

Künstliche Erschütterungsanregung mit VibroScan.at

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

1. EINLEITUNG

Für Neubau-Eisenbahntunnel werden in bebauten Gebieten Erschütterungsprognosen benötigt, um vor dem Einbau des Eisenbahn-Oberbaus allenfalls erforderliche Maßnahmen zur Immissionsminderung treffen zu können.

Die Erschütterungsimmissionen des Schienenverkehrs werden durch

- die Erschütterungsanregung des Zuges,
- das Schwingungsverhalten des Tunnels (Mobilität),
- die Erschütterungsausbreitung im lokal vorhandenen Untergrund (Geodynamik) und
- das Schwingungsverhalten der einzelnen Gebäude und ihrer Bauteile (Baudynamik)

gesteuert. Diese Elemente sind als elastische Körper miteinander gekoppelt und beeinflussen sich entsprechend ihrer individuellen Schwingungseigenschaften gegenseitig stark durch Resonanzeffekte u.dgl., wodurch nichtlineare Übertragungsbedingungen entstehen.

Da rein theoretische Vorhersageberechnungen mangels ausreichender Eingangsdaten zwangsläufig sehr unsicher sind, hat sich die gezielte künstliche Erschütterungsanregung als Vorhersagebasis vielfach bewährt (Krüger, 2001). Zusätzlich sind Erschütterungsmessungen im Rohbautunnel auch geeignet, Schwingungsbrücken zwischen Tunnel und Gebäuden zu erfassen, wie sie bei seichter Tunnellage wiederholt als Baufehler auftreten und bei theoretischen Vorhersagemodellen gar nicht berücksichtigt werden können (Steinhauser, 2001). Welche Anforderungen dabei an die künstliche Erschütterungsquelle zu stellen sind und welche Analysemöglichkeiten sich ergeben, wird hier an Hand des modernen VibroScan.at (advanced technology) Verfahrens erläutert.

2. ÄQUIVALENZKRITERIEN

Wie bei jedem physikalischen Versuch besteht auch hier die grundsätzliche Forderung, dass die künstliche Erschütterungsquelle die realen Emissionen so wirklichkeitsgetreu wie möglich nachbilden kann.

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

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

Welche Anforderungen sich daraus ergeben, soll im folgenden kurz erläutert werden.

Die von Zügen ausgehenden Erschütterungsemissionen besitzen eine große Variationsbreite der angeregten Frequenzbänder, wie extreme Beispiele für Schotterbettstrecken zeigen (Abb.1). Wesentliche Emissionsfrequenzen können somit im Spektralbereich von 2-230 Hz liegen, was eine Bandbreite von fast 7 Oktaven ergibt. Bei einer Festen Fahrbahn können sogar

noch höhere Emissionsfrequenzen auftreten (Abb.2). Untergrundaufbau und Oberbauausführung sind somit für die Emissionsfrequenzen zumindest ebenso wichtig wie zugtechnische Kenngrößen (Fahrtgeschwindigkeit, Achsabstände usw.).

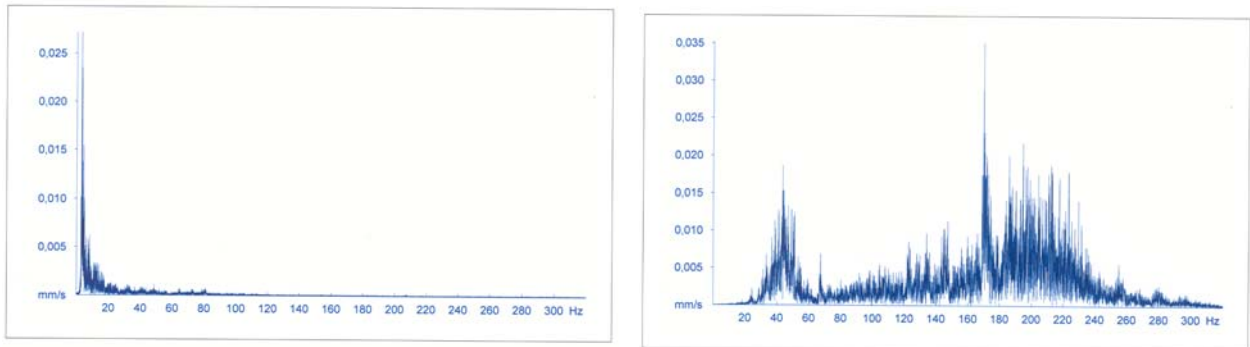


Abb.1: Variationsbreite der Emissionsspektren von Zügen auf Schottergleis in 10 m Distanz bei verschiedenen Untergrundbedingungen
 links: Strecke auf sehr weichen Quartärsedimenten ($f_{max} = 3 \text{ Hz}$)
 rechts: Strecke auf sehr steifem Tertiär ($f_{max} = 170 \text{ Hz}$)

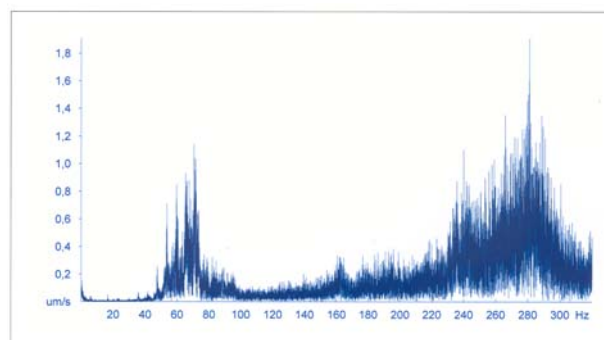


Abb.2: Charakteristisches Emissionsspektrum auf Fester Fahrbahn ($f_{max} = 280 \text{ Hz}$)

Das erschütterungsmäßig wirksame Gewicht bildet die maximale Achslast. Die größten Achslasten betragen derzeit für Güterwagen 225 kN und für Hochleistungslokomotiven 220 kN. Für Reisezugwagen sind häufig maximale Achslasten von 140 kN, bei Hochgeschwindigkeitszügen jedoch 170 kN charakteristisch.

Die Größe der auf die Schienen wirkenden dynamischen Last hängt außerdem von der Fahrtgeschwindigkeit u.a.m. ab und kann in einem Bereich von 30-100 kN streuen (Lichtberger, 2004).

Auch die Größe der ungedehnten Radsatzmasse besitzt eine große Bandbreite und liegt für Lokomotiven im Bereich von 2000-4000 Kg. Als Beispiel können die Siemens S103 mit 2000 kg und die Siemens 252 mit 3400 kg angeführt werden (Siemens, 2006).

Ein über das Gleis rollender Zug belastet mit jeder Achse die Schienen, die über Schwellen und Schotterbett die Last in den Untergrund abtragen.

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.

Der Untergrund federt im Bereich des sich vom Planum aus nach unten fortsetzenden Lastkegels entsprechend seiner elastischen Eigenschaften die Lasteinwirkung ab, wobei er auf die dynamische Last elastisch mit seismischen Schwingungen reagiert. Für das Resonanzverhalten des Untergrunds, den man hierzu als Ein-Massenschwinger approximieren kann, ist aber neben der Eigenfrequenz auch das Dämpfungsverhalten maßgeblich. Die sich aus Volumen und Dichte ergebende Masse des dynamisch durch die Krafteinwirkung eines Zuges über das Schotterbett belasteten Untergrunds wirkt dabei zufolge seiner Trägheit als die sogenannte Systemdämpfung. Um eine realistische, den Schienenverkehrsbedingungen entsprechende Übertragungsfunktion im Frequenzspektrum zu erhalten, ist auch bezüglich dieser Systemdämpfung bestmögliche Äquivalenz anzustreben.

Da das Eigenschwingverhalten des Teilsystems „fahrender Zug – Fahrweg“ somit auch durch die geometrischen Dimensionen gesteuert wird, bilden die Fläche und die durch die Krafteinwirkung hervorgerufene Flächenbelastung Steuerungsparameter (Steinhauser, 2007). Wie aus Abb.3 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.

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 nach Abb.3 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.

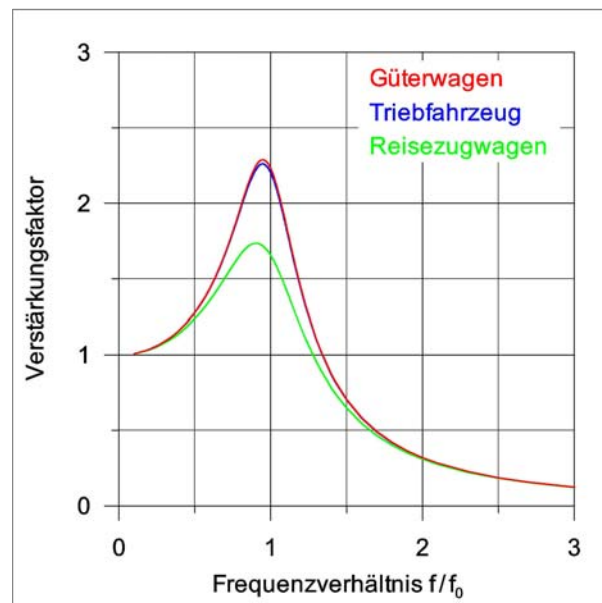


Abb.3: Bandbreite der Resonanzkurven des gekoppelten Systems Zug-Unterbau für Güterwagen sowie Triebfahrzeug und Reisezugwagen

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.4) dieser Vergleich mit den Zugparametern wiedergegeben.

Wie daraus ersichtlich ist, sind die Kennwerte des VibroScan Generators den Parametern der Zugserschütterung 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.

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.4: VibroScan.at Schwingungsgenerator im Weinbergtunnel, Zürich

Während aber beim Tunnelvortrieb mit gleislosem Material- und Mannschaftstransport eine ebene Tunnelsohle vorhanden ist, auf der für die Generator-Grundplatte vollflächiger Untergrundkontakt gegeben ist, ergibt sich bei Tunnelbau mit gleisgebundenem Transport die Schwierigkeit, dass eine lediglich auf den Schienen aufgesetzte Grundplatte nur einen Linienkontakt zum Untergrund bekäme. Welche Auswirkung dies auf das Schwingverhalten des Teilsystems „Grundplatte-Untergrund“ hätte, zeigt Abb.5 am Modell des Ein-Massenschwingers.

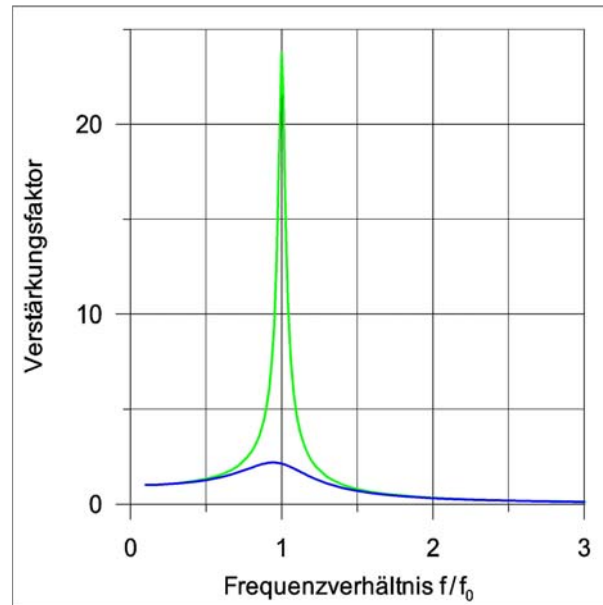


Abb.5: Resonanzkurven des gekoppelten Systems „Generatorgrundplatte-Untergrund“ in Abhängigkeit von der Anregungsform
 blau: flächenhafte Anregung; grün: Linienanregung

Während bei der flächenhaften Anregung die Resonanzkurve mit $V=2,14$ genau in den Bereich der Schienenfahrzeuge (siehe Abb.3) fällt, würde die Linienanregung die Kraftübertragung schmalbandig auf die Untergrundeigenfrequenz mit einer Resonanzverstärkung $V=24,0$ begrenzen. Um dies zu verhindern ist es erforderlich, bei jeder Anregungsposition den Raum zwischen den Schienen durch Ausgleichsbeton ähnlich wie bei Straßenbahnschienen einzuebnen. Damit kann auch in diesem Fall eine flächenhafte Erschütterungsanregung erzielt werden.

Beim Gotthard Basis Tunnel ist zwischen den beiden Gleisen zusätzlich ein breiter Drainage-Kanal für die Tunnelentwässerung vorhanden. Um auch diesen zu überbrücken, war es erforderlich, eine aus Stahlträgern zusammengesetzte Platte einzuschieben (Abb.6), wodurch die bestmögliche Realisierung einer flächenhaften Anregung auch in diesem besonderen Fall erzielt worden ist.



Abb.6: Anregungsposition im Gotthard Basis Tunnel mit Ausgleichsbeton und Stahlplatte zur Überbrückung des Drainage Kanals

4. VERGLEICHBARKEIT VON KÜNSTLICHER UND ECHTER ANREGUNG

Das Ausmaß der erzielbaren Äquivalenz der Stärke von Sweepanregung und Zugschütterung zeigen die Abbildungen 7 und 8 am Vergleich aufeinanderfolgender Immissionen eines 7-76 Hz Sweeps mit 102 kN Sollstärke aus dem Lainzer Tunnel mit denen eines Zuges auf der Bestandstrecke an der Geländeoberfläche, wobei die Distanz des Immissionsmesspunkts zu beiden Quellpositionen mit 23 m (Tunnel) und 27 m (Bestandstrasse) nahezu identisch war.

Wie aus den Abbildungen ersichtlich ist, sind die von beiden Erschütterungserregern ausgehenden Immissionen hinsichtlich Schwinggeschwindigkeit und Bewerteter Schwingstärke außerordentlich gut vergleichbar. Ebenso zeigen erwartungsgemäß die Frequenzspektren beider Erschütterungsquellen bei 30 Hz die gleichen Frequenzmaxima.

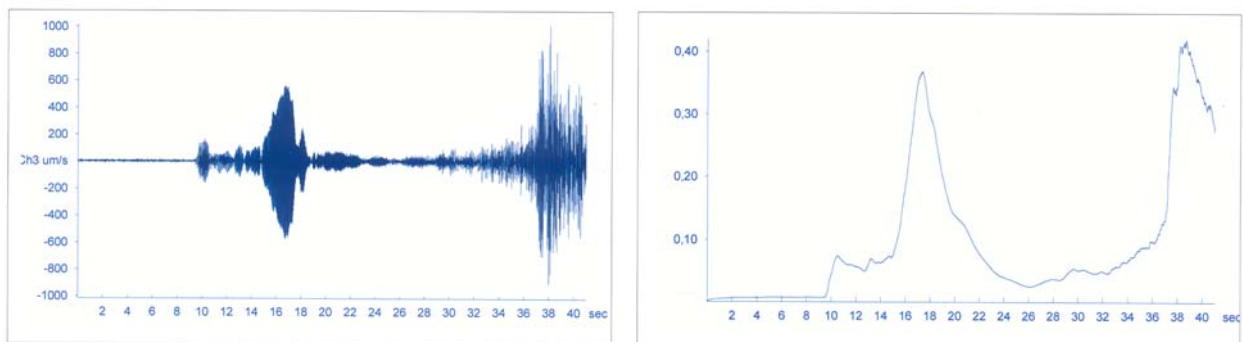


Abb.7: Immissionsvergleich eines 7-76 Hz Sweeps mit Zugserschütterungen:
links: Seismogrammverlauf der Erschütterungsimmisionen eines 7-76 Hz Sweeps aus dem Tunnel (Ende Registriersekunde 30) und eines Zuges auf der freien Strecke (ab Registriersekunde 29)
rechts: Verlauf der Bewerteten Schwingstärke K_B

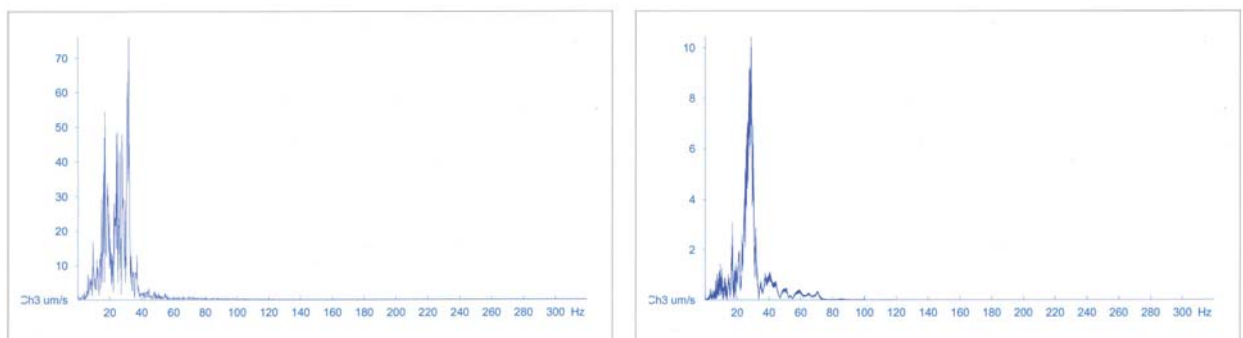


Abb.8: Immissionsvergleich eines 7-76 Hz Sweeps mit Zugserschütterungen:
links: Frequenzspektrum des Zuganteils vom Seismogramm von Abb.7
rechts: Frequenzspektrum des Sweepanteils vom Seismogramm von Abb.7

5. WECHSELWIRKUNG SCHWINGUNGSGENERATOR-UNTERGRUND

Wie bereits zuvor diskutiert worden ist, bilden die Erregermasse und die durch ihre Steifigkeit und viskose Dämpfung charakterisierte Unterlage einen Schwingkreis (Abb.9).

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 Vibrationsignals vom Generator-Steuersignal auftreten und entsprechende Nichtlinearitäten entstehen. Als Schwingungssystem besitzt es Eigenfrequenzen, die von den beteiligten Elementen gesteuert werden und typischerweise im Bereich von 10-50 Hz liegen. In diesem Frequenzbereich erfordert die Schwingungsanregung des Untergrunds weniger Kraftaufwand als in entfernteren Frequenzbereichen.

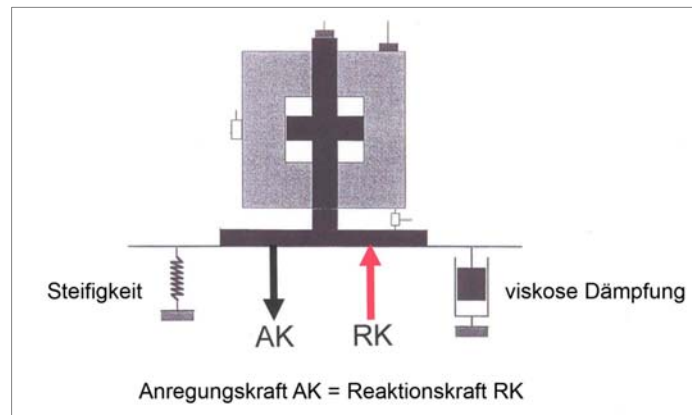


Abb.9 Schema der Wechselwirkung Schwingungsgenerator-Untergrund

Abb.10 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 25-100 Hz (Sweep-Laufzeit ab ca.100 s) variiert demnach die eingeleitete Kraft um den Faktor 3,0 oder 10 dB.

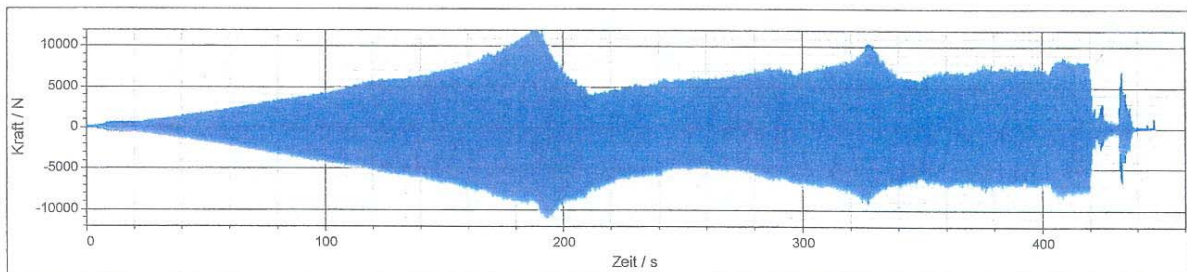


Abb.10: Kraftverlauf eines 10-110 Hz Sweeps auf der Bahntrasse bei konstanter Anregungskraft des Generators ohne Aussteuerung für die dynamische Reaktion des Untergrunds

6. AUTOADAPTIVE KRAFTAUSSTEUERUNG

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 durch eine hydro-mechanische Phasenregelung zu erreichen. 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.11) des VibroScan.at-Schwingungsgenerators.

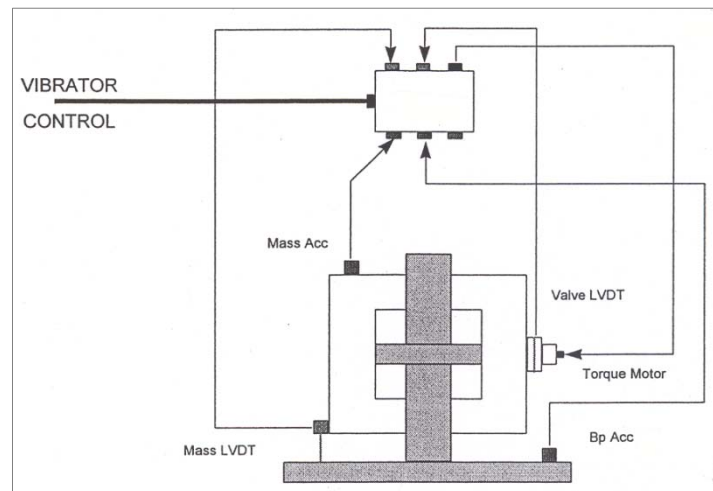


Abb.11: *Sensoranordnung des Schwingungsgenerators für die Kraftaussteuerung*
 LVDT: Kraftsensor Acc: Beschleunigungssensor

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 µs-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 2-5 Hz/s), kann eine hohe Kraftkonstanz erzielt werden (Abb.12), da je Hertz Frequenzänderung 1000-2000 Kraftmess- und Aussteuerungszyklen erfolgen. Der entscheidende Fortschritt der Erschütterungsanregung 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.

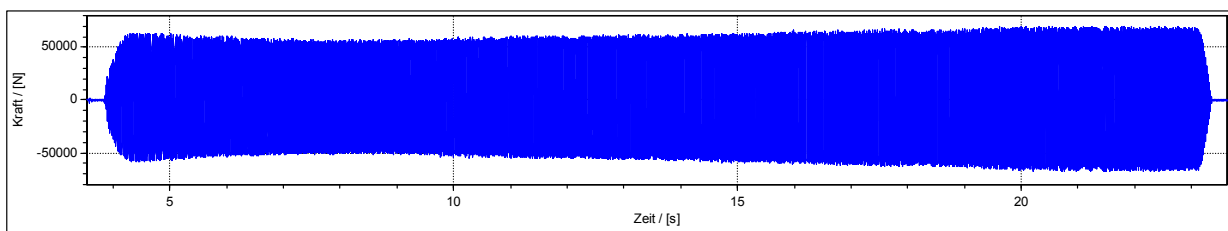


Abb.12: *Kraftverlauf eines 36-96 Hz Sweeps auf einer bituminösen Tragdeckschicht mit auto-adaptiver Kraftaussteuerung*

Zusammenfassend ergibt sich, dass die Anregungskraft nach dem Prinzip der autoadaptiven Aussteuerung gemessen und im Zeitfaktor von wenigstens 1000:1 zur konstanten Aussteuerung der in den Untergrund tatsächlich eingeleitete Kraft verwendet wird, wodurch Nichtlinearitäten der Kraftanregung wirkungsvoll unterdrückt werden.

Infolge der Rückkopplung zwischen der Generator-Grundplatte und der Tunnelsohle samt Untergrund unterscheidet sich die in den Untergrund tatsächlich eingeleitete Anregungskraft von der nominellen entsprechend der Steifigkeit des belasteten Untergrunds. Wie aus dem Beispiel des Weinbergtunnels in Abb.13 ersichtlich ist, hängt die durch die Grundplatte ausgelöste Schwingbeschleunigung und damit die Kraft von der die Steifigkeit charakterisierenden Bettungsziffer ab.

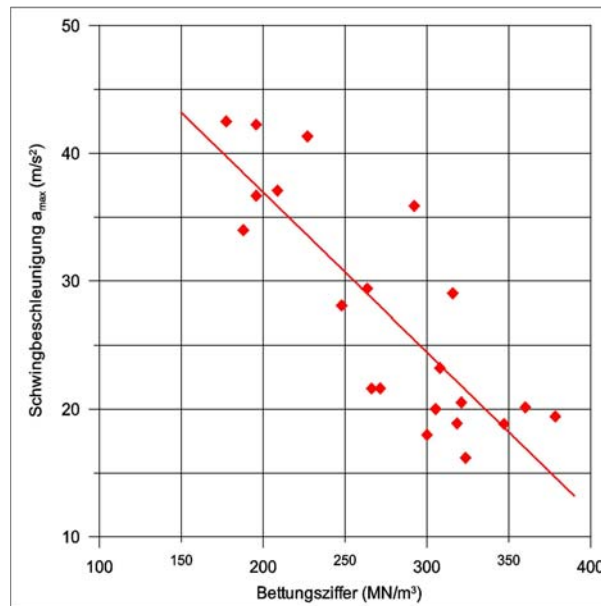


Abb.13: Maximale Schwingbeschleunigung a_{\max} hervorgerufen durch eine nominelle Anregungskraft von 68 kN in Abhängigkeit von der Steifigkeit an den Messpositionen im Weinbergtunnel

7. ADMITTANZUNTERSUCHUNG

Die Admittanz stellt ein Maß für die Anregbarkeit (Mobilität) einer Struktur zu Schwingungen am Ort der Kraftanregung dar. Sie bildet somit ein Maß für die Schwingungsempfindlichkeit eines gekoppelt schwingenden Systems, das hier aus dem Schwingungsgenerator und der Tunnelröhre, die ihrerseits im umgebenden Gebirge gelagert ist, gebildet wird. Diese Kennzahl bzw. Kennfunktion beschreibt anders herum gesehen das Emissionsverhalten des Tunnels im Frequenzbereich.

Wie das Beispiel in Abb.14 vom Lainzer Tunnel in Wien zeigt, können auf kurzen Distanzen sehr große Veränderungen auftreten, die als Folge der sich ständig ändernden geologischen Bedingungen angesehen werden müssen.

Wie dies bei NÖT-Tunnel häufig zu beobachten ist, nimmt die Admittanz oder Mobilität von den niederen zu den hohen Frequenzen hin ab. Zusätzlich wird im betrachteten Streckenabschnitt von knapp 1,3 km Länge in den Tunnel hinein die Mobilität noch um eine Größenordnung kleiner.

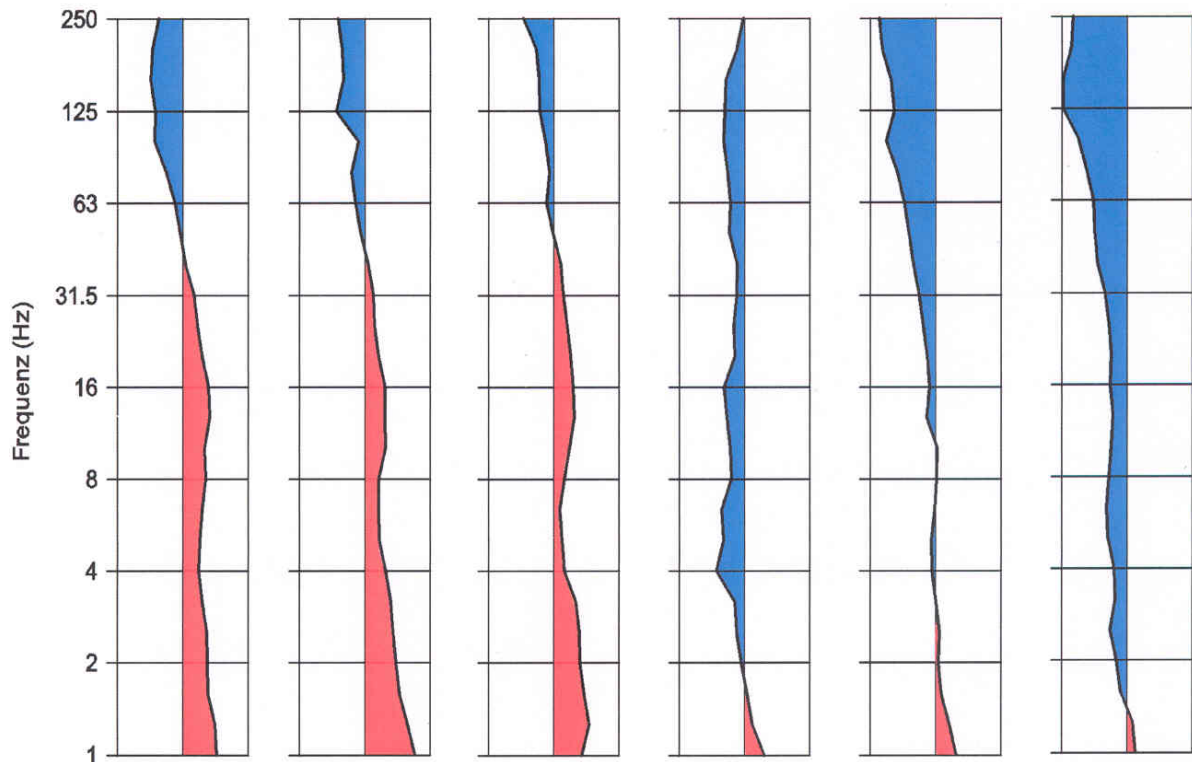


Abb.14: Vergleich der Admittanzspektren der Tunnelsohle im Streckenabschnitt Lainzer Tunnel Güterschleife km 1,75-0,47
 rot: Admittanz Y : 10^{-5} bis $10^{-7} \text{ ms}^{-1}/N$
 blau: Admittanz Y : 10^{-7} bis $10^{-9} \text{ ms}^{-1}/N$

8. SWEEP-QUALITÄTSKONTROLLE

Im Schwingungsgenerator befinden sich zwei voneinander unabhängige Elektronik-Systeme. Einerseits das Sweep-Steuerungssystem, das den Sweep-Ablauf hinsichtlich der Sweep-Parameter (Dauer, Sollkraft, Frequenzband, zeitliche Frequenzänderungsrate) lenkt und die Sollkraft entsprechend der gemessenen Reaktion des Untergrunds autoadaptiv aussteuert.

Unabhängig davon wird die Qualität der erzeugten Sweeps mit Hilfe von Präzisions-Beschleunigungsaufnehmern überwacht und analysiert, sodass unmittelbar nach dem Ende jedes Sweeps eine Reihe Kontrollparameter für eine sofortige Qualitätskontrolle verfügbar ist.

Dabei wird das Schwingbeschleunigungsseismogramm der Grundplatte u.a. wie folgt analysiert:

- Spektrogramm zur Oberwellenidentifikation;
- Verhältnis der Oberwellenfrequenzamplituden zur Frequenzamplitude der Grundschwingung;
- Verlauf der eingeleiteten Kraft während des Sweeps;
- harmonische Verzerrung (Klirrfaktor);
- Wavelet-Korrelationsanalyse;
- Wavelet-Geisterkorrelationsanalyse.

Am Beispiel eines 10-120 Hz Sweeps mit 20 Sekunden Dauer von der Anregungsposition 21 im Weinbergtunnel in Zürich kann der Informationsgehalt dieser Analysen gezeigt werden.

Abb.15 zeigt die Beschleunigungsregistrierung im Zeitbereich zusammen mit der Spektralanalyse im Frequenzbereich,

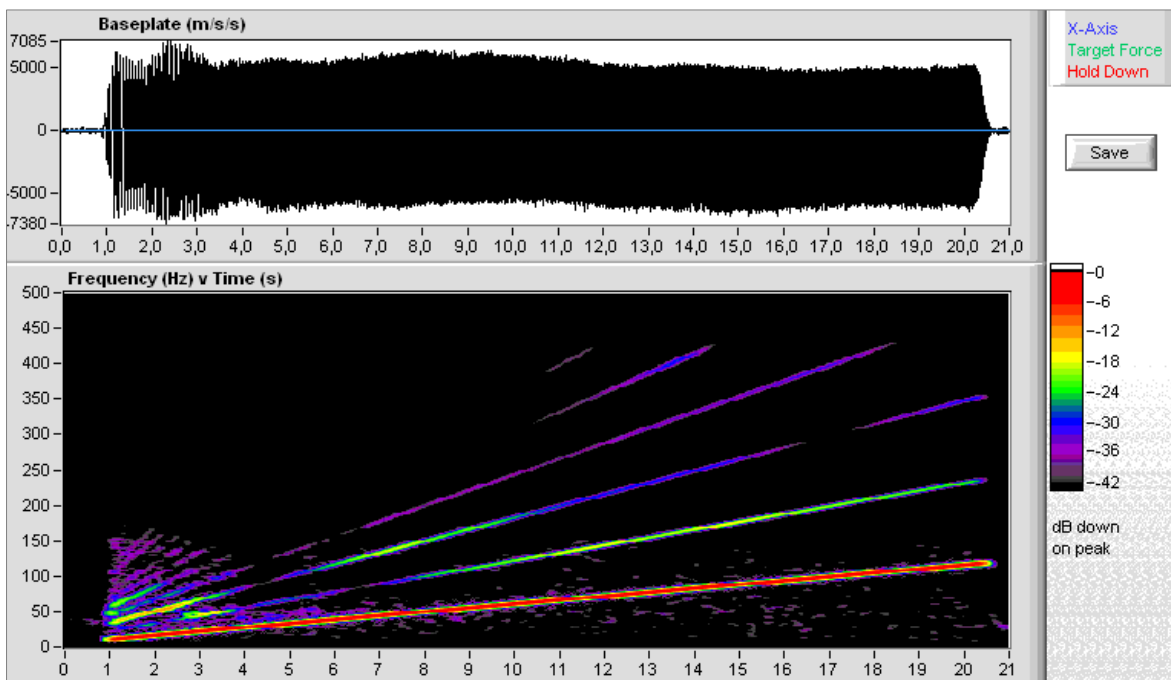


Abb.15: Spektrogrammanalyse eines 10-120 Hz Sweeps

Aus dem oberen Abbildungsteil ist sofort ersichtlich, wie weit es gelungen ist, während des Sweeps die Kraft konstant zu halten. Das Spektrogramm zeigt, dass im niederfrequenten Bereich (10-15 Hz) bis zu 9 Oberwellen mit angeregt werden, die mit anwachsender Frequenz bis auf 4 wieder verschwinden.. Wie Abb.16 belegt, sind diese Oberwellen aber insgesamt energiereich und um mindestens 15 dB schwächer als die Grundschwingung.

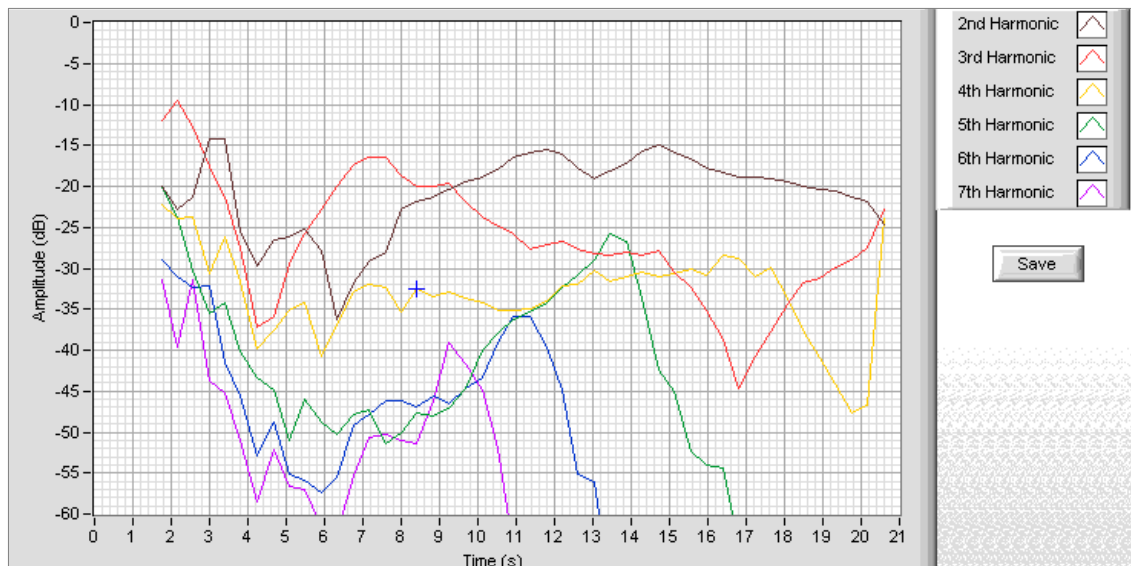


Abb.16: Verhältnis der Frequenzamplituden der 1.-6. Oberwellen zu der der Grundschwingung in dB

Wieweit durch die Aussteuerung tatsächlich Kraftkonstanz während des Sweeps erzielt wird, zeigt die Analyse von Abb.17 für die Grundschwingung und die Gesamtkraft.

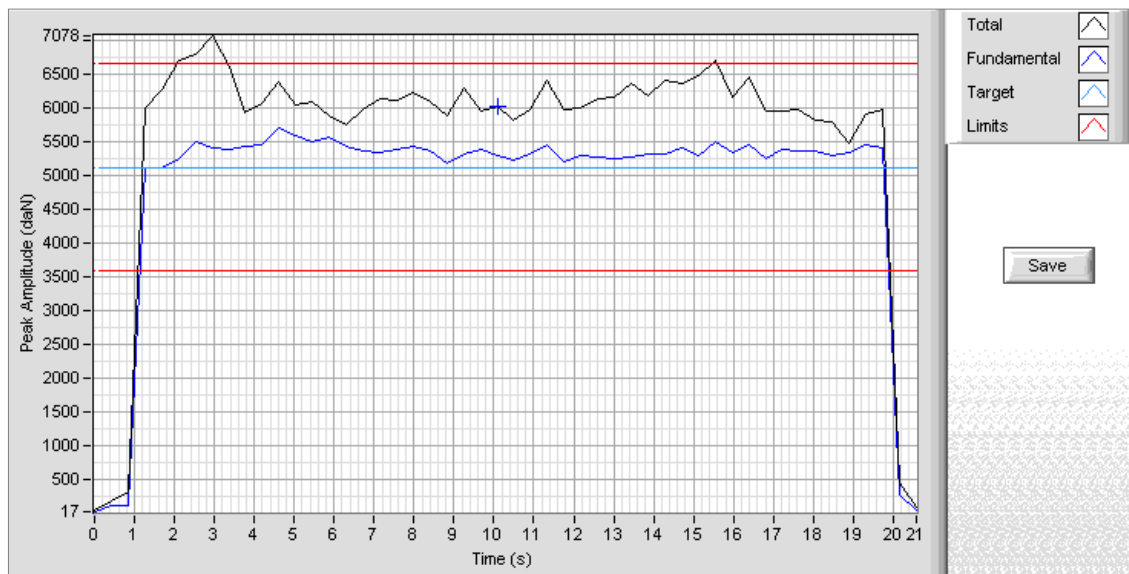


Abb.17: Kraftverlauf während des Sweeps
blau: Grundschiwingung; schwarz: Gesamtkraft

Die Abweichungen vom Aussteuerungsziel sind während des Sweeps durchwegs kleiner als 1 dB für die Grundschiwingung und 2 dB für die Gesamtkraft.

Die harmonische Verzerrung, häufig auch als Klirrfaktor bezeichnet, gibt die Größe des Anteils an, der durch nichtlineare Verzerrung der Schwingung entsteht. Dabei wird die totale Verzerrung, die der geraden bzw. der ungeraden Oberwellen sowie die subharmonische Verzerrung unterhalb der Grundfrequenz analysiert. Wie aus Abb.18 ersichtlich ist, bewegen sich alle Anteile während des Sweeps im Bereich von 4-20%.

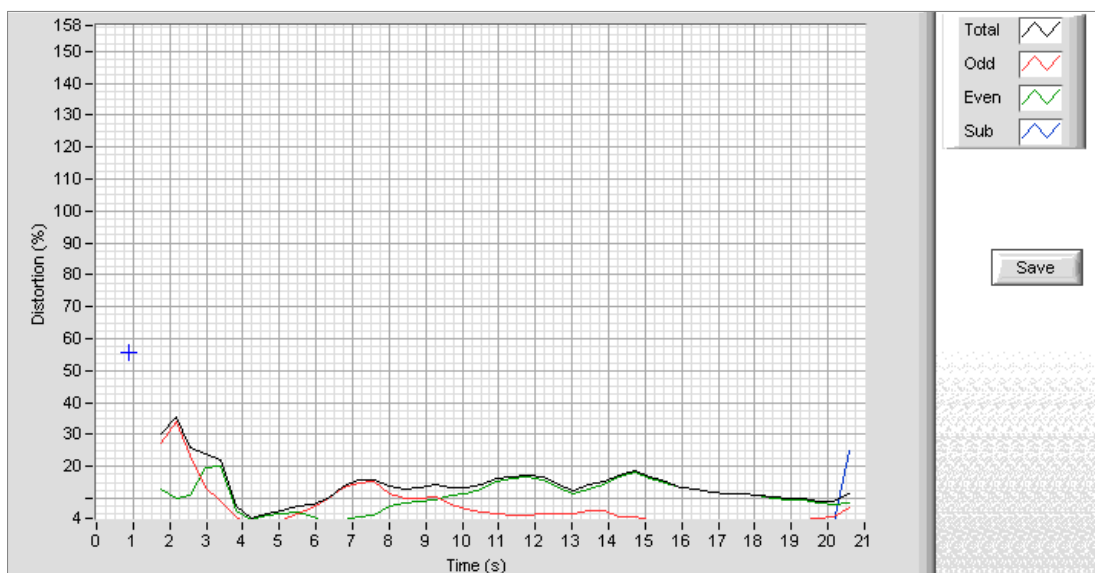


Abb.18: Sweep-Verzerrungsanalyse
schwarz: totale Verzerrung; rot: ungerade Harmonische; grün: gerade Harmonische, blau: Subharmonische

Die Wavelet-Analyse ermöglicht einerseits die Beurteilung der Uniformität der Krafterleitung durch die Grundplatte mittels simultaner Auto- und Kreuzkorrelationsanalyse im Millisekunden-Zeitbereich (Abb.19) und andererseits die der Sweepgleichförmigkeit über die gesamte Sweepldauer (Abb.20), wodurch sie ähnliche Informationen wie die Spektrogramm- oder Verzerrungsanalyse liefert.

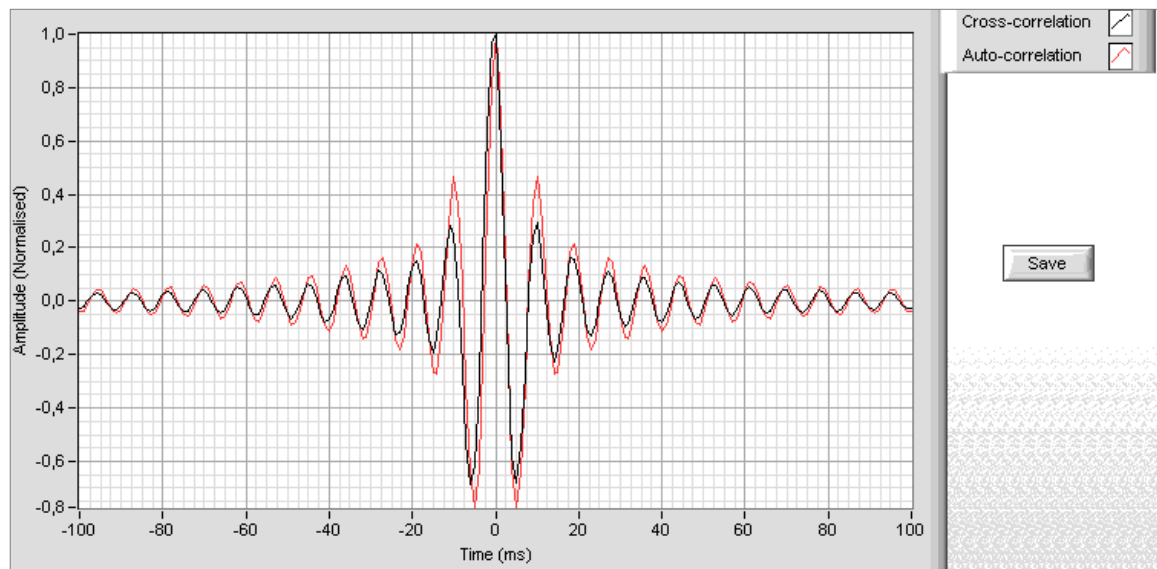


Abb.19: Wavelet-Analyse der Krafterregung
rot: Auto-korrelations-Wavelet des Referenzsignals;
schwarz: Kreuzkorrelations-Wavelet mit Datensignal

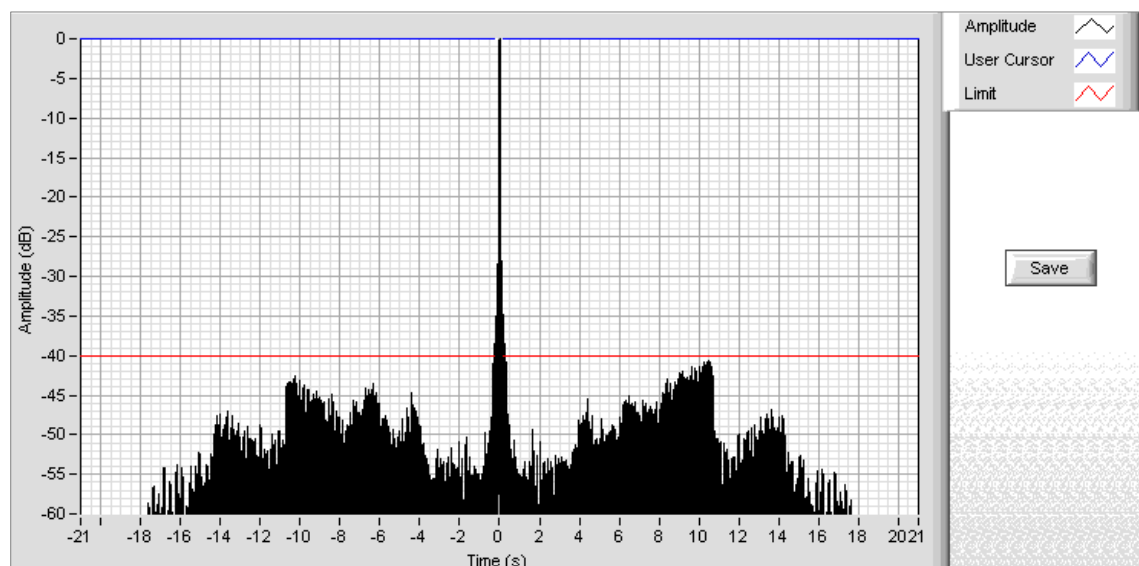


Abb.20: Wavelet-Analyse des gesamten Systems

Geisterkorrelationen werden demnach mit mehr als 40 dB unterdrückt. Die Anregung der gewünschten Grundschwingung ist in diesem Ausmaß dominant.

Einen entscheidenden Punkt der Qualitätskontrolle bildet das Ausmaß der Reproduzierbarkeit der Frequenzsweeps. Da die zuvor diskutierten Beispiele gezeigt haben, dass der Sweepverlauf in hohem Ausmaß durch die autoadaptive Aussteuerung geregelt wird, ist es ausreichend, die Reproduzierbarkeit des Beschleunigungsmaximums zu prüfen. In Abb.21 ist dazu das Ergebnis einer Wiederholungsserie von 6 Sweeps an der Position 240 im Gotthard Basis Tunnel wiedergegeben,

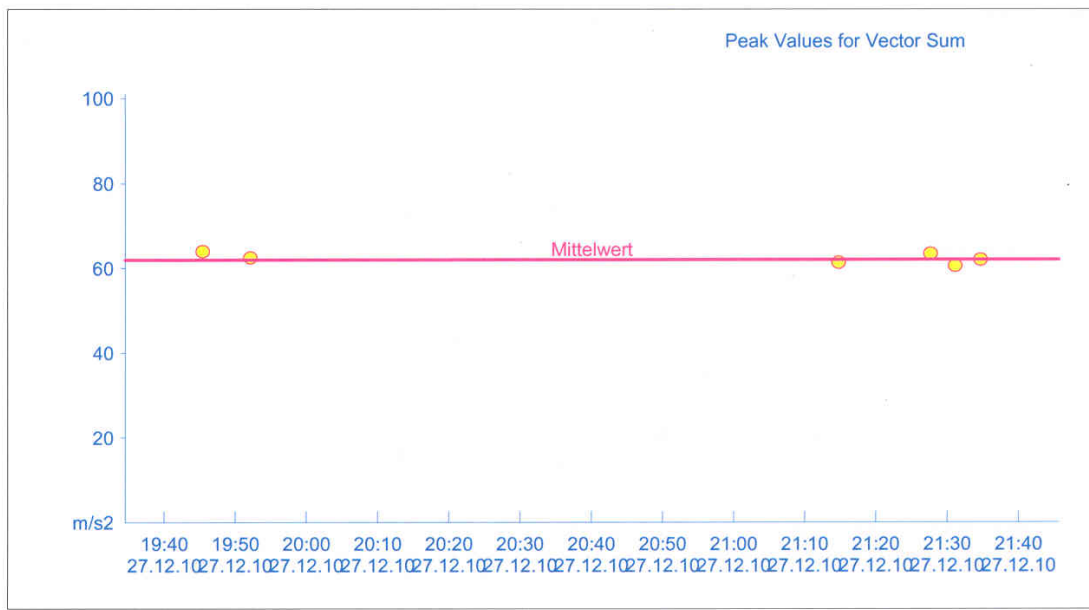


Abb.21: Maximale resultierende Beschleunigung von 5-220 Hz Sweeps an der Position 240 im Gotthard Basis Tunnel

In dieser zweistündigen Versuchsserie, die der Abstimmung der Versuchsanordnungen diene, sind die Beschleunigungsmaxima mit $\pm 2\%$ genau reproduzierbar gewesen. Diese Streubreite ist um etwa eine Größenordnung kleiner als die von den Messgerätenormen zugelassenen Messtoleranzen und somit vernachlässigbar.

9. CONCLUSIO

Bezüglich der Erschütterungsanregung mit dem VibroScan.at gilt zusammenfassend

- flächenhafte Kraftanregung mit geringer Flächenlast bewirkt eine hohe Systemdämpfung bezüglich des Untergrunds;
- infolge der geringen Resonanzüberhöhung frequenzmäßig breitbandige, gleichmäßige Erschütterungsanregung;
- bestmögliche Erfüllung der Äquivalenzkriterien bezüglich Bahnerschütterungen;
- Anregungskraft nicht nur gemessen, sondern autoadaptiv im gesamten Frequenzband angesteuert;
- konstante Anregungskraft vermeidet nichtlineare Verzerrungen;
- Messdaten für Kraftaussteuerung beschreiben auch elastische Bettung und viskose Dämpfung des Untergrunds;
- Kraftmessung ermöglicht Admittanzuntersuchungen der jeweils angeregten Struktur;

- VibroScan.at bildet universelle künstliche Erschütterungsquelle für Verkehrserschütterungsuntersuchungen, dynamische Baugrunderkundungen, Brücken- und Deckenschwingungsmessungen;
- künstliche Erschütterungsanregung vor Ort benötigt keine theoretischen Annahmen über de facto unbekanntes Verhalten des Untergrunds und ermöglicht rechtzeitige Lokalisierung von Baufehlern (Schwingungsbrücken).

LITERATURVERZEICHNIS

- Krüger, F. et al.: Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr, Expert Verlag, Renningen, 2001.
- Lichtberger, B.: Handbuch Gleis. Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2004.
- Siemens: Im Eiltempo durch Europa. pof, 2006.
- Steinhauser, P.: Die Untersuchung technischer Erschütterungen – ein Beitrag der Geophysik zum Umweltschutz. In: 150 Jahre Meteorologie und Geophysik in Österreich, Leykam, Graz 2001.
- Steinhauser, P. u.W.: Neue Möglichkeiten zur Erschütterungsuntersuchung durch das Vibro Scan advanced technology Verfahren. 10.Symposium über Bauwerksdynamik, EMPA, 2007.

AUTOREN

Univ.Prof.Dr.Peter Steinhauser
 Delugstraße 8, 1190 Wien, Österreich
 Dipl.Ing.Wolfgang Steinhauser
 Delugstraße 6/3, 1190 Wien, Österreich
 e-mail: office@steinhauser.eu