

Erschütterungs- und Sekundärschallprognosen im Bahnbau mit dem VibroScan.at (advanced technology) Verfahren

Wolfgang Steinhauser

KURZFASSUNG

Eine bewährte Methode für die Erschütterungs- und Sekundärschallprognose bei Bahn-Neubaustrecken und insbesondere bei Tunnelabschnitten beruht darauf, mittels Ersatz-Schwingungserreger im Rohbaustadium auf der Tunnelsohle Erschütterungen zu erzeugen und deren Übertragung zu den Anrainern zu messen. Von einfachen Baurüttlern ausgehend, sind Schwingungserreger speziell entwickelt worden, die nach verschiedenen Anregungsprinzipien arbeiten und unterschiedliche Frequenz- und Anregungsbereiche besitzen. Methodisch gesehen handelt es sich dabei um Experimente, deren Güte davon abhängt, wieweit die Versuchsparameter jenen der Erschütterungsemissionen eines Zuges entsprechen, d.h. in welchem Ausmaß die Experimentalanordnung das Äquivalenzprinzip erfüllt.

Das VibroScan advanced technology Verfahren erfüllt diese Anforderungen zu einem großen Ausmaß, wie etwa hinsichtlich Erregerkraft, Frequenzband und Anregungsfläche. Dementsprechend werden die Frequenzanforderungen der Bahnerschütterungsnorm ISO 14837-1 in vollem Umfang erfüllt. Ein entscheidender technischer Fortschritt ist es, dass die Anregungskraft während eines Frequenz-Sweeps nicht nur gemessen wird sondern dazu verwendet wird, durch eine autoadaptive Steuerung automatisch die Wechselwirkung mit dem Untergrund laufend zu kompensieren und somit die Anregungskraft über das ganze Spektrum zu stabilisieren. Beispiele des Einsatzes des VibroScan.at Verfahrens beim Wr. U-Bahnbau zeigen, wie dadurch das Einfügungsdämmmaß eines Masse-Feder Systems optimal auf die örtlich vorhandenen Erfordernisse und Randbedingungen abgestimmt werden kann.

ABSTRACT

An approved method to forecast vibrations and ground-borne noise of metro lines, especially in tunnel sections, is based on simulating the vibrations in an early stage of tunnel construction and measure the transfer to the abutting buildings. Starting with very simple shaker systems, vibrators of various exciting types have been developed to simulate vibrations in a broadband frequency range. These experiments especially depend on the closeness of agreement of the test parameters to those from train vibrations, i.e. to which degree equivalence is achieved.

The VibroScan advanced technology method conforms to these requirements very well, especially concerning power, frequency range and area of load transfer. Correspondingly the frequency requirements from the international rail vibration standard ISO 14837-1 are totally covered. The essential advantage of this method is, that the power output of the vibrator is not only measured but also used for an autoadaptive compensation of the ground force feedback, thus stabilizing the real power input to the subsoil over the entire frequency range. Examples from Vienna underground sections under construction demonstrate how the VibroScan.at method is used to evaluate the insertion loss parameters of floating-track systems according to local requirements and conditions.

1. AUFGABENSTELLUNG

Die Größe von Erschütterungsimmissionen wird bekanntlich sowohl vom Erschütterungserreger selbst als auch von den geodynamischen Bedingungen entlang des Ausbreitungsweges im Untergrund sowie dem baulastdynamischen Verhalten des Gebäudes, in dem die Erschütterungsimmissionen wahrgenommen werden, zusammen mit den unvermeidlichen dynamischen Wechselwirkungen zwischen diesen Teil-Schwingungssystemen, die über Resonanz oder Schwingungsabschwächung entscheiden, bestimmt.

Hinsichtlich von Schienenverkehrserschütterungen ist es daher bei Neubauvorhaben in bebautem Gebiet erforderlich, Immissionsprognosen zu erstellen. Es ist unvermeidlich, dass die Genauigkeit derartiger Prognosen begrenzt ist. Um die Unsicherheiten möglichst gering zu halten, ist es notwendig, das dynamische Verhalten der verschiedenen Teilsysteme möglichst genau zu erfassen. Dazu eignen sich Untersuchungen mit Hilfe einer Ersatzanregung durch einen Schwingungsgenerator, da damit auch die vorhin genannten, entscheidenden Wechselbeziehungen integral mit erfasst werden können. Dadurch kann geklärt werden, ob die Immissionsschutzkriterien der jeweils anzuwendenden Norm (beispielsweise ÖNORM S 9012 oder DIN 4150-2) eingehalten werden können, oder auf die lokalen Bedingungen mit ihren vorhin angeführten wechselseitigen dynamischen Abhängigkeiten abgestimmte Unterschottermatten, Masse-Feder Systeme etc. eingebaut werden müssen

Da – wie überall im Bauwesen – auch beim Bahnbau Bauformen, die leicht und einfach herstellbar sind, bevorzugt und andere Erfordernisse erst in zweiter Linie berücksichtigt werden, ist auch die Gestaltung von Bahnbauwerken, wie Tunnel oder Brücken, hinsichtlich der Schwingungseigenschaften zu berücksichtigen. Derartige Objekte müssen aus Gründen der Wechselwirkung noch der Erschütterungsquelle zugeordnet werden. Im folgenden sind daher auch die Möglichkeiten zu diskutieren, die Schwingungsgeneratoruntersuchungen bieten, um die Schwingungsempfindlichkeit von Bahnbauwerken, aber auch des Fahrwegs zu beurteilen, die die Erschütterungsanregungen von Zügen frequenzabhängig beeinflussen.

Methodisch gesehen handelt es sich dabei um Experimente, deren Aussagekraft davon abhängt, wieweit die Versuchsparameter jenen der Erschütterungsemissionen eines Zuges entsprechen, d.h. in welchem Ausmaß die Experimentalanordnung das Äquivalenzprinzip erfüllt. Diese wird für den Schwingungsgenerator, der für das VibroScan.at (advanced technology) Verfahren eingesetzt wird, geprüft. Darauf aufbauend werden dann die Methode zur Kontrolle der dynamischen Rückwirkung der Untergrundelastizität auf das Generatorsignal sowie die dabei anfallenden zusätzlichen Informationen dargestellt.

2. ÄQUIVALENZKRITERIEN

Für die Erschütterungsanregung eines Zuges sind insbesondere folgende Parameter von Bedeutung, für die daher äquivalente Versuchsbedingungen anzustreben sind:

- Frequenzband der Erschütterungen
- Fläche der Kraftereinwirkung
- maximale Bodenpressung
- Größe der dynamischen Lasten
- ungefederte Radsatzmassen
- maximale Achslasten

Die von Zügen ausgehenden Erschütterungsemissionen besitzen eine große Variationsbreite der angeregten Frequenzbänder, wie die beiden extremen Beispiele von Abb.1 für innerstädtische Schotterbettstrecken zeigen. Wesentliche Emissionsfrequenzen können somit im Spektralbereich von 2-230 Hz liegen, was eine Bandbreite von fast 7 Oktaven ergibt. Bei einer Festen Fahrbahn treten im Allgemeinen noch höhere Emissionsfrequenzen auf, wie aus Abb.2 ersichtlich ist. Untergrundaufbau und Oberbauausführung sind somit für die Emissionsfrequenzen zumindest ebenso wichtig wie zugtechnische Kenngrößen (Fahrtgeschwindigkeit, Achsabstände usf.).

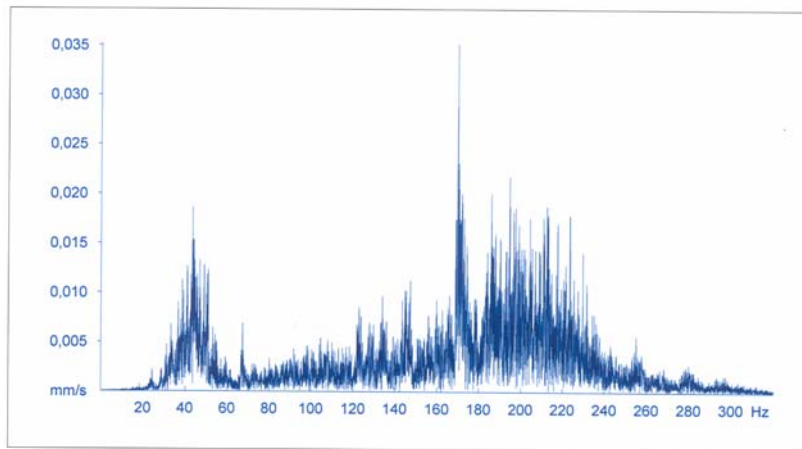
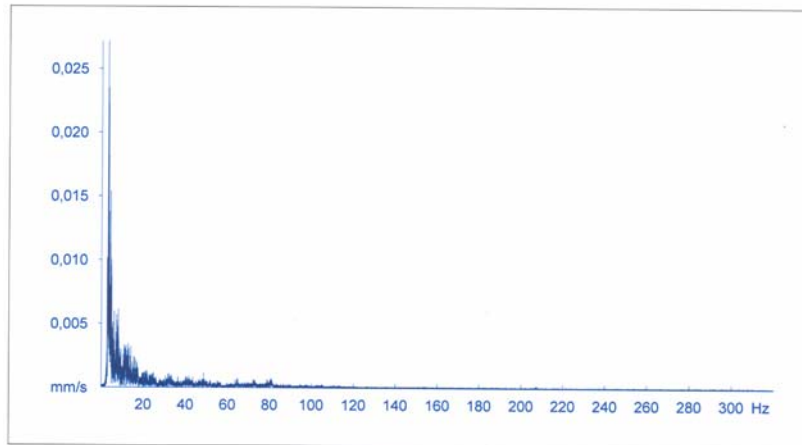


Abb.1: Variationsbreite der Emissionsspektren von Zügen auf Schottergleis in 10 m Distanz bei verschiedenen Untergrundbedingungen
 oben: Strecke auf weichen Seesedimenten
 unten: Strecke auf steifen Tertiärsedimenten

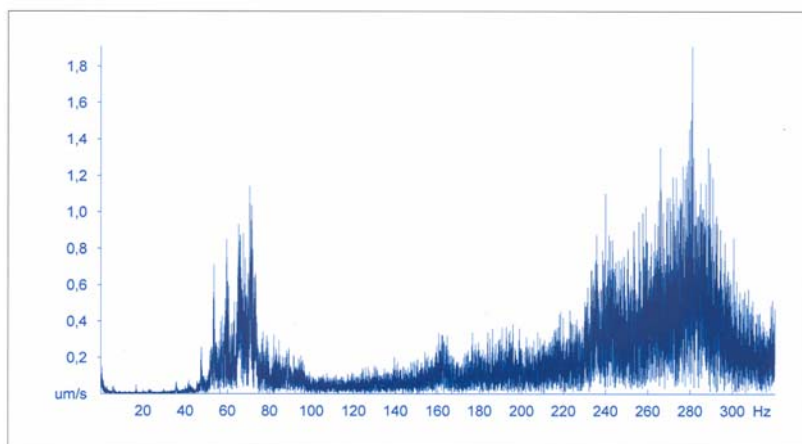


Abb.2: Charakteristisches Emissionsspektrum auf fester Fahrbahn

Die Fläche der Krafteinwirkung in den Untergrund lässt sich aus den Schwellenabmessungen und der Schotterbetthöhe von 30 cm unter der Schwellensohle mit 2,1 m² für den ungünstigsten Fall (Achse über Schwelle) berechnen.

Die Achslasten streuen in einem Bereich von etwa 100-225 kN und die Bandbreite der ungefederten Radsatzmassen umfasst rund 1200-400 kg [SGP, 1994]. Die Größe der auf die Schienen wirkenden dynamischen Last hängt außerdem noch von Fahrtgeschwindigkeit, Gleislage etc. ab und kann daher in einem Bereich von 30-100 kN streuen [Lichtberger, 2004].

3. EMISSIONSÄQUIVALENTE ERSATZANREGUNG

Bei der Ersatzanregung der Zugserschütterungen durch einen Schwingungsgenerator bildet es selbstverständlich das Ziel, die ganze Bandbreite der vorhin beschriebenen Bahnparameter zu erfassen, bzw. wo eine Parametervariation technisch nicht möglich ist, sich möglichst am ungünstigsten Fall zu orientieren. Dies betrifft etwa die ungefederte Radsatzmasse: hier bilden die hohen Radsatzmassen der Triebfahrzeuge die Zielvorgabe, mit der die Erregermasse des Schwingungsgenerators vergleichbar sein soll. Besondere Bedeutung kommt auch der Übereinstimmung der Größe der belasteten Fläche sowie der statischen und dynamischen Flächenlasten zu.

In Tab.1 ist für den modernen VibroScan Schwingungsgenerator (Abb.3) dieser Vergleich mit den Zugparametern wiedergegeben.

Tab.1: Vergleich dynamischer Parameter Zug – VibroScan Schwingungsgenerator

| Parameter | Zug | Generator |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|
| ungefederte Radsatzmasse/Erregermasse | 1200-4000 kg | 3505 kg |
| maximale Erregerkraft | ≤100 kN | ≤227 kN |
| belastete Fläche | 2,1 m ² | 2,0 m ² |
| Last auf Planum/Grundplatte | ca. 100-225 kN | 193 kN |
| maximale Flächenlast | ≤ 15 N/cm ² | ≤ 19 N/cm ² |
| Frequenzband | 3-230 Hz | 1-250 Hz |
| Frequenzcharakteristik | breitbandig | Sweep |



Abb.3: Hochleistungs-Schwingungsgenerator beim Einhub in einen Wiener U-Bahn-Bauschacht

Wie daraus ersichtlich ist, sind die Kennwerte des VibroScan Generators den Parametern der Zugerschütterung in hohem Maße äquivalent, und zwar den jeweils ungünstigsten Bedingungen, welche für Prognosezwecke maßgeblich sind. Da die Erregerkraft dosierbar ist, bereitet es keine Schwierigkeiten, sie auf eine bahnäquivalente Größe einzustellen. Andererseits ist es bei erschütterungsintensiven Baustellen zweckmäßig, die hohe Anregungskraft des Schwingungsgenerators zur Verbesserung des Nutzsignal/Störpegelverhältnisses zu verwenden.

Für das Resonanzverhalten des Untergrunds, den man hierzu als Ein-Massenschwinger approximieren kann, ist aber neben der Eigenfrequenz auch das Dämpfungsverhalten maßgeblich. Um eine realistische, den Schienenverkehrsbedingungen entsprechende Übertragungsfunktion im Frequenzspektrum zu erhalten, ist daher auch bezüglich der Systemdämpfung bestmögliche Äquivalenz anzustreben.

Da das Eigenschwingverhalten des Teilsystems „fahrender Zug – Fahrweg“ auch durch die geometrischen Dimensionen gesteuert wird, bilden Fläche und Stärke der Krafteinwirkung Steuerungsparameter (Steinhauser, 2007). Wie aus Abb.4 ersichtlich ist, liegen diese Kraftübertragungsfunktionen für Züge aller Art in einem schmalen Band und sind durch eine geringe Resonanzüberhöhung und somit relativ hohe Systemdämpfung gekennzeichnet. Die Übertragungsfunktion des VibroScan Schwingungsgenerators ist hierzu äquivalent und liegt genau in diesem Band. Generatoren mit kleineren Grundplatten, wie sie ebenfalls für Schwingungsuntersuchungen verwendet werden, besitzen eine um ein Vielfaches größere Resonanzüberhöhung und sind deshalb für Fragen der Schienenverkehrserschütterungen schlecht geeignet, da sie eine ausgeprägt nichtlineare Kraftanregung bewirken.

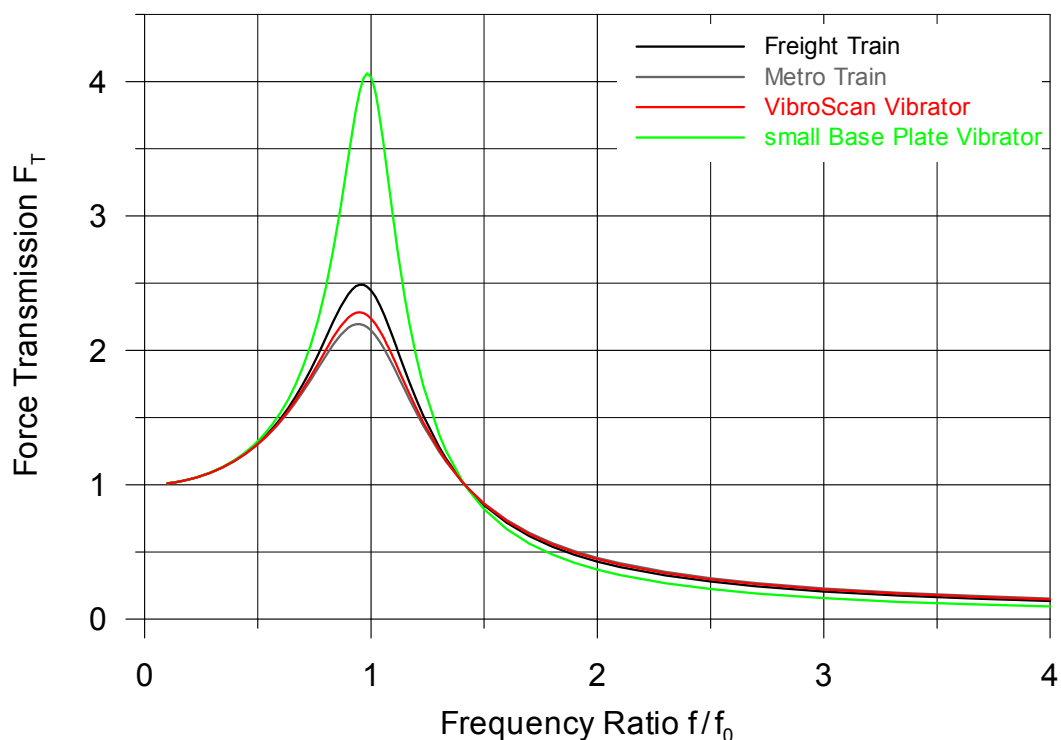


Abb.4: Bandbreite der Resonanzkurven des gekoppelten Systems Zug-Fahrweg für verschiedene Zug- und Schwingungsgeneratortypen

4. VIBROSCAN ADVANCED TECHNOLOGY VERFAHREN

Unter konsequenter Umsetzung der vorhin diskutierten Äquivalenzkriterien wurde schrittweise das VibroScan.at Verfahren zur Erschütterungs- und Sekundärschallprognose entwickelt.

Das Ziel war es dabei, eine Schwingungsanregung zu erzielen, die der menschlichen Erschütterungswahrnehmung entspricht, wofür bekanntlich der Frequenzbereich von 1-80 Hz maßgeblich ist. Dieses Wahrnehmungsvermögen verläuft für das Frequenzband 8-80 Hz – und somit für den Großteil des interessierenden Spektralbandes – schwingungsgeschwindigkeitsproportional, wie aus der W_m -Frequenzbewertungsfunktion nach ISO 2631-2 ersichtlich ist (Abb.5).

Für die Sekundärschallimmissionen ist dieses Frequenzband zu schmal. Hiefür sieht internationale Norm ISO 14837-1 das Frequenzband 16-250 Hz vor. Die ISO-Norm hat damit auf die zunehmende Bedeutung der Sekundärschallimmissionen reagiert. Dazu muss auch die Ausbreitung von Erschütterungen mit Frequenzen $f > 80$ Hz genau erfasst werden, da die Schallwahrnehmung gemäß A-Bewertungskurve in diesem Frequenzband mit steigenden Frequenzen rasch anwächst (Abb.6). Diese Frequenzbewertung bewirkt selbst bei Trassen in verhältnismäßig weichen Sedimenten, dass hinsichtlich des Sekundärschalls hohe Frequenzen maßgeblich werden. Bei einer Schwingungsgeneratoruntersuchung würde die Nichtanregung dieser Frequenzbänder eine beträchtliche Unterschätzung der Sekundärschallimmissionen bewirken.

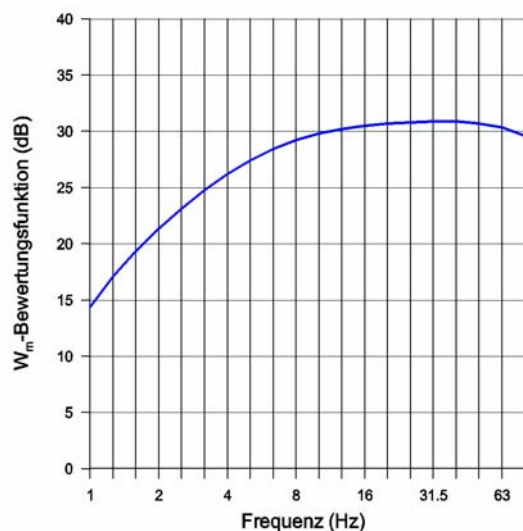


Abb.5: W_m -Bewertungskurve der Schwingungsgeschwindigkeit für die menschliche Erschütterungswahrnehmung nach ISO 2631-2

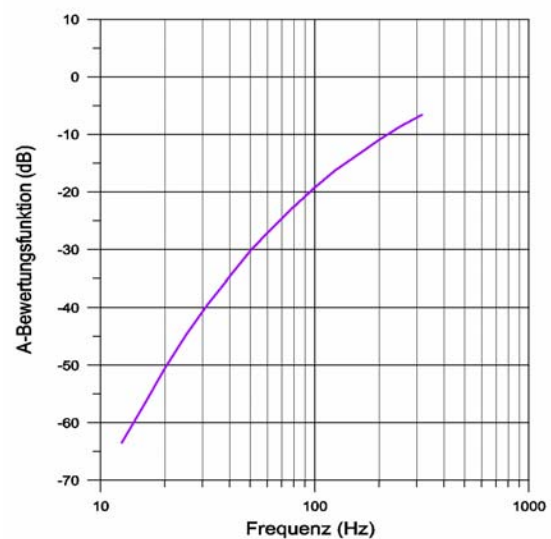


Abb.6: A-Bewertungskurve des Schalldruckpegels des abgestrahlten Sekundärschalls

Durch die Absenkung der unteren Arbeitsfrequenz auf 1 Hz beim VibroScan.at Verfahren kann auch das Schwingungsverhalten der Anrainergebäude untersucht werden, weil die Eigenfrequenzen von Wohngebäuden vorwiegend im Bereich von 2-15 Hz liegen. Dadurch können auch die fallweise auftretenden Aufschaukelungen von Deckenschwingungen durch Bauwerksschwingungen erfasst werden.

Um bei diesen Untersuchungen Verzerrungen durch das nichtlineare Verhalten der gekoppelten Teilschwingungskreise zu vermeiden, die unter Umständen beträchtliche Größe erreichen können, ist die Form der Ersatzanregung entsprechend sorgfältig zu gestalten, wie bereits das Beispiel von Abb.4 zeigt. Die bedeutet, dass sie nicht nur die Äquivalenzkriterien

in Bezug auf den realen Erschütterungsverursacher erfüllen muss (bei Zügen sind dies ungefederte Radsatzmassen, dynamische Flächenlast, Frequenzband, maximale Achslast etc.), sondern auch die dynamische Kraft der Ersatzanregung über das gesamte zu untersuchende Frequenzband hin möglichst konstant bleiben muss, u.zw. unter Berücksichtigung der Rückkopplung mit dem Untergrund. Es ist somit der frequenzabhängige Widerstand des Bauwerks oder Untergrunds gegen die dynamische Krafteinwirkung, der als Impedanz bezeichnet wird, zu ermitteln und zu kompensieren.

5. IMPEDANZ UND ADMITTANZ

Die Impedanz Z beschreibt den Widerstand einer Struktur gegen eine dynamische Kraft F als Verhältnis von anregender Kraft zu der von ihr hervorgerufenen Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz

$$Z(f) = \frac{F(f)}{v(f)}$$

Gleichwertig ist es, die Anregbarkeit einer Struktur zu Schwingungen durch eine einwirkende Kraft zu beschreiben, was als Admittanz Y (mobility) bezeichnet wird und den Kehrwert der Impedanz darstellt.

$$Y(f) = \frac{v(f)}{F(f)}$$

Obwohl somit beide Größen gleichwertig sind, wird im Umweltschutz die Admittanz bevorzugt, da größere Admittanzbeträge auch größere Schwingungsempfindlichkeit eines Systems bedeuten und somit die kritische Kenngröße direkt widerspiegeln. Es handelt sich dabei um eine komplexe Größe, die von der Wechselwirkung der Schwingungsgeneratoranregung mit den viskoelastischen Eigenschaften der Auflagerfläche abhängt.

Wie aus dem Schema von Abb.7 ersichtlich ist, bilden die Erregermasse und die durch ihre Steifigkeit und viskose Dämpfung charakterisierte Unterlage einen Schwingkreis.

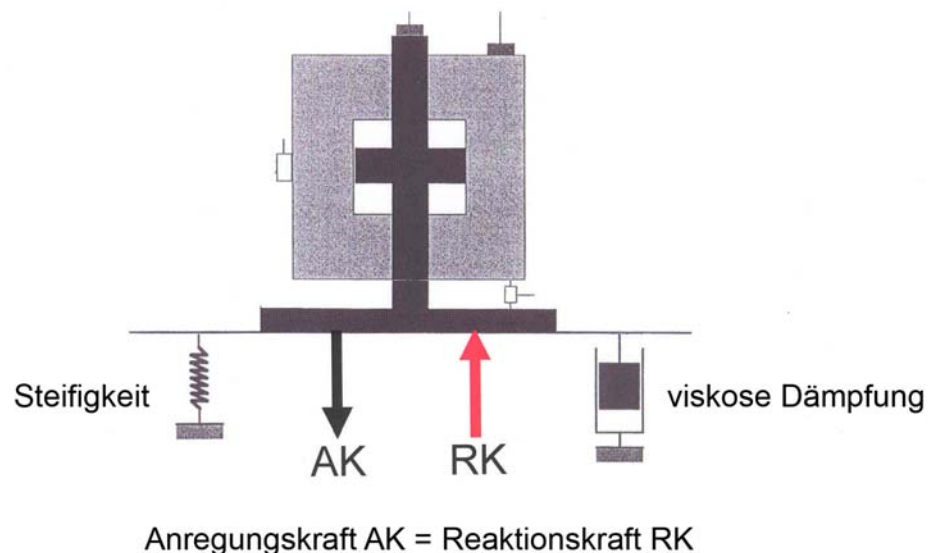


Abb.7: Schema der Wechselwirkung Schwingungsgenerator-Untergrund

Aus diesem Grund muss zwischen der frequenzunabhängig konstanten Anregungskraft des Schwingungsgenerators und der in den Untergrund eingeleiteten frequenzabhängig variierenden Kraft unterschieden werden. Infolge der dynamischen Charakteristik des schwingenden Systems Generator/Untergrund müssen dabei ausgeprägte Abweichungen

des Vibrationssignals vom Generator-Steuersignal auftreten und entsprechende Nichtlinearitäten entstehen. Als Schwingungssystem besitzt es zumindest eine von den beteiligten Elementen insgesamt gesteuerte Eigenfrequenz, die typischerweise im Bereich von 10-50 Hz liegt. In diesem Frequenzbereich erfordert die Schwingungsanregung des Untergrunds weniger Kraftaufwand als in entfernteren Frequenzbereichen.

Abb.8 zeigt die Variation der vom Untergrund angenommenen Kraft, wenn nur die Anregungskraft des Generators konstant gehalten wird, ohne die Reaktionsantwort des Untergrunds auszugleichen. Im Frequenzbereich von 50-100 Hz (Sweep-Laufzeit ab ca.170 s) variiert demnach die eingeleitete Kraft um den Faktor 3,0 oder 10 dB.

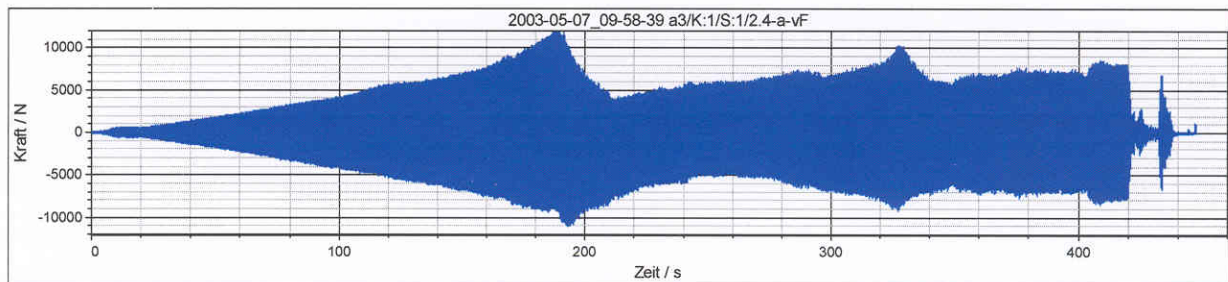


Abb.8: Kraftverlauf eines 10-110 Hz Sweeps auf der Tunnelsohle bei konstanter Anregungskraft des Generators ohne Aussteuerung für die dynamische Reaktion des Untergrunds

Eine frequenzunabhängig konstante Kraft kann auf den Untergrund somit nur dann übertragen werden, wenn entsprechende Echtzeit-Steuerungssysteme eingesetzt werden.

Die Kompensation der Phasenverzerrungen ist bei hydraulisch angetriebenen Generatoren relativ einfach durch eine hydro-mechanische Phasenregelung zu erreichen, die bei mechanisch mit Exzentermassen betriebenen Generatoren nicht möglich ist. Um zusätzlich den Amplitudengang zu beherrschen, muss die von der Erregermasse ausgeübte Anregungskraft laufend automatisch entsprechend der Untergrundreaktion ausgesteuert werden. Die hierfür notwendigen Eingangssignale liefern Beschleunigungs- und Kraftsensoren an der Erregermasse, der Grundplatte und dem Steuerventil (Abb.9) des VibroScan.at-Schwingungsgenerators.

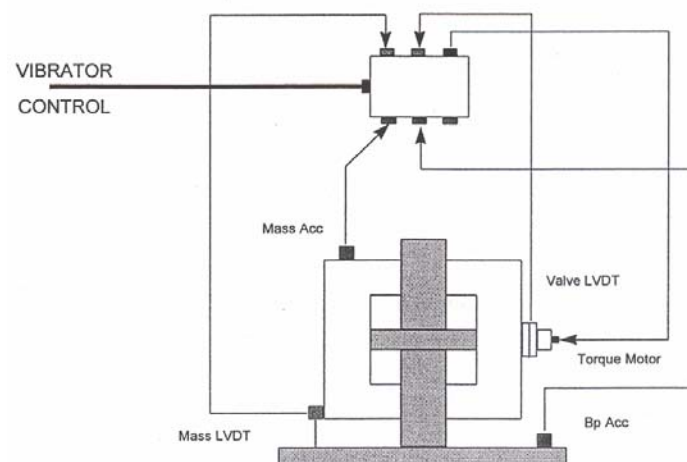


Abb.9: Sensoranordnung des Schwingungsgenerators für die Kraftaussteuerung
LVDT: Kraftsensor Acc: Beschleunigungssensor

Für die Kraftmessung werden dabei LVDT (linear variable differential transducer)-Sensoren verwendet, da diese infolge ihrer extrem geringen Hysterese für dynamische Messungen sehr gut geeignet sind. Die Messwerte aller Sensoren werden als Zeitreihen in 250 μ s-Intervallen ermittelt und über einen Kalman Filter zur Prognose des nächsten Zeitschritts verwendet, womit die Anregungskraft des Schwingungsgenerators autoadaptiv angesteuert wird. Da die Frequenzänderungsraten der Sweeps im Regelfall niedrig sind (etwa 2-4 Hz/s), kann eine hohe Kraftkonstanz erzielt werden (Abb.10), da je Hertz Frequenzänderung 1000-2000 Kraftmess- und Aussteuerungszyklen erfolgen. Der entscheidende Fortschritt der Admittanz-Bestimmung nach dem VibroScan.at Verfahren besteht somit darin, dass die Anregungskraft während eines Frequenz-Sweeps nicht nur gemessen wird, sondern auch zur Stabilisierung der Kraft auf konstantem Niveau verwendet wird. Die Bandbreite der Kraftvariation sinkt somit auf den Faktor 1,2 oder 2 dB ab.

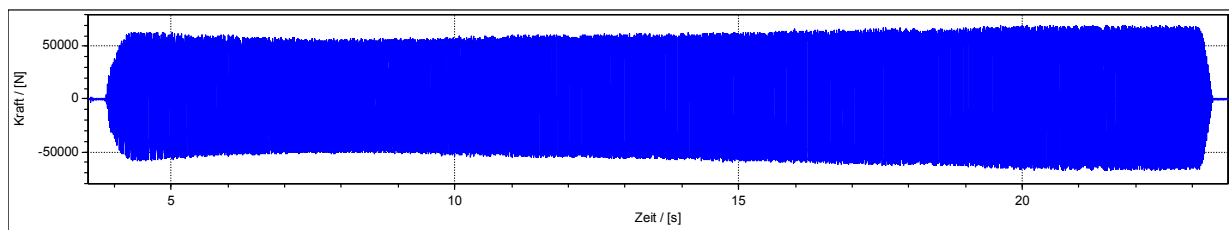


Abb.10: Kraftverlauf eines 36-96 Hz Sweeps auf einer bituminösen Tragdeckschicht mit autoadaptiver Kraftaussteuerung

Zusammenfassend ergibt sich, dass in Erweiterung des klassischen Admittanzbestimmungskonzepts die Anregungskraft nach dem Prinzip der autoadaptiven Aussteuerung nicht nur gemessen wird, sondern im Zeitfaktor von wenigstens 1000:1 auch zur konstanten Aussteuerung der in den Untergrund tatsächlich eingeleiteten Kraft verwendet wird, wodurch Nichtlinearitäten der Kraftanregung wirkungsvoll unterdrückt werden.

Der Frequenzbereich, für den die Admittanz zu untersuchen ist, ergibt sich aus der Aufgabenstellung und wird für Erschütterungsuntersuchungen des Schienenverkehrs in ISO 14837-1 wie in Tab.2 angegeben, festgelegt. Dieser wird vom VibroScan.at-Schwingungsgenerator in vollem Umfang abgedeckt.

Tab.2: Frequenzbereich für Erschütterungs- und Sekundärschalluntersuchungen des Schienenverkehrs

| Ziel | Frequenzband |
|--|--------------|
| Erschütterungswahrnehmung des Menschen | 1-80 Hz |
| Sekundärschallwahrnehmung des Menschen | 16-250 Hz |
| Bauwerksbelastung | 1-150 Hz |
| erschütterungsempfindliche Geräte/Arbeiten | 1-200 Hz |

6. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Welche Ergebnisse mit VibroScan.at Untersuchungen erzielt werden können, soll exemplarisch an einigen Beispielen gezeigt werden. So hängt etwa die Admittanz oder Schwingungsbereitschaft eines Tunnels in ausgeprägter Weise von der Tunnelkonstruktion ab. Abb.11 gibt die Admittanzfunktion für einen einschaligen Tübbingtunnel und einen in offener Bauweise errichteten Rechtecktunnel für die Tunnelwand in 1 m Distanz wieder.

Demnach besitzt der einschalige Tübbingtunnel (rot) die geringste Admittanz bei 3 Hz. Mit zunehmender Frequenz nimmt dann die Mobilität kontinuierlich zu und erreicht im 80-100 Hz-Band ihr Maximum. Somit begünstigt dieser Frequenzverlauf der Admittanz insbesondere die Übertragung der höherfrequenten Emissionen, die für die Sekundärschallimmissionen maßgeblich sind. Ein ähnliches Admittanzverhalten ist auch bei den Tübbingröhren des Nord-Süd Tunnels Berlin beobachtet worden [Jaquet u.Garburg, 2007], wo allerdings nur das Frequenzband von 10-110 Hz untersucht worden ist. Im Vergleich zum Nord-Süd Tunnel ist die Admittanz beim Wiener Tübbingtunnel um etwa 6-10 dB geringer, was als Hinweis darauf gedeutet werden kann, dass auch die Umgebungs-Geologie sich als Glied der Rückkopplungskette bemerkbar macht. Während die Tunnel in Berlin durch wassergesättigte Lockersedimente verlaufen, durchörtert der Wiener Tunnel verhältnismäßig kompakte tertiäre Molassesedimente.

Ganz anders ist die Situation beim Rechtecktunnel (blau), wo im niederfrequenten Teil des Spektrums die Mobilität zunächst zwar größer ist als im Tübbingtunnel, ihr Maximum aber bereits bei etwa 6 Hz erreicht und danach kontinuierlich abnimmt, sodass von 80 Hz aufwärts die Differenz fast zwei Größenordnungen zu Ungunsten der Tübbingbauweise beträgt.

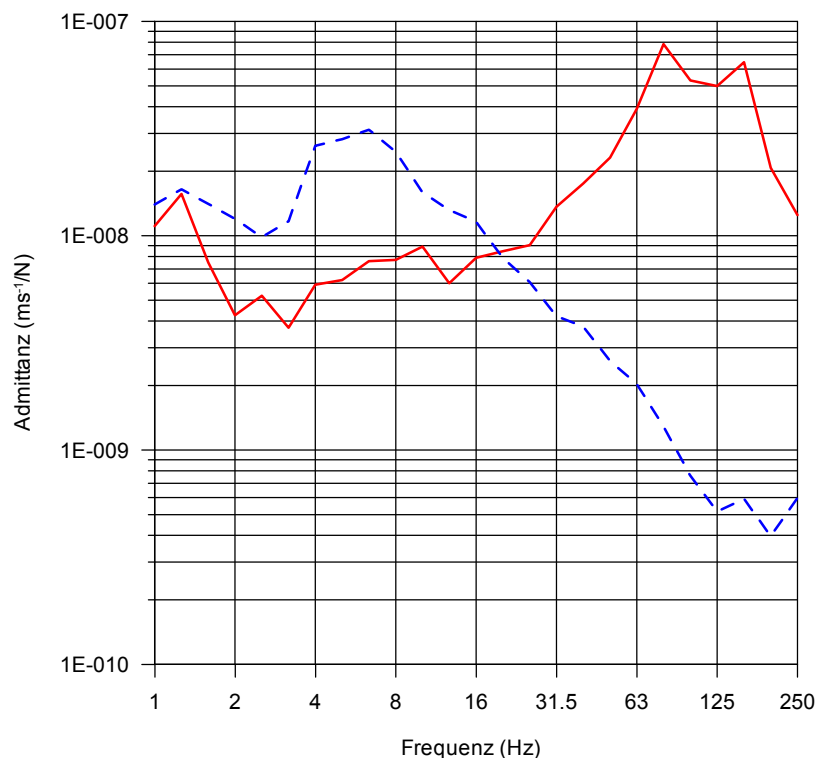


Abb.11: Terzspektrien der Admittanz
rot: einschaliger Tübbingtunnel (TBM-Vortrieb)
blau: Rechtecktunnel (offene Bauweise)

Hinsichtlich des baulastdynamischen Verhaltens der Anrainergebäude liefern die Messungen die in Abbildung 12 wiedergegebenen Gebäudeeigenfrequenzen um Quer- und Längsachse. Den verhältnismäßig geringen Bauwerksabmessungen entsprechend sind diese Frequenzen in diesem Beispiel relativ hoch. Die Deckeneigenfrequenzen variieren je nach Deckenspannweite und Bauweise im Bereich von 10-37 Hz. Hingegen liegen die Beträge des Dämpfungsmaßes vorwiegend in dem schmalen Band von 3-5%.

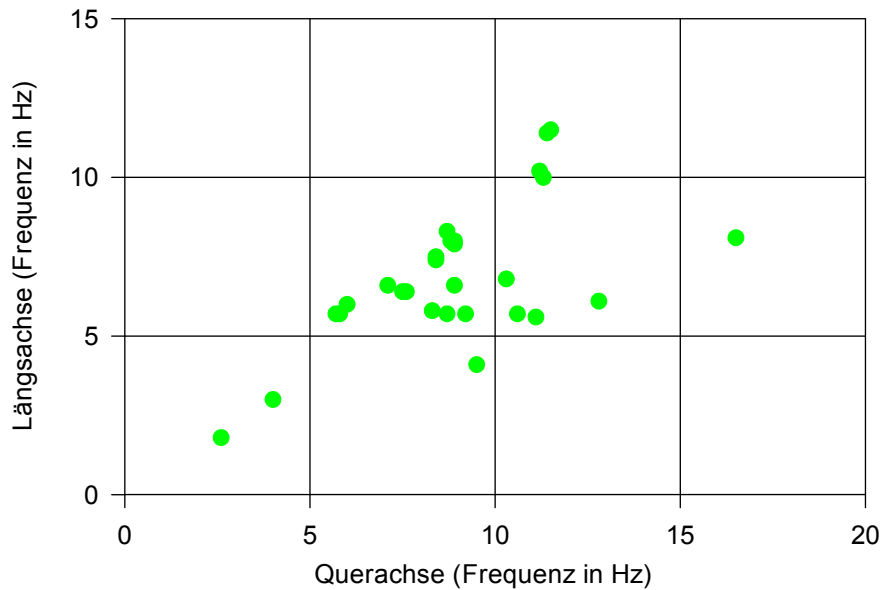


Abb.12: Gemessene Eigenfrequenzen von untersuchten Wohngebäuden

Wie stark die von den Sweep-Emissionen hervorgerufenen Erschütterungen in den Wohnräumen der Anrainer sind, ist für typische näher gelegene Objekte in Abb.13 in Form von Übertragungsfunktionen wiedergegeben. Demnach kann im niederfrequenten Bereich in Extremfällen sogar außerordentlich große Verstärkung um bis zu 23 dB entstehen. Oberhalb von 50 Hz tritt generell Dämpfung auf, die aber im Frequenzbereich von 125 Hz ein Maximum erreicht, wonach mit zunehmender Frequenz nur noch kleinere Dämpfungsbeträge erreicht werden.

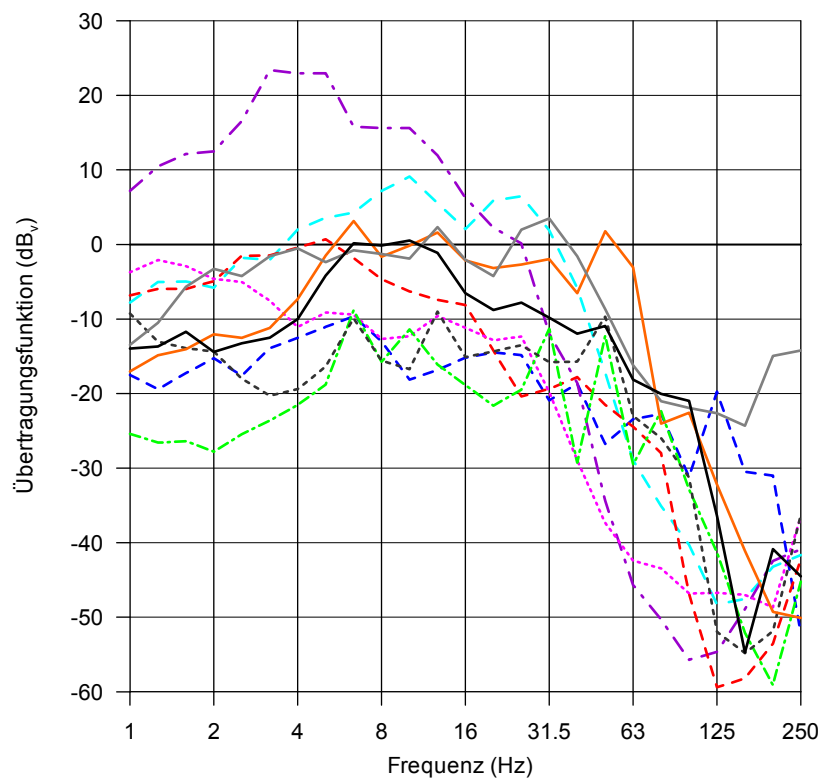


Abb.13. Übertragungsfunktion der Sweep-Emissionen zu Anrainerwohnräumen

Hinsichtlich von Sekundärschallemissionen bewirkt die A-Bewertung für dieselben Wohnräume signifikante Veränderungen des Funktionsverlaufs, wie in Abb.14 zu sehen ist, wobei der Hörbarkeit entsprechend nur die Terzen von 16 Hz aufwärts betrachtet werden. Wie daraus ersichtlich ist, wird die Dämpfung der höheren Frequenzen durch die Bewertung teils aufgehoben, teils sogar überkompensiert. Die Ersatzanregung von Frequenzen im Bereich von 80-250 Hz ist somit für die Vorhersage von Sekundärschallimmissionen von wesentlicher Bedeutung.

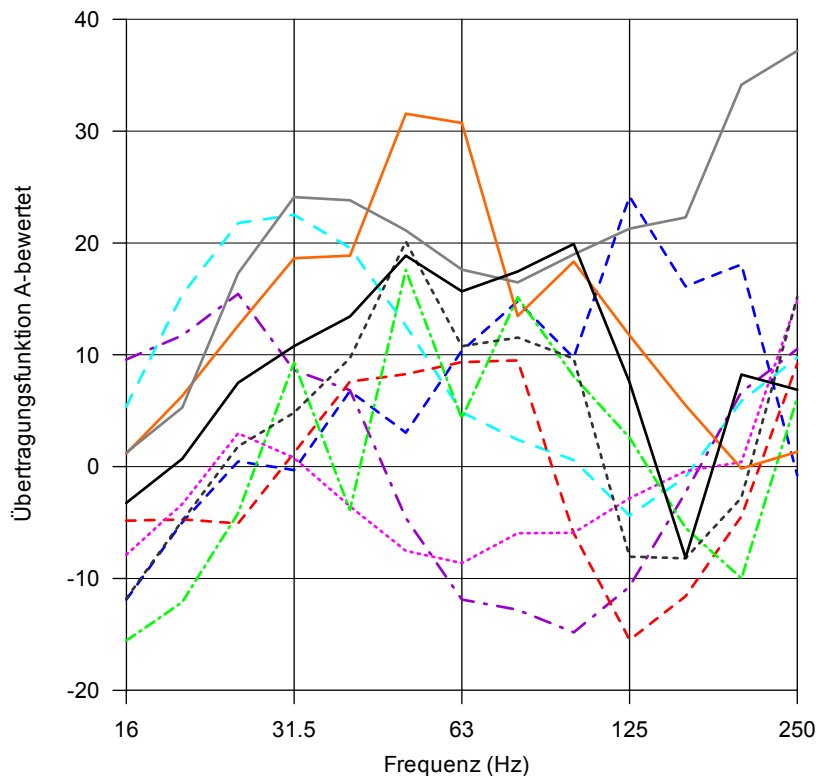


Abb.14: Übertragungsfunktionen der Sweep-Emissionen zu den Anrainerwohnräumen mit A-Bewertung zur Sekundärschalluntersuchung

Überraschend war bei den VibroScan.at Untersuchungen eines Tunnels am Wiener Stadtrand die Höhe der durch die Sweeps hervorgerufenen Sekundärschallimmissionen, wie das Beispiel von Abb.15 zeigt. Dabei ist der Sekundärschall in einem Wohnhaus von einer 230 m entfernten Vibro-Position wiedergegeben: die A-bewerteten Pegelspitzen liegen um rund 14 dB über dem Grundgeräuschpegel zum Zeitpunkt der Messung, wobei dieser in der Nacht mit Sicherheit noch deutlich tiefer liegen wird.

Derartig hochfrequente Erschütterungsimmissionen werden vom Menschen nicht mehr verspürt, dafür aber umso stärker als Sekundärschall gehört. Die Ursache dieser außergewöhnlich starken und weit reichenden Erschütterungsimmissionen ist in der lokalen Geologie im Tunnelabschnitt zu suchen. Wie aus Abb.16 beispielhaft zu ersehen ist, wird das Gebirge aus Wechselfolgen von sehr harten, mäßig zerlegten Gesteinen und mürben bis mäßig harten, zumeist stark zerlegten Gesteinen gebildet, in diesem Fall einerseits Sandstein und andererseits Schluff- und Tonstein.

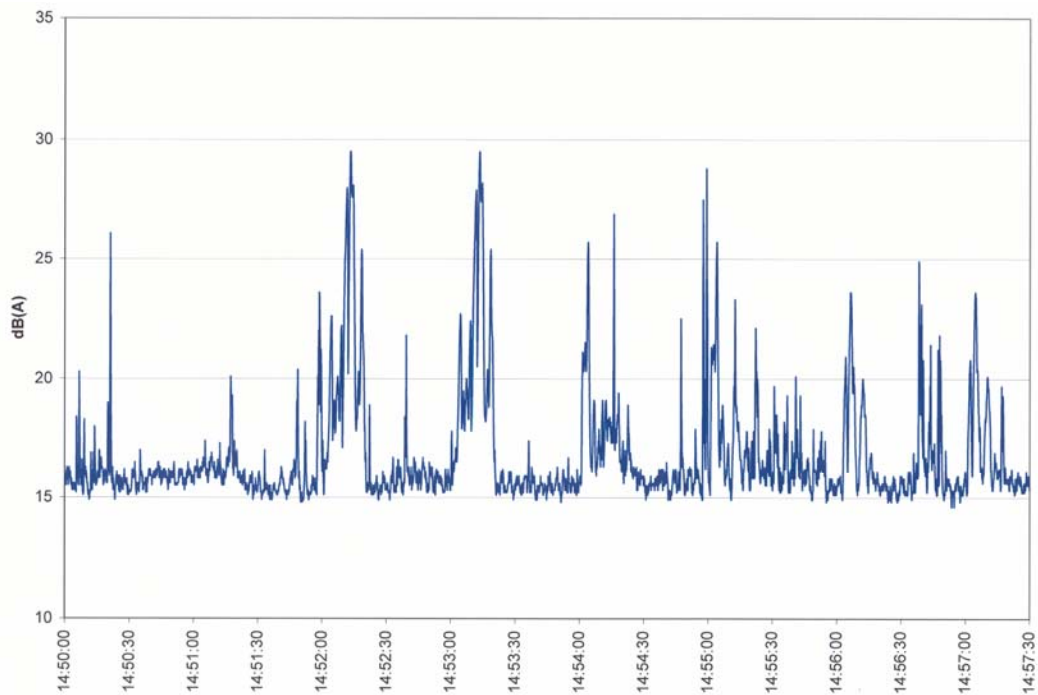


Abb.15: Schallpegelregistrierung der Sweeps in einem Wohnhaus in 230 m Entfernung von dem Anregungspunkt. Startzeitpunkt der 20-Sekunden-Sweeps minütlich von 14:50 bis 14:57

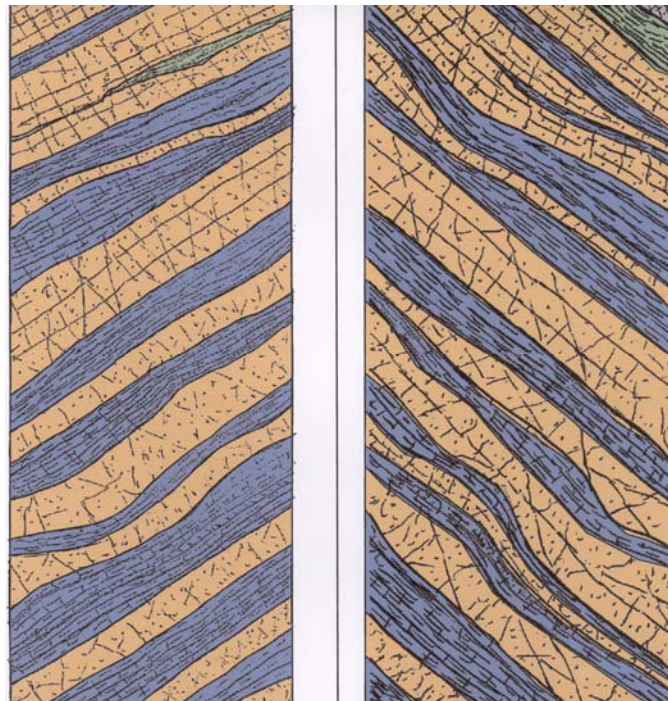


Abb.16: Baugeologisches Tunnelband aus dem Untersuchungsbereich
links: Vertikalschnitt
rechts: Horizontalschnitt

In derartigen, nicht sehr häufig auftretenden, gebankten Strukturen breiten sich Erschütterungen in der Form von Kanalwellen aus. Sie besitzen dabei eine sehr große Reichweite, da die Schwingungsenergie aus strahlengeometrischen Gründen im jeweiligen Kanal kaum Verluste erfährt (keine Abstrahlung). Zusätzlich begünstigt die vergleichsweise dünne Schichtung die Ausbildung hochfrequenter Schwingungen – wodurch sich letztlich das Sekundärschallproblem ergibt.

Infolge der aus Abb.16 beispielhaft erkennbaren Orientierung der Schichtfolgen, ergibt sich die ungünstige Situation, dass die Erschütterungsausbreitung nicht auf dem kürzesten Weg quer zur Vortriebsrichtung, sondern schräg erfolgt. Es ist daher erforderlich, die benötigten Immissionsschutzmaßnahmen im Tunnel entsprechend der Schichtorientierung über die Höhe der Bebauung hinaus auszudehnen.

Auf Basis der Ergebnisse dieser Untersuchung hinsichtlich der Tunneladmittanz, der Baudynamik der Anrainergebäude und der Erschütterungs-Übertragungsfunktionen können die erforderlichen Masse-Feder Systeme dimensioniert werden.

Ein weiterer Vorteil der VibroScan.at Untersuchung ergibt sich daraus, dass bei diesen Versuchen die aktuellen Übertragungsbedingungen nach Errichtung des Tunnelrohbaus mit allen baubedingten Veränderungen erfasst werden. Abb.17 zeigt dies am Beispiel der VibroScan-Immissionen in zwei benachbarten Häusern, von denen eines durch Zementinjektionen unbeabsichtigt direkt mit der Tunnelröhre verbunden worden ist. Trotz gleicher Distanz zum Tunnel bewirkt die Schwingungsbrücke des Injektionskörpers doppelt so hohe Erschütterungsimmissionen wie im anderen Objekt. Die Schwingungsbrücke erlaubt nämlich die frequenzmäßig breitbandige Einleitung der Schwingungen in das Haus, während beim anderen Objekt die Frequenzfilterwirkung des natürlichen Untergrunds wirksam wird, wie dies der Vergleich der Transmissionsspektren zeigt.

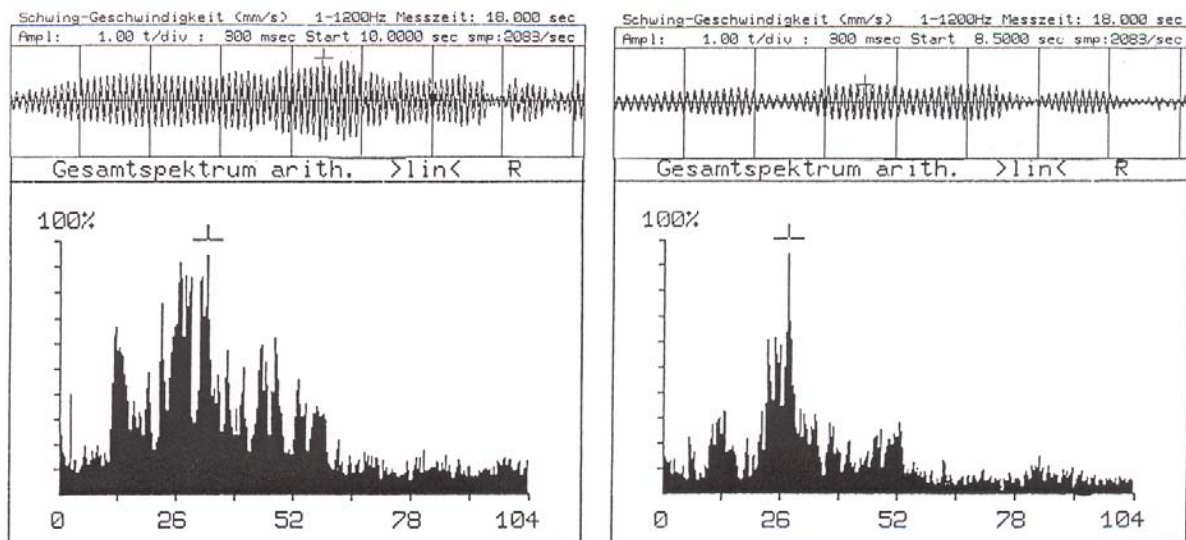


Abb.17: Auswirkung eines bautechnischen Fehlers beim Tunnelvortrieb auf die Größe der Erschütterungsimmissionen (oben) und die Transmissionsspektren (unten) im Vergleich zweier gleichweit vom Tunnel entfernter Häuser
 links: Haus mit direkter Verbindung zum Tunnel (Injektionskörper)
 rechts: Haus ohne Kontakt zum Tunnel

So haben beim U-Bahnbau neben dem Wiener Musikverein die VibroScan Untersuchungen rechtzeitig Schwingungsbrücken zwischen dem Tunnel und den Gebäudefundamenten identifiziert, sodass sie durch ein entsprechend dimensioniertes Masse-Feder System bekämpft werden konnten [Steinhauser et.al., 2005].

7. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Eigenschaften des [VibroScan.at](#) Verfahrens lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Äquivalenzkriterien bezüglich der Bahnerschütterungen werden bestmöglich erfüllt.
- Prinzip des VibroScan.at Verfahrens bildet die flächenhafte Kraftanregung mit geringer Flächenlast.
- Die Frequenzbereichsanforderungen von ISO 14837-1 und ISO 2631-2 werden in vollem Umfang für Erschütterungs- und Sekundärschallimmissionen erfüllt. Zusätzlich kann das Eigenschwingungsverhalten der Gebäude erfasst werden.
- Die autoadaptive Aussteuerung der Anregungskraft bewirkt eine wirkungsvolle Stabilisierung der in den Untergrund eingeleiteten Kraft.
- Die Admittanzbestimmung des Tunnelbauwerks liefert wichtige Informationen über sein Emissionsverhalten.
- Die lokalen geologischen Bedingungen beeinflussen erwartungsgemäß als Rückkopplungselement die Admittanz.
- Lokalisierung von Überreichweiten der Immissionen infolge Kanalwellenanregung.
- Frühzeitige Identifikation von Schwingungsbrücken ermöglicht Ausarbeitung von Immissionsschutzmaßnahmen.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Die Güte einer Erschütterungssimulation und anschließender Prognose mit Hilfe eines Schwingungsgenerators hängt also in großem Maße davon ab, inwieweit die Äquivalenzkriterien (Fläche der Krafterleitung, Frequenzband, Kraft, etc.) erfüllt sind. Generatoren mit kleinen Grundplatten bewirken eine so große Resonanzüberhöhung, dass es zu Fehleinschätzungen der zukünftigen Erschütterungsbelastung kommen kann. Eine zu geringe Krafterleitung kann zur Unterschätzung der möglichen Reichweite von Erschütterungen, wie etwa bei Kanalwellen, führen, insbesondere aber Signale liefern, die bereits in verhältnismäßig geringen Entfernungen auf das Niveau der technischen Bodenunruhe absinken, so dass die Auswertung mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

LITERATURVERZEICHNIS

Jaquet, Th. und R. Garburg: Measurements and Investigations at the Floating-Track-Bed System in the North-South Tunnel in Berlin. 9th International Workshop on Railway Noise. München, 2007.

Lichtberger, B.: Handbuch Gleis. Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2004.

SGP Verkehrstechnik: Ungefederte Massen von Radsätzen, 1994.

Steinhauser, P., J. Lang, M. Österreicher und P. Berger: Schutz des Wiener Musikvereins-Gebäudes gegen Schall- und Erschütterungsimmissionen der U-Bahn. ETR 54, 216-226, 2005.

Steinhauser, P. und W.: Neue Möglichkeiten zur Erschütterungsuntersuchung durch das VibroScan advanced technology Verfahren. 10. Symposium über Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, EMPA 2007.

AUTOR

Dipl.Ing.Wolfgang Steinhauser
Heiligenstädter Straße 9/42, 1190 Wien, Österreich
e-mail: wolfgang@steinhauser.eu