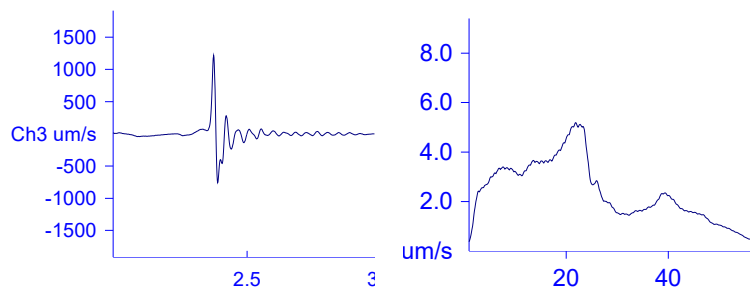
2.2 Messresultate

2.2.1 Impulsanregung: „Heel Drop“

Die Impulsanregung erfolgte durch einen „Heel Drop“. Die Dauer der Aufzeichnung beträgt lediglich 1 Sekunde, die Anregung erreicht 1.2 mm/s.



Bilder 2.2.1a Zeitverlauf auf der obersten Platte (links) und das entsprechende Amplitudenspektrum (rechts)



Bilder 2.2.1b Zeitverlauf am Boden - Anregung (links) und das entsprechende Amplitudenspektrum (rechts)

2.2.2 Harmonische Anregung: Sweep mit dem Shaker

Die Anregung erfolgte mit einem Shaker. Die Frequenzen von 5 – 60 Hz wurden in ca. 5 Minuten durchlaufen. Die Amplitude beträgt maximal ca. 0.9 mm/s.

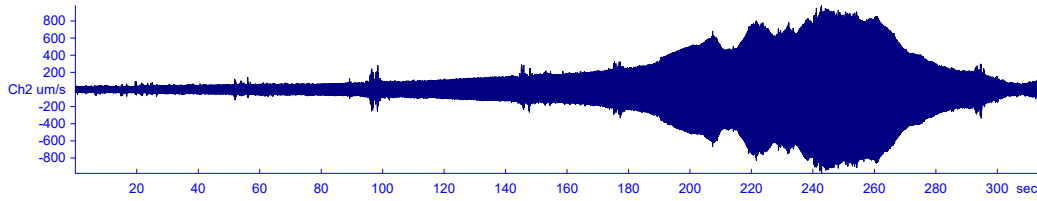


Bild 2.2.2a (oben) Zeitverlauf (Sweep)
auf der obersten Platte

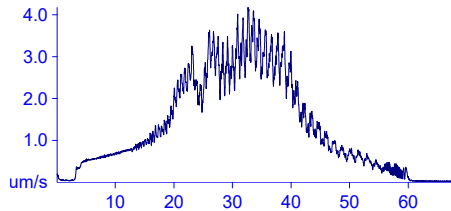


Bild 2.2.2b (links) Dazugehöriges
Amplitudenspektrum

2.2.3 Ambiente Anregung

Als Anregung dienen die Erschütterungen im Büro (ohne vorbeifahrende Lastwagen oder Trolleybusse). Die Dauer der Aufzeichnung beträgt ca. 27 Sekunden, die Amplitude erreicht ca. 0.02 mm/s.

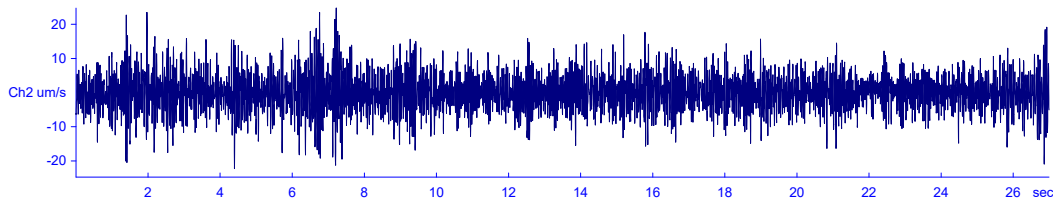


Bild 2.2.3a (oben) Zeitverlauf (Ambient)
auf der obersten Platte

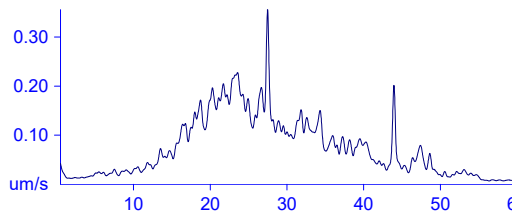


Bild 2.2.3b (links) Dazugehöriges
Amplitudenspektrum

2.2.4 Vergleich der Resultate

Zur Bestimmung des Transferspektrums des Isolationsmaterials wird das auf der obersten Platte gemessene Spektrum (Reaktion auf dem Dämmmaterial) mit dem Quellspektrum (Anregung auf dem Boden) dividiert. Das Ergebnis ist in Bild 2.2.4a dargestellt. Die Ergebnisse für die verschiedenen Methoden variieren nicht stark: Die Eigenfrequenz liegt zwischen 31 Hz und 34 Hz, die Verstärkung bei der Resonanzfrequenz liegt zwischen einem Faktor von 4,6 und 3,3. Die Dämpfung des Materials (Schlankheit und Höhe der Glockenkurve) scheint bei allen Anregungen etwa gleich zu sein und liegt bei ca. 2,5%.

Dabei ist nicht klar, ob die Unterschiede bei den Resultaten durch die Messmethode entstehen, oder ob sich das Material bei den verschiedenen Anregungen und verschiedenen Amplituden tatsächlich unterschiedlich verhält.

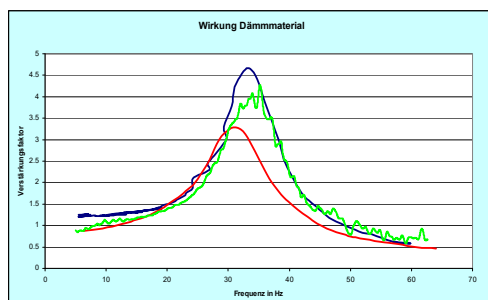


Bild 2.2.4a Frequenzabhängiges Dämmmaß eines Isolationsmaterials (blau: Sweep, grün: Ambient, rot: Impuls)

3 Anwendungen

3.1 Prognose von Erschütterungen durch Baumassnahmen

Auf dem Areal eines grossen Chemiewerks soll ein Gebäude abgerissen und durch einen Neubau ersetzt werden. In den umliegenden Gebäuden befinden sich empfindliche Laboreinrichtungen (u.a. Elektronenmikroskop, hochempfindliche Waagen, MRI, etc.). Der Auftraggeber möchte wissen, ob der Betrieb dieser Geräte während der Bauarbeiten weiterhin möglich ist, oder ob gewisse Arbeiten nur in einem bestimmten Zeitfenster durchgeführt werden können.

Bei Abbrucharbeiten entstehen die stärksten Erschütterungen typischerweise durch Herunterfallen von schweren Trümmern und bei den Bauarbeiten werden die stärksten Erschütterungen durch die Pfählungen (Bohrpfähle) erwartet. In beiden Fällen (bei den Bohrpfählen durch das Aufsetzen der Bohrröhre) stehen impulsartige Erschütterungen im Vordergrund. Zur Prognose der zu erwartenden Erschütterungen an ca. 50 Standorten in den umliegenden Gebäuden werden die impulsartigen Anregungen beim Ansetzen der Bohrröhre durch ein Fallgewicht simuliert.



Bild 3.1a Bohrmachine mit Bohrrohren.
Fallhöhe: 0.2 m
Gewicht: 2'000 kg

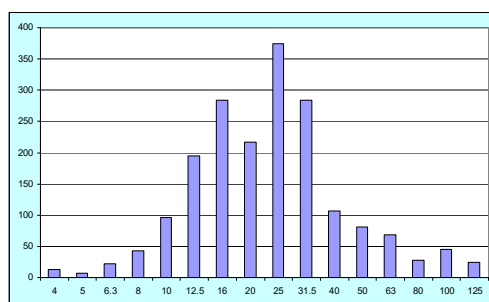


Bild 3.1c Quellspektrum des Aufeinanderschlagens der Bohrröhre, gemessen in ca. 7 m Entfernung



Bild 3.1b Fallgewicht
Fallhöhe: 2m
Gewicht: 100 kg

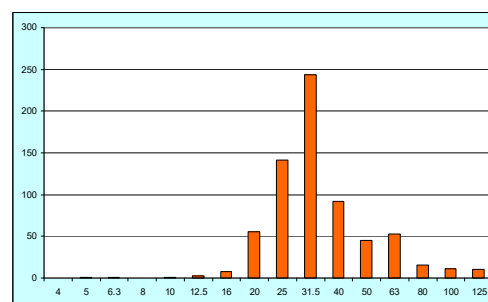


Bild 3.1d Quellspektrum eines Schlages mit dem Fallgewicht, gemessen in ca. 20 m Entfernung

Die Anregung ist ähnlich, die Maschine weist mehr tieffrequente Anteile auf, dies ist auf die längere Einwirkdauer des Stosses (Eindringen in den Boden) zurückzuführen.

Die weitere Ausbreitung der Erschütterungen über das Erdreich ins Fundament der Gebäude (Ankopplung) und von da auf die Geschossdecken (Transfer) wird im Kapitel 3.3 dargestellt. Das Prognosemodell wird überprüft, sobald die Bauarbeiten gestartet sind.

3.2 Prognose von Erschütterungen eines Stanzwerks

In einer Gewerbezone plant ein metallverarbeitender Betrieb den Neubau eines Stanzwerks als Ersatz der bisherigen Anlagen in Dorfmitte. In unmittelbarer Nachbarschaft des Neubaus in der Gewerbezone befindet sich ein Betrieb, der Präzisionsteile herstellt. Dieser hat Einsprache gegen den Neubau erhoben, da er eine Störung seiner Präzisionsmaschinen durch die Erschütterungen des Stanzwerks befürchtet.

Aufgrund von Messungen der Erschütterungen der Maschinen am bisherigen Standort werden die Art und die Stärke der Erschütterungen der Stanzmaschinen ermittelt. Durch die Wahl von geeigneten Aufstellungsorten und Einstellungen werden die Erschütterungen der Stanzmaschine mit dem Fallgewicht simuliert. Daraufhin wird eine Simulation der Erschütterungen am neuen Standort durchgeführt und entschieden, ob eine elastische Lagerung der Stanzpressen notwendig ist.

3.3 Prognose von Transferspektren bei Eisenbahnerschütterungen

Bei der Messung von Erschütterungen durch Eisenbahnen werden immer Messungen an mindestens 3 Stellen durchgeführt: Freifeld, Fundament und Geschossdecke. Dadurch können Ankopplungs- und Transferspektrum bestimmt werden. Wir haben bei einigen Messungen auch zusätzlich noch eine Anregung durch das Fallgewicht durchgeführt, dies in der Absicht, zu prüfen, ob die mit dem Fallgewicht erzeugten Transferspektren identisch sind mit den von den Zügen erzeugten.

Im Folgenden werden einzelne Messergebnisse vorgestellt.

3.3.1 Romanshorn

Bei der Auswertung der Zugsdurchfahrten wurde unterschieden zwischen Regionalzügen und Güterzügen. Die Erschütterungen der beiden Zugtypen sind recht unterschiedlich, insbesondere verursachen die Güterzüge etwa doppelt so starke Schwingungen wie die Regionalzüge. Erwartungsgemäss sind sowohl das Ankopplungsspektrum als auch das Transferspektrum für die beiden Zugtypen sehr ähnlich. Die Impulsanregung gibt eine gute Schätzung für das Transferspektrum Fundament - Geschossdecke. Für das Ankopplungsspektrum liefert sie hingegen ein falsches Bild. Die Fallvorrichtung wurde wohl zu nahe beim Haus und zudem noch auf der dem Freifeldsensor abgewandten Seite aufgestellt.

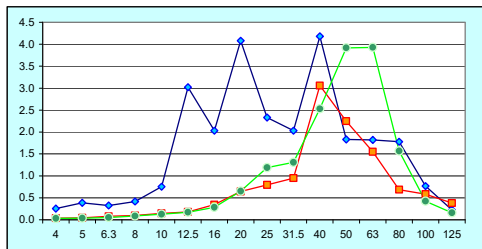


Bild 3.3.1a Mittelwertspektren aller Regionalzüge

Blau: Geschossdecke, EG
Orange: Fundament
Grün: Freifeld

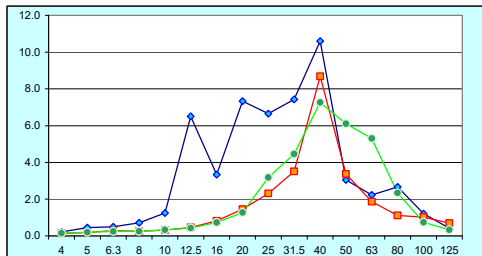


Bild 3.3.1b Mittelwertspektren aller Güterzüge

Blau: Geschossdecke, EG
Orange: Fundament
Grün: Freifeld

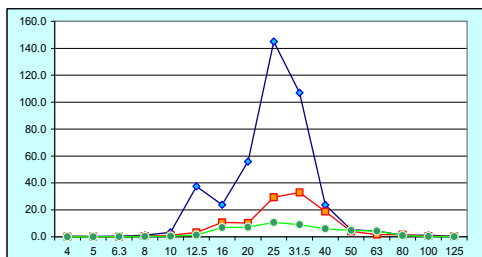


Bild 3.3.1c Spektrum der Impulsanregung

Blau: Geschossdecke, EG
Orange: Fundament
Grün: Freifeld

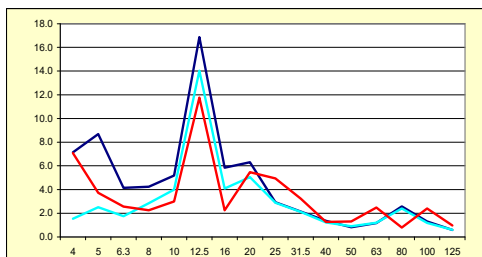


Bild 3.3.1d Transferspektren Fundament – Geschossdecke

Dunkelblau: Regionalzüge
Hellblau: Güterzüge
Rot: Impuls

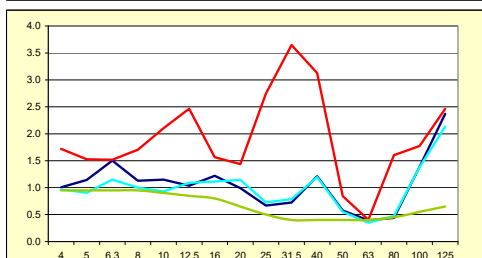


Bild 3.3.1e Ankopplungsspektren

Dunkelblau: Regionalzüge
Hellblau: Güterzüge
Rot: Impuls
Grün: das idealisierte Ankopplungsspektrum für ein Einfamilienhaus aus VIBRA 2

3.3.2 Winterthur

Auch hier wurde bei der Auswertung der Zugsdurchfahrten unterschieden zwischen Regionalzügen und Güterzügen. Die Erschütterungen der beiden Zugtypen sind hier ähnlich. Auffällig ist die starke Abminderung im 40 Hz Band auf dem Fundament. Diese zeigt sich auch in Bild 3.3.2c bei der Impulsanregung und hier insbesondere auch beim Freifeldsensor. Das Transferspektrum (Bild 3.3.2d) der Impulsanregung trifft die 1. Eigenfrequenz der Geschossdecke gut, hat aber noch zusätzlich zwei weitere Spitzen, die vermutlich durch die zu geringe Distanz zum Gebäude entstehen. Das Ankopplungsspektrum ist für Frequenzen < 40 Hz zu tief. Die Spitzen von 100-125 Hz beim Ankopplungsspektrum der Zugschütterung sind untypisch.

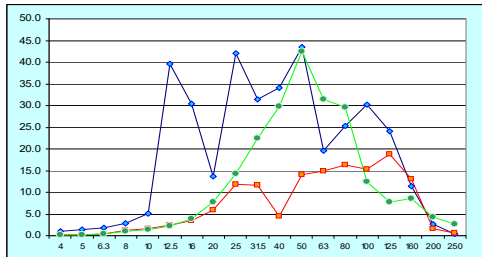


Bild 3.3.2a Mittelwertspektren aller Regionalzüge

Blau: Geschossdecke, EG
Orange: Fundament
Grün: Freifeld

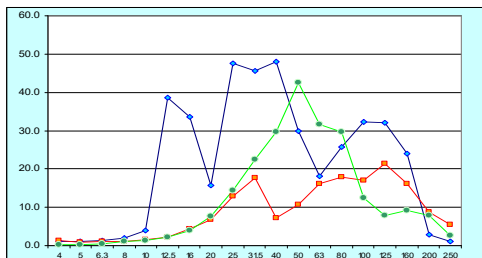


Bild 3.3.2b Mittelwertspektren aller Güterzüge

Blau: Geschossdecke, EG
Orange: Fundament
Grün: Freifeld

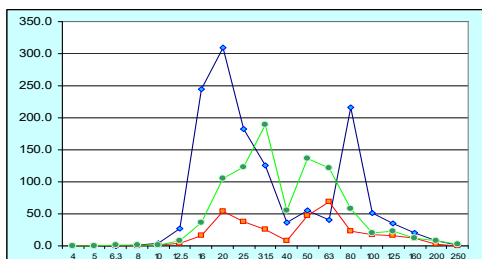


Bild 3.3.2c Spektrum der Impulsanregung

Blau: Geschossdecke, EG
Orange: Fundament
Grün: Freifeld

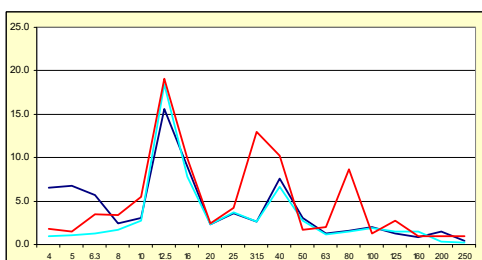


Bild 3.3.2d Transferspektren Fundament – Geschossdecke

Dunkelblau: Regionalzüge
Hellblau: Güterzüge
Rot: Impuls

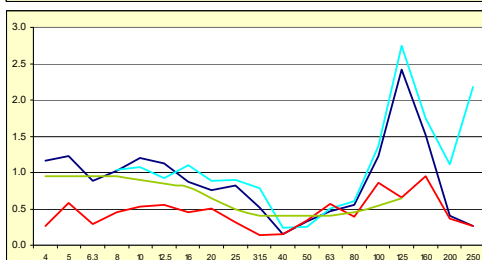


Bild 3.3.2e Ankopplungsspektren

Dunkelblau: Regionalzüge
Hellblau: Güterzüge
Rot: Impuls
Grün: das idealisierte Ankopplungsspektrum für ein Einfamilienhaus aus VIBRA 2

3.3.3 Zürich

Bei den Zugsdurchfahrten handelt es sich ausschliesslich um S-Bahn Züge. Die Eisenbahnlinie befindet sich ca. 25 m unter dem Haus in einem Tunnel. Das Fallgewicht wurde in ca. 25 m Entfernung vom Haus auf der Strasse aufgestellt. Das Transferspektrum Fundament – Geschossdecke schätzt hier nur die 1. Eigenfrequenz korrekt. Das Ankopplungsspektrum wird durch die Impulsanregung gut geschätzt. Interessant ist auch, dass der Energiegehalt der Erschütterungen durch Zug und Fallgewicht etwa gleich ist. Die Spitzenwerte des Zeitverlaufs für Zug bzw. Impuls beim Freifeldmesspunkt sind: 0.12 mm/s bzw. 1.0 mm/s, die RMS Werte sind 0.03 mm/s, bzw. 0.08 mm/s.

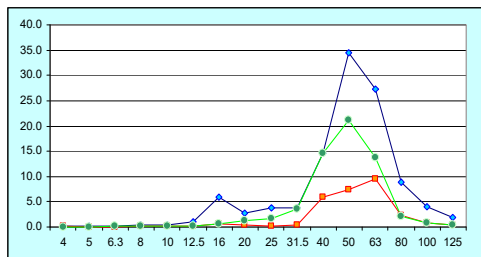


Bild 3.3.3a Mittelwertspektren aller Züge
(nur S-Bahn)

Blau: Geschossdecke, EG
Orange: Fundament
Grün: Freifeld

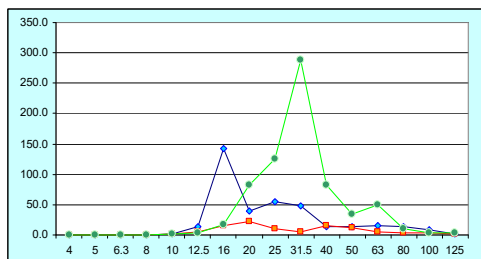


Bild 3.3.3b Spektrum der Impulsanregung

Blau: Geschossdecke, EG
Orange: Fundament
Grün: Freifeld

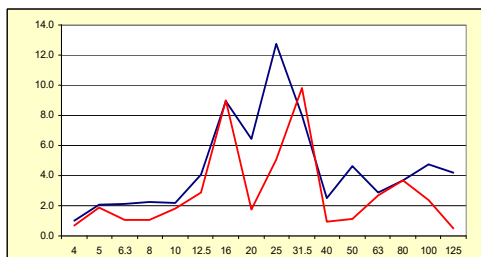


Bild 3.3.3c Transferspektren
Fundament – Geschossdecke

Dunkelblau: Alle Züge
Rot: Impuls

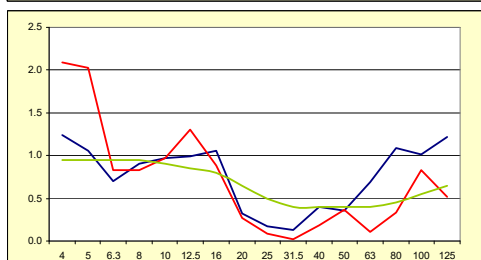


Bild 3.3.3d Ankopplungsspektren

Dunkelblau: Alle Züge
Rot: Impuls
Grün: das idealisierte Ankopplungsspektrum für ein Einfamilienhaus aus VIBRA 2

4 Schlussfolgerungen

Die Anregung durch einen Impuls ist einfach anzuwenden – schon der „Heel Drop“ bringt gute Resultate. Für die Simulation von stärkeren Erschütterungen leistet das Fallgewicht gute Dienste. Die Anregung durch das Fallgewicht ist sehr gut reproduzierbar, d.h. gleiche Amplitude und gleicher Frequenzgehalt.

Im Vergleich zu anderen Methoden (Sprengung, Rüttelplatte) ist die Installation einfach, billig und verursacht wenige Immissionen.

Bevor die Methodik für Prognosen von Eisenbahnerschütterungen eingesetzt werden kann, sind weitere Vergleichsmessungen mit Zugserschütterungen nötig, insbesondere müssen noch folgende Punkte geklärt werden:

- Richtige Distanz zum Gebäude
- Richtiger Ort
- Frequenzgehalt des Schlages (Beeinflussung der Impulsdauer durch Dämmmatten)
- Stärke des Impulses (Fallhöhe und Gewicht)