21.Symposium Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen

<u>Erschütterungsausbreitung beim Schienenverkehr</u> <u>Vertiefte Untersuchung zur Gebäudeankopplung</u>

Autoren: Philipp Huber, Adrian Egger

1. EINLEITUNG

1.1. Problemstellung

Bei der Prognose der durch Eisenbahnen induzierten Erschütterungen und dem abgestrahlten Körperschall wird mit den gängigen Prognosetools schrittweise frequenzabhängig in Terzbändern mittels Transferfunktionen von der Emission (Bahnstrecke an der Oberfläche oder im Tunnel) bis zur Immission gerechnet (*Abbildung 1-1*).

Ein Zwischenschritt davon ist die Berechnung des Terzbandspektrums der Erschütterungen am Gebäudefundament, welche sich ergibt aus dem Terzbandspektrum im Freifeld neben dem Gebäude multipliziert mit der Transferfunktion Freifeld – Gebäudefundament.



Abbildung 1-1: Gesamtmodell Erschütterungsausbreitung für Bahnstrecke an der Oberfläche oder im Tunnel mit Messpunkten Freifeld (neben Gebäude) und Gebäudefundament rot eingekreist

Diese Transferfunktion der Erschütterungen Freifeld – Fundament Gebäude bei Zugsvorbeifahrten zeigt in Funktion der Terzbandfrequenzen in den gängigen Prognosetools (basierend auf in situ Messungen) ab ca. 50 Hz einen Verlauf, der mit einfachen physikalischen Modellen nicht erklärt werden kann (*Abbildung 1-2*). Demnach nehmen die Erschütterungen je nach Gebäudetyp über einen breiten Frequenzbereich stetig ab, nehmen dann aber ab ca. 50 Hz wieder zu bis zu einem Faktor von ca. 1.0. Dies bedeutet, dass in den Terzbändern ab etwa 200 Hz die Erschütterungen am Gebäudefundament, d.h. in der Regel ca. 5 m unter Terrain, trotz Übergang Boden – Gebäude, genau gleich stark sind wie an der Oberfläche.



Abbildung 1-2: Transferfunktion AG LEO Freifeld – Gebäudefundament, aus [7]

Es stellt sich die Frage, ob es sich um einen realen Effekt oder allenfalls um einen Fehler / Effekt bei der Messung oder Auswertung handelt. Die Transferfunktion in diesem Frequenzbereich hat einen grossen Einfluss insbesondere auf die Prognose des abgestrahlten Körperschalls.

Die Studie hat das Ziel, den in Prognosetools verwendeten Verlauf der Transferfunktion Freifeld – Gebäudefundament zu erklären und falls nötig wird eine Verbesserung des Prognoseverfahrens vorgeschlagen. Dabei beschränkt sie sich auf die (wie auch im Normallfall übliche) Betrachtung der vertikalen Schwingungsrichtung.

Seite 3

2. RECHERCHE

2.1. Recherche Theorie und Literatur

Für die Recherche standen Fachartikel verschiedener Erschütterungs- / Baudynamik-Tagungen der letzten Jahre, insbesondere aus dem deutschsprachigen Raum, zur Verfügung. Zudem wurden Forschungsberichte der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin (BAM) zu diesem Thema durchgesehen. Die Liste der verwendeten Literatur, auf die in diesem Dokument verwiesen wird, findet sich in Kapitel 7.

In [2], *Abbildung 2-1* ist die Transferfunktion mit Mittelwert und Streubreite (135 Messungen in Deutschland) dargestellt. Der Anstieg bei höheren Frequenzen ist auch hier deutlich erkennbar. Allerdings beginnt hier der Anstieg bereits ab 31.5 Hz und die Daten enden bei 80 Hz.



Übergang Freifeld - Fundament

Abbildung 2-1: Mittelwert und Streuband Transferspektrum aus 135 Messungen in zweiund dreigeschossigen Ein- bzw. Mehrfamilienhäusern, aus [2]

In [1], Teil 2 zeigt sich bei einem einfachen Modell, bei dem die aufgehenden Wände als ein Stab modelliert wurden, ein interessantes Ergebnis, das gegenüber anderen numerischen Simulation besser zu den Erfahrungen aus Messungen passen, siehe *Abbildung 2-2*: Bis 50 Hz ist im untersten Geschoss der Übertragungsfaktor am kleinsten, steigt dann aber bis 100 Hz auf fast 1,0 wieder an. Dies hat mit einer Bauwerksresonanz bei 96 Hz zu tun, bei der die kleinsten Amplituden in Bauwerksmitte auftreten und das Fundament und das Dach verstärkt gegenphasig schwingen.

In [1], Teil 1 werden Messergebnisse von Erschütterungsmessungen an einigen Gebäuden diskutiert. Der Autor stellt dabei fest: «Als einheitliche Tendenz bei der Amplitudenverteilung über die Gebäudehöhe kann festgehalten werden, dass bei tiefen Frequenzen die Amplituden mit der Höhenlage zunehmen und dass bei hohen Frequenzen die Amplituden im Keller und im Erdgeschoss stärker sind als in den oberen Stockwerken.



Abbildung 2-2: Übertragungsfunktion Bauwerk-Boden beim Stabmodell mit Standarddaten, aus [1]



Abbildung 2-3: Erschütterungsübertragung Freifeld – Wand für unterschiedliche Gebäudeparameter, (a) Anzahl Geschosse $\Box 2$, $\circ 6$, $\Delta 10$, +15, x20, aus [4]

In *Abbildung 2-3* ist der Übertragungsfaktor ebenfalls berechnet mit einem Wand-Decken-Modell als Terzbandspektrum für eine unterschiedliche Anzahl Geschosse dargestellt. Je mehr Geschosse umso geringer ist der Übertragungsfaktor in den tiefen Frequenzen. Beim Modell liegen die Eigenfrequenzen der Decken bei 20 ± 2 Hz und wirken in diesem Terzband sozusagen als Tilger und minimieren die Wandschwingungen. Danach steigt der Übertragungsfaktor wieder an.

Abbildung 2-4 aus [5] zeigt gemittelte Terzbandspektren von Zugsvorbeifahrten gemessen in unterschiedlichen Tiefen im Bohrloch bei typischen CH-Verhältnissen mit geschichtetem Boden in Zürich Oerlikon beim Andreasturm. Sehr interessant ist, dass ab 40 Hz in der Tiefe höhere Schwingungsamplituden gemessen wurden als an der Oberfläche beim Freifeldmesspunkt.



Abbildung 2-4: Messungen im Bohrloch, gemittelte Terzbandspektren in vier unterschiedlichen Tiefen, aus [5]

Abbildung 2-5 [8] zeigt das Resultat von Schwingungsmessungen (vertikal und horizontal) an der Oberfläche und in 6 m Tiefe in einem Bohrloch. Aufgrund dieser Messungen erkennt man, dass die Amplituden zuerst bis zu einer bestimmten Frequenz f_0 (cutoff frequency) kontinuierlich stark abnehmen und danach oberhalb f_0 wieder allmählich mit grosser Streuung gegen 1,0 und sogar darüber ansteigen. Die Frequenz f_0 ist dabei abhängig von der Tiefe. Je tiefer die Messung, umso tiefer liegt die Frequenz f_0 , d.h. um tiefe Frequenzen massgeblich zu reduzieren muss das Gebäude möglichst tief gegründet werden.



Abbildung 2-5: Vergleich der Schwingungsamplituden in 6 m tiefem Bohrloch zur Oberfläche, aus [8]

2.2. Recherche Messberichte und eigene Messerfahrung

Die Autoren dieses Berichtes haben grosse Messerfahrung und haben in den vergangenen 20 Jahren über 100 Gebäude gemessen, bei denen unter anderem Messdaten im Freifeld (Gartenmesspunkt) und am Gebäudefundament erhoben wurden. Die Variabilität der Messumgebung ist sehr gross, was den lokalen Untergrund, die Emissionsquellen, Abstände sowie die Gebäude selbst betrifft. Die Streuung der Messresultate ist dementsprechend sehr gross. Gewisse Hypothesen können jedoch an diesen Daten untersucht werden.

Im Jahr 2003 fand in Wien die Fachtagung Lärm- und Erschütterungsarmer Oberbau (LEO) statt. In einem der Arbeitspakete der Arbeitsgruppe LEO wurde die Ausbreitung von Schwingungen und sekundärem Luftschall in Gebäuden untersucht [7]. Neben einer Vielzahl von eigenen Messungen kamen Messdaten der SBB-Datenbank und Ingenieurbüros von Österreich hinzu. So konnten für den Fachbeitrag gesamthaft 500 Terzbandspektren von 139 Gebäuden untersucht werden. Für den Aspekt der Gebäudeankopplung standen von total 82 Gebäuden Messdaten zur Verfügung.



Abbildung 2-6: Transferfunktion AG LEO Freifeld – Gebäudefundament, aus [7]

Bei Gebäudemessungen anderer Projekte gibt es immer wieder Beispiele, die von den gängigen mittleren Ankopplungsfunktionen, wie in *Abbildung 2-6* gezeigt, abweichen. Aufgrund dieser Beispiele kann untersucht werden, warum sie gegenüber dem Mittel über viele Messungen abweichen. Sind es mathematische, geometrische, physikalische oder messtechnische Effekte? Nachfolgend werden einige solcher Beispiele dokumentiert. Es werden Terzbandspektren am Freifeldmesspunkt neben dem Gebäude und am Gebäudefundament sowie die daraus abgeleiteten Übertragunsfunktionen gezeigt.

Beispiel 1: breitbandige Anregung



Abbildung 2-7: Beispiel breitbandige Anregung; oben: Immissionsspektren Garten- und Fundamentmesspunkt; unten: Übertragungsfunktion

Im Beispiel 1 liegt das Nutzsignal unterhalb 8 Hz im Grundrauschen, hat dafür auch bei 400 Hz noch grossen Signal-Rausch-Abstand. Anregung durch gebäudenahen Schienenverkehr auf steifem Untergrund.

In der Übertragungsfunktion werden die Werte unter 8 Hz durch das Grundrauschen beeinflusst, das beim Gartenmessunkt deutlich höher lag als am Fundament. Der Knickpunkt, ab wo die Übertragungsfunktion Richtung Faktor 1 strebt, ist erst bei 80-100 Hz. Ab dieser Frequenz fällt im Freifeld die Schwingungsenergie ab.



Beispiel 2: relativ schmalbandige, tieffrequente Anregung

Abbildung 2-8: Beispiel schmalbandige Anregung; oben: Immissionsspektren Garten- und Fundamentmesspunkt; unten: Übertragungsfunktion

Frequenz[Hz]

Im Beispiel 2 liegt das Nutzsignal unterhalb 8 Hz und bereits wieder ab 100 Hz im Grundrauschen. Ab 40 Hz fällt die Schwingungsenergie im Freifeld deutlich ab. Anregung durch LKW-Verkehr auf gebäudenaher Autobahn.

In der Übertragungsfunktion werden die Werte unter 8 Hz und über 100 Hz durch das Grundrauschen beeinflusst, das beim Gartenmessunkt auch hier deutlich höher lag als am Fundament. Der Knickpunkt, ab wo die Übertragungsfunktion Richtung Faktor 1 strebt, ist bereits bei 40 Hz. Ab dieser Frequenz fällt im Freifeld die Schwingungsenergie ab.



Beispiel 3: Einfluss der Fensterfunktion bei der FFT-Berechnung (Rechteck-Fenster)

Abbildung 2-9: Beispiel Einfluss Fensterfunktion (Rechteck); oben: Immissionsspektren Fundament- und Zimmermesspunkt; unten: Übertragungsfunktion

In den Beispielen 3 und 4 wird ein mathematischer Effekt gezeigt, der einerseits durch die

Wahl des Zeitfensters und andererseits durch die Wahl der Fensterfunktion bei der FFT der Frequenzberechnung entstehen kann. Der normale Zeitverlauf der Erschütterungen einer Zugsvorbeifahrt sieht fast schon so aus, wie wenn ein Hanning-Fenster (auch Kosinusquadratfenster genannt) über ein



Signal mit konstanter Schwingungsamplitude gelegt worden wäre. Die Erschütterungsamplituden vor und nach der Vorbeifahrt liegen nahe bei null. Für die Frequenzanalyse eines ausgeschnittenen Zeitfensters braucht es im Normalfall keine Fensterfunktion. Damit bleibt der gesamte Frequenzinhalt des Zuges erhalten. Es kann aber auch vorkommen, dass beim Zeitfenster zu Beginn und am Ende immer noch Signalanteile deutlich über Null vorhanden sind. Dann gibt es bei der Anwendung der FFT den sog. Leakage-Effekt, das Spektrum wird zu breit. Es wird sozusagen verschmiert. Im Beispiel 3 wird das bei einzelnen Spektren des Zimmers ab 100 Hz deutlich erkennbar (könnte geradesogut bei einem Freifeldspektrum sein). Am Fundament ist dies nicht zu erkennen. Hier sind die Amplituden ausserhalb der effektiven Zugsvorbeifahrt anscheinend wesentlich geringer als auf der Zimmerdecke, was zu keinem Leakage-Effekt führt.

In der Übertragungsfunktion werden dadurch die Werte über 100 Hz durch den Leakage-Effekt stark beeinflusst und das Mittel über alle Züge wird zu höheren Frequenzen hin immer stärker erhöht.



Beispiel 4: Einfluss der Fensterfunktion bei der FFT-Berechnung (Hanning-Fenster)

Abbildung 2-10: Beispiel Einfluss Fensterfunktion (Hanning); oben: Immissionsspektren Fundament- und Zimmermesspunkt; unten: Übertragungsfunktion

Wird bei der FFT wie in Beispiel 4 ein Hanning-Fenster über die gleichen Zeitausschnitte gelegt, so wird der Leakage-Effekt praktisch eliminiert und die Übertragungsfunktionen und das Mittel wird bei den Frequenzen über 100 Hz nicht mehr beeinflusst. Allerdings ist mit

der Anwendung der Fensterfunktion nicht sicher, ob gewisse Frequenzanteile einer Zugsvorbeifahrt nicht vermindert werden, da sich die meist massgebende Lokomotive am Beginn oder Ende des Zuges befindet und diese Signalanteile bei der Fensterfunktion am meisten verändert werden.

Beispiel 5 zeigt den Einfluss einer teilelastischen Lagerung auf die Übertragungsfunktion, wobei das Gebäude nur in einzelnen Abschnitten teilelastisch gelagert ist und somit ein direkter Vergleich mit nicht elastisch gelagerten Bereichen möglich ist. Die teilelastische Lagerung reduziert dabei wie gewünscht die für den abgestrahlten Körperschall relevanten Erschütterungen auf der Fundamentplatte.

Beispiel 5: Teilelastische Lagerung eines langen Gebäudes entlang einer Eisenbahnstrecke



Abbildung 2-11: Beispiel Einfluss einer teilelastischen Lagerung auf die Übertragungsfunktion

3. HYPOTHESEN

3.1. Hypothese 1

Hohe Frequenzen werden im Gegensatz zum Erdreich in der Gebäudestruktur besser weitergeleitet. Liegt das Gebäude entlang einer Bahnlinie, werden die hohen Frequenzen über die ganze Länge des Gebäudes eingetragen und zum Messpunkt am Fundament geleitet (Nebenwegübertragung). Beim Messpunkt Freifeld kommt hochfrequent jeweils nur ein kurzer Anteil des gesamten Zuges an.

Untersuchung:

Das Zeitsignal einer Lokvorbeifahrt wird in mehrere Zeitfenster unterteilt und davon jeweils die Transferfunktion gebildet. Diese wird der Transferfunktion mit klassischer Auswertung (average terzband spectra über gesamte Vorbeifahrt) und MaxHold gegenübergestellt.

Fazit:

Die Wahl des Zeitfensters beeinflusst die Transferfunktion. Die Transferfunktion nimmt ab 80 – 100 Hz gegenüber der klassischen Auswertung zu, wenn ein Zeitfenster gewählt wird, wo die Lok nicht direkt vor den Messpunkten liegt. Die Transferfunktionen sind jedoch praktisch identisch für die Fälle MaxHold-Spektrum, verkürztes Zeitfenster über das Maximum und Zeitfenster ganze Vorbeifahrt. Dies bedeutet, dass die Lage der Quelle zum Messpunkt einen Einfluss hat und unterschiedliche Übertragungswege z.B. über die Bodenplatte die Transferfunktion beeinflussen.



Abbildung 3-1: Einfluss der Wahl des Zeitfensters und der Methode der Terzband-Spektralanalyse auf die Übertragungsfunktion

3.2. Hypothese 2

Die Schwingungsamplituden unter Geländeoberkante (kompaktierte Bodenschicht) sind ab einer bestimmten Frequenz höher als an der Oberfläche (weiche Bodenschicht). Mit dem Ankopplungsverlust auf die Bodenplatte resultiert schlussendlich eine Transferfunktion, die den bisher gemessenen entsprechen.

Untersuchung:

Eine weitere Bohrlochmessung in Dübendorf Stettbach mit Anregung S-Bahn im Tunnel und Tram an der Oberfläche wurde durchgeführt.

Fazit:

Die Messungen zeigen im Bohrloch deutlich verstärkte Erschütterungen ab 80 Hz aufwärts, sowohl bei Anregung durch Züge wie auch Tram und ambient vibration.



Abbildung 3-2: Erschütterungen im Bohrloch Tiefe ca. 9m im Vergleich zur Oberfläche bei Anregung Tram (links oben) und Züge (rechts oben)

Die Anregung durch Schienenverkehr im hohen Frequenzbereich ist zu schwach. Der Signal-zu-Noise-Abstand ist zu klein und darum ergibt sich der Übertragungsfaktor 1,0 bei Frequenzen um 100 Hz.

Nachweis:

Abbildung 2-8 zeigt ein Beispiel wo die hochfrequenten Signalanteile im Grundrauschen verschwinden und die Transferfunktion gegen Faktor 1 tendiert. Dieses Phänomen kann also in gewissen Fällen diesen Verlauf der Transferfunktion erklären. Es gibt aber genügend andere Beispiele mit hohem Signal-Noise Abstand wie z.B. *Abbildung 2-7*, bei denen die Transferfunktionen hochfrequent ebenfalls gegen 1 tendieren.

Fazit:

Ein zu kleiner Signal-zu-Noise Abstand kann den hochfrequenten Verlauf der Übertragungsfunktion in einzelnen Fällen erklären, ist aber in den meisten Fällen nicht ausschlaggebend.

3.4. Hypothese 4

Die erhöhten Werte ab 50 Hz entstammen einer Resonanz der aufgehenden Wände, bei der die Wandenden gegenphasig schwingen entsprechend Literatur [1].

Dazu wurden bisher keine weiteren Untersuchungen durchgeführt und es ist dazu keine Messung bekannt, die näher untersucht werden könnte. Mit der Anordnung von Sensoren am Deckenrand bzw. Wandfuss in verschiedenen Stockwerken (zuunterst, zuoberst und ein paar Messpunkte dazwischen) könnte das schwingungstechnische Verhalten der Wand in Wandlängsrichtung erfasst werden.

3.5. Hypothese 5

Das Gebäude wird im Gegensatz zum Freifeld Messpunkt direkt über Luftschall im Frequenzbereich 50 – 100 Hz angeregt (Nebenwegübertragung).

Untersuchung:

Da ein Gebäude bei einer Zugsvorbeifahrt in Tunnellage nicht über Direktschall angeregt wird, kann diese Hypothese anhand solcher Beispiele untersucht werden.

Fazit:

Diese Hypothese kann, wie in *Abbildung 3-3* gezeigt, widerlegt werden, da die Übertragungsfunktionen bei Tunnellage eine ähnliche Charakteristik zeigt wie bei Strecken an der Oberfläche.



Abbildung 3-3: Übertragungsfunktion bei Zugsvorbeifahrt im Tunnel, d.h. ohne Direktschallanregung

4. ZUSAMMENFASSUNG

- Die Übertragungsfunktion Freifeld Gebäudefundament, welche in frequenzabhängigen Erschütterungsprognoseverfahren verwendet wird, zeigt einen charakteristischen Verlauf mit einer Abnahme in den tiefen Frequenzen und anschliessend einer zunehmenden Ankopplung bei höheren Frequenzen, welche basierend auf der vorliegenden Untersuchung plausibel ist und einen physikalischen Hintergrund hat.
- Mehrere Bohrlochmessungen zeigen, dass die Erschütterungen in der Tiefe im Vergleich zu den Freifeldmesspunkten tieffrequent zuerst abnehmen und dann ab einer bestimmten Frequenz wieder zunehmen womit diese den charakteristischen Verlauf der Übertragungsfunktion bestätigen. Die vermeintlich zunehmende Ankopplung könnte demnach durch die unterschiedliche Position der Messpunkte (Gartenpunkt an der Oberfläche, Fundamentpunkt im Untergeschoss in mehreren Metern Tiefe) erklärt werden.
- Die Übertragungsfunktion Freifeld Gebäudefundament kann von der Wahl des gewählten Zeitausschnitts für die Frequenzanalyse bzw. von der Position der Quelle zum Messpunkt abhängen.
- Eine saubere Signalauswertung, insbesondere ein genügend grosser Signal-zu-Noise Abstand und die Vermeidung von Leakage-Effekten ist wichtig für die korrekte Ermittlung der hochfrequenten Anteile bei Terzbandspektren.
- Der Einfluss von Wandschwingungen und -eigenfrequenzen auf die Übertragungsfunktion konnte messtechnisch noch nicht bestätigt werden.

5. OFFENE FRAGEN

Die Untersuchung hat gezeigt, dass es mehrere Erklärungen für einen Anstieg der Übertragungsfunktion bei höheren Frequenzen gibt. Aber welcher ist der dominierende Effekt, der bei der grossen Mehrheit der Messungen konsistent auftritt? Das ist aufgrund der durchgeführten Untersuchungen an verschiedenen Beispielen nicht abschliessend zu beantworten.

Der grössere Anteil hochfrequenter Signalanteile mit zunehmender Tiefe ist sicher ein starkes Argument. Durch den weichen Boden an der freien Oberfläche existiert in vielen Fällen oberflächennah ein grosser Gradient in der Ausbreitungsgeschwindigkeit, was durch die erhöhte Dämpfung in Oberflächennähe auch den Unterschied im Frequenzgehalt gegenüber kompaktiertem Boden erklärt. Warum sehen wir aber immer noch den gleichen Effekt bei Gebäuden ohne Untergeschoss, also ohne grosse Tiefendifferenz der Messpunkte (vgl. *Abbildung 2-6*)? Reicht der Unterschied in der Bodensteifigkeit unter dem Gebäude gegenüber dem Garten auch bei solchen Gebäuden aus, den gleichen Effekt zu erzielen?

Muss für Prognoseberechnungen für eine Situation Gebäude über einem Tunnel eine andere Übertragungsfunktion für die Gebäudeankopplung gegenüber einer Situation mit der Quelle an der Oberfläche gewählt werden? Die Schwingungen kommen bei einer Tunnelsituation direkt über Raumwellen am Gebäudefundament an, ohne eine Oberflächenwelle ausgebildet zu haben und somit ist auch der normale Gartenmesspunkt an der Oberfläche für die Ankopplungsfunktion nicht mehr massgebend, sondern ein virtueller Messpunkt in Fundamenttiefe.

6. FAZIT

Die offenen Fragen zeigen, dass der massgebende physikalische Effekt aufgrund dieser Untersuchungen noch nicht klar ist. Mit einem Boden-/Bauwerk-Simulationsmodell könnte versucht werden, mittels FE-Berechnung verschiedene Szenarien (unterschiedlichen Quellpositionen, Variation der Bodenparameter, Fundationstiefe und Anzahl Geschosse des Gebäudes etc.) nachzurechnen um mit den gemessenen Effekten vergleichen zu können.

LITERATURVERZEICHNIS

7.

- [1] Erschütterungen im Bauwesen: Messergebnisse an verschiedenen Gebäuden und eine einfache Berechnung von Fundament-, Wand- und Deckenschwingungen. Auersch, L., Said, S., Schmid, W. und Rücker W., Bauingenieur 79 (4/6), 2004, S. 185-192 (Teil 1) und S. 291-299 (Teil 2)
- [2] Taschenbuch der technischen Akustik, Prof. M. Heckl, Dipl.-Phys. H.A. Müller,2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1994
- [3] Task D: Analysis of simple prediction model, Validation report, RENVIB II, Phase 3, UIC, SBB AG, Bern, 15th October 2003
- [4] Building response due to ground vibration simple prediction model based on experience with detailed models and measurements, Auersch, L., International Journal of Acoustics and Vibrations 15 (2010) 101-112.
- [5] Eine Schlitzwand als Erschütterungsbarriere: Wie viel darf man erwarten? Dr. D. Gsell, Ziegler Consultants, Zürich CH, 19. Symposium Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, 03.06.2016
- [6] Prediction of building vibration induced by underground trains using a coupled waveguide Finite / Boundary Element method, Jin, Qiyun, Thompson, David, Lurcock, Daniel, Institute of Sound and Vibration Research, University of South-ampton, Southampton SO17 1BJ, UK, IWRN12, Terrigal 12-16 September 2016
- [7] Ausbreitung von Schwingungen und sekundärem Luftschall in Gebäuden; Fachtagung an der TU Wien: Lärm- und erschütterungsarmer Oberbau, Arbeitspaket 3b: Gebäude, A. Egger, Rutishauser Ingenieurbüro für Bau, Verkehr und Umwelt, Zürich, 6.-7. März 2003
- [8] Effects of frequency and depth on attenuation of ambient ground vibration, H. Amick, M. Gendreau, Blong Xion, N. Simos, NOISE-CON 2010, Baltimore, Maryland, 2010 April 19- 21