

Einsatz eines dynamischen Erregers in der Bauwerksdynamik

Dr. A. Ziegler; ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich

1 Einführung

Der dynamische Erreger ist ein Hilfsmittel, das bei sehr vielen Problemstellungen der Bauwerksdynamik wertvolle Dienste leisten kann. Zumeist wird allerdings davon ausgegangen, dass ein solcher Erreger sehr schwer und auch sehr kostspielig im Einsatz sein muss. Es gibt jedoch auch kleinere elektro-dynamische Erreger, die leicht von zwei Personen getragen werden können und einfach zu bedienen sind. Im vorliegenden Beitrag wird gezeigt, wie mit einem nur etwa 120 kg schweren Erreger zahlreiche Problemstellungen der Bauwerksdynamik elegant, zuverlässig und mit relativ geringem Aufwand gelöst werden können.

2 Aufbau des dynamischen Erregers

Der von uns verwendete elektrodynamische Erreger (siehe Bild 2.1) besteht im wesentlichen aus einer Spule, einem Magneten und zwei seitlich angehängten Massen. Gesteuert durch das veränderliche elektrische Magnetfeld wird die Masse bewegt und überträgt auf diese Weise ihre Trägheitskraft auf die Unterlage. Die Masse von 30.8 kg wird durch Gummibänder in der Null-Lage gehalten und kann unter der Wirkung der Magnetkräfte 10 cm nach oben und nach unten bewegt werden. Mit einem Frequenzgenerator und einem Leistungsverstärker kann eine Schwingung zwischen 0.2 und 200 Hz erzeugt werden.



Bild 2.1 Elektrodynamischer Erreger von APS

Im Bereich von 1.5 BIS 10 Hz entfaltet der Erreger seine volle Kraft von 445 N. Die Masse erreicht dabei eine maximale Beschleunigung von 14.5 m/s^2 . Unterhalb 1.5 Hz ist die Kraft durch die maximal mögliche Wegamplitude begrenzt, oberhalb 10 Hz durch die Kapazität des Leistungsverstärkers (vgl. Bild 2.2).

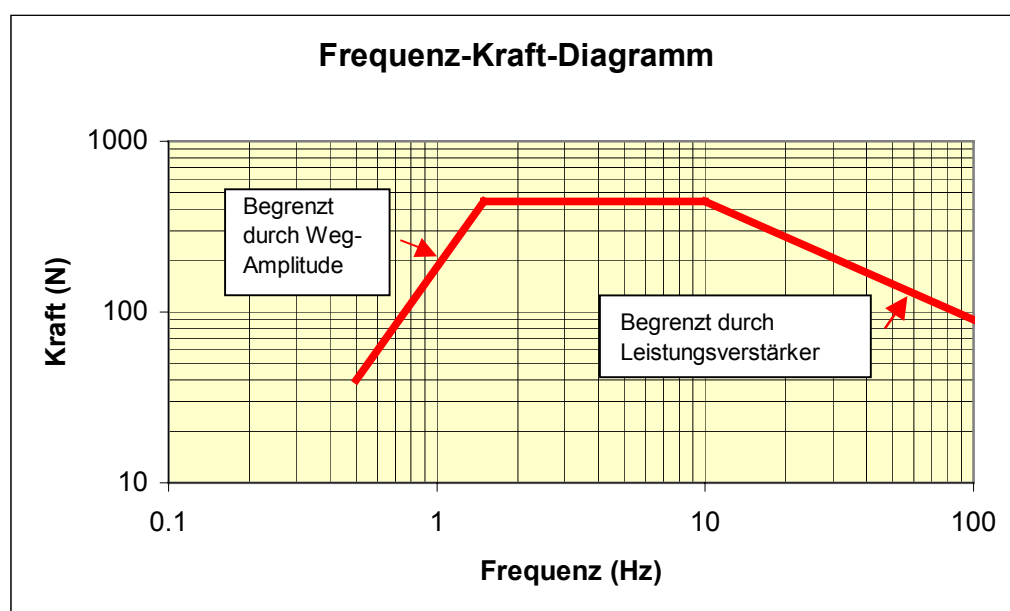


Bild 2.2 Frequenz-Kraft-Diagramm des elektro-dynamischen Erregers APS 400

3 Bestimmung der Eigenfrequenz

3.1 Geschossdecke im Verkehrshaus Luzern

Das Verkehrshaus Luzern hatte beschlossen, einen über hundert Jahre alten Schiffsdieselmotor in seine Ausstellung aufzunehmen (siehe Bild 3.1). Der Motor sollte dabei auch im Betrieb gezeigt werden können. Damit aber durch die Erschütterungen nicht andere Ausstellungsgegenstände in Bewegung geraten, war eine elastische Lagerung zu konzipieren, die die auf die Geschossdecke abgegebenen Kräfte in einem zulässigen Rahmen hält.

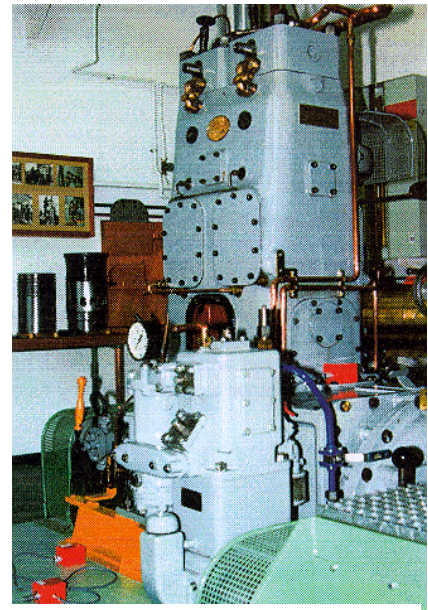


Bild 3.1 Schiffsdieselmotor im Verkehrshaus Luzern

Für die Dimensionierung des Motoren-Fundamentes und seiner elastischen Lagerung musste als erstes die Eigenfrequenz der Geschossdecke bestimmt werden. Diese Bestimmung wurde einerseits mit Hilfe des dynamischen Erregers, andererseits durch stossartige Anregung (durch Hüpfen) durchgeführt. Bild 3.2 zeigt die mit dem Erreger bestimmte Resonanzkurve, Bild 3.3 die durch Stossanregung bestimmte.

Die beiden Bilder zeigen – was für eine einfach gelagerte Betondecke auch zu erwarten war - eine sehr gute Übereinstimmung. Beide weisen eine 1. Eigenfrequenz von 16 Hz aus und zeigen auch die 2., 3. und 4. Eigenfrequenz. Der Vorteil der mit dem Erreger bestimmten Resonanzkurve liegt in der numerischen Auswertbarkeit. Mit der Methode „Hüpfen“ lässt sich zwar die Eigenfrequenz ebenfalls exakt bestimmen, doch liefert die Methode „Erreger - wegen der kontrollierten Krafteinleitung - zusätzlich die dynamische Steifigkeit. D.h. wir wissen für jede Frequenz, welche Kraftamplitude zu welcher Wegamplitude führt.

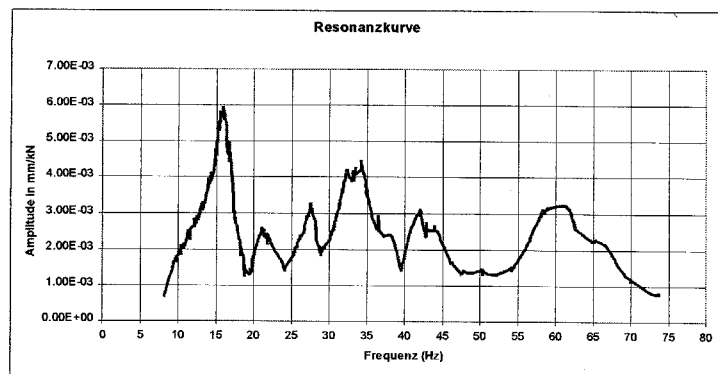


Bild 3.2 Resonanzkurve bestimmt durch dyn. Erreger

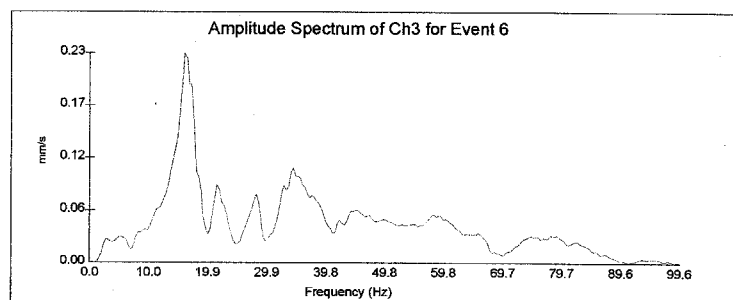


Bild 3.3 Resonanzkurve bestimmt durch stossartige Anregung

Mit den dynamischen Kräften des Motors und aus Bild 3.2 konnte für die Geschossdecke im Verkehrshaus Luzern abgeleitet werden, dass bei 16 Hz mit einer

Schwinggeschwindigkeit von 4 mm/s gerechnet werden muss. Wird die Drehzahl – was für ein Ausstellungsstück durchaus zumutbar ist – auf 10 Hz beschränkt, so ergibt sich nur noch eine maximale Amplitude von 0.5 mm/s. Mit einer einfachen Isolation mit Sylomer-Platten (PU-Schaum-Platten) unter dem Maschinenfundament konnte die Schwingung der Decke unter der Wahrnehmungsgrenze von 0.2 mm/s gehalten werden.

3.2 Rosenbergertunnel St. Gallen

Für die Sanierung des Rosenbergertunnels in St. Gallen sollte die Eigenfrequenz der Tunneldecke bestimmt werden. Neben den Messungen direkt an den Stahlträgern der Tunneldecke, haben wir – was wesentlich weniger aufwendig ist – versucht, die Eigenfrequenz der Tunneldecke mittels einer Messung auf dem Parkplatz über der Tunneldecke zu bestimmen. Hierzu haben wir als Anregung den dynamischen Erreger APS 400 sowie die Anregung durch den Zugverkehr und die Anregung durch Hüpfen eingesetzt. Bild 3.4 zeigt das Portal zum Rosenbergertunnel. Der Messpunkt befand sich auf dem Teerbelag des Parkplatzes über dem Tunnel.



Bild 3.4 Portal zum Rosenbergertunnel

Bild 3.5a zeigt die Resonanzkurve bei Anregung durch den dynamischen Erreger APS 400. Deutlich erkennbar sind die beiden Frequenzspitzen bei 17 und bei 23 Hz. Des weiteren sieht man – zwar nicht mehr so deutlich – Frequenzspitzen bei 37 Hz, bei 54 Hz und bei 71 Hz.

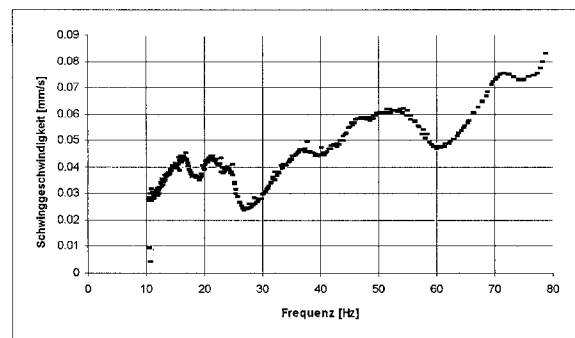


Bild 3.5b zeigt das Amplitudenspektrum bei einer Zugdurchfahrt. Hier erkennt man Hauptfrequenzen um 20 Hz, 50 Hz und 90 Hz. Die dominanten Frequenzen um 20 Hz stimmen überein mit den in Bild 3.5a gezeigten Frequenzspitzen von 17 und 23 Hz. Eine exakte Bestimmung der beiden Hauptfrequenzen ist jedoch nicht möglich. Die dominanten Frequenzen um 50 Hz stimmen überein mit der in Bild 3.5a gezeigten Frequenzspitze bei 54 Hz, doch ist hier zu beachten, dass der Zugverkehr ohnehin in diesem Frequenzbereich seine dominante Erregerfrequenz hat.

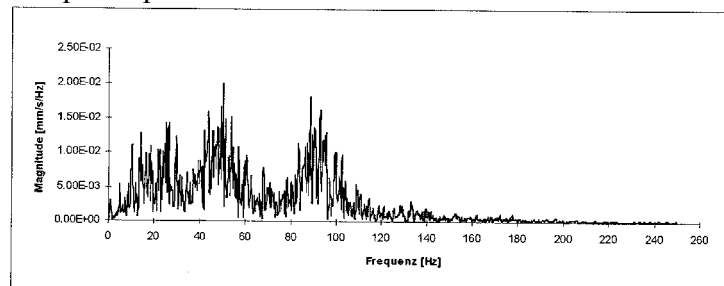


Bild 3.5c zeigt das Amplitudenspektrum für Anregung durch Hüpfen. Hier lassen sich die beiden Hauptfrequenzen bei 17 und 23 Hz recht deutlich erkennen.

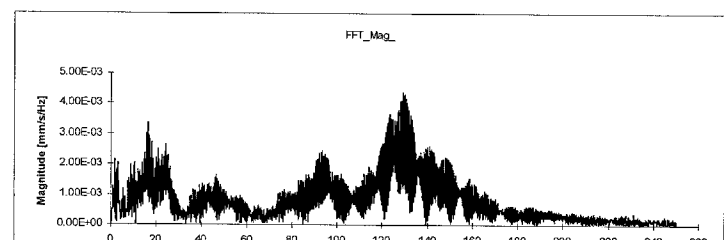


Bild 3.5a – c: Resonanzkurve (von oben nach unten) aus Anregung durch a) dyn. Erreger APS 400, b) Anregung durch Zugdurchfahrt und c) Anregung durch Hüpfen.

Der Vergleich zeigt, dass sich mit dem dynamischen Erreger die beste Frequenzbestimmung ergibt. Trotzdem gelangt man, wegen der starken Dämpfung des Bodens und wegen des relativ hohen Hintergrund-Erschütterungspegels, an die Grenzen des dyn. Erregers dieser Grösse.

4 Wahl der elastischen Lagerung

Der neuerstellte Tunnel für das 2 km lange Kies-Förderband hatte für einen Hausbesitzer recht unangenehme Nebenwirkungen. Durch die Vibrationen der Förderband-Auflager wurde der ganze Tunnel und damit das umgebende Erdreich und auch das Einfamilienhaus, unter dem der Tunnel durchführte, in Schwingung versetzt. Die Schwingungen waren zwar nicht spürbar, doch verursachten sie abgestrahlten sekundären Schall (sog. Körperschall), der als unangenehmes Brummen Tag und Nacht wahrgenommen wurde.

Als Sanierung bot sich die elastische Lagerung der Förderband-Auflager an. Durch geeignete elastische Elemente sollte die Übertragung der Vibrationen im hörbaren Bereich, d.h. Vibrationen über 35 Hz, möglichst stark reduziert werden. Für die Wahl der geeigneten Elemente wurde ein rein empirisches Verfahren gewählt.

Ein Abschnitt des Förderbandes wurde mit dem dynamischen Erreger APS 400 im Frequenzbereich von 5 bis 100 Hz angeregt (siehe Bild 4.1). Gleichzeitig wurden die Schwingungen des Förderbandträgers und diejenigen des Betonbodens gemessen. Diese Messung wurde für verschiedene elastische Elemente durchgeführt, um die optimale Lagerungsart zu bestimmen.



Bild 4.1 Dynamische Anregung des Förderbandträgers mit dem APS 400

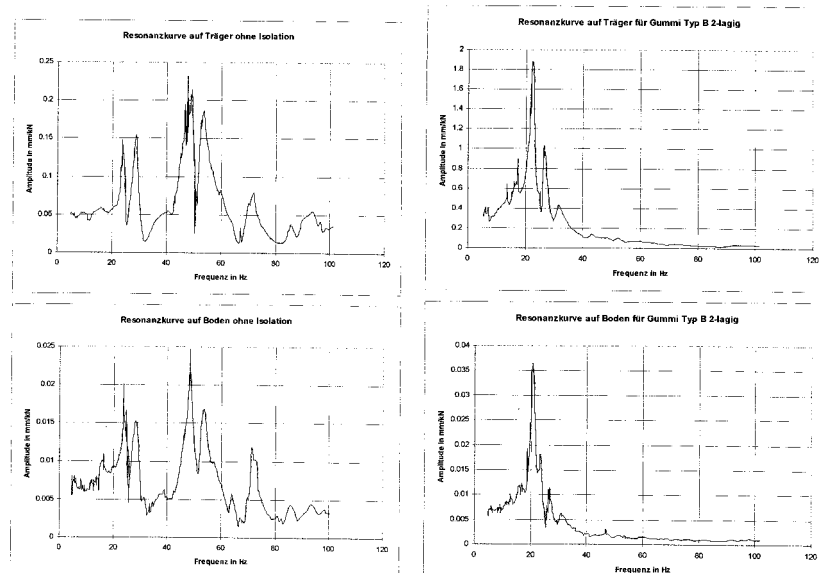


Bild 4.2 Resonanzkurve; *oben*: Messung auf Förderbandträger; *unten*: Messung auf Betonboden. *Links*: ohne Isolation; *Rechts*: mit optimaler Isolation.

Bild 4.2 zeigt links die Resonanzkurven für die direkte Lagerung, d.h. Lagerung ohne Isolation. Man sieht, dass sehr grosse Anteile im Frequenzbereich zwischen 40 und 60 Hz übertragen werden und genau diese Anteile werden als tiefes Brummen wahrgenommen. Durch die Isolation werden die Frequenzen oberhalb 30 Hz praktisch vollständig unterdrückt, allerdings auf Kosten der tiefen Frequenzen. Diese liegen allerdings nicht im Hörbereich.

Bild 4.3 zeigt die Wirkung der verschiedenen untersuchten Isolationselemente in den verschiedenen Frequenzbereichen. Oben sind die Schwingungen auf dem Förderbandträger, unten die Schwingungen auf dem Betonboden dargestellt. Man erkennt sehr schön, wie die höheren – und damit auch hörbaren – Frequenzen stark abnehmen, während die tiefen Frequenzen leicht

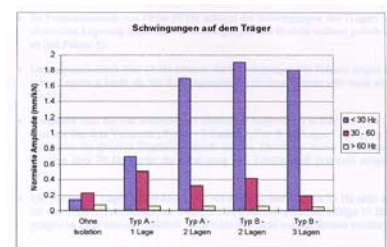


Bild 2.1a Normierte Schwingungen des Trägers über dem Auflager

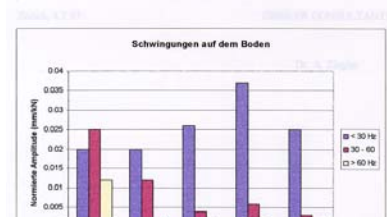


Bild 4.3 Isolationswirkung

zunehmen. Aufgrund von Bild 4.3 konnte die optimale Isolation leicht gefunden werden.

5 Prognose der Erschütterungsimmissionen

In der BMW-Garage Maxim sollte ein neuer Fahrzeug-Prüfstand installiert werden. Mit einem solchen Prüfstand wird die Radaufhängung eines Fahrzeuges, d.h. sein Feder- und Dämpfungsverhalten unter realistischen Bedingungen geprüft. Das Fahrzeug wird hierzu – wie man in Bild 5.1 sieht - auf eine vertikal bewegliche Platte gefahren. Die Platte führt dann vertikale Hubbewegungen im Bereich von 12 bis 30 Hz aus und simuliert so die bei einer Fahrt auftretenden Bodenunebenheiten.

Bei diesem Vorgang entstehen – den Gesetzen der Mechanik entsprechend - dynamische Reaktionskräfte, welche das Tragwerk, in das der Fahrzeugprüfstand eingebaut wird, aufzunehmen hat. Bei der Garage Maxim war man sich dieser Problematik bewusst. Man wollte, da der Prüfstand in die Decke über dem 2. UG eingebaut werden sollte, abklären, ob diese Decke selbst nicht zu stark in Schwingung gerät und – was noch wichtiger war - abklären, ob die Wohnungen über der Garage nicht zu stark beeinträchtigt werden. Die Aufgabe wurde noch dadurch erschwert, dass weder der Garagenbesitzer noch der Hersteller des Prüfstandes Angaben über die zu erwartenden dynamischen Reaktionskräfte machen konnten.



Bild 5.1 Fahrzeugprüfstand in Betrieb. Diese Anlage wurde als Referenzanlage verwendet.



Bild 5.2 Messungen mit dyn. Erreger am Standort des projektierten Prüfstandes

In einem ersten Schritt wurde die dynamische Steifigkeit des Bodens der Referenzanlage bestimmt (Bild 5.3a). Da der Boden direkt auf dem Baugrund liegt, ergibt sich keine Frequenzspitze sondern ein relativ flacher Kurvenverlauf. Anschliessend wurden die maximalen Schwinggeschwindigkeiten beim Betrieb der Referenzanlage gemessen (Bild 5.3b). Daraus lässt sich die Wegamplitude berechnen. Durch Division der Wegamplitude durch die dynamische Steifigkeit ergibt sich schliesslich die dynamische Belastung des Bodens in der Referenzanlage.

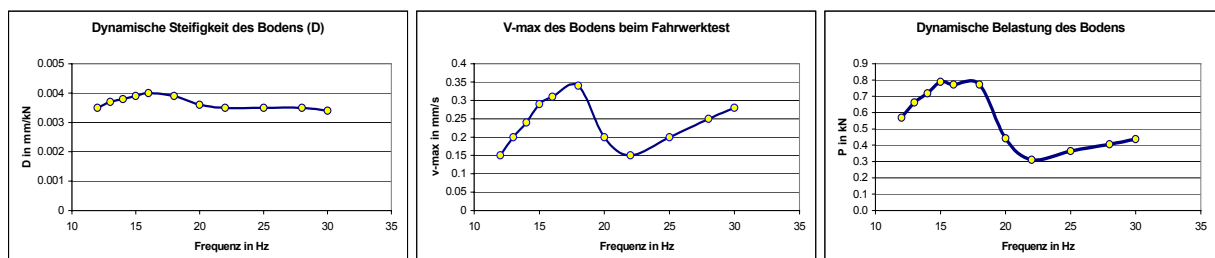


Bild 5.3 a bis c: Berechnung der dyn. Reaktionskräfte aufgrund der dynamischen Steifigkeit des Bodens und der Schwinggeschwindigkeit beim Betrieb des Fahrzeugprüfstandes.

In einem zweiten Schritt wurde die dynamische Steifigkeit am Standort der projektierten Anlage gemessen (Bild 5.4a). Da es sich hier um eine Geschossdecke handelt, ergibt sich hier eine ausgeprägte Frequenzspitze (bei 13 Hz). Durch Multiplikation dieser dynamischen Steifigkeit mit der bei der Referenzanlage gemessenen Belastung ergibt sich die am projektierten Standort zu erwartende Wegamplitude. Daraus lässt sich schliesslich die maximale Geschwindigkeit berechnen (Bild 5.4b).

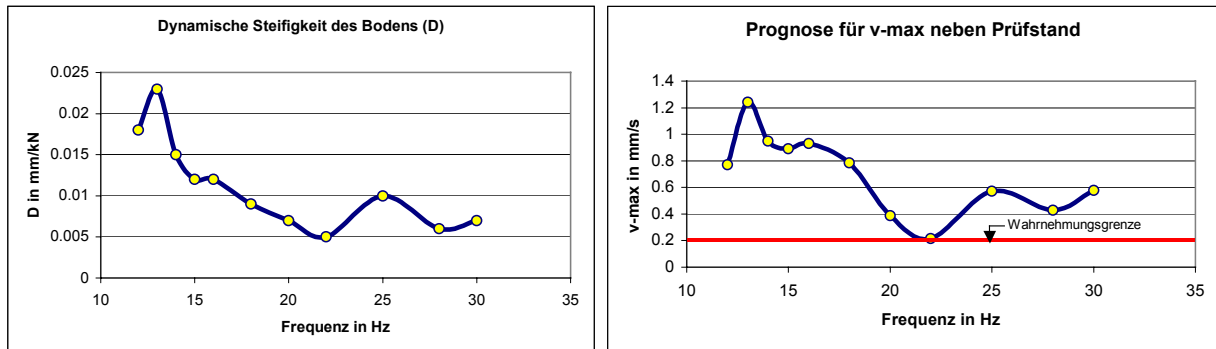


Bild 5.4a,b Berechnung der Schwinggeschwindigkeit am projektierten Standort aus der dynamischen Belastung und der dynamischen Steifigkeit.

Bild 5.4b zeigt, dass am projektierten Standort mit wesentlich höheren Schwinggeschwindigkeiten zu rechnen ist als bei der Referenzanlage. Bei 13 Hz werden bis zu 1.2 mm/s erreicht. Für die Garage selbst ist dies – da sie selbst der Verursacher der Erschütterungen ist - kein Problem.

Um abzuklären, welche Erschütterungen schliesslich in den Wohnungen über der Garage zu erwarten sind, wurden - wiederum mit dem dynamischen Erreger APS 400 - Transferfunktionen zwischen dem projektierten Standort des Fahrzeugprüfstandes und verschiedenen Wohnungen bestimmt (Bild 5.5a). Durch Multiplikation der Immissionen am projektierten Standort mit den Transferfunktionen ergaben sich schliesslich die Immissionen in den Wohnungen (Bild 5.5b).

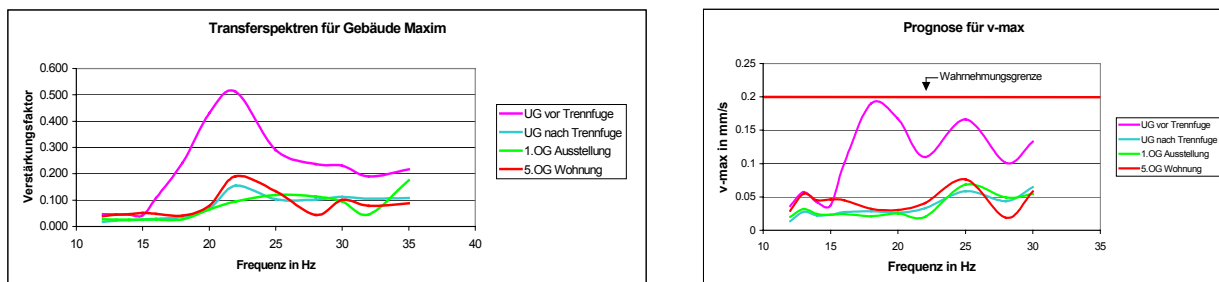


Bild 5.5a,b Berechnung der Immissionen in den Wohnungen durch Multiplikation der Immissionen am projektierten Standort mit den Transferfunktionen.

6 Prüfung der Erschütterungsisolation

Bodenknappheit und ein dichteres Verkehrsnetz führen dazu, dass heute an Orten Wohnhäuser gebaut werden, an denen früher niemand gebaut hätte, nämlich unmittelbar neben oder über Eisenbahnlinien. Um die von den Zügen verursachten Erschütterungen fernzuhalten, müssen Isolationssysteme eingebaut werden.

Bild 6.1 zeigt drei Varianten für die Isolation von Gebäuden über einem Eisenbahntunnel. Variante 1 verwendet einen Abfangträger, der die Lasten auf einige wenige Federelemente überträgt. Variante 2 verwendet eine „verlorene Schalung“, welche auf vielen kleineren elastischen Elementen ruht. Variante 3 schliesslich verwendet eine vollflächige Isolation.

Variante 2 hat den Vorteil, dass sie kostenmässig etwas günstiger liegt, dafür ist das Risiko, dass Kontaktstellen durch eindringende Zementmilch entsteht, nicht zu unterschätzen.

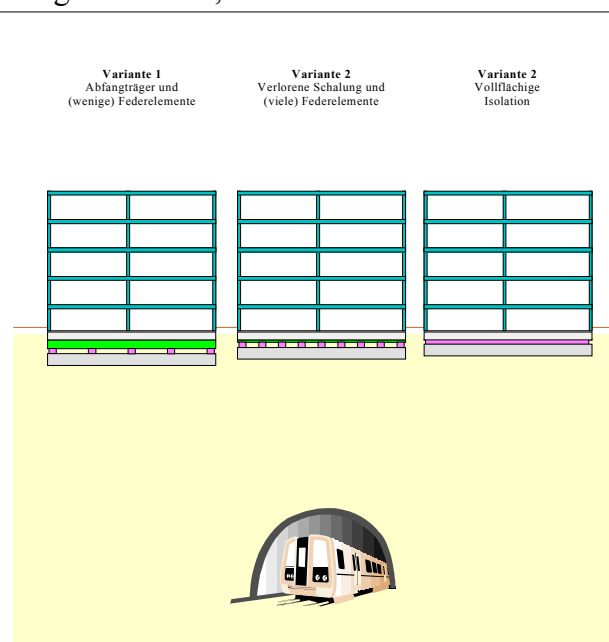


Bild 6.1 Drei Varianten für die Isolation von Gebäuden über einem Eisenbahntunnel

Bei der Wahl von Variante 2 ist unbedingt auf eine zuverlässige Kontrolle der Wirksamkeit der Erschütterungsisolation zu achten. Diese Kontrolle sollte unmittelbar nach dem Betonieren der isolierten Bodenplatte durchgeführt werden. Als gute Methode bietet sich hier die Prüfung mit einem tragbaren dynamischen Erreger an. Der Erreger wird an verschiedenen Stellen der Bodenplatte aufgestellt. An jedem Messpunkte wird die Resonanzkurve zwischen 5 und 80 Hz bestimmt. Die Form der Resonanzkurve zeigt uns an, ob die Bodenplatte frei schwingen kann oder ob eine Kontaktstelle vorhanden ist.

Bild 6.1 zeigt zwei Resonanzkurven, die auf der gleichen Bodenplatte aufgenommen worden sind. Das Bild links zeigt die Messung im Bereich der einwandfreien Isolation. Hier bildet sich eine dominante Frequenz bei 38 Hz. Das Bild rechts hingegen – gemessen über einer Kontaktstelle – weist keine dominante Frequenz auf.

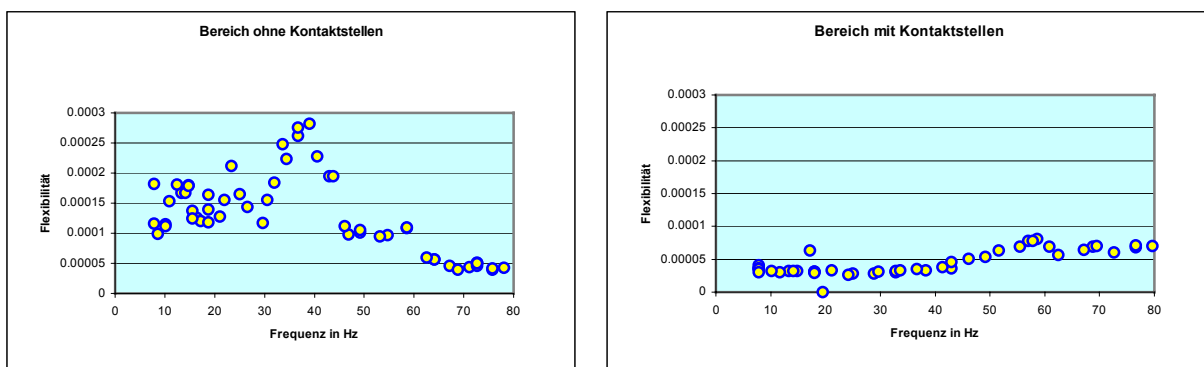


Bild 6.1a,b Resonanzkurve bei der Prüfung einer elastisch gelagerten Bodenplatte. *Links*: Messpunkt mit einwandfreier Isolation. *Rechts*: Messpunkt mit Kontaktstelle durch eingedrungene Zementmilch.

7 Bestimmung der zulässigen Erschütterungen

Die Durchführung von Bauarbeiten im Nahbereich von empfindlichen Geräten oder die Installation von empfindlichen Geräten an neuen Standorten erfordern oft die Bestimmung der zulässigen Erschütterungen. Herstellerangaben über „zulässige Erschütterungen“ sind oft nicht erhältlich oder sind derart konservativ, dass sie nicht sinnvoll verwendet werden können.

Vor einigen Jahren mussten im Eidg. Amt für Messwesen (EAM) umfangreiche Um- und Erweiterungsbauten erstellt werden. Um sicher zu sein, dass keine betriebsstörende oder unzulässige Erschütterungen auftreten, musste zuerst festgestellt werden, welche Erschütterungen überhaupt zulässig sind. Mit Hilfe des dyn. Erregers APS 400 wurde für 10 typische Messgeräte eine empirische Prüfung vor Ort vorgenommen. Der Erreger wurde neben der zu prüfenden Maschine aufgestellt, um dann den gesamten interessierenden Frequenzbereich mit verschiedenen Schwingungsamplituden zu durchfahren. Während dieser Messungen musste der Operator der Maschine stets prüfen, ob die Maschine einwandfrei arbeitet.



Bild 7.1 Bestimmung der zulässigen Erschütterungen bei einer 3-D-Messanlage.

Bild 7.1 zeigt eine 3-D-Messanlage des EAM während der Bestimmung der zulässigen Erschütterungen. Das Ergebnis ist in Bild 7.2 dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass im allgemeinen eine Schwinggeschwindigkeitsamplitude von 0.01 mm/s nicht überschritten werden sollte, dass aber im Frequenzbereich um 40 Hz auch Schwinggeschwindigkeitsamplituden bis 0.02 mm/s toleriert werden können.

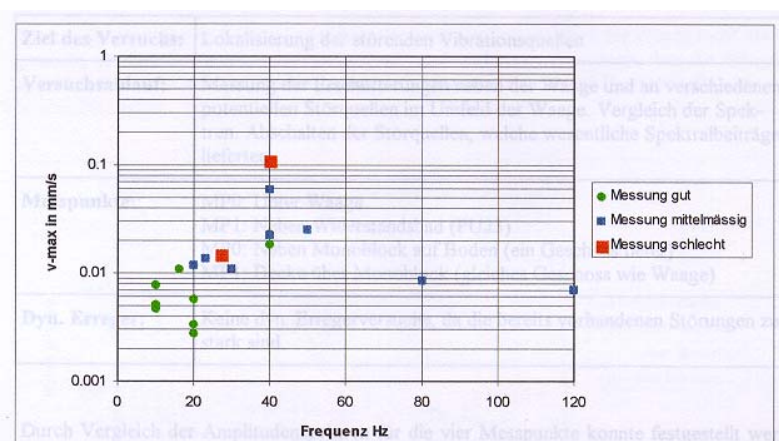


Bild 7.2 Zulässige, kritische und unzulässige Erschütterungen für die 3-D-Messanlage