

Erfolgskontrolle bei elastischen Lagerungen

1 Einleitung

Die elastische Lagerung ist ein altbewährtes Mittel, um die Übertragung dynamischer Kräfte auf den Boden, oder umgekehrt, um die Erschütterungsübertragung vom Boden auf eine Anlage zu reduzieren. Am Anfang der Entwicklung vor mehr als 200 Jahren stand sicherlich die elastische Lagerung von Schmiedehämmern und Motoren. Heute ist es wohl eher die Isolation von Gebäuden und empfindlichen Anlagen gegenüber Erschütterungen aus der Umgebung, die uns hauptsächlich beschäftigt. Die Zielsetzungen sind sehr vielfältig: Während es zum Beispiel bei Wohnhäusern darum geht, störende Erschütterungen und sekundär abgestrahlten Schall unterhalb der Wahrnehmungsgrenze zu halten, müssen wir bei Forschungslabors die Erschütterungen um einen Faktor 1000 und mehr unter die Wahrnehmungsgrenze bringen, damit Arbeiten im Nano-Bereich überhaupt erst möglich sind.

All diesen Aufgabenstellungen ist eines gemeinsam: Die elastische Lagerung bildet zwar nur einen kleinen Teil der Bausumme, doch bereits ein kleiner Fehler in der Ausführung macht die Wirkung der elastischen Lagerung zu Nichte und stellt die Nutzung des Bauwerkes in Frage. Das Schadenpotential ist deshalb – verglichen mit dem Aufwand – extrem hoch. Aus diesem Grunde kommt der Qualitätskontrolle während der Bauausführung eine sehr grosse Bedeutung zu.

Im vorliegenden Beitrag soll diese Qualitätskontrolle näher betrachtet werden. Mit einem kurzen Exkurs in die theoretischen Grundlagen des Ein-Massen-Schwingers soll aufgezeigt werden, was mit einer elastischen Lagerung grundsätzlich erreicht werden kann. Darnach werden die Möglichkeiten und Grenzen der Überprüfung einer elastischen Lagerung während der Bauphase dargestellt. Zur Illustration soll anschliessend anhand von 6 Fallbeispielen aufgezeigt werden, wie eine perfekte elastische Lagerung sichergestellt werden kann.

2 Etwas Theorie zur elastischen Lagerung

In der Regel wird eine elastische Lagerung – sei es für ein Maschinenfundament oder für ein ganzes Gebäude – nach der Theorie des Ein-Massen-Schwingers berechnet. Wir sollten uns aber stets bewusst sein, dass dies zwar für ein gedrungenes Fundament noch einigermaßen korrekt ist. Für eine elastisch gelagerte Platte oder für ein ganzes Gebäude hingegen ist die 1-Massen-Schwinger-Analogie nicht viel mehr als eine Approximation.

Bei der elastischen Lagerung unterscheiden wir zwei Fälle: Der *Schutz der Umgebung einer Maschine vor den störenden Schwingungen dieser Maschine* und der *Schutz einer Anlage vor den störenden Schwingungen der Umgebung*.

Isolation des Bodens gegenüber einer vibrierenden Maschine

Diese Situation ist in Bild 2.1 dargestellt. Eine Maschine erzeugt – z.B. durch die Rotation von nicht ausgewuchteten Komponenten – eine vertikal oszillierende Kraft $P(t) = P_0 \sin \omega t$.

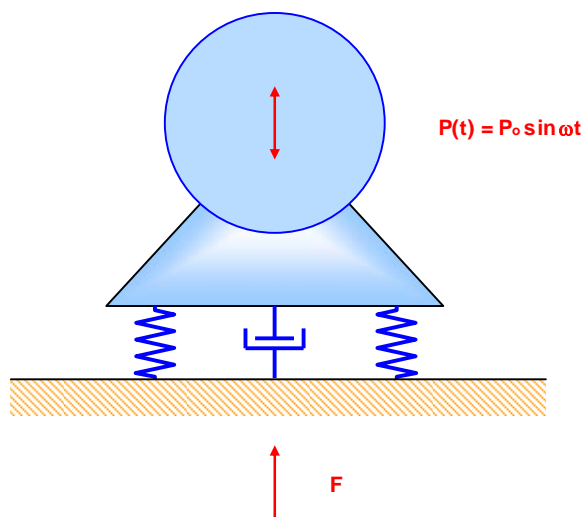


Bild 2.1 Elastisch gelagerte Maschine

Das Verhältnis zwischen der maximalen Kraft F auf die Unterlage zur maximalen von der Maschine erzeugten Kraft P_0 berechnet sich – wie wir aus jedem Lehrbuch zur Dynamik entnehmen können – zu:

$$TR \equiv \frac{F_{\max}}{P_0} = \sqrt{\frac{1}{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \cdot \sqrt{1 + (2\xi\beta)^2} \quad (2.1)$$

und lässt sich in Form des Diagramms von Bild 2.2 darstellen. Dabei bedeuten:

TR	=	Transmissionsfaktor
F_{\max}	=	Maximale Kraft auf die Unterlage
P_0	=	dynamisch Kraftamplitude der Maschine
β	=	Frequenzverhältnis (Anregungsfrequenz zu Eigenfrequenz)
ξ	=	Dämpfung (in Prozent der kritischen Dämpfung)

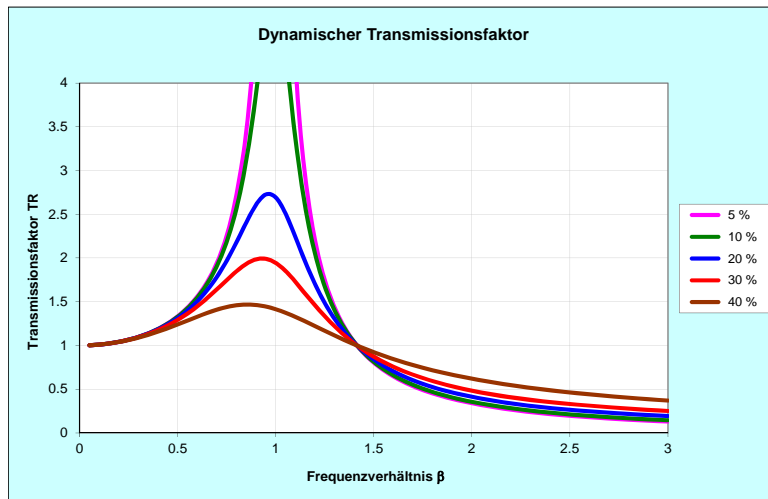


Bild 2.2 Transmissionsfaktor für verschiedene Werte von ξ und β

Isolation einer Anlage gegenüber einem vibrierenden Boden

Die Situation, bei der eine Anlage gegenüber den Erschütterungen des Bodens isoliert werden soll, ist in Bild 2.3 dargestellt. Die zu isolierende Masse M ruht auf einem Feder-Dämpfungssystem. Der Boden, auf dem das Feder-Dämpfungssystem steht, führt eine vertikale harmonische Bewegung $x_g(t)$ aus.

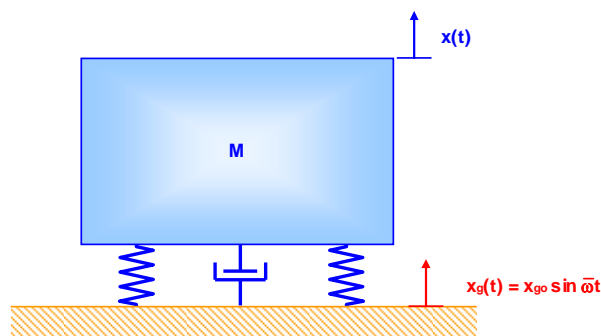


Bild 2.3 Elastisch gelagerte Anlage

Das Verhältnis zwischen der maximalen Bewegung der Maschine zur maximalen Bewegung der Unterlage berechnet sich zu:

$$TR \equiv \frac{x_{\max}}{x_{g0}} = \sqrt{\frac{1}{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2}} \cdot \sqrt{1 + (2\xi\beta)^2} \quad (2.2)$$

Diese Gleichung ist identisch mit Gl. (2.1), sodass wir die Kurven in Bild 2.2 für beide Fälle, d.h. für die Isolation der Umgebung vor den störenden Schwingungen einer Maschine und auch für die Isolation einer Anlage vor den störenden Schwingungen dieser Umgebung verwenden können.

In den Bildern 2.4a bis c ist die Wirkung von zwei unterschiedlichen elastischen Lagerungen eines starren Blockes anhand von Terzspektren dargestellt. Die resultierenden Spektren in Bild 2.4c ergeben sich jeweils durch Multiplikation der Terzbandwerte des Quellspektrums (Bild 2.4a) mit dem entsprechenden Terzbandwert des Einfüge-Spektrums (Bild 2.4b). Unterhalb der Abstimmfrequenz bleiben die Erschütterungen weitgehend unverändert. Im Bereich der Abstimmfrequenz werden die Erschütterungen verstärkt. Bei 20 % Dämpfung liegt die Verstärkung bei einem Faktor 2.5. Erst oberhalb der zweifachen Abstimmfrequenz beginnt sich die elastische Lagerung spürbar positiv auszuwirken.

Mit der tiefen Abstimmung von 12 Hz erreichen wir bei der vorliegenden Eisenbahnerschütterung eine spürbare Reduktion der Schwingungen, mit der etwas höheren Abstimmung von 20 Hz hingegen verstärken wir die Eisenbahnerschütterungen sogar. Dieses Beispiel mag etwas gesucht anmuten und doch kommen solche Fälle, wie wir in Kapitel 5 noch sehen werden, tatsächlich vor.

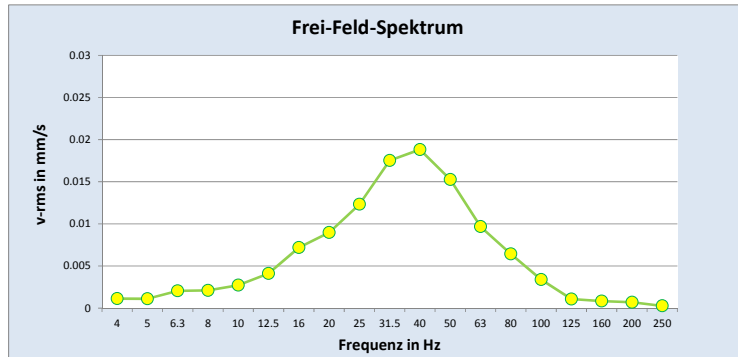


Bild 2.4a

Frei-Feld-Spektrum für Anregung durch Eisenbahn mit dominanten Frequenzen zwischen 20 und 60 Hz

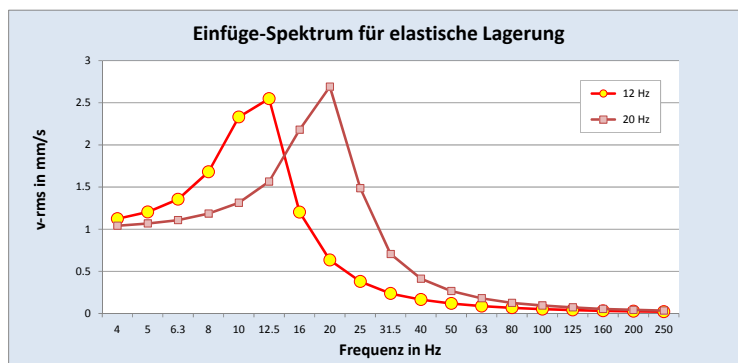


Bild 2.4b

Einfüge-Spektrum für elastische Lagerung mit 12 Hz bzw. 20 Hz Abstimm-Frequenz und 20 % Dämpfung

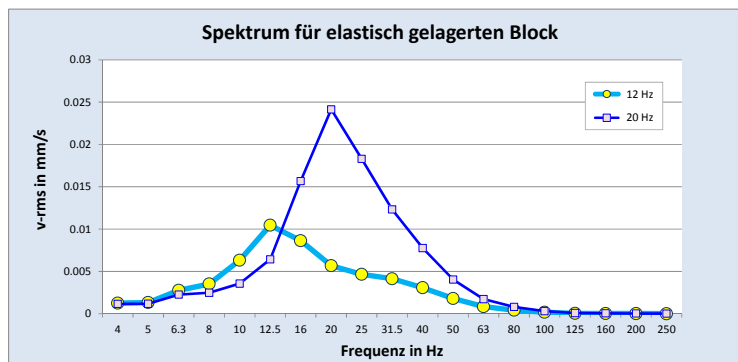


Bild 2.4c

Resultierendes Spektrum für elastisch gelagerten Block

Die Einfüge-Spektren in Bild 2.4b sind mit Gleichung 2.2 berechnet worden, d.h. es wird vorausgesetzt, dass sich das elastisch gelagerte Objekt wie ein Ein-Massen-Schwinger verhält. Dass diese Annahme nicht unbedingt zutreffend ist, mögen die Beispiele in den Bildern 2.5a bis c zeigen. Diese Bilder zeigen gemessene Einfüge-Spektren für drei elastische Lagerungen unter „Labor-Bedingungen“. Beim ersten Fall handelt es sich um einen 50-Tonnen-Block auf Luftfedern mit 1.35 Hz Abstimmfrequenz. Die Anregung erfolgte durch Eisenbahn-Erschütterungen aus dem 100 m tiefer liegenden Tunnel. Die gemessene Kurve folgt zwar im gesamten Frequenzbereich der theoretischen Kurve des 1-Massen-Schwingers, doch ist sie stets um einen Faktor 3 bis 10 höher (d.h. „schlechter“). Im Frequenzbereich von 20 bis 100 Hz, dem Bereich in dem bei Eisenbahnerschütterungen am meisten Energie vorhanden ist, erreicht die Isolationswirkung einen Faktor von 50.

Bei den beiden anderen Beispielen handelt es sich um einen 500-kg-Block auf Stahlfedern bzw. auf PU-Schaum-Matten. Bei der Stahlfeder-Lagerung mit 2.5 Hz ist die Übereinstimmung mit der Theorie von 1 bis 10 Hz sehr gut. Doch bei höheren Frequenzen ist die Abweichung recht

gross, was wohl auf die Erschütterungsübertragung entlang den Windungen der Stahlfedern zurückzuführen ist. Bei der elastischen Lagerung auf PU-Schaum liegt die Abweichung von der Theorie - bei kontrollierter harmonischer Anregung - bei einem Faktor 1.5 bis 3. Bei Anregung durch die Strassenbahn (mit ihrer recht unregelmässigen Anregung) liegt die Abweichung allerdings grösser. Im Frequenzbereich von 40 bis 80 Hz wird hier nur noch eine Isolationswirkung von 10 erreicht und nicht von 30, wie dies die Theorie vorgibt.

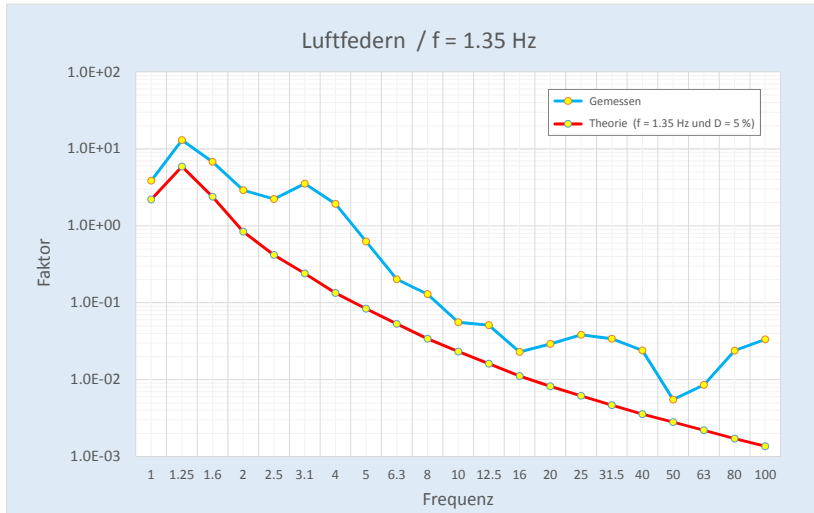


Bild 2.5a

Einfüge-Spektrum für 50-Tonnen Betonblock auf Luftfedern mit 1.35 Hz Abstimmfrequenz. Anregung durch Zugvorbeifahrten

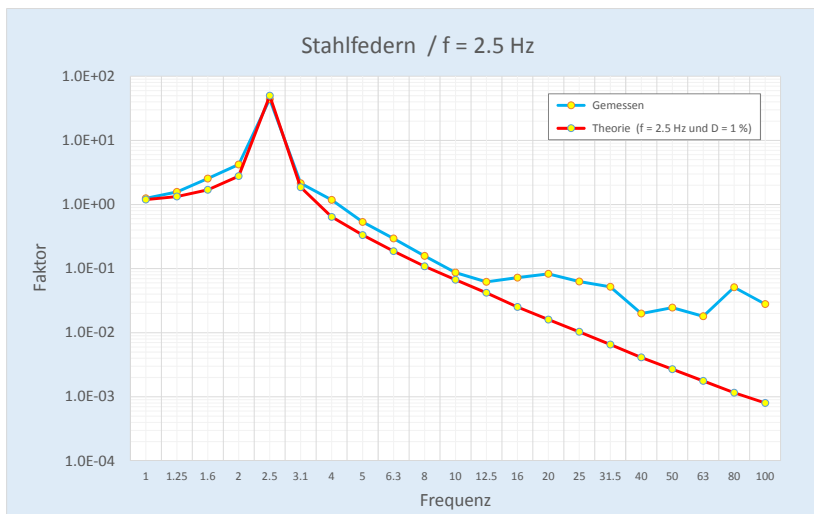


Bild 2.5b

Einfüge-Spektrum für 0.5-Tonnen Betonblock auf Stahlfedern mit 2.5 Hz Abstimmfrequenz. Anregung durch Elektro-Dynamischen Erreger.

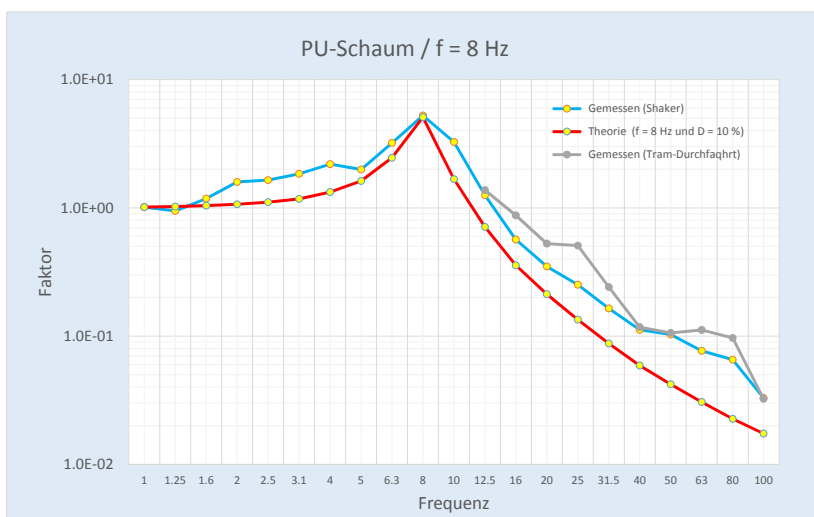


Bild 2.5c

Einfüge-Spektrum für 0.5-Tonnen Betonblock auf PU-Schaum mit 8 Hz Abstimmfrequenz. Anregung durch Elektro-Dynamischen Erreger und durch Tramvorbeifahrten.

3 Qualitätssicherung während der Ausführung

Die Qualitätssicherung für eine elastische Lagerung beginnt mit der richtigen Auswahl der elastischen Elemente. Dies ist natürlich die Voraussetzung für eine erfolgreiche elastische Lagerung, ist aber nicht das Thema dieses Beitrages. Es sei lediglich daran erinnert, dass nicht nur die richtige Abstimmfrequenz von Bedeutung ist, sondern auch die richtige Masse. Es kommen nämlich zwei verschiedene Definitionen der Masse ins Spiel: Die realistische oder wirksame Masse, die für die Bestimmung der Abstimmfrequenz zu verwenden ist und die maximale Masse, die für die zulässige Belastung des elastischen Materials massgebend ist.

Die Qualitätssicherung für eine vollflächige elastische Lagerung eines Gebäudes neben einer Eisenbahnlinie sollte folgende Punkte umfassen:

1. **Vor Lieferung der elastischen Lagerung:** Überprüfung der gewählten Materialien bzw. deren Spezifikationen. Es ist zu verifizieren, dass die anvisierte Abstimmfrequenz auch erreicht werden kann und dass die gewählte Masse richtig definiert ist.
2. **Vor Einbau der elastischen Lagerung:** Visuelle Kontrolle der Betonplatte, auf welche die Isolation zu liegen kommt. Es ist zu verifizieren, dass die Oberfläche des Betons genügend eben und trocken ist.
3. **Vor Einbringen des Betons:** Visuelle Kontrolle der elastischen Lagerung. Es ist zu verifizieren, dass die elastische Lagerung korrekt verlegt und abgedichtet ist. Auch ist zu prüfen, dass durch das Verlegen der Armierung keine Schäden am elastischen Material und an der Abdichtung verursacht worden sind.
4. **Nach Einbringen der 1. Etappe Beton:** Messung des Schwingverhaltens. Vergleich mit Soll-Werten. Messung der Isolationswirkung.
5. **Weitere Etappen:** Schritte 2 bis 4 sind für jede Etappe zu wiederholen.
6. **Nach Fertigstellung des Gebäudes:** Messung des Schwingverhaltens der Fundamentplatte. Vergleich mit Soll-Werten. Messung der Isolationswirkung bei Zugsdurchfahrt.
7. **Abnahmemessung:** Messung der Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen während 24 Stunden. Vergleich mit Prognosewerten.

Diese Kurzbeschreibung einer „Qualitätssicherung“ sieht auf dem Papier zwar vielversprechend und überzeugend aus, lässt sich aber in der Praxis nur zum Teil umsetzen. Punkte 1 bis 3 sind problemlos umsetzbar und sind auch äusserst wichtig. Die Schwierigkeiten beginnen mit Punkt 4 und zwar nicht mit dem Messen an sich, sondern beim Vergleich mit den Soll-Werten.

Bei einem elastisch gelagerten Fundamentblock, der z.B. in zwei Etappen betoniert wird, lässt sich die Eigenfrequenz nach der ersten Betonier-Etappe sehr gut bestimmen, da er sich im Wesentlichen wie ein Ein-Massen-Schwinger verhält. Aufgrund der gemessenen Eigenfrequenz lässt sich die Eigenfrequenz im Endzustand durch Berücksichtigung der noch fehlenden Masse errechnen.

Bei einer Bodenplatte eines Hauses hingegen lässt sich die Eigenfrequenz nicht ohne weiteres bestimmen. Bei Impuls-Anregung in Plattenmitte werden primär die höheren Eigenfrequenzen angeregt und auch die Messung der Umgebungs-Schwingungen (ambient vibration) ergibt in der Regel keine eindeutige Aussage über die Grundfrequenz.

Ein Ausweg aus diesem Dilemma ist die Anregung in horizontaler Richtung. In dieser Richtung schwingt eine Platte eher als Ein-Massen-Schwinger (siehe Bild 3.1a und b). Die so gemessene Grundfrequenz hat zwar keinen direkten Bezug zur Abstimmfrequenz, doch erkennt man bei einer solchen Messung sehr rasch, ob eine Platte frei schwingt oder ob irgendwelche Betonbrücken vorhanden sind.

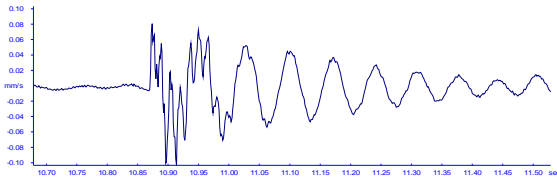


Bild 3.1a Schwingung bei Impulsanregung in horizontaler Richtung

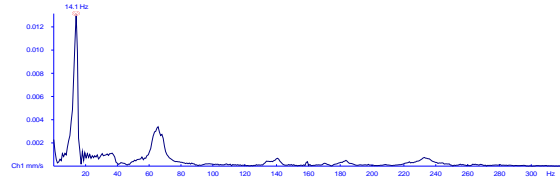


Bild 3.1b Amplitudenspektrum zu Signal in Bild 3.1a

Ein zweiter Test, der ebenfalls Aufschluss über die Isolationswirkung gibt, ist die Messung der Impulsanregung an zwei Messpunkten. Ein Messpunkt wird auf der elastisch gelagerten Platte positioniert, der andere auf einer nicht elastisch gelagerten Nachbarplatte (siehe Bild 3.2a und b).

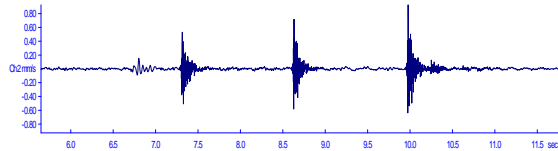


Bild 3.2a Impulsanregung vertikal auf elastisch gelagertem Bereich; oben: Messung auf elastisch gelagertem Bereich, unten: Messung auf nicht-elastisch gelagertem Bereich



Bild 3.2b Impulsanregung auf nicht elastisch gelagertem Bereich; oben: Messung auf elastisch gelagertem Bereich, unten: Messung auf nicht-elastisch gelagertem Bereich

Die Messung der Isolationswirkung bei einer Zugvorbeifahrt kann irreführend sein. Da erst ein kleiner Teil der endgültigen Masse vorhanden ist, liegt die vertikale Eigenfrequenz der Bodenplatte einiges höher als die gewählte Abstimmfrequenz, was dazu führt, dass die elastisch gelagerte Bodenplatte die Eisenbahnerschütterungen sogar verstärkt (siehe Bild 3.3a).

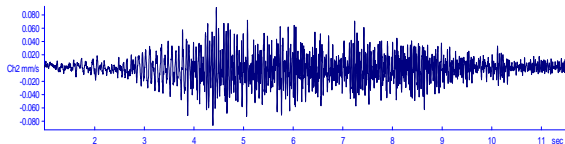


Bild 3.3a Durchfahrt eines Zuges: oben: Messung auf elastisch gelagertem Bereich, unten: Messung auf nicht-elastisch gelagertem Bereich

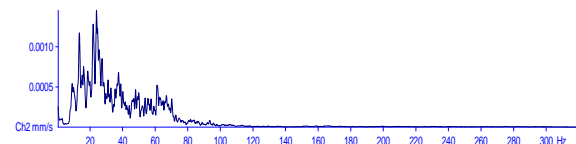
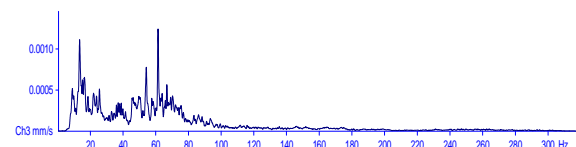
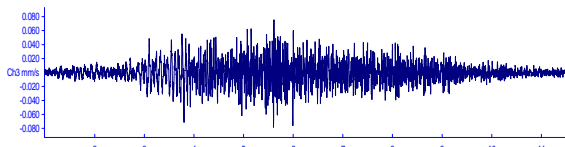


Bild 3.3b Amplitudenspektrum zu Bild 3.3a. oben: Messung auf elastisch gelagertem Bereich, unten: Messung auf nicht-elastisch gelagertem Bereich



4 Abnahmemessung

Mit der Abnahmemessung erhält der Bauherr den Nachweis, dass die teuren Zusatzkosten für die elastische Lagerung sinnvoll ausgegeben worden sind - oder eben auch nicht. Oft werden Abnahmemessungen gerade aus diesem Grund abgelehnt, denn wer will schon „schlafende Hunde“ wecken.

Abnahmemessungen sollten möglichst im endgültigen Ausbauzustand erfolgen. Für ein elastisch gelagertes Gebäude neben einer Bahnlinie bedeutet dies, dass Fenster und Türen bereits eingebaut sein müssen. An sich sollte auch die Möblierung vorhanden sein, denn ohne Möblierung liegt der sekundär abgestrahlte Schall (sog. Körperschall) einiges höher als im möblierten Zustand. Der Unterschied zwischen „unmöbliert“ und „möbliert“ kann ohne weiteres 6 dB ausmachen.

Die Abnahmemessung ist auf die vorgesehene Nutzung abzustimmen. Bei einem elastisch gelagerten Maschinenfundament mag die Eigenfrequenz und die Dämpfung das Hauptkriterium sein. Bei einem elastisch gelagerten Gebäude hingegen hat die Eigenfrequenz für die Abnahmemessung letztlich keine grosse Bedeutung. Überdies ist sie in den wenigsten Fällen eindeutig bestimmbar. Viel wichtiger ist hier die Bestimmung der Erschütterungs- und Körperschall-Immission in einem typischen Raum. Eine solche Messung sollte dann auch 24 Stunden dauern, um eine repräsentative Aussage zu erhalten.

5 Fehlerquellen

Eine Baustelle ist kein Labor. Was auf dem Papier oder unter Laborbedingungen ohne weiteres funktioniert, kann auf einer Baustelle absolut untauglich sein. Für eine Baustelle sollten deshalb einfache Verfahren eingesetzt werden, die auch bei misslichen Wetterverhältnissen noch zuverlässig angewendet werden können.

5.1 Versteckter Konzeptfehler

Für ein vierstöckiges Bürogebäude neben einer Eisenbahnlinie wurde – wie in Bild 5.1 dargestellt – eine elastische Lagerung auf der Mauerkrone des Untergeschosses gewählt. Zwei Liftschächte waren für die horizontale Aussteifung (Erdbebensicherheit) erforderlich. Als Abstimmfrequenz wurde 12 Hz vorgegeben. Die elastischen Lager auf der Mauerkrone waren als Punktlager aus Naturgummi ausgebildet.

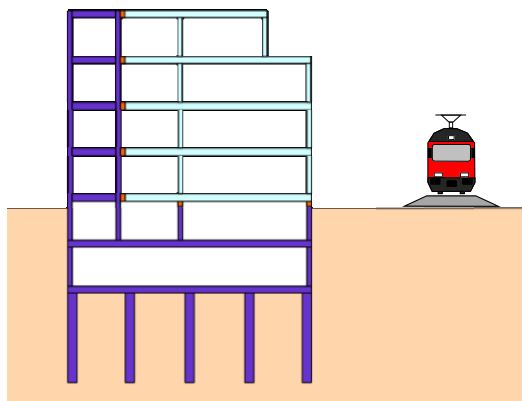


Bild 5.1 Elastische Lagerung auf Mauerkrone UG

In allen (über 50) Büroräumen wurden die Ziele bestens erreicht. Trotz der geringen Distanz von lediglich 7 m zum nächstgelegenen Gleis mit mehreren Weichen sind weder Erschütterungen noch Körperschall wahrnehmbar. Probleme traten allerdings in zwei grossen Sitzungszimmern

auf. Diese weisen mit ihren weitgespannten Decken eine Eigenfrequenz von 13.7 Hz auf und treten so in Resonanz mit der elastischen Lagerung. Die Erschütterungen erreichen in diesen Sitzungszimmern teilweise Werte von 0.7 mm/s (Bild 5.2a), was verständlicherweise nicht auf grosse Begeisterung stiess. Es ist zu vermuten, dass diese Verstärkung bei Resonanz auch mit der Art der elastischen Lagerung zusammenhängt. Die punktförmige Lagerung auf einzelnen Gummielementen hat relativ geringe Dämpfung, was die Verstärkung bei Resonanz begünstigt.

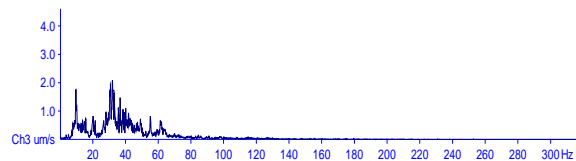
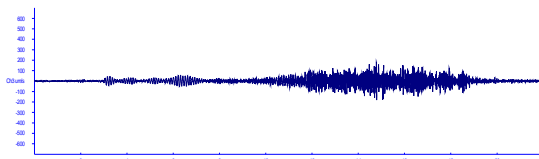
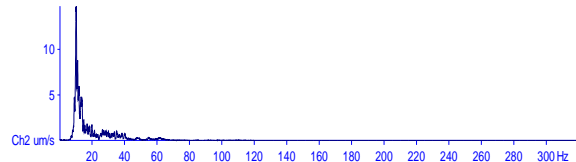
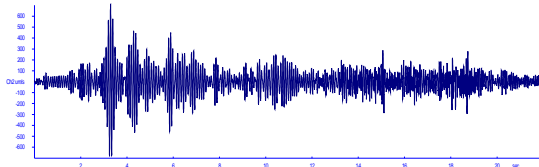


Bild 5.2a Erschütterung bei der Durchfahrt eines Zuges: oben: auf Decke mit 13.7 Hz, unten: auf Decke mit 35 Hz

Bild 5.2b Amplitudenspektren. oben: auf Decke mit 13.7 Hz, unten: auf Decke mit 35 Hz

5.2 Änderung der Bezugsquelle

An sich war bei diesem Projekt vorgesehen, die schwimmend gelagerten Platten auf 14 Hz abzustimmen, um die Eisenbahnerschütterungen zu reduzieren. Mit einer Linienlagerung aus PU-Schaum-Streifen und vorgefertigten Deckenelementen sollte dies – wie in Bild 5.3 dargestellt – auch problemlos möglich sein.

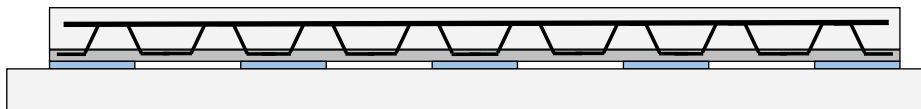


Bild 5.3 Schwimmende Platte auf Streifenlagerung

Da eine grosse Anzahl solcher Platten vorgesehen war, entschied man sich, an einer Testplatte die Isolationswirkung nachzuweisen, bevor alle 30 Platten produziert würden. Die Tests verliefen positiv und ergaben – wie die Bilder 5.4a und b zeigen – eine Isolationswirkung von 75 %.

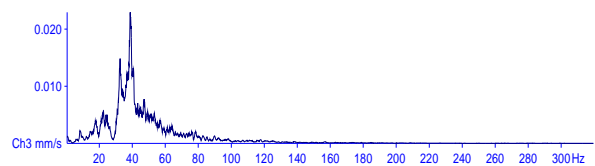
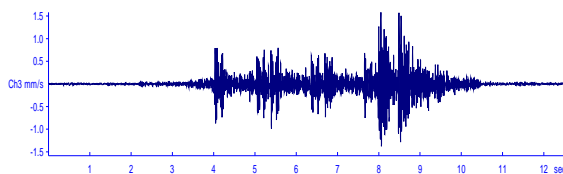
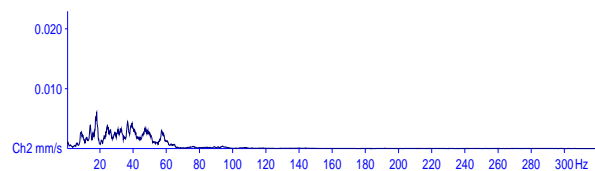
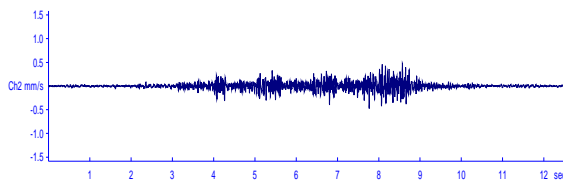


Bild 5.4a Erschütterungen bei Zugdurchfahrt: oben: auf isolierter Platte; unten: neben isolierter Platte

Bild 5.4b Amplitudenspektren. oben: auf isolierter Platte; unten: neben isolierter Platte

Für die Produktion der 30 Platten entschied die Bauunternehmung (ohne Rückfrage beim verantwortlichen Ingenieur), anstelle der Streifen aus PU-Schaum solche aus Gummigranulat zu verwenden. Laut Katalog hätte dieses Material die gleichen Eigenschaften haben sollen wie der

PU-Schaum. Nachmessungen zeigten allerdings, dass mit den verwendeten Gummi-Granulat-Streifen eine Abstimmung von 21 Hz erreicht wurde und nicht 14 Hz wie mit den PU-Schaum-Streifen. Anstelle einer Reduktion der Erschütterungen von 75 %, stellte sich sogar eine Verstärkung von 20 % ein. D.h. es hat sich ziemlich genau das ergeben, was am Anfang dieses Beitrages in Bild 2.4a bis c dargestellt ist.

5.3 Kritische Bauzustände

Auch die in Bild 5.5 dargestellte Decke war als schwimmende Platte vorgesehen. Fertigelemente bildeten die verlorene Schalung. Der Abstand zwischen den elastischen Auflagerpunkten wurde zu 1.5 m gewählt.

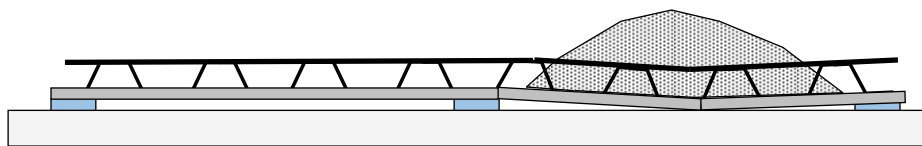


Bild 5.5 Schwimmende Platte auf Punktlagerung

Für die meisten Deckenfelder hat dieses Konzept auch sehr gut funktioniert. In einigen Feldern allerdings wurde wohl zu viel Beton an einem Ort deponiert, sodass die Fertigelemente einbrachen und - wie in Bild 5.5 dargestellt – die Wirkung der elastischen Lagerung zu Nichte machten. Mehrere Deckenfelder mussten herausgetrennt werden und neu betoniert werden.

5.4 Änderungen in letzter Minute

Ursprünglich war für die Isolation des Einfamilienhauses gegen die Erschütterungen der Eisenbahn im 15 m tiefer liegenden Tunnel eine einfache elastische Lagerung vorgesehen. Ein Stahlblech auf Gummi-Elementen sollte als verlorene Schalung dienen (Bild 5.6a). In letzter Minute wurde das Isolationskonzept um einem Erdbebenriegel ergänzt (Bild 5.6b). Das Konzept der punktförmigen elastischen Lagerung wurde aber unverändert auch für den Riegel übernommen, ohne zu bedenken, dass hier die Belastung für das Blech wesentlich ungünstiger ausfällt. Es bildeten sich Kontaktstellen zwischen den beiden Platten (Bild 5.6c), was – da sie nicht sauber entfernt worden sind – letzten Endes zu starken Körperschall-Immissionen führte.

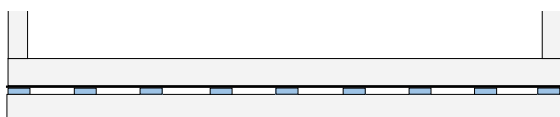


Bild 5.6a Schwimmende Platte auf Punktlagerung

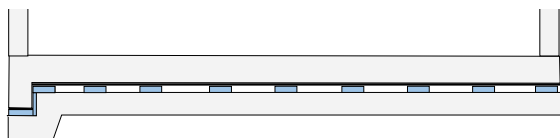


Bild 5.6b Schwimmende Platte auf Punktlagerung mit Erdbebenriegel (links)

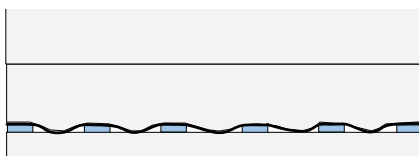


Bild 5.6c Verformung des Bleches im Erdbebenriegel (Ansicht des Erdbebenriegels von hinten nach dem Ausschalen)

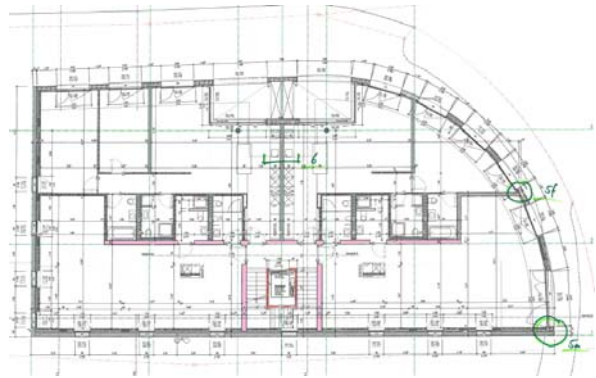
6 Fallbeispiele

6.1 Wohn- und Geschäftshaus, 7 m neben Eisenbahn

Wegen beengten Platzverhältnissen wurde für dieses Objekt eine spezielle Variante der elastischen Lagerung gewählt: Drei vertikale – nicht elastisch gelagerte – (Erdbeben-)Wände, mit denen die Geschossdecken und die übrigen Wände elastisch verbunden sind. Die vielen Anschlussdetails erforderten eine genaue Kontrolle aller Verbindungen zwischen den nicht-elastisch gelagerten und den elastisch gelagerten Bereichen.



Baugrube neben Eisenbahnlinie



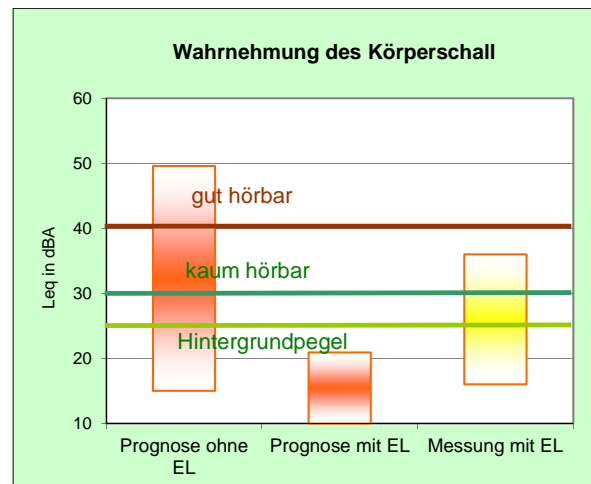
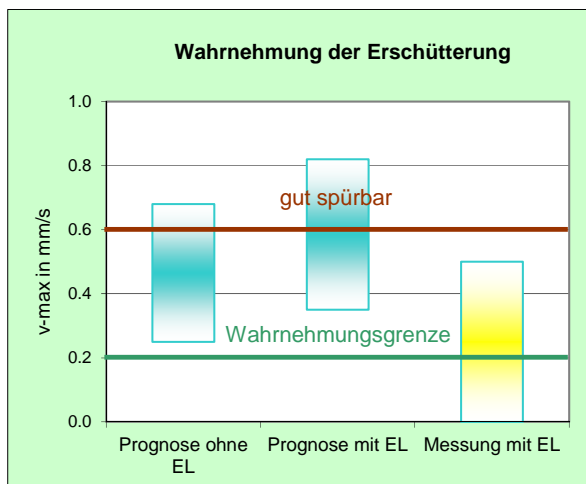
Grundriss für Wohnhaus neben Eisenbahnlinie

Qualitätssicherung:

- Messung nach 1. Betonieretappe
- 11 visuelle Kontrollen (nach jeder Betonieretappe)
- Abnahmemessung: Kombinierte Erschütterungs- und Körperschallmessung während 24 Stunden



Elastische Durchdringung Decke - Wandscheibe



Die Abnahmemessungen zeigten, dass die Erschütterungen wesentlich tiefer ausfielen als die Prognose voraussagte. Die tiefen im Frei-Feld gemessenen Anregungsfrequenzen wirkten sich offensichtlich nicht so stark aus wie befürchtet. Der Körperschall hingegen war etwas höher als prognostiziert, lag aber immer noch im Bereich „Kaum hörbar“.

6.2 Wohn- und Geschäftshaus, 14 m neben Eisenbahnlinie

Bei diesem 4-stöckigen Gebäude handelt sich um einen klassischen Fall von vollflächiger elastischer Lagerung. Sowohl die Bodenplatte als auch die Seitenwände sind mit 25 mm PU-Schaum gegen Erschütterungen isoliert.



Wohnhaus neben Eisenbahnlinie

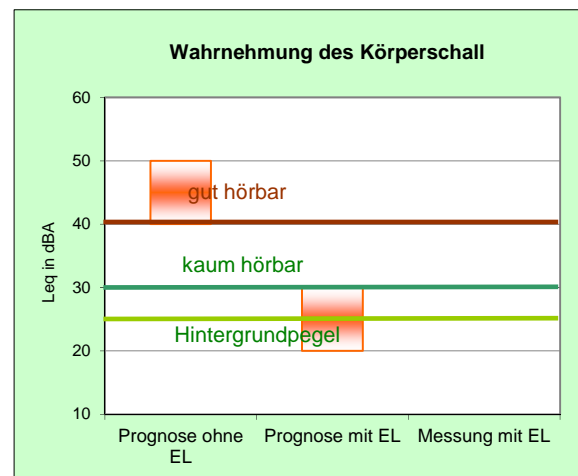
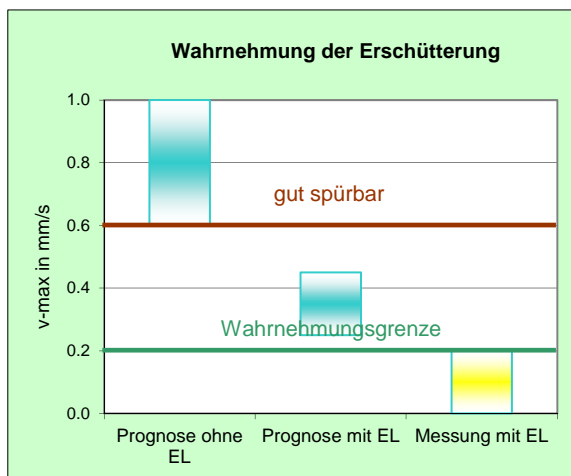
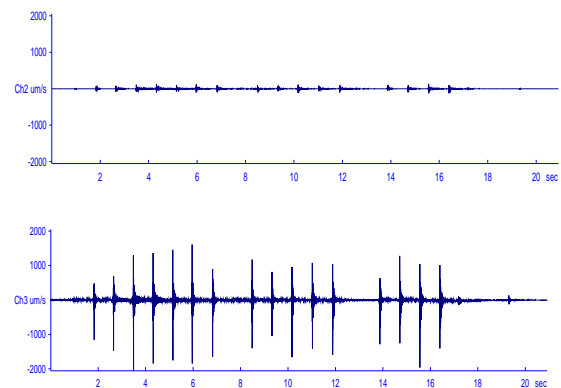


Elastisch gelagerte Bodenplatte

Qualitätssicherung:

- Visuelle Kontrolle vor Einbau der elastischen Lagerung
- Visuelle Kontrolle der Liftschacht-Lagerung
- 2 visuelle Kontrollen (vor Betonieren)
- Messung (Impuls-Anregung) der elastisch gelagerten Bodenplatte
- Abnahmemessung: Erschütterungsmessung während 24 Stunden

Kontrolle durch Messung der Impuls-Anregung; oben: elastisch gelagerter Bereich; unten: nicht elastisch gelagerter Bereich.



Die Abnahmemessung wurde auf Wunsch des Bauherrn noch im Rohbauzustand durchgeführt. Das Ergebnis war sehr zufriedenstellend. Die Erschütterungen lagen unter der Wahrnehmungsgrenze. Im Gebäude, das vorher an der gleichen Stelle stand, wurden noch Erschütterungswerte von 1.5 mm/s gemessen. Auf eine Messung des Körperschalls wurde verzichtet.

6.3 Wohnhaus, 7 m neben Gleisfeld

Bei diesem 6-stöckigen Gebäude handelt sich um einen klassischen Fall von vollflächiger elastischer Lagerung. Sowohl die Bodenplatte als auch die Seitenwände sind mit 25 mm PU-Schaum gegen Erschütterungen isoliert.



Wohnhaus neben Eisenbahnlinie

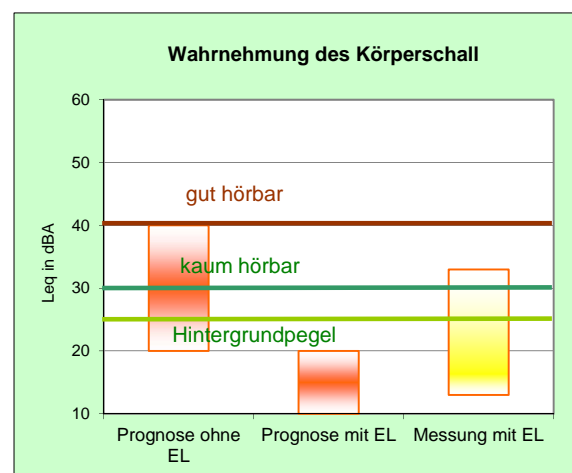
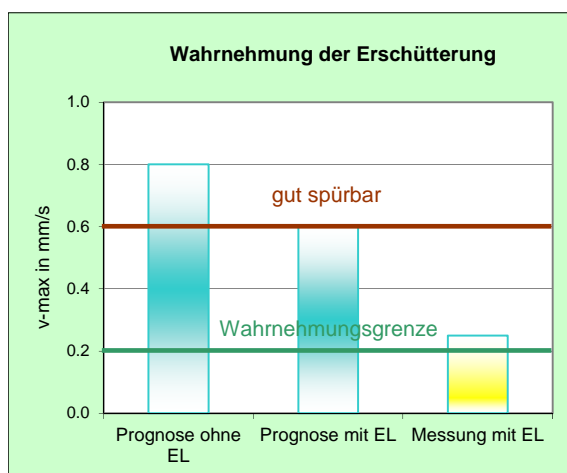
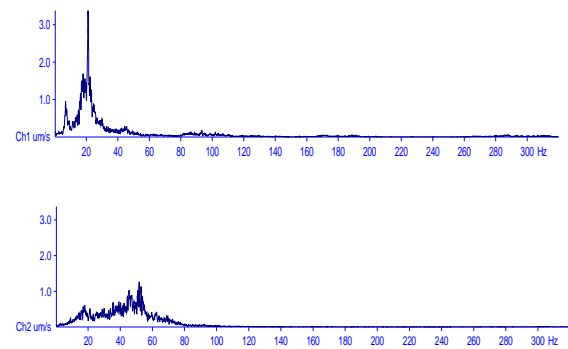


Auskleidung der Lift-Unterfahrt mit PU-Schaum

Qualitätssicherung:

- Visuelle Kontrolle vor Einbau der elastischen Lagerung
- Visuelle Kontrolle der Liftschacht-Lagerung
- 3 visuelle Kontrollen (vor Betonieren)
- Messung (Impuls-Anregung) der elastisch gelagerten Bodenplatte
- Abnahmemessung: Kombinierte Erschütterungs- und Körperschallmessung während 24 Stunden

Kontrolle durch Vergleich der Amplitudenspektren für eine Zugvobeifahrt; oben: elastisch gelagerter Bereich; unten: nicht elastisch gelagerter Bereich.



Die Abnahmemessungen zeigten, dass die Erschütterungen wesentlich tiefer ausfielen als die Prognose voraussagte. Der Körperschall hingegen war etwas höher als prognostiziert, lag aber immer noch im Bereich „Kaum hörbar“. Im ähnlich gebauten Nachbarhaus, das allerdings nicht elastisch gelagert worden ist, wurden Körperschallwerte von 30 bis 50 dBA gemessen

6.4 Wohnhaus, 18 m neben Gleis

Bei diesem 4-stöckigen Gebäude handelt sich um einen klassischen Fall von vollflächiger elastischer Lagerung. Sowohl die Bodenplatte als auch die Seitenwände sind mit 25 mm PU-Schaum gegen Erschütterungen isoliert. Eine Besonderheit bildet die für 5 Gebäude gemeinsame unterirdische Garage. Da nur ein Gebäude im Nahbereich der Bahn lag wurde nur dieser Teil elastisch gelagert. Eine Trennung der Bodenplatte wurde nicht vorgenommen.



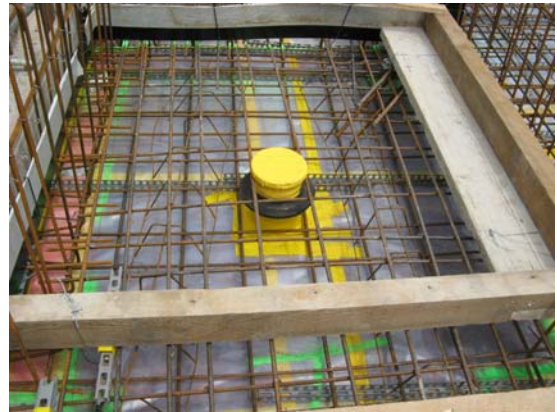
Wohnhaus neben Eisenbahnlinie



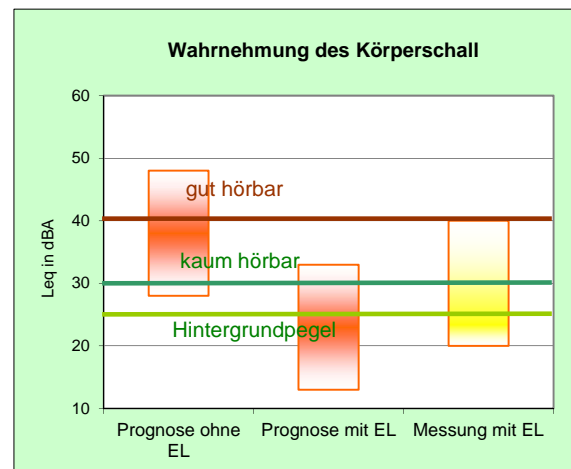
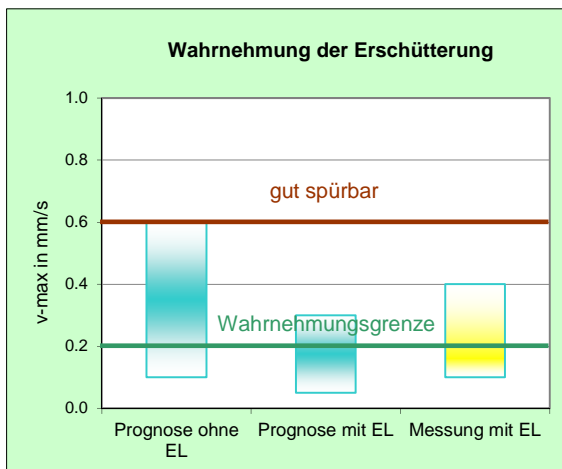
Verkleidung der Aussenwände mit PU-Schaum-Matten

Qualitätssicherung:

- Visuelle Kontrolle vor Einbau der elastischen Lagerung
- 2 visuelle Kontrollen (vor Betonieren)
- Messung (Impuls-Anregung) der elastisch gelagerten Bodenplatte
- Abnahmemessung: Kombinierte Erschütterungs- und Körperschallmessung während 24 Stunden



Elastisch eingebettetes Ablaufrohr mit Dichtungskragen



Das Ergebnis der elastischen Lagerung war zufriedenstellend. Die Abnahmemessungen zeigten, dass sowohl die Erschütterungen als auch der Körperschall etwas höher waren als prognostiziert. Sie lagen aber immer noch im Bereich „Kaum wahrnehmbar“. Mit einer Trennung der Bodenplatte hätte man wohl noch etwas mehr erreichen können.

6.5 Wohnhaus über Parkhaus

Über einem bestehenden Parkhaus – unmittelbar neben den Bahngleisen – wurde ein 4-stöckiges Wohnhaus errichtet. Als Isolation gegen Erschütterungen wurde die Decke über dem Parkhaus vollflächig mit PU-Schaum-Matten belegt.



Wohnhaus über bestehendem Parkhaus



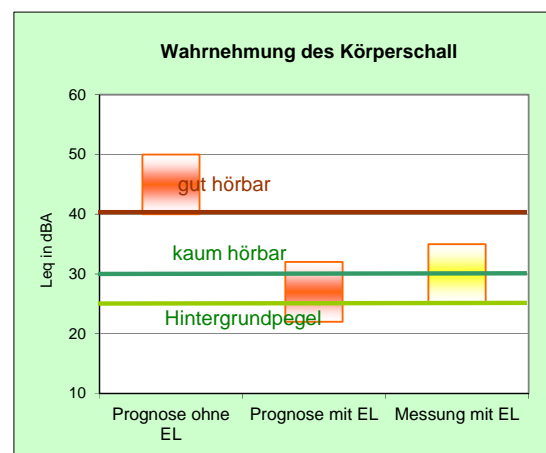
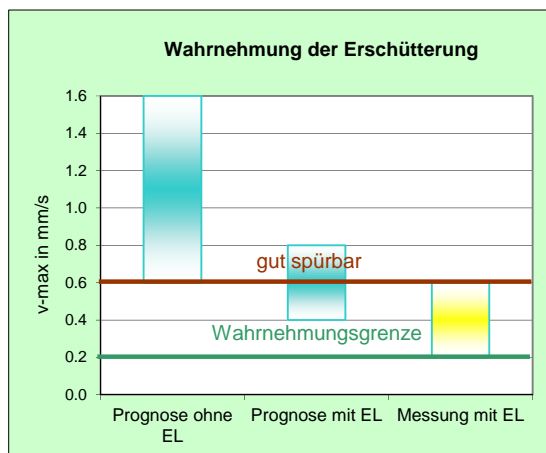
Verlegen der PU-Schaum-Matten über Parkhausdecke

Qualitätssicherung:

- Visuelle Kontrolle vor Einbau der elastischen Lagerung
- 4 visuelle Kontrollen (vor Betonieren)
- Messung (Impuls-Anregung) der elastisch gelagerten Bodenplatte
- Abnahmemessung: Kombinierte Erschütterungs- und Körperschallmessung während 24 Stunden



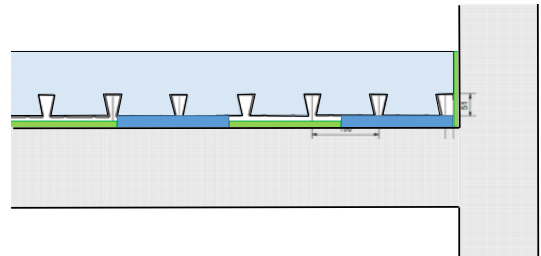
Fehlerstelle: Nicht-verkleidete Beton-Stirnseite



Die Abnahmemessungen zeigten, dass die Erschütterungen etwas tiefer ausfielen als die Prognose voraussagte. Der Körperschall hingegen war etwas höher als prognostiziert, lag aber immer noch im Bereich „Kaum hörbar“.

6.6 Elastisch gelagerte Böden

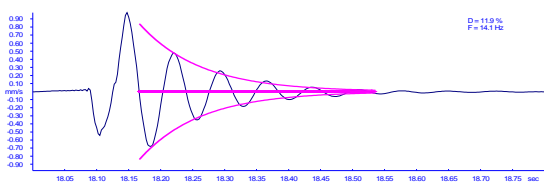
In einem Forschungszentrum werden elastisch gelagerte Böden eingebaut. Mit dieser elastischen Lagerung soll die Übertragung von Erschütterungen und Körperschall auf die umgebenden Räume reduziert werden. Die elastische Lagerung wird mit PU-Schaum-Matten, auf denen eine Betonplatte von 170 mm Stärke ruht, realisiert. Um die stark variierende Belastung abdecken zu können, wurden zwei unterschiedliche PU-Materialien eingesetzt: Ein weiches Material mit 37 mm Stärke und ein härteres Material mit 35 mm Stärke. Auf diese Weise ergibt sich eine progressive Feder, die sowohl für geringe als auch für hohe Belastungen eine Abstimmfrequenz von 12 bis 20 Hz ergibt.



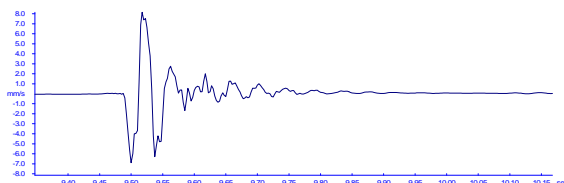
Elastische Lagerung mit zwei verschiedenen PU-Schaum-Matten mit unterschiedlichen Dicken

Qualitätssicherung:

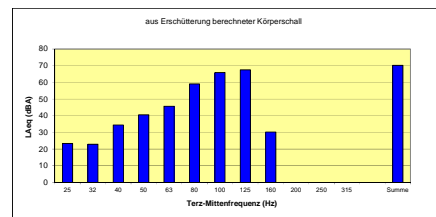
- Visuelle Kontrolle vor Einbau der elastischen Lagerung
- Abnahmemessung an einer Testplatte: Bestimmung der Eigenfrequenz; Erschütterungsmessung, Umrechnung in Körperschall



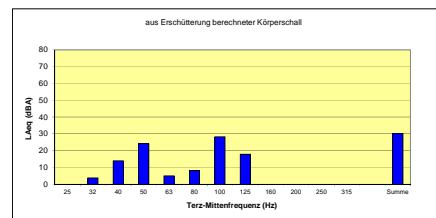
Impuls in horizontaler Richtung



Impuls in vertikaler Richtung



Schallspektrum im Testraum (70 dBA)



Schallspektrum im Nachbarraum (30 dBA)

Die Messungen an der Testplatte zeigten, dass durch die elastische Lagerung der Bodenplatte der Körperschall im Nachbarraum um 40 dB reduziert wird.

7 Schlussfolgerungen

Die Qualitätskontrolle während der Bauausführung ist ein wichtiger Bestandteil der elastischen Lagerung eines Bauwerkes. Aus den vielen von uns begleiteten Projekten, die zumeist die elastische Lagerung von Wohnhäusern wegen Eisenbahnerschütterungen betrafen, ergeben sich folgende Empfehlungen:

- Eine elastische Lagerung sollte einfach konzipiert sein. Eine Baustelle ist kein Labor. Komplikationen lassen sich zwar durchaus realisieren, sie erfordern jedoch gut geschultes Personal und eine intensive Kontrolle.
- Bei der Auswahl des Materials ist auf die Langzeitanforderung besonderes Gewicht zu legen. Bauwerke sollten 50 oder 100 Jahre überdauern. Bereits geringe Veränderungen in den dynamischen Eigenschaften (z.B. durch alterungsbedingte Erhöhung der Abstimmfrequenz) kann die Isolationswirkung erheblich reduzieren.
- Für die Qualitätssicherung auf der Baustelle braucht es ein Konzept mit festgelegten Kontrollaufgaben. Durchgeführte Kontrollen und Messungen sind in einem Protokoll und in Messberichten zu dokumentieren.
- Die Qualitätskontrolle auf der Baustelle besteht einerseits aus *visueller Kontrolle* und andererseits aus *Messungen*. Die visuelle Kontrolle erfordert ein 100-prozentiges Verständnis der Funktionsweise der elastischen Lagerung und ein „scharfes“ Auge. Fehler passieren in der Regel nicht im Grossen, sondern in den Details.
- Was immer mit Messungen kontrolliert werden kann, sollte gemessen werden. Allerdings lässt sich während des Bauablaufs gar nicht so viel „eindeutig“ messen. Zumeist verfälschten Abspriessungen und temporäre Verbindungen die Messungen und lassen keine eindeutige Interpretation zu.
- Abnahmemessungen sollten erst im Endzustand erfolgen. Sie dienen weniger der Qualitätssicherung als der Beruhigung für den Investor, dass er das viele Geld richtig ausgegeben hat. Und noch viel mehr dienen sie der Weiterentwicklung von elastischen Lagerungen und der Verbesserung von Berechnungsmethoden. Die in diesem Beitrag gezeigten Abnahmemessungen zeigen alle, dass die vom 1-Massen-Schwinger abgeleiteten Einfüge-Spektren für elastische Lagerungen eindeutig zu optimistische Werte für den Körperschall ergeben. Bei zukünftigen Prognosen werden wir für elastische Lagerungen „korrigierte“ Einfüge-Spektren verwenden.
- Bauherren erwarten oft, dass der für die elastische Lagerung verantwortliche Spezialist die volle Verantwortung für die elastische Lagerung übernimmt. Dies ist im Grunde genommen gar nicht möglich. Auch mit der aufwändigsten Kontrolle kann nicht jeder versteckte Fehler gefunden werden. Und es genügt bereits ein kleiner versteckter Fehler, um eine elastische Lagerung zu blockieren.