

Neue Möglichkeiten zur Erschütterungsuntersuchung durch das VibroScan advanced technology Verfahren

Peter Steinhauser, Universität Wien, und Wolfgang Steinhauser, TU Wien

1. AUFGABENSTELLUNG

Eine bewährte Methode für die Erschütterungsprognose 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 (Krüger, 1986) ausgehend, sind Schwingungserreger speziell entwickelt worden, die nach verschiedenen Anregungsprinzipien arbeiten und unterschiedliche Frequenz- und Anregungsbereiche besitzen. Die Schwingungsanregung des Untergrunds erfolgt dabei im allgemeinen über 3-4 Stempel oder Standbeine (Krüger et al., 2001).

Methodisch gesehen handelt es sich dabei um Experimente, deren Güte davon abhängt, wie weit die Versuchsparameter jenen der Erschütterungsemissionen eines Zuges entsprechen, d.h. in welchem Ausmaß die Experimentalanordnung das Äquivalenzprinzip erfüllt. Diese wird für den Schwingungsgenerator P23, der für das VibroScan.at (advanced technology) Verfahren eingesetzt wird, geprüft. Darauf aufbauend werden dann die Weiterentwicklung des Verfahrens 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:

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

Für die Ausbreitung der Erschütterungsemissionen ist darüber hinaus der Linienquellencharakter eines Zuges zu beachten, der sich aus der dichten Achsfolge (Quellpunktkette) ergibt.

Die größten Achslasten betragen derzeit für Güterwagen 225 kN und für Lokomotiven 215 kN. Für Reisezugwagen sind Achslasten um 140 kN charakteristisch, wobei allerdings eine große Streubreite besteht.

Die ungefederten Radsatzmassen besitzen eine große Bandbreite und liegen für Lokomotiven im Bereich von 2000-4000 kg, für Reisezugwagen bei 1400-1800 kg und für Güterwagen bei 1200-1500 kg (SGP, 1994).

Die Größe der auf die Schiene wirkenden dynamischen Lasten hängt von weiteren Faktoren (Fahrtgeschwindigkeit, Gleislagequalität usf.) ab und besitzt deshalb eine große Bandbreite von etwa 30-100 kN (Stühler, 1986; Lichtberger, 2004).

Die Fläche der Krafteinwirkung in den Untergrund lässt sich aus den Schwellenabmessungen und der Schotterbetthöhe von 30 cm unter der Schwellensole mit 2,1 m² für den ungünstigsten Fall (Achse über einer Schwelle) berechnen, wobei die Flankensteilheit des Lastkegels im Schotterbett entsprechend den Bahnbaunormen mit 3:2 angesetzt wird.

Aus diesen Angaben ergibt sich, dass die maximale Bodenpressung im Bereich von etwa 8-16 N/cm² liegt. Das Verhältnis der Bodenpressung zur Fläche der Krafteinwirkung ist maßgeblich für die Systemdämpfung des gekoppelten Schwingungssystems vom fahrenden Zug und Untergrund. Für die Bahn ergeben sich somit kritische Dämpfungen von $D=0,22$ bis $0,30$. Dementsprechend können im Resonanzfall zwischen Anregungs- und Untergrundeigenfrequenzen Verstärkungsfaktoren im Bereich von $V=1,66$ bis $2,29$ auftreten (Abb.1). Diese Systemdämpfung sagt aber nichts über das Eigenschwingverhalten des Untergrunds aus, der für höherfrequente Erschütterungen trotzdem gute Transmissionsbedingungen besitzen kann.

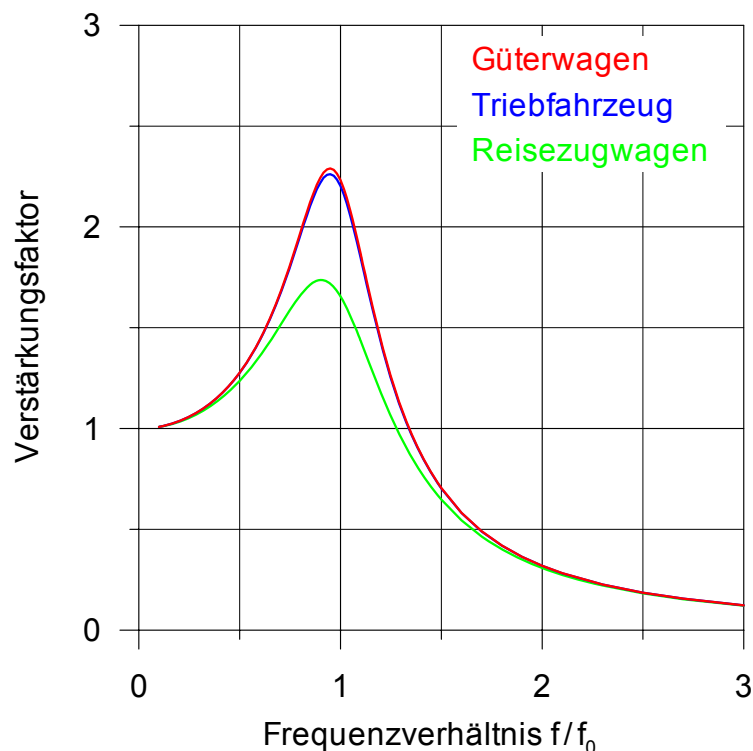


Abb.1: Bandbreite der Resonanzkurven des gekoppelten Systems Zug-Unterbau für Güterwagen sowie Triebfahrzeug mäßiger Laufruhe und Reisezugwagen hoher Laufruhe

Ebenso besitzen die von Zügen ausgehenden Emissionsspektren eine große Variationsbreite der angeregten Frequenzbänder, wie die beiden extremen Beispiele von Abb.2 für 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.3 ersichtlich ist.

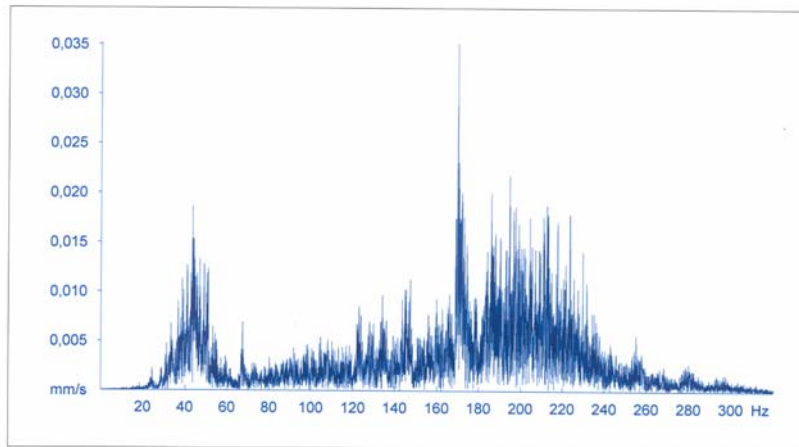
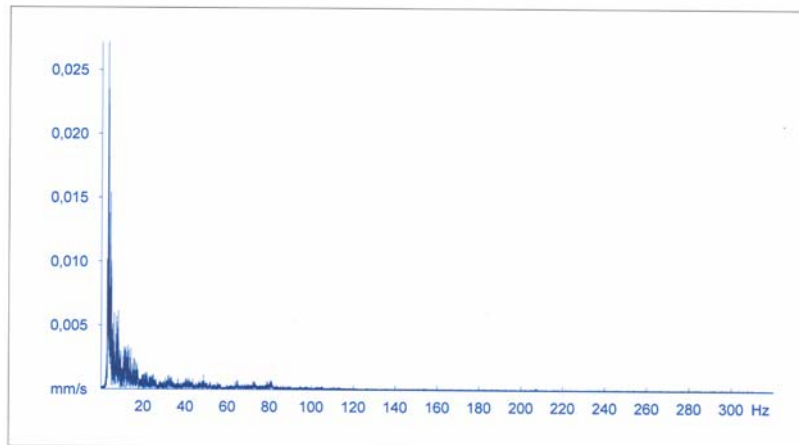


Abb.2: Variationsbreite der Emissionsspektren von Zügen auf Schottergleis in 10 m Distanz bei verschiedenen Untergrundbedingungen

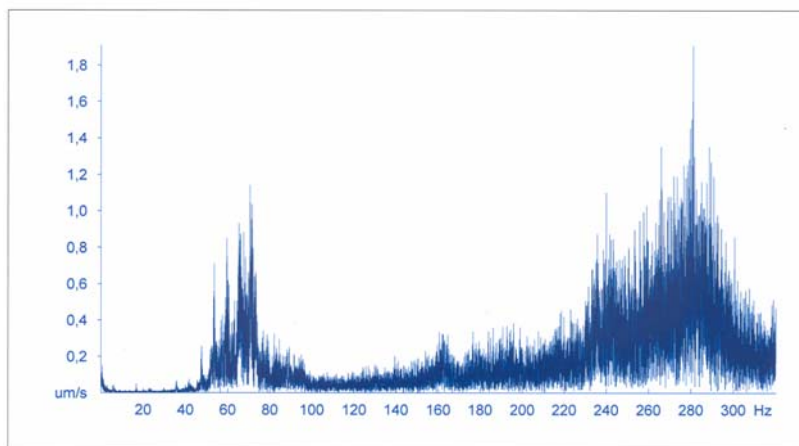


Abb.3: Charakteristisches Emissionsspektrum auf Fester Fahrbahn

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, die bei den verschiedenen Lokomotiv- und Wagentypen eine große Bandbreite besitzt: 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 Schwingungsgenerator P23 (Abb.4) dieser Vergleich mit den Zugparametern wiedergegeben.

Tab.1: Vergleich dynamischer Parameter Zug – Schwingungsgenerator P23

Parameter	Zug	P23
ungefederte Radsatzmasse/Erregermasse	2000-4000 kg	3505 kg
maximale Erregerkraft	100 kN	227 kN
belastete Fläche	2,1 m ²	2,2 m ²
Last auf Planum/Grundplatte	ca. 140-225 kN	193 kN
maximale Flächenlast	≤ 15 N/cm ²	≤ 19 N/cm ²
Frequenzband	3-230 Hz	1-250 Hz
Frequenzcharakteristik	breitbandig	Sweep



Abb.4: Hochleistungs-Schwingungsgenerator P23

Wie daraus ersichtlich ist, sind die Kennwerte des P23-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.

Hinsichtlich der Linienquellencharakteristik der Zugerschütterungen ist messtechnisch keine Äquivalenz möglich, da ein Schwingungsgenerator auf jeden Fall eine Punktquelle bildet. Da für beide Quelltypen unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen gelten, bewirkt dies in größeren Entfernungen eine systematische Unterbewertung der Erschütterungsimmissionen durch die Ersetzanregung im Vergleich zu einem Zug. Diese kann durch eine distanzabhängige Erhöhung der Anregungskraft des Schwingungsgenerators ausgeglichen werden.

Da aber die Ausbreitungsbedingungen vom geologischen Aufbau abhängen, muss diese Kraftüberhöhung empirisch für Regionen vergleichbarer Untergrundstrukturen durch Ausbreitungsmessungen von Zugerschütterungen und Sweeperschütterungen ermittelt werden.

Dabei hat sich gezeigt, dass im unmittelbaren Nahbereich (bis zu ca. 30 m Distanz) keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Anregungsquellen auftreten. Offensichtlich wirkt auch bei einem Zug im Nahbereich die einzelne Achse als dominante Quelle, wozu noch kommen dürfte, dass sich Oberflächenwellen erst ab einer gewissen Mindestentfernung entwickeln können. In Abb.5 ist als Beispiel die empirisch ermittelte Kraftüberhöhungsbeziehung für den Raum Asten-St.Valentin (Molassezone bei Linz) dargestellt, die angibt, welche Zuschläge in Abhängigkeit von der Messentfernung erforderlich sind. Die im Vergleich zu einem Zug wesentlich höhere Anregungskraft des Schwingungsgenerators P23 wird somit für derartige Untersuchungen voll ausgeschöpft.

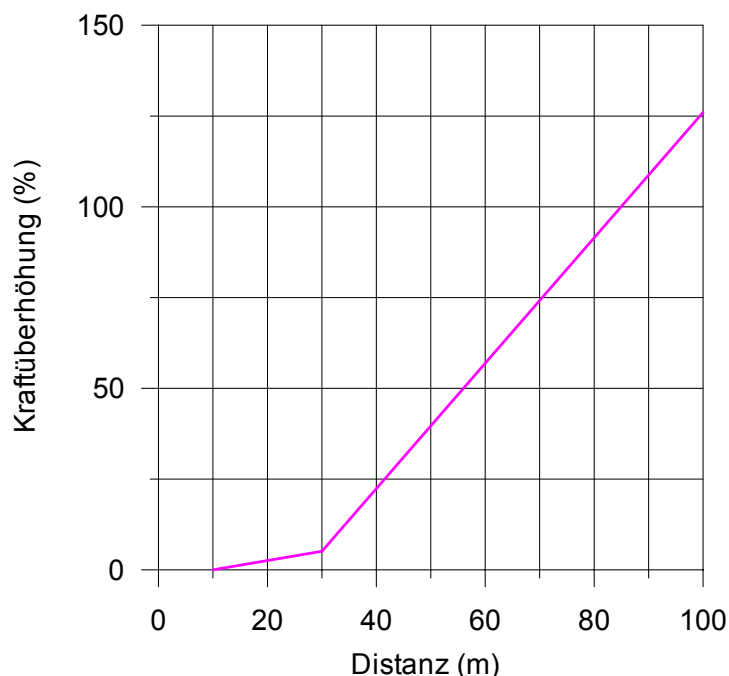


Abb.5: Empirische Kraftüberhöhung zur Simulation des Linienquellencharakters mit einem Schwingungsgenerator (Molassezone bei Linz)

4. VIBROSCAN ADVANCED TECHNOLOGY VERFAHREN

Von den vorhin dargestellten Äquivalenzkriterien ausgehend wurde Anfang der 90er Jahre für Bahnerschütterungsprognosen das Vibroscan Verfahren entwickelt, wobei eine entsprechend große Anregungsfläche mit verhältnismäßig geringer Flächenlast im Vordergrund stand. (Steinhauser, 1994). 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 10-80 Hz – und somit für den Großteil des interessierenden Spektralbandes – schwinggeschwindigkeitsproportional, wie aus der W_m -Frequenzbewertungsfunktion nach ON-ISO 2631-2 ersichtlich ist (Abb.6). Daher ergibt sich die Notwendigkeit einer frequenzunabhängig konstanten Schwinggeschwindigkeitsanregung, wozu lediglich während des Sweeps die Anregungskraft mit der Frequenz hochzufahren ist. Entsprechend den damals gegebenen technischen Möglichkeiten musste die Frequenzuntergrenze mit 10 Hz gewählt werden.

Diese erfolgreiche Methode wurde in zweierlei Hinsicht weiterentwickelt. Der **erste Aspekt** betrifft das untersuchte Frequenzband, da die neue internationale Norm ISO 14837-1 für die Untersuchung der Sekundärschallimmissionen des Schienenverkehrs das Frequenzband 16-250 Hz vorschreibt. 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.7). Dies gilt selbst für Bahnstrecken in verhältnismäßig weichen tertiären Sedimenten, wie das Terzspektrum eines Zuges in Abb.8 oben beispielsweise belegt. Obwohl erschütterungsmäßig 40 Hz dominieren, zeigt die Analyse, dass hinsichtlich des Sekundärschalls das 160-250 Hz Frequenzband maßgeblich ist (Abb.8 unten).

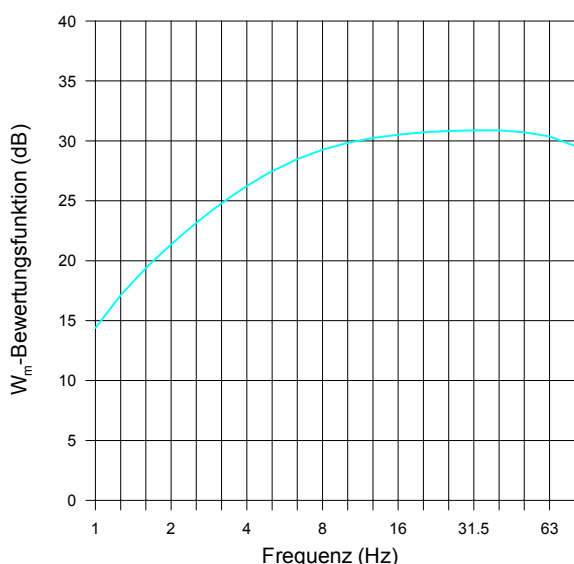


Abb.6: W_m -Bewertungskurve der Schwinggeschwindigkeit für die menschliche Erschütterungswahrnehmung nach ON-ISO 2631-2

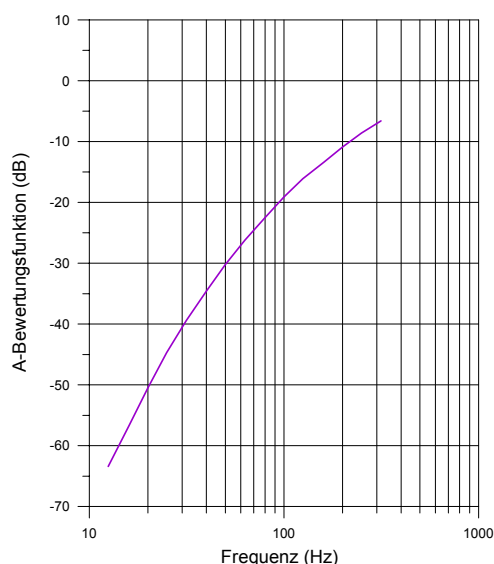


Abb.7: A-Bewertungskurve des Schalldruckpegels des abgestrahlten Sekundärschalls

Für den Terzbandbereich von 16-80 Hz ergäbe sich ein Pegel des Sekundärschalls von 34 dB(A), der sich durch die Einbeziehung der Terzbänder von 100-250 Hz um 8 dB auf 42 dB(A) erhöht. Bei einer Schwingungsgeneratoruntersuchung würde die Nichtanregung dieser Frequenzbänder eine beträchtliche Unterschätzung der Sekundärschallimmissionen bewirken.

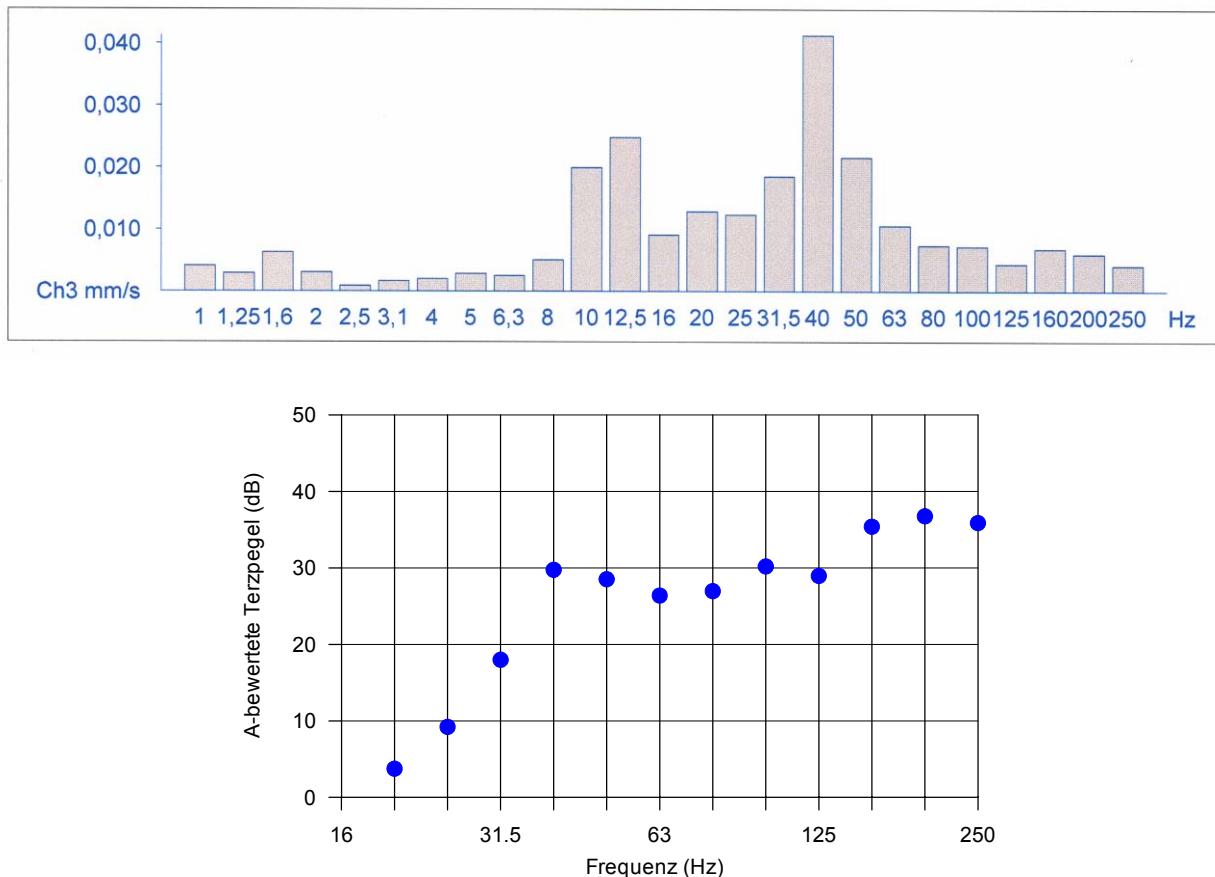


Abb.8: Berechnung des Sekundärschalls eines Zuges
 oben: Terzspektrum der Erschütterungsmissionen
 unten: Terzpegel der berechneten Sekundärschallimmissionen

Für Erschütterungsmissionen sieht ISO 14837-1 in Übereinstimmung mit ON-ISO 2631-2 das Frequenzband 1-80 Hz vor. Durch die Absenkung der unteren Arbeitsfrequenz auf 1 Hz, die bei einem modernen Hochleistungs-Schwingungsgenerator möglich ist (vergl. Tab.1) kann die Stärke der menschlichen Erschütterungswahrnehmung über das gesamte von den Normen vorgegebene Frequenzband beurteilt werden. Ebenso kann das Schwingungsverhalten der Anrainergebäude untersucht werden, weil die Eigenfrequenzen von Wohngebäuden vorwiegend im Bereich von 2-10 Hz liegen. Dadurch können auch die fallweise auftretenden Aufschaukelungen von Deckenschwingungen durch Bauwerksschwingungen erfasst werden.

Der **zweite Aspekt** der Weiterentwicklung ist methodischer Natur. Das ursprüngliche Vibroscan Verfahren zielte direkt auf die Bewertete Schwingstärke der menschlichen Wahrnehmung, weshalb eine Schwingungsgeneratoranregung mit konstanter Schwinggeschwindigkeit angestrebt

worden ist. Wenn darüber hinaus auch andere Fragen (Sekundärschall, Transferfunktionen, Deckenverstärkungsfaktoren usw.) zu klären sind, besteht die Gefahr von u.U. sogar nichtlinearen Verzerrungen durch die frequenzabhängige Kraftänderung. Beispielsweise werden durch das Hochfahren der Kraft mit der Sweepfrequenz höhere Frequenzen etwas bevorzugt. Da aber tiefe Frequenzen schwieriger zu dämpfen sind und die dynamische Auslegung der Unterschottermatten etc. üblicherweise auf 1 Hz genau erfolgt, kann sich dies negativ auf die Prognosesicherheit auswirken. Aus diesen Gründen ist daher die Kraft des Schwingungsgenerators über den anzuregenden Frequenzbereich konstant zu halten.

Von der Erregerseite her ist die konstante Kraft leicht einzustellen. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass der Schwingungsgenerator ebenso wie die vorhin diskutierten Züge mit dem elastischen Untergrund ein gekoppelt schwingendes System darstellt, das eine analoge Systemdämpfung besitzt, die vom Verhältnis der Anregungsfrequenzen zur Untergrundeigenfrequenz gesteuert ist, wie es in Abb.1 für die Bahnfahrzeuge dargestellt ist. Diese Rückkopplung mit der Steifigkeit und Dämpfung des Untergrunds verändert die in den Untergrund tatsächlich eingebrachte Kraft frequenzabhängig. Um eine stabile, konstante Kraftübertragung zu erzielen, muss die von der Erregermasse ausgeübte Anregungskraft automatisch ausgesteuert werden. Die hierfür notwendigen Eingangssignale liefern Beschleunigungs- und Wegsensoren an der Erregermasse, der Grundplatte und dem Steuerventil (Abb.9).

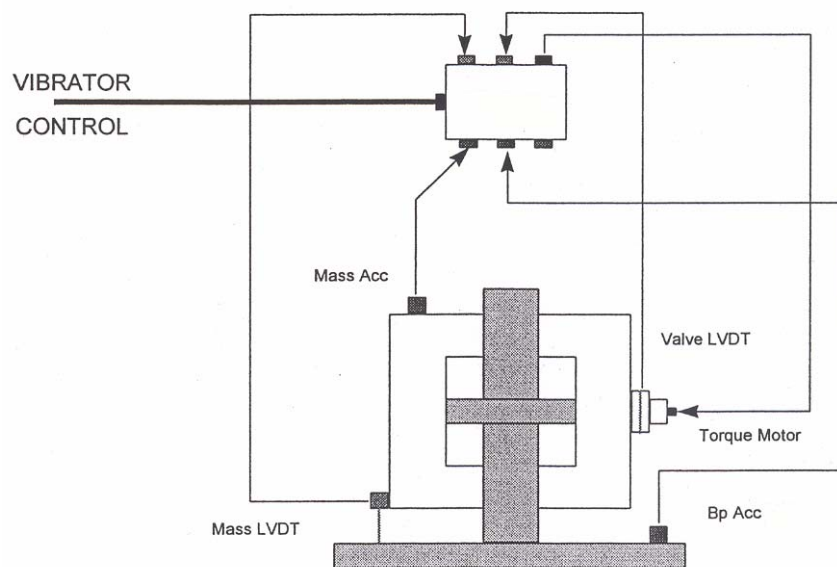


Abb.9: *Sensoranordnung des Schwingungsgenerators für die Kraftaussteuerung*
LVDT: Wegsensor Acc: Beschleunigungssensor

Aus diesen Daten wird in 250 μ s-Zeitschritten die vom Untergrund kommende Antwortkraft samt Phasenverschiebung ermittelt und der Schwingungsgenerator entsprechend ausgesteuert (autoadaptive Servosteuerung). Infolge der Konstanz der Anregungskraft sind somit auch Admittanzuntersuchungen möglich. Die Messung der Antwortkraft ermöglicht gleichzeitig auch Angaben über die elastische Federsteifigkeit und die viskose Dämpfung des Untergrunds. Mit diesen Angaben kann das dynamische Verhalten von verschiedenen Vibro-Positionen erstmals quantitativ verglichen werden.

Wie gut diese autoadaptive Steuerung der Anregungskraft funktioniert, zeigt das Frequenzspektrum der Beschleunigungsregistrierung der Generator-Grundplatte für einen 60-118 Hz-Sweep (Abb.10 oben) bzw. einen 150-210 Hz-Sweep (Abb.10 unten). Wenn man von der FFT-bedingten Instabilität im Bereich der Eckfrequenzen (Sweepanfäng und Sweepende) absieht, ergibt sich eine außerordentlich stabile, konstante Schwingbeschleunigung und somit auch Anregungskraft über den gesamten Frequenzbereich des Sweeps. Wie aus Abb.10 ersichtlich ist schwankt die Beschleunigung – und damit die Kraft – jeweils nur um $\pm 10\%$ um den Mittelwert. Bei Schwingungsgeneratoren ohne autoadaptive Aussteuerung kommen je nach Untergrundbedingungen Streubreiten auch von $\pm 50\%$ bei der Anregungskraft vor. Lediglich in der Anfangsphase eines Sweeps benötigt die Aussteuerung eine gewisse Zeit zur Stabilisierung, was durch einen entsprechenden Frequenzvorlauf eines Sweeps, der dann bei der Auswertung abgeschnitten wird, und durch Frequenzbandüberlagerungen bei Sweep-Serien umgangen werden kann.

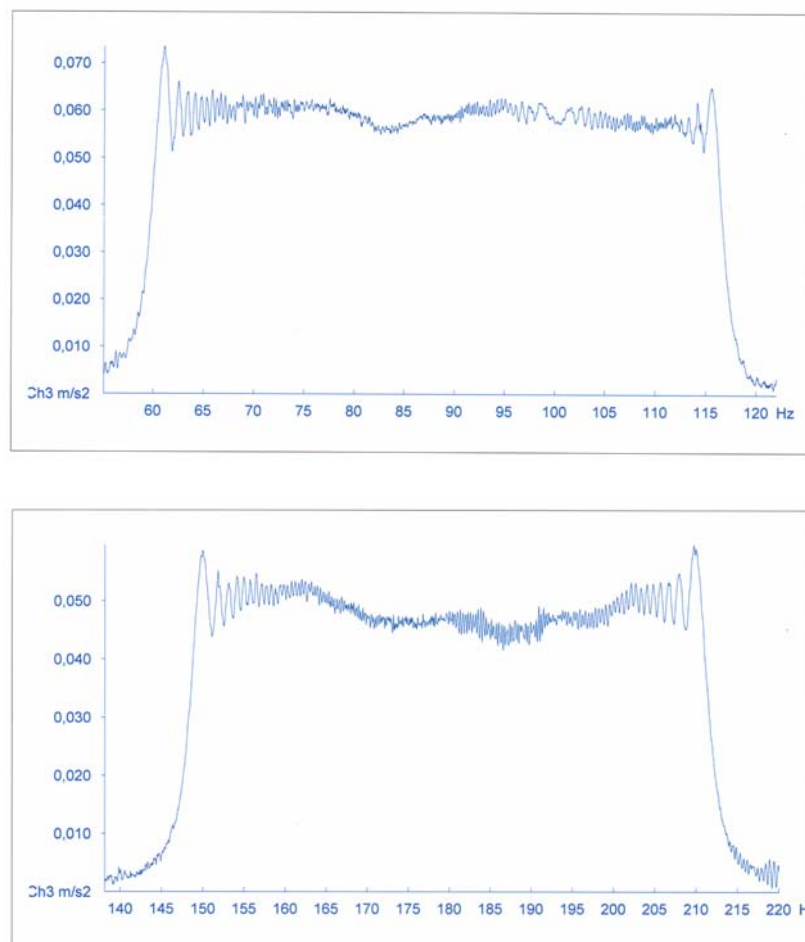


Abb.10: *Frequenzspektren der Schwingbeschleunigung der Generator-Grundplatte mit autoadaptiver Anregungskraftsteuerung*
 oben: 60-118 Hz-Sweep
 unten: 150-210 Hz-Sweep

Die Eigenschaften des **VibroScan.at** Verfahrens mit dem Schwingungsgenerator P23 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Äquivalenzkriterien bezüglich der Bahnerschütterungen werden bestmöglich erfüllt.
- Die Frequenzbereichsanforderungen von ISO 14837-1 und ON-ISO 2631-2 werden in vollem Umfang erfüllt. Dadurch entfallen alle Beschränkungen bei der Untersuchung von Erschütterungs- und Sekundärschallimmissionen. Zusätzlich kann das Eigenschwingungsverhalten der Gebäude erfasst werden.
- Die Umstellung von schwinggeschwindigkeitskonstanter auf schwingbeschleunigungs-konstante (=kraftkonstante) Anregung verbessert die Aussagekraft der Messdaten und erhöht dadurch die Prognosesicherheit und ermöglicht dynamische Untersuchungen aller Art einschließlich Admittanzmessungen.
- Die autoadaptive Servosteuerung sorgt für eine bisher nicht erreichbare Konstanz der Anregungskraft über den gesamten Frequenzbereich. Gleichzeitig liefert sie Informationen über Steifigkeit und Viskosität des Untergrunds, womit verschiedene Vibro-Positionen quantitativ verglichen werden können.
- Bewährte Prinzipien des VibroScan Verfahrens, wie die flächenhafte Kraftanregung mit geringer Flächenlast, sind beibehalten worden.

LITERATURVERZEICHNIS

- Krüger, F.: Ermittlung von Kenngrößen aus Messungen an Rohbautunneln zur Festlegung des aus Immissionsschutzgründen notwendigen Oberbaus. BMFT-Forschungsprogramm, Bericht 20, 1986.
- Krüger, F. et al.: Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr, Expert Verlag, Renningen, 2001.
- SGP Verkehrstechnik: Ungefederte Massen von Radsätzen, 1994.
- Stühler, W.: Schwingungstechnische Beurteilung von Gleisbettmatten. Bericht S1555/1, 1986.
- Lichtberger, B.: Handbuch Gleis. Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2004.
- Steinhauser, P.: VibroScan – a special seismic method. Proceedings, 56.EAEG-Tagung, 1994

NORMEN

- ISO 14837-1:2005 Mechanical vibration – Ground-borne noise and vibration – Part 1: General guidance
- ON ISO 2631-2 Mechanische Schwingungen und Stöße – Bewertung der Auswirkung von Ganzkörperschwingungen auf den Menschen.
Teil 2: Schwingungen in Gebäuden (1 Hz bis 80 Hz).

AUTOREN

Univ.Prof.Dr.Peter Steinhauser
Delugstraße 8, 1190 Wien, Österreich
Dipl.Ing.Wolfgang Steinhauser
Heiligenstädter Straße 9/42, 1190 Wien, Österreich
e-mail: office@steinhauser.eu