

Die Tücken der Bauwerksdynamik - Ein Rückblick auf 30 Jahre Praxis

1 Einleitung

Bauwerksdynamik ist sicherlich eines der schwierigeren Gebiete der Bauingenieur-Wissenschaften. Man kann sich das notwendige Wissen an einer Hochschule erwerben. Das allein dürfte nicht ganz reichen. Man kann auch aus praktischer Erfahrung lernen. Zusammen mit dem Hochschulwissen dürfte dies eine gute Grundlage ergeben. Man kann zusätzlich auch aus den Fehlern der anderen lernen, dann muss man sie nicht selbst machen. Das spart Kosten und Ärger.

In diesem Sinne sind die Beispiele im vorliegenden Beitrag zusammengestellt worden. Die Sammlung enthält 30 Beispiele von schwierigen, nicht unbedingt ideal angepackten Dynamik-Herausforderungen. Bei manchen Fällen hätte man – mit genügend Fachwissen und Erfahrung – den richtigen Lösungsweg wissen können. Bei anderen erkennt man den richtigen Weg wirklich erst wenn der Fehler bereits gemacht ist. Und bei einigen Fällen gibt es gar keine Lösung.

Vielleicht tragen die 30 Beispiele dazu bei, dass die Tücken der Bauwerksdynamik bereits in der Planungsphase erkannt werden. In der Planungsphase lässt sich noch Vieles zurecht biegen. Ist das Bauwerk einmal erstellt, lassen sich Fehler in der Bauwerksdynamik nur schwer oder gar nicht mehr korrigieren.

Schwingungen in einer Weberei

Das Gebäude ist ein dreistöckiges Beton-Skelett-Tragwerk mit einer Grundfläche von 22 m x 53 m. Die Träger des ersten und des zweiten Geschosses sind vorgespannte Betonträger. Tragende Schubwände existieren nur im Untergeschoss. Im Gebäude wurden seit über 30 Jahren qualitativ hochstehende Textilfilter hergestellt, ohne dass irgendwelche Probleme aufgetaucht wären. 56 Maschinen, jede mit einem Gewicht von 2.2 t, produzierten Tag und Nacht. Im Laufe der Zeit wurden einige Zwischenwände entfernt, um den Warenfluss zu verbessern. Dann wurden Hochgeschwindigkeits-Webmaschinen installiert. Und damit traten extrem hohe Horizontalschwingungen von bis zu 10 mm/s auf. Der örtliche Ingenieur wurde beigezogen, um die Schwingungen zu reduzieren.

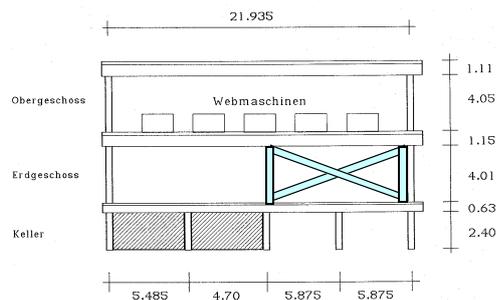


Bild 1 Schnitt durch das Gebäude mit Verstärkung mit Stahlträgern

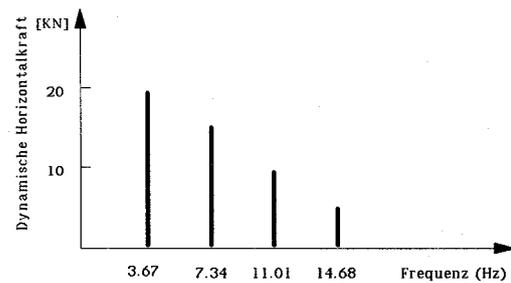


Bild 2 Dynamische Horizontalkräfte der Webmaschinen

Er entschied sich für eine Verstärkung mit schweren Doppel-T-Trägern (HEM-300), wie in Bild 1 blau dargestellt. Das Ergebnis war katastrophal. Anstelle einer Reduktion brachte die Verstärkungsmassnahme eine Verdoppelung der horizontalen Schwingungen mit Schwinggeschwindigkeiten von bis zu 20 mm/s. Mitarbeiter beklagten sich über Seekrankheit.

Was war passiert? Das Gebäude hatte – vor der Verstärkung mit Stahlträgern – die zweite Eigenfrequenz bei 3 Hz, d.h. leicht unterhalb der Hauptanregungsfrequenz der Webmaschinen (siehe Bild 2). Mit den Stahlträgern stiegen die horizontalen Eigenfrequenzen an und die zweite Eigenfrequenz erreichte exakt die Hauptanregungsfrequenz von 3.67 Hz. Die horizontalen Schwingungsamplituden verdoppelten sich.

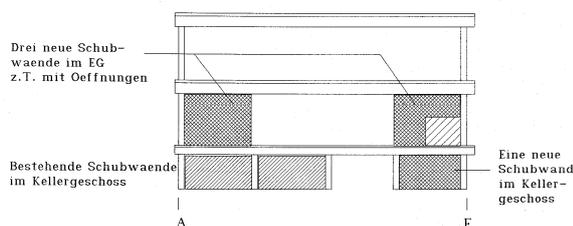


Bild 3 Verstärkung mit 3 zusätzlichen Schubwänden (Schnitt)

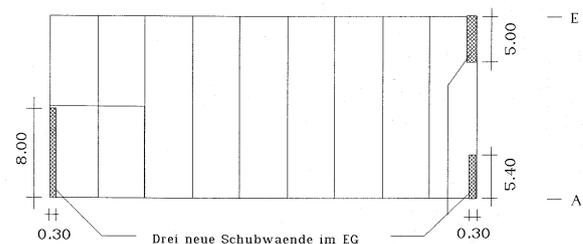


Bild 4 Verstärkung mit 3 zusätzlichen Schubwänden (Grundriss)

Um das Problem zu lösen, wurde eine FE-Berechnung durchgeführt. Damit konnte die Wirkung verschiedener Verstärkungsmassnahmen studiert werden. Schliesslich wurde die Lösung mit Schubwänden, wie sie in Bild 3 und 4 dargestellt sind, gewählt. Diese Lösung trägt die Horizontalkräfte sicher auf die Fundation ab und erhöht die Eigenfrequenz und die Dämpfung. Die erste Eigenfrequenz ergab sich rechnerisch zu 3.0 Hz und die zweite zu 5.5 Hz. Somit lag die Hauptanregungsfrequenz von 3.67 Hz zwischen den zwei untersten Eigenfrequenzen und konnte keine Resonanz erzeugen. Eine Reduktion von 80 % wurde vorausgesagt. Messungen nach dem Einbau der Verstärkungen zeigten, dass eine Reduktion von über 90 % erreicht worden ist.

Bürogebäude neben einer Produktionshalle

Ein neues Bürogebäude wurde unmittelbar neben einem existierenden Produktionsgebäude errichtet. Das Produktionsgebäude enthielt Ausstellungsräume, in denen die neuesten Webmaschinen gezeigt wurden. Im Bürogebäude sollten Sitzungen mit zukünftigen Kunden stattfinden. Sehr bald wurde klar, dass der Lärmpegel im Bürogebäude einfach zu hoch war.

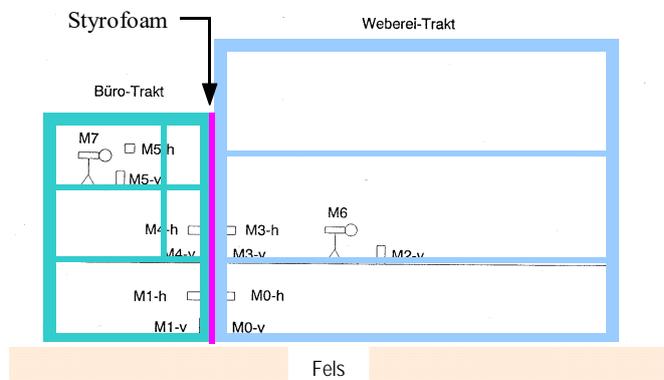


Bild 1 Schnitt durch das Bürogebäude (links) und das Produktionsgebäude (rechts)

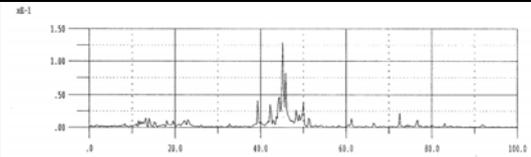


Bild 2a Vibrationsspektrum der Wand im Sitzungszimmer

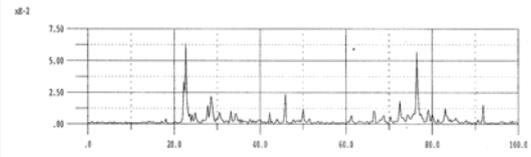


Bild 2b Vibrationsspektrum des Bodens im Sitzungszimmer

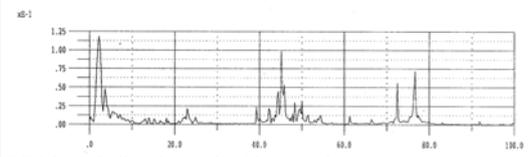


Bild 2c Schallspektrum im Sitzungszimmer

Die beiden Gebäude haben ihre Fundation auf der gleichen Felschicht, womit sich eine gute Erschütterungsübertragung von einem Gebäude zum anderen ergab. Überdies bestand die Isolation zwischen den beiden Gebäuden aus 15 mm Styropor-Hartschaum. Die Wand des existierenden Produktionsgebäudes wurde der Einfachheit halber direkt als äussere Schalung für das neue Bürogebäude verwendet.

Umfangreiche Vibrations- und Schallmessungen ergaben folgende Ergebnisse: Der Lärm in den Sitzungszimmern des Bürogebäudes wurde eindeutig durch sekundär abgestrahlten Schall erzeugt. Das Spektrum des Schalldruckes entsprach – wie man aus Bild 2a bis c entnehmen kann – einer Superposition des Wand- und Boden-Vibrationsspektrums. Der Schallpegel in den Sitzungszimmern lag in folgenden Bereichen:

- Webmaschinen im Produktionsgebäude in Betrieb: 51 bis 53 dBA
- Alle Maschinen und Anlagen abgestellt: 24 bis 25 dBA

Mit den Messungen konnte auch nachgewiesen werden, dass die Erschütterungsübertragung sowohl über die gemeinsame Felsplatte als auch über die Styropor-Isolation verlief.

Um die unbefriedigende Situation zu verbessern wurden drei Möglichkeiten geprüft:

- Entfernung der Styropor-Isolation mit einer Seil-Säge
- Verwendung von elastisch gelagerten Zwischenwänden
- Änderung der Nutzung des Bürogebäudes

Welche Lösung schlussendlich gewählt wurde, ist dem Autor nicht bekannt.

Vibrationen bei Zentrifugen

Vier Zentrifugen wurden auf einer Plattform installiert. Die Plattform besteht aus einer 12 cm dicken Betonplatte, die auf Stahlträgern ruht (siehe Bild 1). Der Ingenieur dimensionierte die Plattform unter Berücksichtigung der Hauptanregungsfrequenz der Zentrifuge. Bei einer Betriebsdrehzahl von 600 U/Min wurde eine Hauptanregungsfrequenz von 10 Hz eingesetzt. Für eine solche Anregung wurde eine Plattform mit einer Eigenfrequenz von 7 Hz als adäquat erachtet. Die Überraschung war gross, als die Plattform schon bei den ersten Testläufen wild schüttelte. Messungen ergaben die Resonanzkurve von Bild 2 und zeigten maximale Schwingungsgeschwindigkeiten von 13 mm/s. Die Eigenfrequenz der Plattform lag offensichtlich nicht bei 7 Hz sondern vielmehr bei 10 Hz und fiel somit mit der Anregungsfrequenz zusammen.

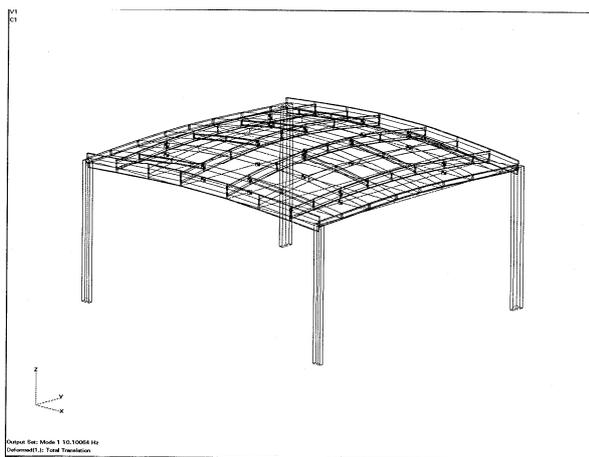


Bild 1 FE-Modell der ursprünglichen Plattform

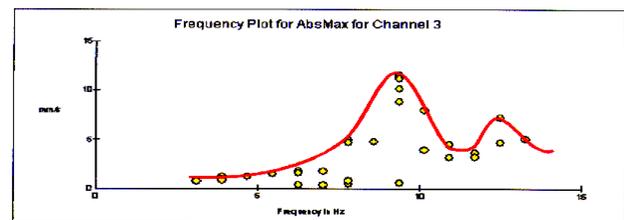


Bild 2 Resonanzkurve der Plattform

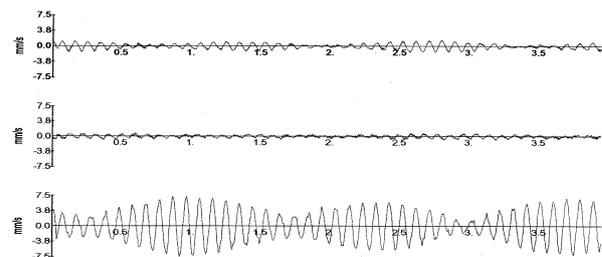


Bild 3 Schwingungsaufzeichnung auf der Plattform (hor1, hor2, vert.)

Der Grund für das ungünstige Verhalten der Plattform war der Kontakt zwischen der Betonplatte und den Stahlträgern. Der Ingenieur ging davon aus, dass die Betonplatte und die Stahlträger unabhängig wirken. Diese Annahme ist – zumindest für eine statische Betrachtung – auf der sicheren Seite. Für eine dynamische Betrachtung ist eine solche Annahme falsch. Die Betonplatte klebt quasi an den Stahlträgern und wirkt somit als Verbundträger mit einer entsprechend höheren Steifigkeit. Die Betonplatte hatte deshalb eine Eigenfrequenz von 10 Hz, was mit der Anregungsfrequenz zusammenfiel und entsprechend hohe Resonanzschwingungen ergab.

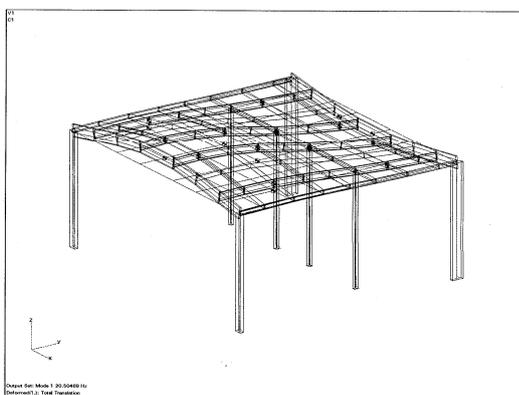


Bild 4 FE-Modell für verstärkte Plattform

Die Lösung des Problems war der Einbau von vier zusätzlichen Stützen, wie in Bild 4 dargestellt. Die Grundfrequenz der Plattform erreichte damit 20.5 Hz, womit sich keine störenden Schwingungen mehr ergaben.

Die dynamische FE-Berechnung ergab folgende Ergebnisse:

- Ursprüngliche Plattform (ohne Verbund): 7.5 Hz
- Ursprüngliche Plattform (mit Verbund): 10.1 Hz
- Plattform mit 4 Stützen: 20.5 Hz

Sekundär abgestrahlter Schall bei Webmaschinen

Im oberen Stock eines Industriegebäudes wurden 12 Webmaschinen installiert, während das Erdgeschoss weiterhin als Reparaturwerkstätte für schwere Lastwagen verwendet wurde. Kaum nahmen die Webmaschinen ihren Betrieb auf, beschwerten sich die Mitarbeiter im Erdgeschoss über den hohen Lärmpegel. Wenn alle Webmaschinen in Betrieb waren, wurde im Erdgeschoss ein Schallpegel von 80 dBA gemessen. Dies war sogar für eine Reparaturwerkstätte zu hoch.

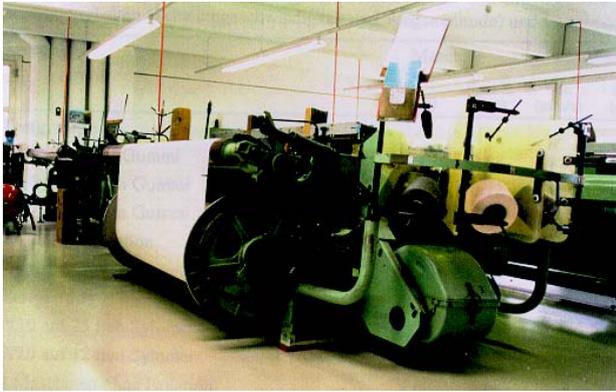


Bild 1 Webmaschinen im 1. OG



Bild 2 Untersicht der vorfabrizierten Geschossdecke

Der Hersteller der Webmaschinen empfahl den Einbau von speziellen weichen Federn mit dem Ergebnis, dass zwar der Schallpegel stark zurückging aber die Schwingungen der Geschossdecke stark anstiegen und Werte von bis zu 10 mm/s erreichten. Überdies wären die Kosten für die Lagerung der 12 Maschinen mit diesen Federelementen sehr teuer geworden.

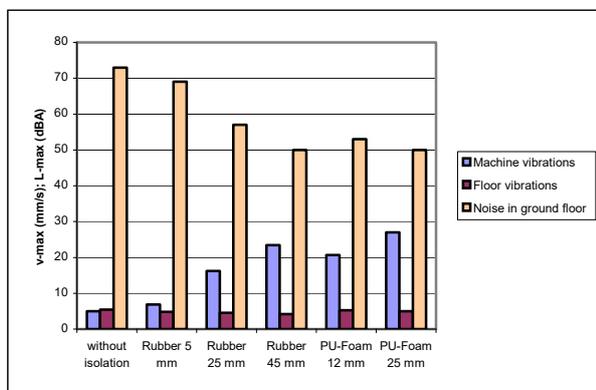


Bild 3 Wirkung verschiedener PU-Schaum-Platten

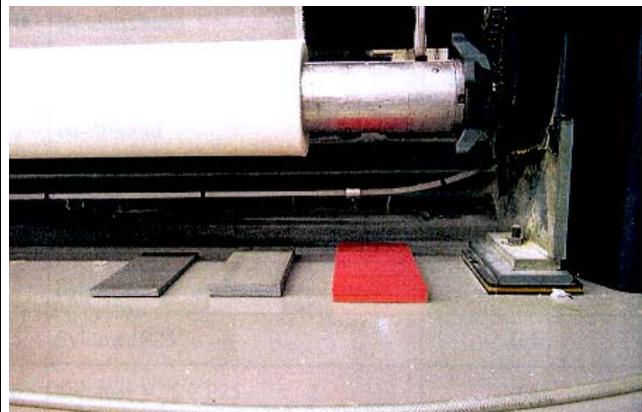


Bild 4 Muster von Gummi- und PU-Schaum-Platten

Eine effizientere Lösung war der Einbau von Gummi- oder PU-Schaum-Platten. Diese sind leicht zu installieren und kosten nicht ein Vermögen. Überdies können - ohne viel Aufwand - Tests mit verschiedenen Material-Typen durchgeführt werden bis die richtige Abstimmung gefunden worden ist. Wie man aus Bild 3 entnehmen kann, nimmt die Schwingung der Maschine mit zunehmender Weichheit der Lagerung zu, während gleichzeitig der Schallpegel im Erdgeschoss abnimmt. Die Schwingung der Geschossdecke variierte dabei nicht stark. Die Aufgabe bestand nun darin, den optimalen Kompromiss zwischen Schallreduktion und Erhöhung der Maschinenschwingung zu finden. Schliesslich wurde eine Lösung mit 12 mm PU-Schaum gewählt. Die Schwingungen auf der Geschossdecke von maximal 5 mm/s lagen damit im akzeptablen Bereich.

Ausbreitung der Erschütterung bei einer Wasserkraftanlage

Bei einer Distanz von 100 m von der Wasserkraftanlage erwartete der Architekt nicht, dass die Vibrationen der Turbinen für das neue Einfamilienhaus auf der anderen Seite der Autobahn irgendwelche Probleme verursachen könnten. Allerdings beschwerte sich sein Kunde sehr bald über andauernden Schall, der zu Übelkeit und Kopfschmerzen führe und ihn nachts nicht schlafen lasse.



Bild 1 Wasserkraftanlage



Bild 2 Autobahnunterführung

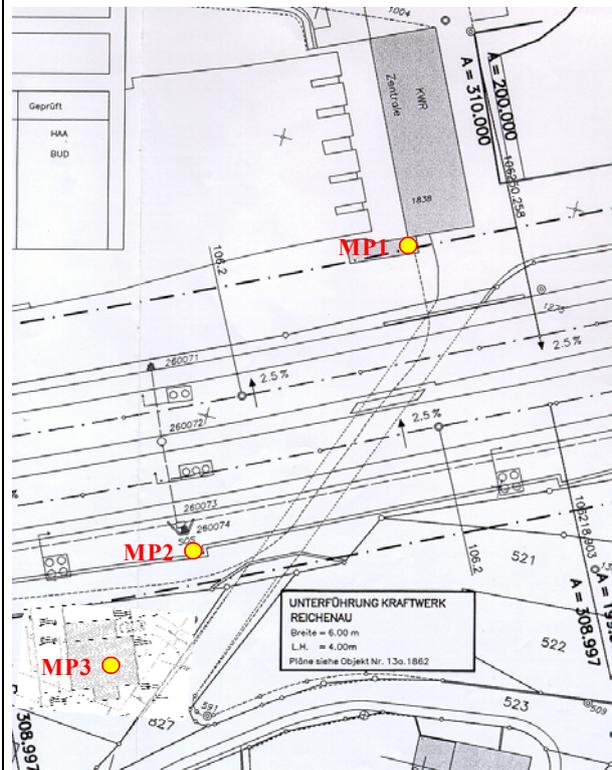


Bild 3 Situation mit Wasserkraftanlage, Unterführung und betroffenes Einfamilienhaus

Messungen auf dem Fundament der Wasserkraftanlage ergaben eine konstante Schwingung von 0.15 mm/s. In einer Distanz von 100 m lagen die Schwingungen auf dem Gebädefundament immer noch bei 0.025 mm/s. Durch Verstärkungseffekte ergaben sich im Gebäude selbst Schwingungen von bis zu 0.13 mm/s bei 31 Hz. Mit einer Abstrahleffizienz von 10 dB ergibt sich damit ein Schallpegel von über 35 dBA, was gerade in der Nacht nicht besonders angenehm ist.



Bild 4 Betroffenes Einfamilienhaus

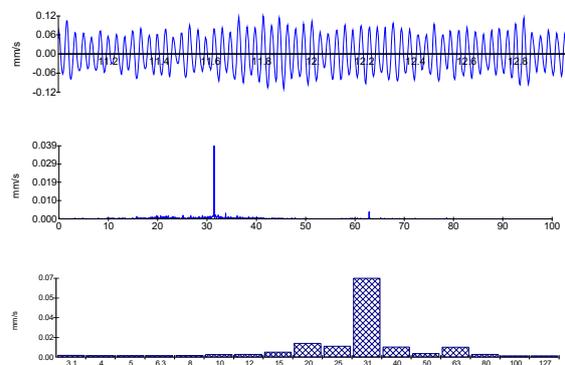


Bild 5 Schwingungen des Fussbodens im Einfamilienhaus

Der Grund für die unerwartet hohen Immissionen ist die Autobahnunterführung. Dadurch werden die Vibrationen von der Wasserkraftanlage ziemlich ungedämpft zum Einfamilienhaus geleitet. Mit einer elastischen Lagerung des Einfamilienhauses hätte das Problem verhindert werden können.

Schwingungsprobleme in einer Textilfabrik

Alle Webmaschinen sind in die neuerbaute Halle – mit grosszügigen Platzverhältnissen und Spannweiten von fast 12 m – verschoben worden. Die Vibrationen waren zwar nicht alarmierend, doch sie gaben Anlass zu Besorgnis. Tests wurden durchgeführt um Möglichkeiten zur Reduktion der Schwingungen zu suchen.

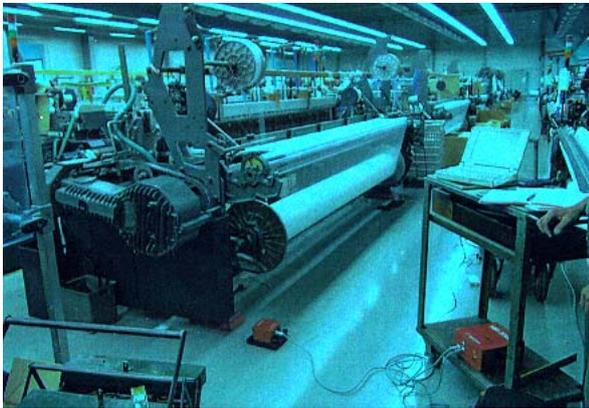


Bild 1 Schwingungsmessung bei den Webmaschinen

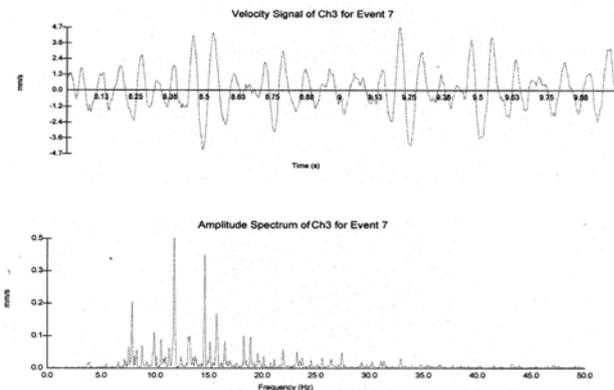


Bild 2 Schwingungsaufzeichnung und Amplitudenspektrum

Die Webmaschinen waren ursprünglich auf recht steifen Gummi-Platten gelagert. Man ging davon aus, dass weichere Gummilager eine gewisse Reduktion der Deckenschwingungen bringen würden. Die Versuche zeigten allerdings (siehe Bild 4), dass die Schwingungen mit zunehmender Dicke (Weichheit) der Lager anstiegen. Erst mit einer Dicke von 75 mm konnte eine Reduktion erreicht werden. Allerdings war diese Weichheit für den Betrieb der Webmaschinen nicht akzeptabel. Somit mussten die ursprünglichen Lager beibehalten werden und die Vibrationen von 4 mm/s mussten toleriert werden.

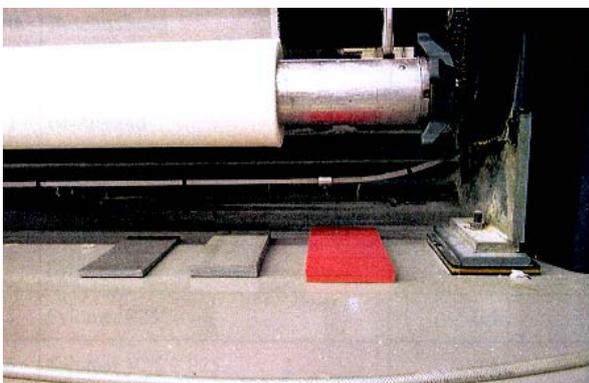


Bild 3 Muster von Gummi- und PU-Schaum-Platten

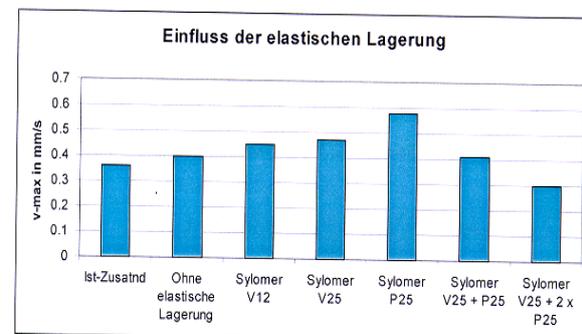


Bild 4 Einfluss von elastischen Lagern unterschiedlicher Dicke beim Betrieb einer Webmaschine

Um dieses Verhalten zu verstehen, muss man wissen, dass die Geschossdecke eine Eigenfrequenz von 12 Hz aufwies. Die Hauptanregungsfrequenzen der Webmaschinen lagen – wie man aus Bild 2 entnehmen kann – bei 8, 12 und 15 Hz. Mit zunehmender Dicke der elastischen Lager sinkt die dominante Anregung von 15 Hz auf 12 Hz, was zu Resonanz mit der Eigenfrequenz der Geschossdecke führt. Mit Lagerdicken über 50 mm sinkt die dominante Anregung gegen 8 Hz und verschiebt somit die Anregung ausserhalb des Resonanzbereiches.

Wegen des komplexen Verhaltens von Webmaschinen ist die rechnerische Bestimmung des Schwingungsverhaltens sehr schwierig. Oft führen Versuche, wie sie oben beschrieben sind, eher zum Erfolg.

Einfluss der Vorspannung auf die Eigenfrequenz

Leichtbeton ist für manche Anwendungen der ideale Baustoff. Vorsicht ist allerdings geboten, wenn es sich um schwingungsempfindliche Tragwerke handelt. Der Ingenieur, der das Busterminal in Bild 1 entwarf, war sich dieser Problematik bewusst und argumentierte, dass nachträgliche Vorspannung die Eigenfrequenz der Geschossdecken erhöhen werde. Die nachträgliche Vorspannung hatte man bei einigen Platten bereits aufgebracht, als Probleme mit dem Aufbringen der Vorspannung auftauchten. Es wurde entschieden, die Wirkung der Vorspannung durch Messungen zu überprüfen.



Bild 1 Gasbeton-Platten für die Geschossdecke des Busterminal

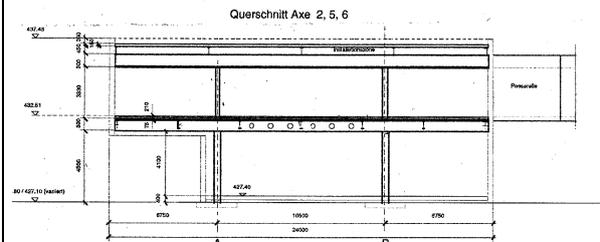


Bild 2 Schnitt durch Busterminal

Wie in Bild 3 dargestellt, wurden Messungen im vorgespannten und nicht-vorgespannten Bereich durchgeführt. Die entsprechenden Aufzeichnungen und Amplitudenspektren sind in Bild 4a und b wiedergegeben. Offensichtlich sind die Aufzeichnungen in den beiden Bereichen praktisch identisch und auch die Eigenfrequenzen zeigen nur ganz geringe Unterschiede.

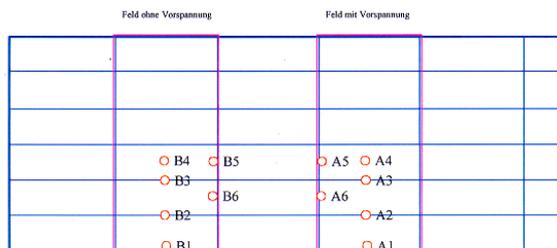


Bild 3 Grundriss mit Position der Sensoren

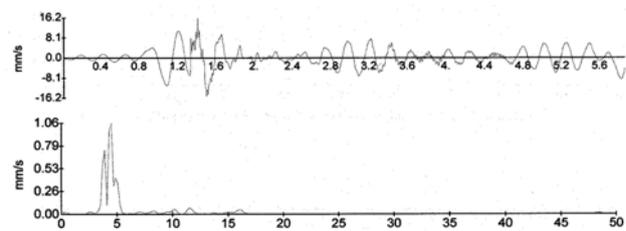


Bild 4a Schwingungsverlauf und Amplitudenspektrum für Bereich ohne Vorspannung

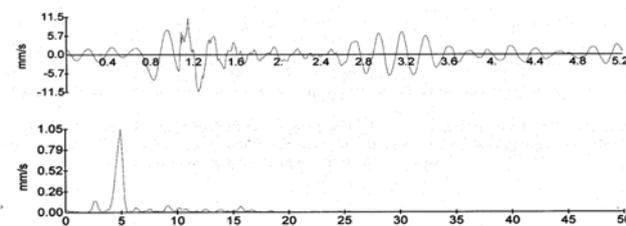


Bild 4b Schwingungsverlauf und Amplitudenspektrum für Bereich mit Vorspannung

Vorspannung an sich hat keinen Einfluss auf die Eigenfrequenz einer Tragstruktur. Dies liegt daran, dass es sich bei den aufgebrachtten Kräften um innere Kräfte handelt. Allerdings kann wegen des Schliessens von Rissen ein leichter Anstieg der Eigenfrequenz beobachtet werden. Im vorliegenden Beispiel wurde ein Anstieg von 8 % festgestellt.

Schwingungen einer Leichtbeton-Geschossdecke

Das 12-stöckige Gebäude sollte um 3 Stockwerke ergänzt werden. Um die zusätzlichen Lasten klein zu halten wurde Leichtbeton gewählt. Leichtbeton hat ein Raumgewicht von nur 6 kN/m^3 und einen statischen E-Modul von 4 kN/m^2 . Normaler Beton hingegen hat ein Raumgewicht von 25 kN/m^3 und einen statischen E-Modul von 35 kN/m^2 . Die dynamische Berechnung wies eine Eigenfrequenz von 6 bis 7 Hz aus. Resonanzschwingungen durch Personen sollten somit nicht auftreten. Trotzdem störten sich die Gäste an den Schwingungen, die von gehenden Personen hervorgerufen wurden. Die Messungen zeigten dann auch, dass beim Rennen Schwingungen von bis zu 8 mm/s entstehen (vgl. Bild 3). Nachträgliche FE-Berechnungen zeigten, dass mit einer Impulsbelastung von 35 kgm/s (entsprechend einem Heel Drop), eine maximale Schwinggeschwindigkeit von 12 mm/s erreicht wird. Dies zeigt, dass ein FE-Programm durchaus in der Lage ist, das dynamische Verhalten einer Geschossdecke korrekt zu berechnen.



Bild 1 Leichtbetondecke im Bau

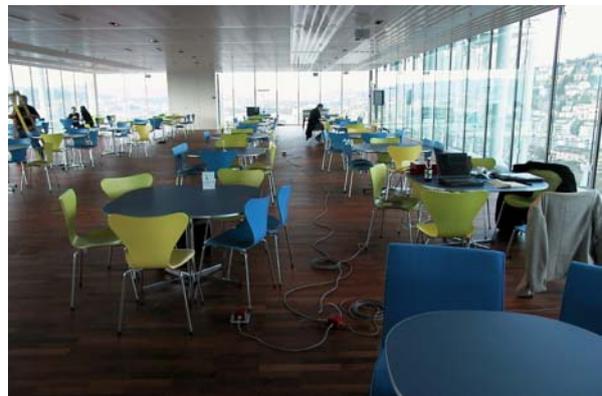


Bild 2 Personalrestaurant mit Leichtbetondecke von Bild 1

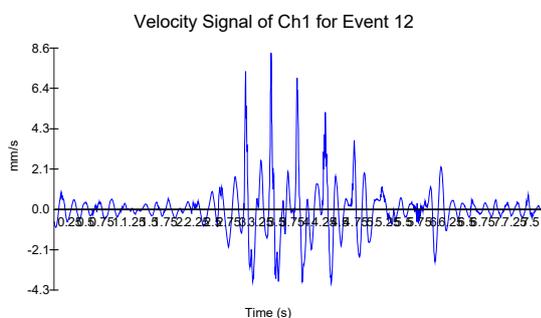


Bild 3 Gemessener Schwingungsverlauf

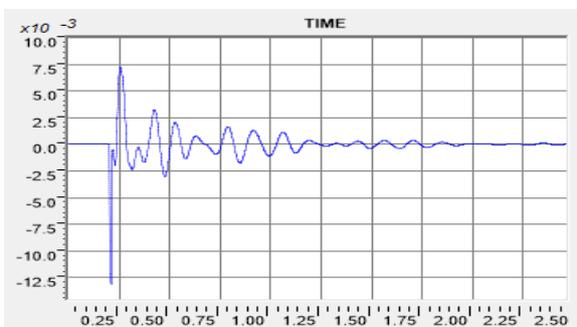


Bild 4 Berechneter Schwingungsverlauf

Was ist bei dieser Decke nicht optimal gelaufen? Leichtbeton hat eine um einen Faktor 4 geringere Masse. Dies bedeutet, dass die Masse fehlt, um einer Impulsbelastung Widerstand zu leisten. Dies wiederum bedeutet, dass es nicht genügt abzuklären, ob eine Leichtbeton-Geschossdecke Resonanzerscheinungen aufweisen wird. Die Geschossdecke des Personalrestaurants hatte ja auch eine Eigenfrequenz von 6,4 Hz und die Schwingungsspitzen wurden, wie man in Bild 3 erkennt, nicht durch Aufschaukeln erreicht. Bei Leichtbau-Konstruktionen ist es daher besonders wichtig, dass im Rahmen der dynamischen Beurteilung nicht nur das Phänomen der harmonischen Anregung sondern auch das Phänomen der Impuls-Anregung untersucht wird.

Schwingungen in einem Theater

Die Aula in Bild 1 ist als geneigte auskragende Plattform gestaltet. Die Plattform steigt in einem Winkel von ca. 20° von der untersten bis zur obersten Reihe an. Der untere Rand (mit der vordersten Sitzreihe) ist in einem Fundationsblock eingespannt (unter dem Boden), während die anderen drei Ränder der Plattform frei sind. Die Breite der Plattform beträgt 10 m, die Länge 8 m.

Die Plattform wies sehr starke Schwingungen auf, weshalb zwei Spannkabel zwischen dem freien Ende der Plattform und dem Boden darunter eingebaut wurden (siehe Bild 2). Mit diesen zwei Spannkabeln sollten die Schwingungen reduziert werden.



Bild 1 Sitzreihen auf der auskragenden Plattform



Bild 2 Untersicht mit den zwei Spannkabeln zwischen der Plattform und dem Boden

Messungen nach dem Einbau der Spannkabeln ergaben, dass sich die Eigenfrequenzen nur geringfügig erhöht hatten und dass die Schwingungen immer noch sehr hoch waren. Mit drei Personen, welche die Plattform absichtlich anregten, wurden Schwingungen von 50 mm/s erreicht (Bild 3). Dies entspricht einer Beschleunigung von 2 m/s² oder einem Schwingweg von 2 mm.

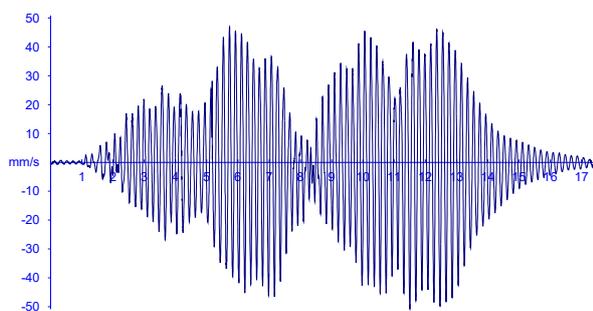


Bild 3 Schwingungsaufzeichnung bei Anregung durch 3 Personen

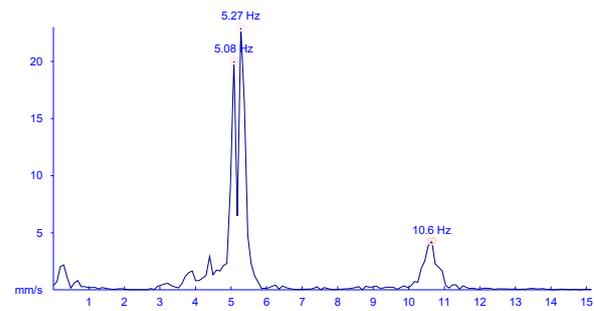


Bild 4 Amplitudenspektrum zu Signal in Bild 3

Warum funktioniert die Aussteifung mit Spannkabeln nicht? Die Kraft in den Spannkabeln hat keinen Einfluss auf das Schwingverhalten der auskragenden Plattform. Nur die Querschnittsfläche der Kabel und der E-Modul des Stahls finden Eingang in die Bewegungsgleichung. Vergleicht man die kleine Querschnittsfläche der Spannkabel mit der grossen Querschnittsfläche der auskragenden Plattform, so wird schnell klar, dass man von den Spannkabeln nicht allzu viel erwarten darf.

Erhöhung der Eigenfrequenz einer Betondecke

Die neue Produktionshalle war termingerecht fertiggestellt worden und die meisten Produktionsanlagen waren in ihre neue Position gebracht worden. Allerdings liess die Qualität der produzierten Teile (hoch präzise pharmazeutische Pumpen) zu wünschen übrig und die Produktion musste gestoppt werden. Die Schwingungen der Geschossdecke waren eindeutig zu hoch und es musste ohne Verzug eine Lösung gefunden werden.



Bild 1 Versuche mit Baustützen, um eine Reduktion der Spannweite zu simulieren

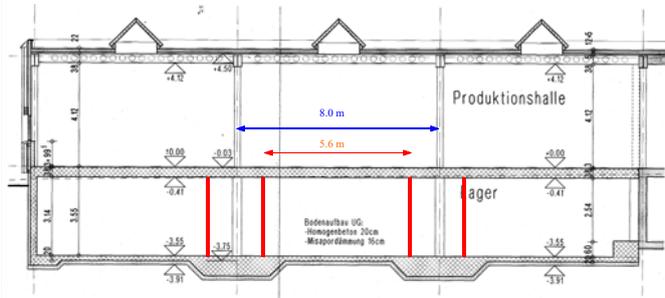


Bild 2 Schnitt durch Produktionshalle mit den vorgeschlagenen Stützen, um die freie Spannweite von 8 m auf 5.6 m zu reduzieren und die Eigenfrequenz von 14 Hz auf 28 Hz zu erhöhen

Ein Vorschlag war, die freie Spannweite zwischen den Stützen zu reduzieren. Als Test für die Wirksamkeit dieser Lösung wurden bei jeder Stütze 8 Baustützen aufgestellt, was gesamthaft 120 Baustützen ergab. Es wurde argumentiert, dass dadurch die effektive Spannweite von 8 m auf 5.6 m reduziert würde. Und da die Eigenfrequenz sich proportional zu $1/L^2$ verhält, würde die Eigenfrequenz von 14 Hz auf 28 Hz ansteigen.



Bild 3 Test mit 8 Baustützen in Feldmitte um die Eigenfrequenz von 14 Hz auf 18 Hz zu erhöhen

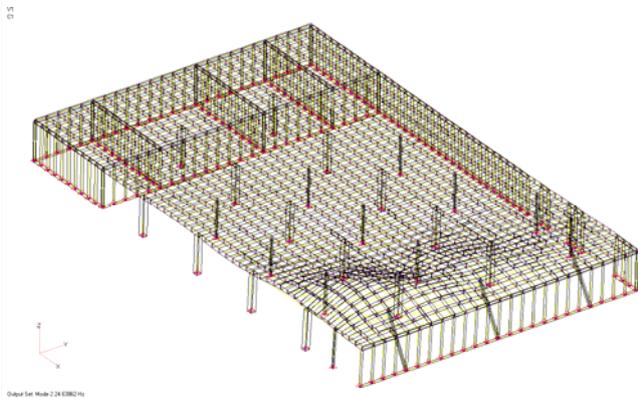


Bild 4 Dynamisches FE-Modell zur Simulation der Wirkung von zusätzlichen Stützen

Eine genauere Betrachtung des Vorschlages in Bild 2 zeigt rasch, dass diese Methode nicht von Erfolg gekrönt sein kann. Die Baustützen mit einer Querschnittsfläche von 7 cm^2 sind viel weicher als die bestehenden Stützen. Sie wirken vielmehr als weiche Federn und erhöhen die Eigenfrequenz nur unwesentlich. Messungen zeigten dann auch, dass der erreichte Zuwachs nicht mehr als 1 Hz betrug. Es braucht wesentlich mehr als 8 Stützen mit einem Querschnitt von 7 cm^2 um eine Decke von 40 cm Stärke auszusteiern.

Erschütterungen bei Präzisionsfertigung

Das neue Produktionsgebäude – konzipiert als zweigeschossiger Stahlbeton-Skelettbau mit grosszügigen Deckenspannweiten von 8.40 m x 8.40 m und 40 cm Deckenstärke – wurde bezogen. Rasch zeigte sich, dass die neu installierten Bearbeitungszentren nicht auf voller Leistung fahren durften. Die gegenseitigen Störungen durch Vibrationen waren zu stark. Bei manchen Maschinen traten Erschütterungen (verursacht von Nachbarmaschinen) von über 1 mm/s auf. Dabei sind bereits Erschütterungen von 0.4 mm/s als obere Grenze für Präzisionsfertigung zu betrachten.



Bild 1 Schwingungsmessungen zwischen zwei Bearbeitungszentren

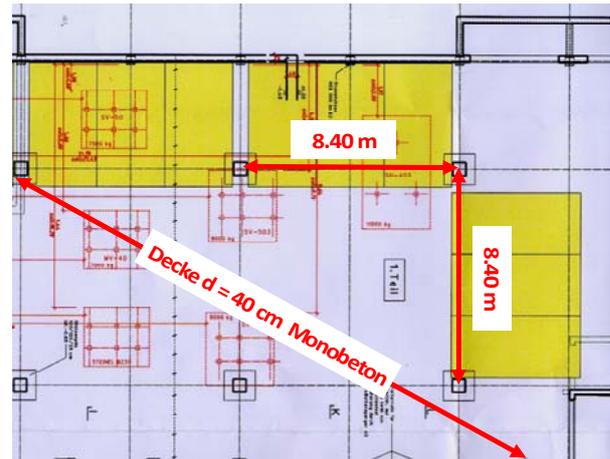


Bild 2 Ausschnitt aus Deckenplan

Als Massnahme zur Reduktion der störenden Schwingungen wurde der Einbau von zusätzlichen Stützen in der Parkgarage im UG erwogen. Zur vorgängigen Überprüfung der Wirksamkeit dieser Massnahme wurde die Durchführung einer Simulation mit Hilfe von Baustützen beschlossen. Um eine annähernd realistische Simulation zu erreichen, mussten 12 Baustützen (siehe Bild 3) für jede neue Betonstütze eingebaut werden.



Bild 3 Test mit 12 Baustützen zur Simulation der Verstärkung mit Stützen

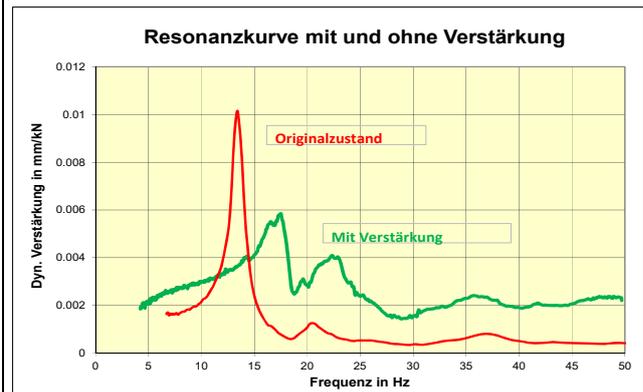


Bild 4 Resonanzkurven für Originalzustand und Zustand mit Verstärkung durch Baustützen

Die durchgeführten Messungen zeigten, dass sich mit dieser Massnahme die Eigenfrequenz von 13.4 Hz auf 17 Hz erhöhen lässt. Die dynamische Verstärkung bei Resonanz reduzierte sich um 40 % und die maximalen Erschütterungen bei den Bearbeitungszentren gingen teilweise über 50 % zurück. Diese Ergebnisse zeigten, dass die gewählte Massnahme – d.h. der Einbau von Stützen – der richtige Weg ist. Mit den Stützen, die ja einiges steifer sind als die für den Test gewählte Unterspriessung, dürfte die Reduktion der Erschütterungen noch etwas grösser gewesen sein.

Resonanzschwingungen bei einer Flaschenblasanlage

Eine Flaschenblasanlage sollte vom Standort A zum Standort B transferiert werden. Vorgängig wurde abgeklärt, ob sich die Geschossdecke am Standort B hierfür auch eignet. Denn Flaschenblasanlagen verursachen recht starke impulsartige Kräfte. Bei 18'000 Flaschen pro Stunde ergibt dies 5 Schläge pro Sekunde und wenn die Decke dann noch 5 Hz Eigenfrequenz aufweist, kann dies zu erheblichen Problemen führen. Die Messungen ergaben eine Eigenfrequenz von 6.6 Hz, was praktisch gleich war wie am gegenwärtigen Standort A. Man war sich auch bewusst, dass die vorgesehene Leistung von 5.8 Flaschen pro Sekunde recht nahe bei der Eigenfrequenz der Decke zu liegen kommt. Aber da die Decke am Standort B dynamisch die gleichen Eigenschaften aufwies wie die Decke am Standort A, sprach nichts gegen eine Transferierung der Anlage.



Bild 1 Messung der Resonanzkurve am neuen Standort B

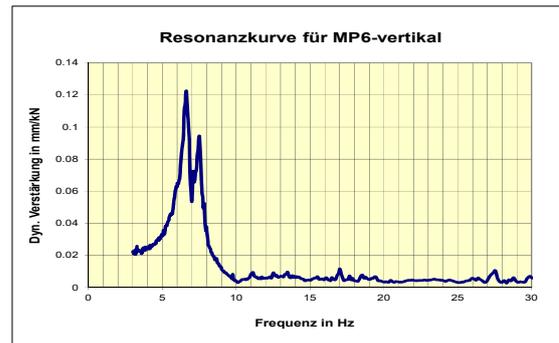


Bild 2 Resonanzkurve für Decke am Standort B

Die Überraschung war sehr gross als Beschwerden wegen übermässiger Schwingungen im Bereich der neuen Flaschenblasanlage eingingen. Es sei unmöglich bei solchen Schwingungen zu arbeiten. Messungen zeigten sehr bald, dass die Anlage nicht wie vorgesehen bei 21'000 Flaschen pro Stunde betrieben wurde sondern bei 23'700, d.h. exakt bei der Eigenfrequenz der Geschossdecke von 6.6 Hz. Der Einwand, dass diese Leistungssteigerung explizit wegbedungen worden sei, wurde zwar akzeptiert, trotzdem musste sofort eine Lösung gefunden werden, denn schliesslich wollte man auf die höhere Leistung nicht verzichten.



Bild 3 Improvisierter Schwingungstilger

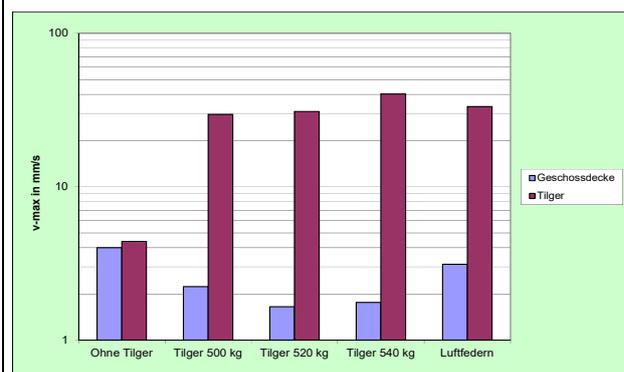


Bild 4 Einfluss der Tilgermasse und der Dämpfung

Die Lösung fand sich schliesslich in einem Schwingungstilger. Mit einfachsten Mitteln wurde schnell ein improvisierter Tilger aus 9 Stahlfedern, einer Holzpalette und 500 kg Masse aufgebaut (Bild 3). Nach einigen Abstimmungen der Masse reduzierte sich die Schwingung von 4 mm/s auf 1.65 mm/s. Die Reduktion war so verblüffend, dass der Betriebsleiter überzeugt war, dass jemand die Maschine abgestellt hatte. Zusätzliche Versuche mit Luftfedern, die ja eine wesentlich grössere Dämpfung aufweisen als Stahlfedern, ergaben keine besseren Ergebnisse (siehe Bild 4). Es sei auch noch darauf hingewiesen, dass diese Lösung nur dann so gut funktioniert, wenn Anregungsfrequenz und die Eigenfrequenz der Geschossdecke exakt zusammenfallen.

Bürohaus neben Eisenbahngleis

Im projektierten Bürohaus an bester Lage mit Blick auf den See werden die zukünftigen Mieter gewisse Ansprüche stellen. Da sollten weder die Züge hinter dem Gebäude noch die Trams vor dem Gebäude störend wahrgenommen werden. Eine elastische Lagerung des Gebäudes drängte sich auf. Der Bauherr entschied sich für eine elastische Trennung zwischen dem Erdgeschoss und dem 1. Untergeschoss (siehe Bild 2). Auf die Mauerkronen des oberen Garagengeschoßes wurden Gummi-Elemente platziert. Auf diesen ruht das gesamte viergeschossige Gebäude mit einer (theoretischen) Abstimmfrequenz von 14 Hz. Zwei Liftkerne, die elastisch mit den Decken verbunden sind, stabilisieren das Gebäude in horizontaler Richtung und garantieren die Erdbebensicherheit.



Bild 1 Standort des neuen Bürogebäudes mit Gleisanlage und Weichen

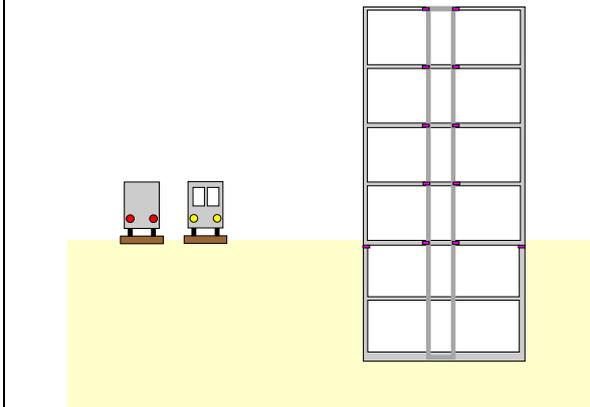


Bild 2 Prinzip der gewählten elastischen Lagerung

Der Rohbau war kaum fertig, als die ersten besorgten Anrufe des Bauherrn eintrafen. Jetzt hätte man so viel Geld für die elastische Lagerung ausgegeben und die Züge seien trotzdem gut spürbar. Die sofort durchgeführte Messkampagne ergab folgendes Bild: In der Mehrzahl der über 40 Büros waren die Zugserschütterungen nicht spürbar. In einigen wenigen lagen die maximalen Erschütterungen bei 0.3 bis 0.4 mm/s (siehe Bild 3). Aber in den beiden grossen Sitzungszimmern im EG erreichten die Schwingungen 0.7 mm/s. Dies ist eindeutig gut spürbar und entspricht sicher nicht den Komfortansprüchen eines Bürohauses an bester Lage.

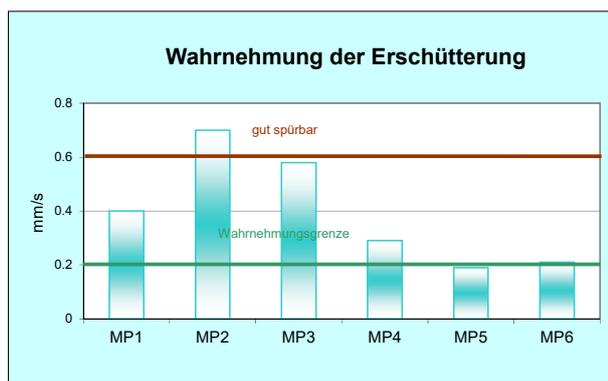


Bild 3 Wahrnehmung der Erschütterungen in 6 verschiedenen Büros

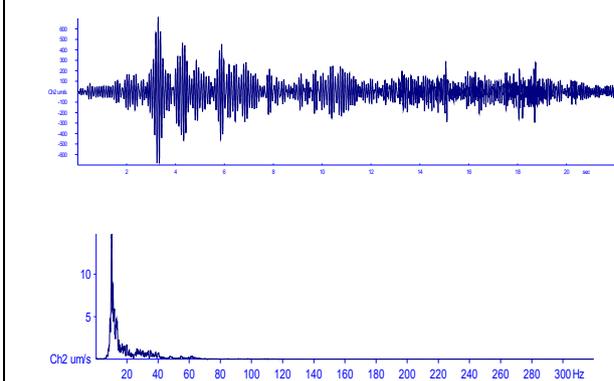


Bild 4 Schwingungsaufzeichnung und Amplitudenspektrum für MP 2

Was war schief gelaufen? Zusätzliche Messungen zeigten, dass die erreichte Abstimmfrequenz nicht bei 14 Hz lag sondern bei 16 Hz. Eine „kleine“ Abweichung, die normalerweise keine nachteiligen Folgen zeitigen sollte, wenn nicht die Geschossdecken der grossen Sitzungszimmer nicht ebenfalls ihre Eigenfrequenz genau bei 16 Hz gehabt hätten. Dieser Umstand führte zu Resonanzerscheinungen und damit zu maximalen Schwingungsamplituden von 0.7 mm/s. Nachträgliche Massnahmen zur Reduktion stehen in solchen Fällen kaum zur Verfügung. Auch Versuche mit Schwingungstilgern ergaben keine Verbesserung.

Schwingungen eines Kirchturmes

Der schlanke Glockenturm der reformierten Kirche von Zürich-Altstetten (Bild 1) weist beim Läuten der Glocken seit jeher relativ starke Schwingungen auf mit maximalen Schwinggeschwindigkeiten von bis zu 35 mm/s und maximalen Wegamplituden von 4 mm. Bezogen auf die Turmhöhe von 50 m ist dies auch kein Problem. Trotzdem wurden verschiedene Versuche unternommen, um diese Schwingungen etwas zu reduzieren. Verstärkungen an der Tragstruktur selbst ergaben nur geringfügige Verbesserungen. Deshalb wollte man durch Veränderung am Geläute eine Reduktion der Schwingungen erreichen.



Bild 1 Ref. Kirche Zürich-Altstetten



Bild 2 Glocken der Ref. Kirche Zürich-Altstetten

Messungen zeigten, dass die stärksten Schwingungen durch die 1000 kg schwere Glocke 4 verursacht werden. Die übrigen Glocken mit Eigengewichten von bis zu 3500 kg trugen wesentlich weniger bei. Diese Situation weist auf das Vorhandensein einer Resonanzschwingung hin. Die Bestimmung der Eigenfrequenz des Turmes mit einer „Ambient Vibration“-Messung ergab eine Grundfrequenz von 1.56 Hz. Die Glocke Nr. 4 hatte eine Schlagzahl von 55, was einer Anregung der 3. Harmonischen von 1.375 Hz entspricht. Somit war die naheliegende Massnahme eine Reduktion der Schlagzahl, um einen grösseren Abstand zur Eigenfrequenz von 1.56 Hz zu gewinnen. Das Erstaunen war recht gross, als sich damit die Schwingungen noch verstärkten.

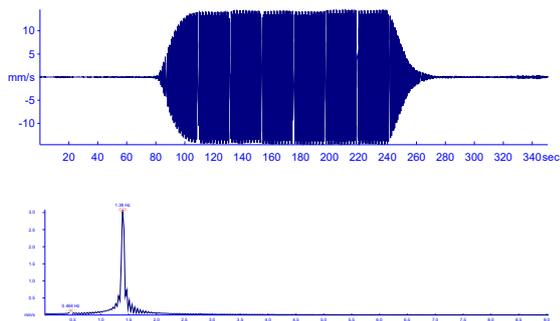


Bild 3 Schwinggeschwindigkeit und Amplitudenspektrum für Glocke 4

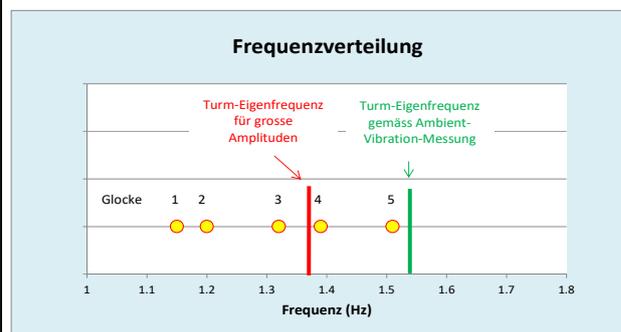


Bild 4 Frequenzverteilung

Wie lässt sich dieses Phänomen erklären: Die gemessene Eigenfrequenz von 1.56 Hz entspricht der Steifigkeit des Turmes bei sehr geringen Verformungen. Die massgebende Eigenfrequenz für grosse Verformungen – wie sie beim Läuten aller Glocken auftreten – ist jedoch wesentlich tiefer. Sie dürfte beim Turm von Altstetten bei 1.37 Hz liegen. Damit erklärt sich auch, warum eine Reduktion der Schlagzahl von Glocke 4 einen Zuwachs und die Erhöhung der Schlagzahl eine Reduktion der Schwingungen ergab.

Horizontale Gebäudeschwingungen infolge Eisenbahnverkehr

Eine Faustregel besagt, dass Gebäude, die weniger als 20 m von der Eisenbahnlinie entfernt liegen, in der Regel ernsthafte Erschütterungs- und Körperschallprobleme aufweisen. Gebäude die weiter entfernt liegen als 50 m, weisen in der Regel keine spürbaren Erschütterungen und keinen hörbaren Körperschall auf. Umso erstaunlicher war es, als eine Anfrage für Erschütterungsmessungen für ein Gebäude in 150 m Distanz von den Gleisen eintraf. Die Bewohner hatten die oberste Wohnung im 6-stöckigen Gebäude (Bild 1) mit wunderschönem Blick auf den Vierwaldstättersee gekauft. Mit der Zeit stellten sie unangenehme Horizontalschwingungen der gesamten Wohnung fest. Bald stellte sich auch heraus, dass diese Schwingungen immer bei der Durchfahrt von langen Güterzügen auf dem 150 m entfernten Gleis auftraten. Für eine Luxus-Wohnung war dies nicht unbedingt eine befriedigende Situation, weder für den Verkäufer, noch für den Käufer.



Bild 1 6-stöckiges Gebäude auf Seeboden-Ablagerung



Bild 1 Situation relativ zur Eisenbahnlinie

Messungen zeigten, dass in der besagten Wohnung tatsächlich Horizontalschwingungen von bis zu 2.7 mm/s auftraten mit dominanten Frequenzen von 3.56 Hz. Solche Schwingungen sind – trotz der relativ tiefen Frequenz – eindeutig gut spürbar und je nach Erwartungshaltung der Bewohner recht störend.

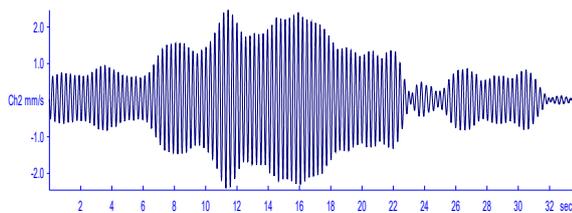


Bild 3 Horizontale Schwingungsaufzeichnung im 6. Stock

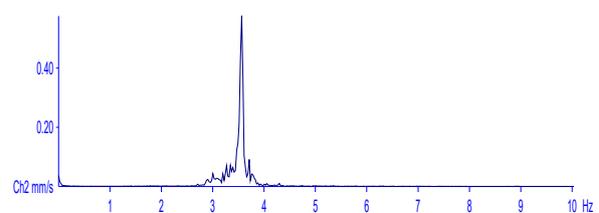


Bild 4 Amplitudenspektrum zu Bild 3

Hätte diese Situation vorausgesehen werden können? Hätte man mit elastischer Lagerung die Schwingungen reduzieren können? Bei einer Distanz von 150 m vom Eisenbahngleis war nicht zu erwarten, dass die Zugserschütterungen noch zu spüren sind. Das 6-stöckige Gebäude befindet sich in einer Schwemmebene mit entsprechend weichem Boden. Das im Boden eingebettete Gebäude hat eine Kipp-Eigenfrequenz von 3.56 Hz und die Erschütterungen im Frei-Feld weisen dominante Schwingungen zwischen 3 und 4 Hz auf. Dadurch ergeben sich Resonanzschwingungen, die auch bei einer Distanz von 150 m zum Gleis zu starken horizontalen Schwingungen führen. Eine elastische Lagerung hätte bei derart tiefer Anregungsfrequenz keine Verbesserung gebracht. Einzig eine grössere Gebäudegrundfläche hätte die Schwingungen reduziert, da damit die Eigenfrequenz der Kipperschwingung höher ausgefallen wäre und damit Resonanzschwingungen vermieden worden wären.

Elastische Lagerung eines Einfamilienhauses

Das Grundstück war ideal gelegen. Zwar etwas nahe bei der Eisenbahnlinie aber mit einer elastischen Lagerung sollte man dieses Problem in den Griff bekommen. Frei-Feld-Messungen und entsprechende Berechnungen zeigten dann auch, dass ohne Massnahmen mit Erschütterungen von bis zu 1.4 mm/s und mit Körperschall von bis zu 48 dBA zu rechnen ist. Somit wurde eine elastische Lagerung – abgestimmt auf 12 Hz – beschlossen. Die Wahl des Materials und die Ausführung wurde (gegen die Empfehlung des Fachspezialisten) dem Bauunternehmer überlassen. Der Bauherr wurde etwas stutzig, als er auf dem Bauplatz die Rollen aus relativ hartem Gummischrot vorfand. Rasch durchgeführte Tests zeigten dann auch, dass mit diesem Material nur eine Abstimmung auf 30 Hz erreicht werden kann. Für einen Wechsel des Materials war es aber zu spät. Die Matten waren schon eingebaut und der Unternehmer hatte überhaupt kein Gehör für die Befürchtungen des Bauherrn.



Bild 1 Einfamilienhaus neben Eisenbahnlinie

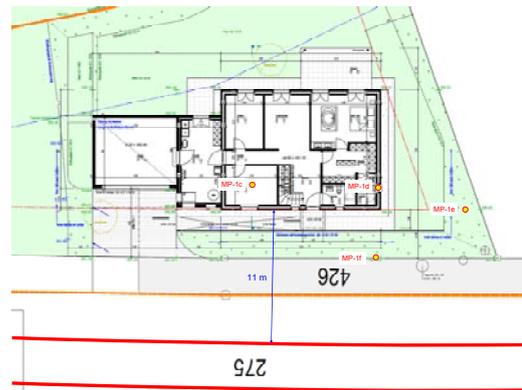


Bild 2 Grundriss EG (Distanz zum Gleis = 11 m)

Auf Wunsch des Bauherrn wurden nun Prognose-Rechnungen für die elastische Lagerung mit dem eingebauten Gummischrot-Material durchgeführt. Die Ergebnisse waren beängstigend. Die Berechnungen zeigten, dass sich die Erschütterungen gegenüber der Variante ohne elastische Lagerung sogar verdoppeln würden. Auf den Körperschall hatte das eingebaute Material keinen nennenswerten Einfluss.

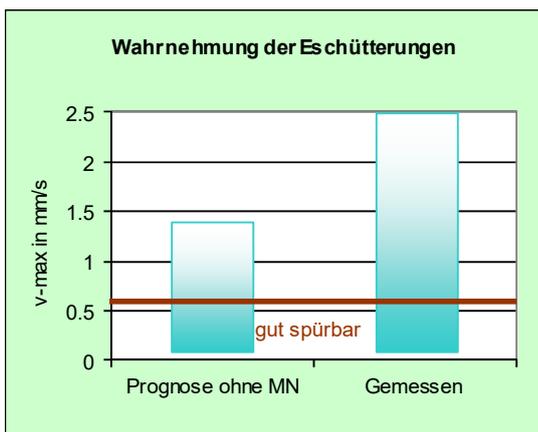


Bild 3 Wahrnehmung der Erschütterung

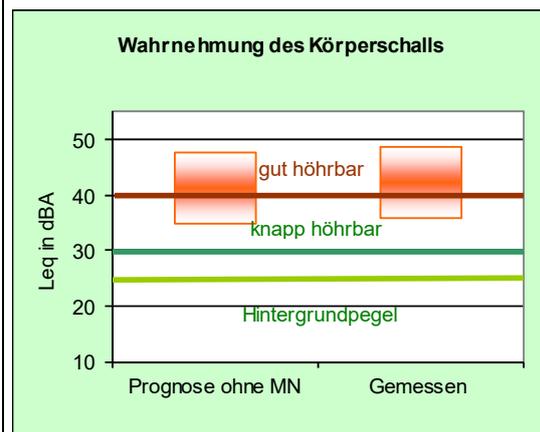


Bild 4 Wahrnehmung des Körperschalls

Messungen nach Fertigstellung des Gebäudes bestätigten dann auch, dass die eingebaute elastische Lagerung – mit einer Abstimmfrequenz von 30 Hz – eine Verdoppelung der Erschütterung bewirkt hat, anstatt diese zu reduzieren. Die schweren Güterzüge nachts verursachen nun Schwingungen von bis zu 2.5 mm/s. Möglichkeiten, um diesen Baufehler mit vertretbarem Aufwand zu korrigieren, existieren leider nicht.

Elastische Lagerung eines Liftmotors

Die neu bezogene Eigentumswohnung war zwar wunderschön, doch der Liftmotor (Bild 1) verursachte extrem störende Geräusche. Unangenehm war es vor allem, wenn die Nachbarn nach Mitternacht nach Hause kamen. Rasch musste Abhilfe geschafft werden. Die störenden Frequenzen des Liftmotors lagen bei 50 Hz und damit im tieferen Körperschall-Frequenzbereich. Eine elastische Lagerung, abgestimmt auf 20 Hz, schien das richtige. Bei einer Gesamtmasse von 5'000 kg, wobei der Motor 1000 kg beitrug und der Lift 4'000 kg, glaubte man das richtige Material in Form einer 10 mm dicken profilierten Gummiplatte gefunden zu haben.



Bild 1 Elastische Lagerung eines Liftmotors

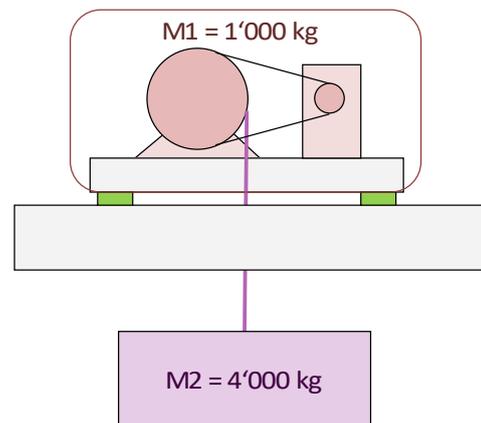


Bild 2 Massenverteilung beim Liftmotor

Die Enttäuschung war gross, als der Besitzer der obersten Eigentumswohnung sich weiterhin beschwerte. Ja sogar behauptete, dass sich die Situation noch verschlimmert habe.

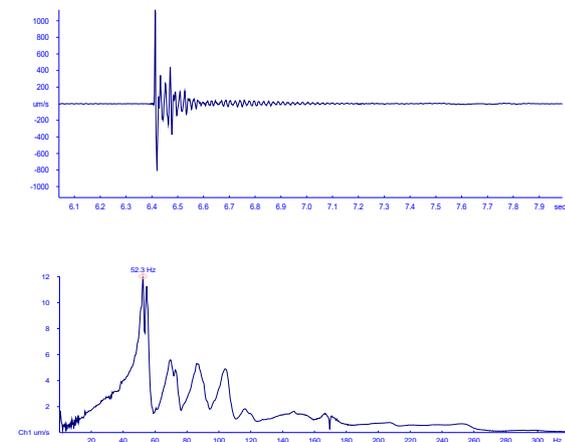


Bild 3 Zeitverlauf und Amplitudenspektrum bei Impulsanregung



Bild 4 Elastische Lagerung mit 10 mm Gummiplatte

Was war falsch gelaufen? Die elastische Lagerung war auf die Gesamtmasse von 5'000 kg, d.h. die Masse des Lifts und die Masse des Motors ausgelegt worden. Dabei schwingt der Liftkasten, der ja über ein relativ flexibles Stahlseil mit dem Motor verbunden ist, dynamisch gar nicht mit. Eine korrekte Bemessung der elastischen Lagerung berücksichtigt für die Berechnung der Abstimmfrequenz nur die Masse des Liftmotors, d.h. 1'000 kg. Für den Nachweis der Einhaltung der maximal zulässigen Belastung der elastischen Lagerung hingegen müssen beide Anteile, die des Lifts und die des Motors, berücksichtigt werden.

Überbauung über einem Eisenbahntunnel

Das bestehende Haus befindet sich 30 m über dem Tunnel (siehe Bild 1). Der Besitzer des Hauses hatte sich schon öfters bei den SBB über das Dröhnen bei der Durchfahrt von Güterzügen beschwert. Messungen in seiner Wohnung ergaben Vorbeifahrtspegel von bis zu 50 dBA. Ändern liesse sich nichts und schliesslich sei ja der Tunnel zuerst dagewesen. Um den Nachbar, der gleich fünf neue Häuser neben dem Tunnel erstellen wollte, vor dem gleichen Schicksal zu bewahren, empfahl er dem Architekten der geplanten Überbauung, eine Studie über die zu erwartenden Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen durchführen zu lassen.

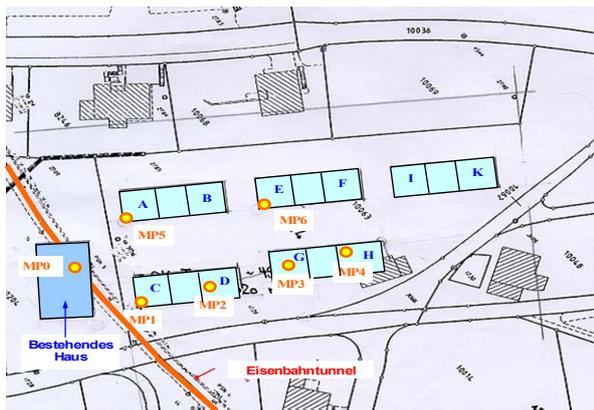


Bild 1 Einfamilienhaus neben Eisenbahnlinie



Bild 2 Grundriss EG (Distanz zum Gleis = 11 m)

Die Frei-Feld-Messungen und die entsprechenden Berechnungen ergaben, dass zwar die Werte der BEKS in den projektierten Häuser eingehalten sein werden, dass aber der Körperschall hörbar sein werde (siehe Bild 4). Für die Häuser unmittelbar neben dem Tunnel wurde, da es sich um Eigentumswohnungen handelte, eine elastische Lagerung empfohlen. Sollte dies nicht gemacht werden, so müsse man zumindest die Käufer entsprechend orientieren.

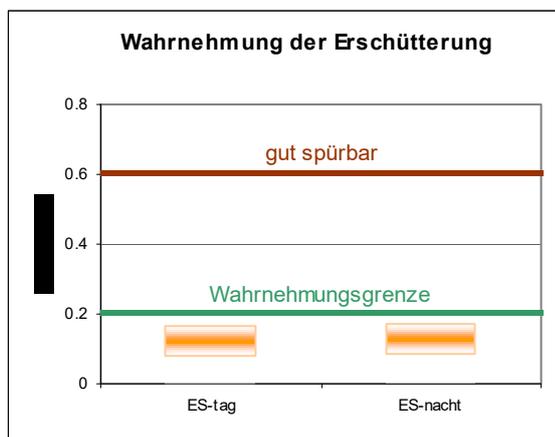


Bild 3 Wahrnehmung der Erschütterung

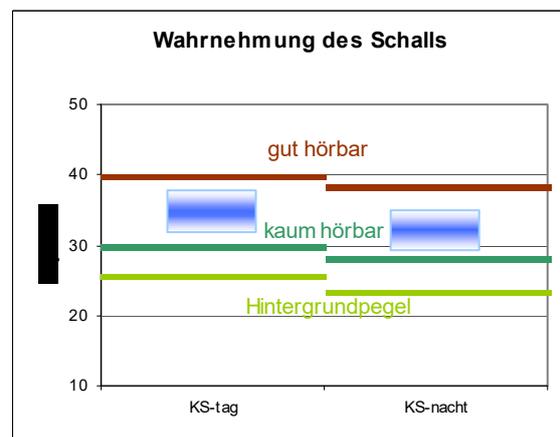


Bild 4 Wahrnehmung des Körperschalls

Kaum waren die neuen Häuser bezogen, meldeten sich schon die ersten Anwälte. Die Körperschall-Immissionen seien unzumutbar. Offensichtlich hatte man auf die elastische Lagerung verzichtet. Auch hatte man es unterlassen, die Käufer über die Körperschall-Immissionen aus dem Tunnel zu orientieren. Nachträglich durchgeführte Messungen zeigten, dass die Körperschall-Immissionen die BEKS-Werte gut einhalten und dass sie sogar etwas tiefer waren als die prognostizierten Werte. Das Beispiel zeigt, dass das Einhalten der BEKS-Werte noch lange keine komfortable Wohnsituation garantiert. Es zeigt auch, wie wichtig die offene Information der Käufer ist.

Haus mit freier Aussicht

Der Plan des Architekten war bestechend. Im neuen Einfamilienhaus hoch über dem Vierwaldstättersee sollte keine Stütze den Blick stören. Dazu war aber eine 9 m frei auskragende Geschossdecke nötig. Mit üblichen Deckenstärken war dies nicht zu schaffen. Deshalb wurde die Betondecke über dem Gartensitzplatz mit Zugstangen an den vorgespannten Dachträgern aufgehängt (siehe Bild 1). Erste Zweifel kamen erst auf, als Handwerker sich über seltsame Schwingungen in gewissen Bereichen des Hauses beschwerten.

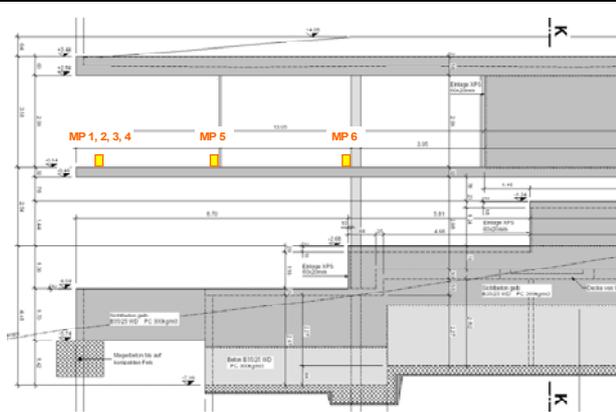


Bild 1 Schnitt mit auskragender Geschossdecke

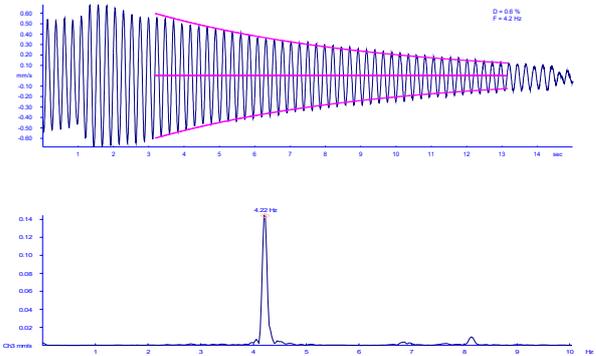


Bild 2 Ausschwingversuch zur Bestimmung der Eigenfrequenz und der Dämpfung

Die Messungen zeigten, dass der Fussboden im Wohnzimmer mit der Aufhängung eine Eigenfrequenz von 4.2 Hz und eine Dämpfung von 0.6 % aufweist. Bei normalem Gehen wurden Schwingungen von 3 mm/s erreicht. Beim Rennen ergaben sich keine stärkeren Schwingungen. Hingegen konnten mit mutwilliger Anregung Schwingungen von bis zu 11 mm/s provoziert werden.

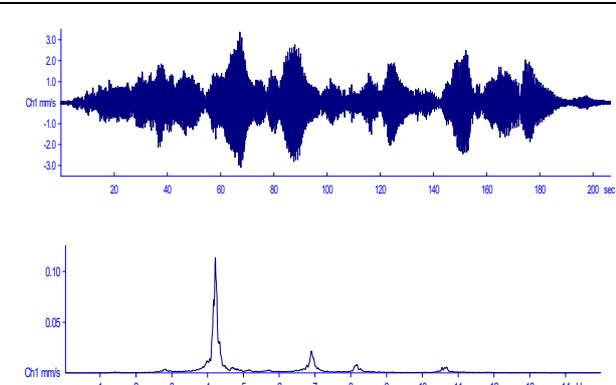


Bild 3 Schwingungsverlauf und Amplitudenspektrum für „Gehen“

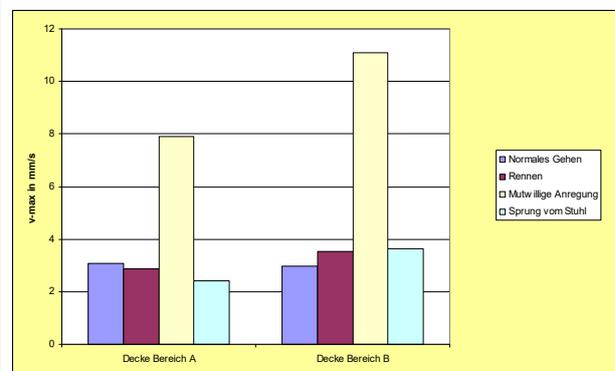


Bild 4 Maximale Schwingungen bei verschiedenen Aktivitäten

Wie lässt sich dieser Sachverhalt erklären? Menschen machen beim normalen Gehen etwa 2 Schritte pro Sekunde, d.h. sie geben pro Sekunde 2 kurze vertikale Impulse ab. Beim Rennen steigert sich die Schrittfrequenz auf ca. 2.7. Mit Impulsen von 2 Hz wird aber nicht nur eine 2-Hz-Schwingung erzeugt, sondern auch eine solche von 4, 6, 8 Hz usw., wobei die höheren Frequenzen schwächer ausfallen. In der oben beschriebenen Wohnung erzeugt man beim Gehen mit 2.1 Schritten pro Sekunde nicht nur eine Anregung von 2.1 Hz, sondern auch eine solche von 4.2 Hz und erzeugt damit Resonanzschwingungen mit der Geschossdecke. Beim Rennen liegt die Anregung bei 2.7 und 5.4 Hz. Obwohl die Anregung beim Rennen stärker ist als beim Gehen, fallen die Schwingungen nicht stärker aus, da keine Resonanzschwingung entsteht.

Abgesehen vom Resonanzphänomen hat man beim vorliegenden Tragwerk eine Grundregel der Statik verletzt, nämlich, dass man „Kräfte nicht spazieren führen sollte“.

Schwingungen im Operationsmikroskop

Beim Operationsmikroskop in der Frauenklinik traten störende Schwingungen auf, die sich darin manifestierten, dass ein durch das Mikroskop betrachtetes ruhendes Objekt sich gut sichtbar hin und her bewegte. Der Lieferant des Mikroskops hatte schon alles versucht, um diese Störungen zu eliminieren, konnte aber keine Verbesserung erreichen. Schwingungsmessungen auf dem Fussboden zeigten, dass bei 17.1 Hz tatsächlich eine sehr kleine Störschwingung von 40 $\mu\text{m/s}$ vorhanden war. Schwingungen dieser Grössenordnung sollten an sich für das Mikroskop kein Problem darstellen.



Bild 1 Operationsmikroskop

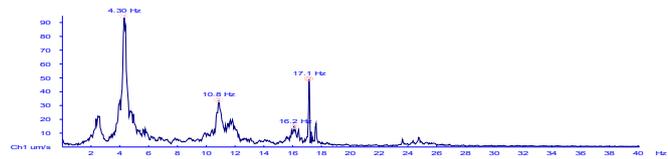


Bild 2a Amplitudenspektrum auf dem Operationsmikroskop

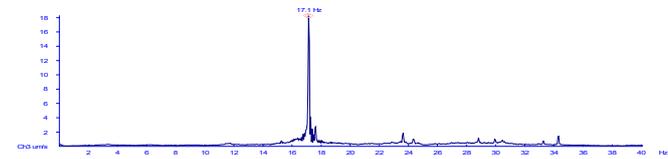


Bild 2b Amplitudenspektrum auf dem Fussboden

Die Messung auf dem Mikroskop selbst ergab ein interessantes Ergebnis: Die Betrachtung eines Objektes durch das Mikroskop zeigte jeweils starke Horizontalbewegungen. Sobald man den Sensor mit einer Masse von 3.5 kg darauf stellte, verschwanden die störenden Schwingungen. Die Begründung für dieses Phänomen ergab sich aus der Messung der Eigenfrequenzen des Mikroskops (siehe Bild 2a). Da das Mikroskop eine dritte Eigenfrequenz von ebenfalls 17 Hz aufwies, ergab sich im Mikroskop eine massive Verstärkung der Schwingungen, die vom Boden kamen.



Bild 3 Ventilator der Lüftungseinheit F-100

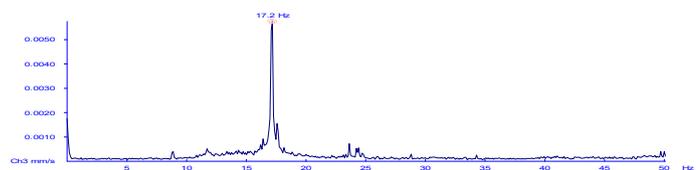


Bild 4a Amplitudenspektrum bei Vollast

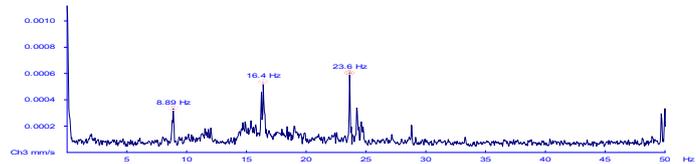


Bild 4b Amplitudenspektrum bei abgestellter Lüftung

Nun ging es noch darum, den Verursacher der 17.1-Hz-Schwingung zu lokalisieren. Bei über 100 Aggregaten im Gebäude war dies keine leichte Aufgabe. Erst eine systematische Messung mit horizontalen und vertikalen Messreihen verteilt über das ganze Gebäude führte zum Ziel. Durch Vergleiche der Amplituden der an verschiedenen Messpunkten erfassten 17.1-Hz-Schwingungen konnte schliesslich ein Ventilator im 5. OG als Verursacher der störenden Schwingung eruiert werden (Bild 3). Durch An- und Abstellen konnte dann leicht die Richtigkeit dieses Befundes verifiziert werden (Bilder 4a und b). Als Massnahme wurde schliesslich die Veränderung der Drehzahl gewählt.

Schwingungen im Baumhaus

Ein Hotel der Luxusklasse hat im Rahmen einer kleinen Erweiterung ein Baumhaus im hoteleigenen Park realisiert. Unter dem Arbeitstitel „Glasdiamant“ wurde ein exklusives Hotelzimmer auf drei Stützen in den Bäumen direkt am See erstellt. Schlafen zwischen Baumkronen mit Blick auf Schilf und See mit der untergehenden Sonne am Horizont muss sicherlich ein einmaliges Erlebnis sein. Weniger lustig fanden das die Gäste, die eine stürmische Nacht erwischten und geweckt durch die wilden Schwingungen das Baumhaus fluchtartig verliessen um sich im Hotel in Sicherheit zu bringen.



Bild 1 Exklusives Hotelzimmer konzipiert als Baumhaus



Bild 2 Provisorische Verstärkung durch Abspannungen

Der Ingenieur hatte zwar die Windkräfte berücksichtigt und nachgewiesen, dass die statischen Deformationen wohl im normgemässen Rahmen sind. Eine dynamische Berechnung blieb allerdings aus. Dabei hätte eine einfache Umrechnung der statischen Deformation unter Windlast - unter Berücksichtigung der Eigenfrequenz - gezeigt, dass mit Schwinggeschwindigkeiten von 40 mm/s zu rechnen ist. Nachträglich durchgeführte Messungen zeigten dann auch, dass innerhalb eines Monats mehrmals Schwingungen von über 30 mm/s auftreten.

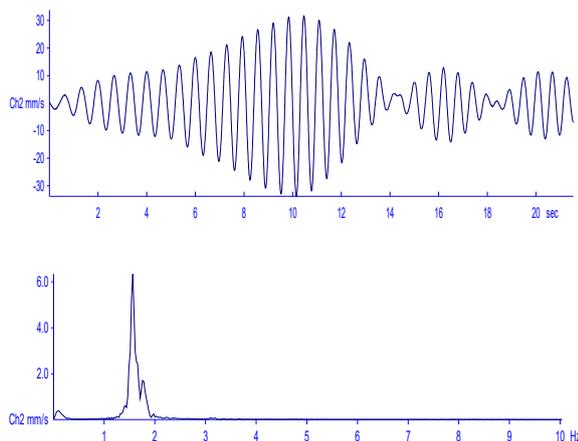


Bild 3 Schwingungsverlauf und Amplitudenspektrum bei Windböen



Bild 4 Verstärkung durch Diagonalen

Erste Verstärkungen mit Spannseilen (Bild 2) brachten keinen Erfolg. Dies war ja auch nicht zu erwarten, wenn man das Verhältnis zwischen Seilquerschnitt und Rohrquerschnitt betrachtet. Erst eine Verstärkung mit drei Diagonalen (Bild 4) führte zum Erfolg. Mit dieser Massnahme konnten die horizontalen Schwingungen von 35 mm/s auf 3,3 mm/s reduziert werden. Damit konnte das Baumhaus seiner ursprünglichen Bestimmung übergeben werden und ist seither zu einem Anziehungspunkt für Gäste aus aller Welt geworden.

Neue Maschinen in einer Druckerei

Die Aufgabe schien an sich recht einfach. Die Druckerei wollte eine bestehende Maschine durch eine neue ersetzen (Bild 1, Bild 2) und wollte vorgängig abklären lassen, ob dies für das Gebäude Schwingungsprobleme geben könnte. Da schriftlich zugesichert wurde, dass die neue Maschine mit der gleichen Drehzahl betrieben wird wie die alte, wurde nur eine einfache Studie mit Messung der Deckeneigenfrequenzen und der Anregungsfrequenzen der Maschine durchgeführt. Auf eine Anregung des Gebäudes mit einem dynamischen Erreger zur Prüfung des Schwingverhaltens bei höheren Anregungsfrequenzen wurde bewusst verzichtet. Die Eigenfrequenz der Geschossdecke lag bei 15 Hz und somit zwischen der Anregung 3. und 4. Ordnung (siehe Bild 3). Starke Schwingungen waren nicht zu erwarten, da Druckmaschinen die Hauptanregung bei der 1. und 2. Ordnung aufweisen.



Bild 1 Schwingungsmessung bei der alten Druckmaschine



Bild 2b Schwingungsmessung bei der neuen Druckmaschine

Die Überraschung war gross als nach der Installation der neuen Maschine die Mitarbeiter in den darüber liegenden Geschossen sich über wackelnde Bildschirme beschwerten. Mit der alten Druckmaschine war nichts Derartiges beobachtet worden.

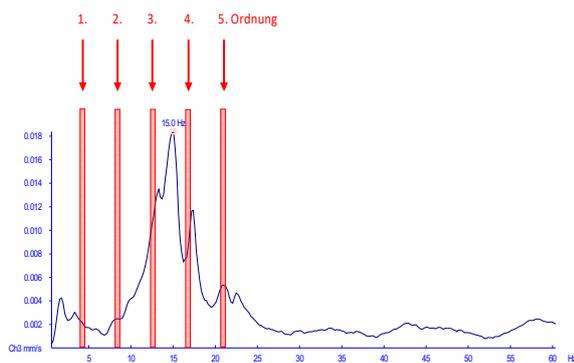


Bild 3 Amplitudenspektrum und Anregungsfrequenzen beim Betrieb mit 15'000 Bogen pro Stunde

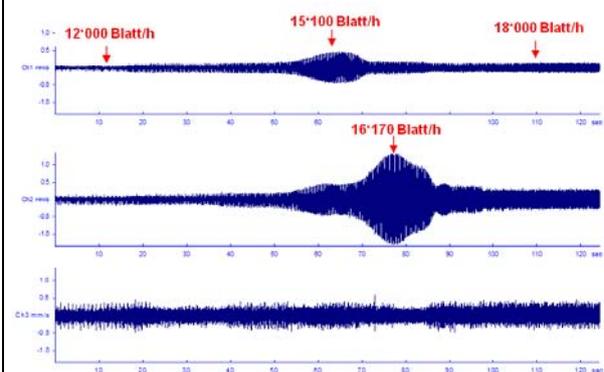


Bild 4 Schwingungsverlauf mit zunehmender Drehzahl: oben: Horizontal-X, mitte: Horizontal-Y, unten: Vertikal-Z

Messungen zeigten, dass das Gebäude im 2. OG tatsächlich Horizontalschwingungen von bis zu 1.3 mm/s aufwies und dadurch die Flachbildschirme in Schwingung versetzte. Sie zeigten aber auch, dass die Maschinen dabei mit einer Leistung von 16'170 Blatt/h arbeiteten und damit die horizontale Eigenfrequenz von 4.5 Hz anregten. Bei einer Leistung unter den vereinbarten 15'000 Blatt/h traten keine störenden Schwingungen auf (siehe Bild 4). Das Beispiel zeigt, dass man bei solchen Abklärungen immer einen grösseren Leistungsbereich einbeziehen sollte als der Kunde angibt.

Wohnüberbauung in einer Distanz von 29 m zum Gleis

Die Wohnüberbauung war im Rohbau bereits fertig, als die ersten Bedenken wegen Eisenbahnerschütterungen aufkamen. In gewissen Räumen vibrierte es ganz gehörig und man habe das Gefühl, der Zug fahre durch die Garage. Dabei hatte das Gebäude eine Distanz von knapp 30 m von der Eisenbahnlinie (Bild 2). Auf die Idee, die Erschütterungs- oder Körperschall-Immissionen zu untersuchen ist in der Projektierungsphase niemand gekommen.



Bild 1 Blick vom Dach auf die Gleisanlage



Bild 2 Situation mit Wohnhaus und Gleisanlage

Ohne Verzug wurden Erschütterungs- und Körperschallmessungen in den verschiedensten Räumen angeordnet, damit man sich ein klares Bild über die Immissionsverhältnisse machen konnte. Tatsächlich traten in zahlreichen Räumen gut spürbare Erschütterungen von 0.6 mm/s auf. In einigen Zimmern erreichten die Erschütterungen sogar 1.1 mm/s und der Körperschall 43 dBA (Bild 3, 4).

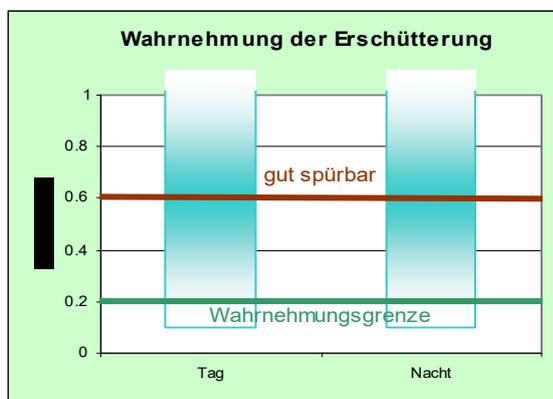


Bild 3 Wahrnehmung der Erschütterungen

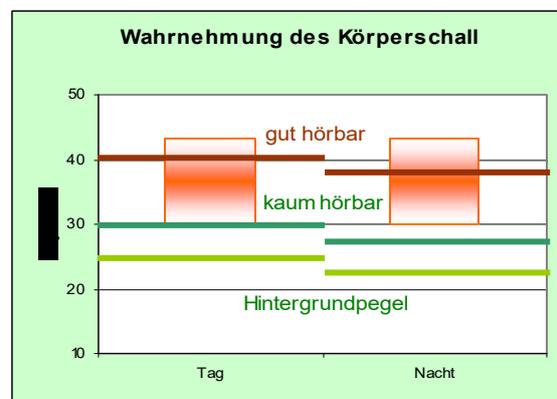


Bild 4 Wahrnehmung des Körperschalls

Wie war das möglich? 30 m Distanz vom Gleis ist ein Abstand, bei dem der Fachspezialist zwar eine vertiefte Abklärung der Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen empfiehlt. Und doch sind die hier gemessenen Immissionen auf den ersten Blick erstaunlich hoch. Drei Faktoren tragen im vorliegenden Fall zu diesen hohen Immissionen bei: Erstens fahren die Züge mit 120 km/h, zweitens befindet sich eine Weiche auf dem nächstgelegenen Gleis und drittens weisen die Räume mit den höchsten Immissionswerten Deckeneigenfrequenzen von 40 Hz und nur eine geringe Dämpfung von 2.2 % auf. Diese Kombination führte zu überdurchschnittlich starken Erschütterungen. Das Beispiel zeigt einmal mehr, dass bei Neubauprojekten innerhalb des 50-m-Korridors der Eisenbahnlinie Abklärungen zu Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen unbedingt empfehlenswert sind.

Hochhaus neben Eisenbahnlinie

Das 13-geschossige Hochhaus in Bild 1 befindet sich in 30 m Distanz vom Gleis. Eine Prognoserechnung mit VIBRA-2 ergab eine maximale Erschütterung von 0.15 mm/s und einen Körperschall-Vorbeifahrtspegel von 35 dBA. Eine elastische Lagerung war somit nicht angezeigt.

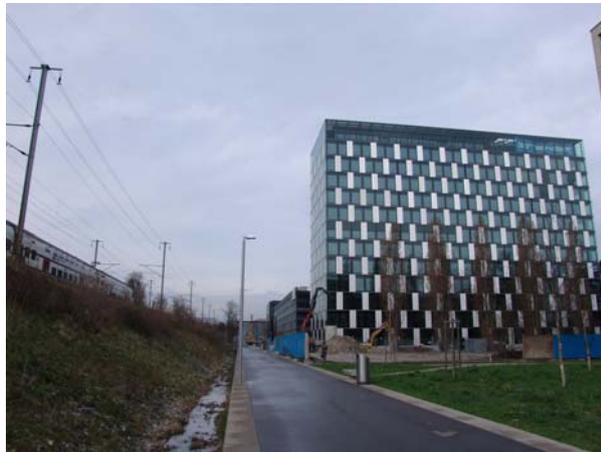


Bild 1 Hochhaus neben Eisenbahnlinie

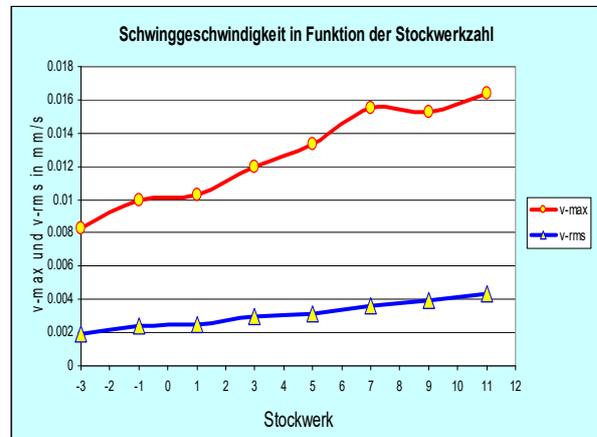


Bild 2 Zuwachs der Erschütterungen mit zunehmender Stockwerkzahl

Messungen nach Fertigstellung des Gebäudes ergaben allerdings maximale Erschütterungen von 0.3 mm/s. Solche Immissionen wirken zwar nicht störend und der Entscheid, auf eine elastische Lagerung zu verzichten, war richtig. Trotzdem muss man sich fragen, was bei der Prognose schief gelaufen ist. Warum liegt der gemessene Wert doppelt so hoch wie der prognostizierte Wert.

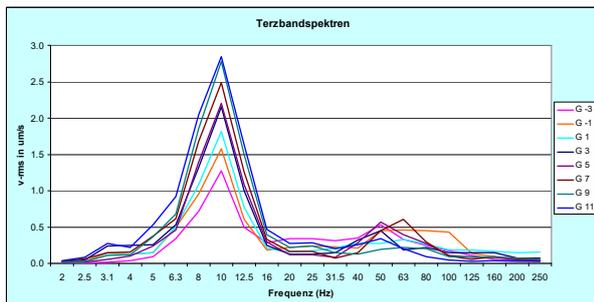


Bild 3 Terzbandspektren für verschiedene Stockwerke, gemessen neben dem Kern

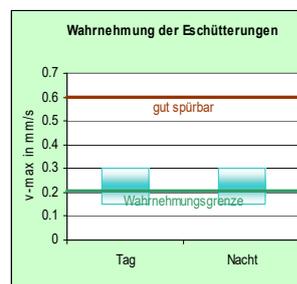


Bild 4a Wahrnehmung der Erschütterung

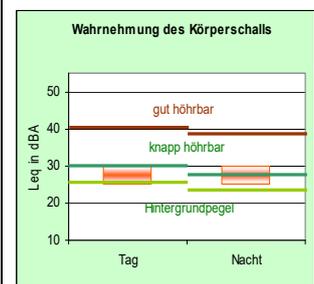


Bild 4b Wahrnehmung des Körperschalls

Die Messungen zeigten, dass die maximalen Erschütterungen auf dem Fundament bei 0.013 mm/s liegen. Damit waren sie sogar etwas tiefer als die entsprechenden Prognosewerte. Im 12. OG neben dem Kern erreichten sie 0.026 mm/s. Sie wiesen somit eine Verstärkung von einem Faktor 2 gegenüber dem Fundamentpunkt auf. Diese Verstärkung – die wie zusätzliche Messungen an anderen Hochhäusern zeigten, typisch sind für Hochhäuser – wurde in der Prognose nicht berücksichtigt. In Deckenmitte im 12. OG wurde eine Schwingstärke von 0.3 mm/s gemessen, was einem Verstärkungsfaktor gegenüber dem Fundamentpunkt von 23 entspricht. Die enorme Verstärkung von 0.013 mm/s auf dem Fundament auf 0.30 mm/s in Deckenmitte im 12. OG wurde noch begünstigt durch das Zusammenfallen der Eigenfrequenz des Kerns (siehe Bild 3) mit der Eigenfrequenz der Geschossdecken im 12. OG. Verstärkend wirkte auch die geringe Dämpfung der Geschossdecken von 1 bis 2 %. Im Gegensatz zur Erschütterungsprognose war die Körperschallprognose zutreffend. Dies hängt damit zusammen, dass die Verstärkung der Vertikalschwingungen durch den Hochhauskern sich primär im tieferen Frequenzbereich abspielt (siehe Bild 3).

Schwingende Balkone

Die Gebäude einer Genossenschaftssiedlung waren in die Jahre gekommen und auch die Balkone waren für heutige Vorstellungen viel zu klein. Eine Generalsanierung drängte sich auf und im Zuge dieser Sanierung wurden die kleinen Betonbalkone durch grössere, angehängte Stahlbalkone ersetzt (siehe Bild 1). Mehr als 180 Balkone dieser Art mussten erstellt werden. Der Architekt wollte eine schlanke Lösung und auch der Bauingenieur war – nachdem er die Eigenfrequenz und das statische Deformationsverhalten abgeklärt hatte – mit der vorgeschlagenen Lösung einverstanden.

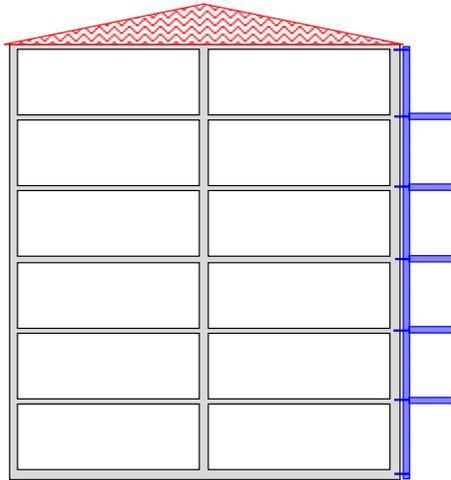


Bild 1 Prinzip-Skizze für die nachträglich angebrachten Balkone

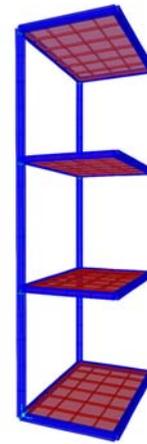


Bild 2 FE-Modell für nachträglich angebrachte Balkone

Bei der Abnahme der Gebäude durch den Bauherrn war dann die Begeisterung für die schlanken Balkone allerdings weniger gross. Man befürchtete, dass sich die Bewohner nicht mehr auf die Balkone wagen würden, weil sie seekrank werden oder Angst bekommen, sobald der Nachbar oben auf dem Balkon eine Party veranstaltet. Eine Schwingungsmessung mit Anregung durch einen „Heel-Drop“ ergab den Schwingungsverlauf von Bild 3 mit mehr als 50 mm/s. Die Grundfrequenz des Balkons betrug 6.6 Hz. An sich wäre nichts gegen diesen Balkon einzuwenden, denn die Eigenfrequenz liegt höher als das Zweifache der maximalen Hüpf Frequenz. Trotzdem ist dieser Balkon nicht „akzeptabel“.

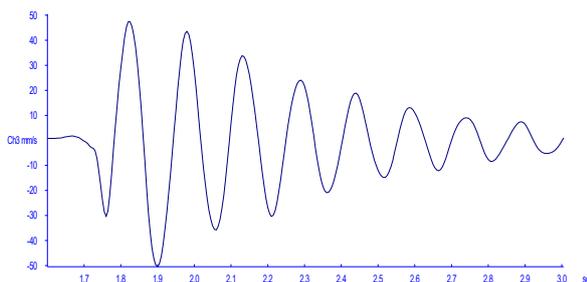


Bild 3 Gemessener Schwingungsverlauf bei einem Heel-Drop

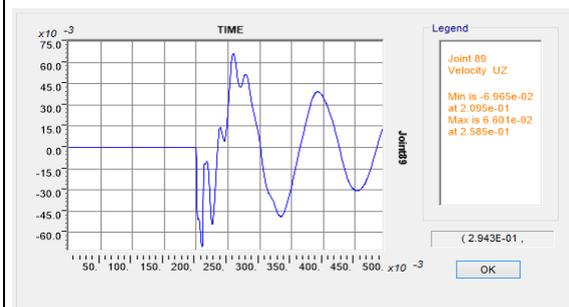


Bild 4 Berechneter Schwingungsverlauf

Die nachträglich durchgeführte FE-Berechnung mit einer Impulsanregung von 35 kgm/s (3.5 kN während 0.01 s) ergab den in Bild 4 dargestellten Schwingungsverlauf mit einer maximalen Schwinggeschwindigkeit von 70 mm/s. Dies bedeutet, dass ein FE-Programm durchaus in der Lage ist, das dynamische Verhalten eines Balkons richtig zu berechnen. Somit liessen sich solche Probleme durch geeignete Berechnung im Voraus erkennen und vermeiden.

Bürohaus neben Eisenbahngleis

Bei einem Abstand von nur 10 m vom Eisenbahngleis war allen Beteiligten klar, dass es ohne elastische Lagerung wohl nicht gehen wird. Die Kosten für die elastische Lagerung des 4-geschossigen Bürohauses mussten einkalkulierte werden. Nachdem die Baugrube mit der 10 m hohen Rühlwand gegen das Eisenbahngleis (Bild 1) stand, wurden Messungen durchgeführt.



Bild 1 Rühlwand gegen Bahn mit Messpunkt MP 1b

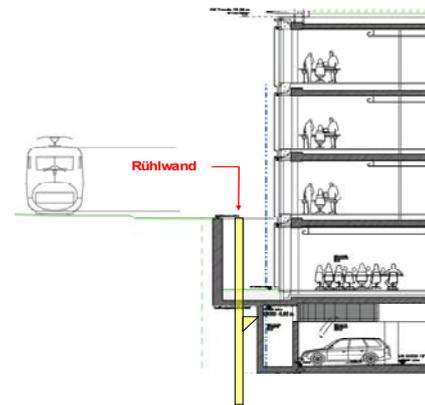


Bild 2 Rühlwand gegen Bahn (Schnitt)

Das Erstaunen war nicht gering, als man auf der Baugrubensohle praktisch keine Eisenbahnerschütterungen messen konnte. An den Frei-Feld-Messpunkten neben der Baugrube waren die Erschütterungen wesentlich höher als bei vergleichbaren Situationen. In der Baugrube selbst waren sie wesentlich tiefer als erwartet (siehe Bild 3). Zur Verifizierung dieses überraschend positiven Befundes wurden Messungen beim Nachbargebäude durchgeführt (siehe Bild 4, Gebäude Alte Landstrasse 397). Die Darstellung des Ankopplungsspektrums und dessen Vergleich mit üblichen Ankopplungsspektren ergaben die Erklärung für die überraschend tiefen Erschütterungen.

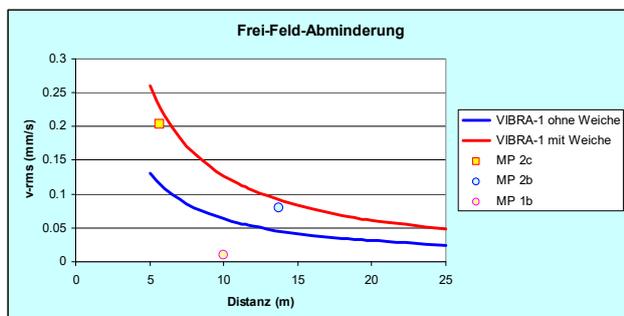


Bild 3 Vergleich der Messdaten mit dem Abminderungsmodell in VIBRA-1 (MP 2b und MP 2c sind Frei-Feld-Messpunkte neben der Baugrube, MP 1b ist ein Messpunkt in der Baugrube)

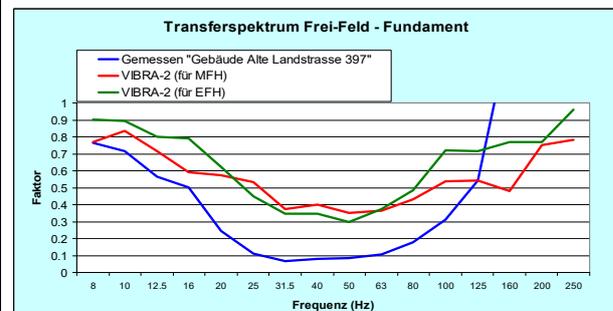


Bild 4 Vergleich von Ankopplungsspektren

Die Felsschicht, auf der das neue Gebäude gestellt werden sollte – und auf der auch das Nachbargebäude stand – wurde durch die Eisenbahnerschütterungen praktisch nicht angeregt. Die Erschütterungen blieben offensichtlich in der wesentlich weicheren Lockergesteinsschicht. Für das neue Bürogebäude konnte somit auf eine kostspielige elastische Lagerung der Bodenplatte verzichtet werden. Die Wand gegen das Eisenbahngleis hingegen musste elastisch getrennt werden. Das Beispiel zeigt einmal mehr, dass für eine aussagekräftige Immissionsprognose für Gebäude neben Eisenbahnlinien In-situ-Messungen unerlässlich sind.

Gebäude über Eisenbahntunnel

Der alte Eisenbahntunnel genügte den heutigen Anforderungen nicht mehr. Es musste ein neuer Tunnel parallel zum alten erstellt werden. Für die meisten Häuser bedeutete dies eine Reduktion der Immissionen, da sich damit die Distanz zum Gleis vergrösserte. Für einige Häuser jedoch bedeutete es eine Verstärkung der Immissionen. Vor dem Bau des neuen Tunnels wurden umfangreiche Messungen in allen betroffenen Häusern durchgeführt. Aufgrund dieser Messdaten und unter Berücksichtigung der neuen Lage des Tunnels und der neuen Fahrgeschwindigkeiten wurden Prognosen für die zukünftigen Immissionen erstellt. Massnahmen zur Reduktion der Immissionen wurden definiert und wo erforderlich eingebaut, damit die geltenden Grenzwerte überall gut eingehalten werden konnten.



Bild 1 Portal des neuen Eisenbahntunnels

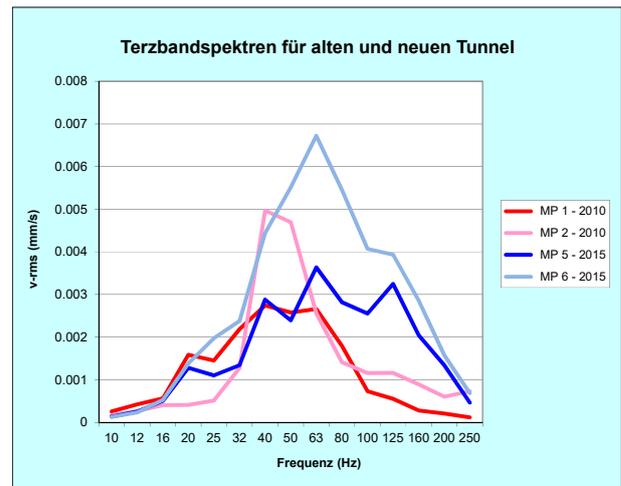


Bild 2 Terzbandspektren für den alten und den neuen Tunnel

Trotzdem gab es in einem Gebäude Überraschungen. Das Gebäude beherbergt eine Produktionsanlage und befindet sich 50 m über dem neuen Tunnel. In den grossen Räumen der Produktionsanlage konnte das Dröhnen des Zuges gut wahrgenommen werden. Im danebenliegenden Wohnhaus war es nur ganz schwach hörbar. Spüren konnte man die Vibrationen nirgends.

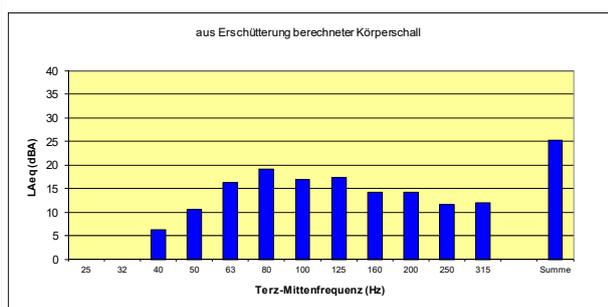


Bild 3 Körperschall aufgrund der Messung 2010 (alter Tunnel)

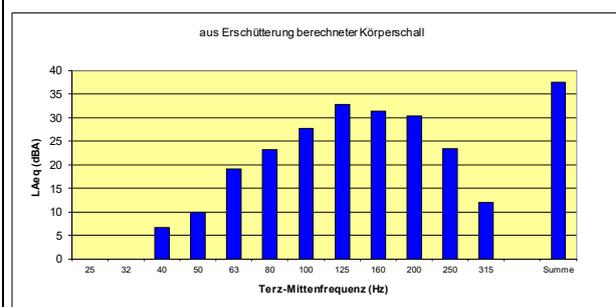


Bild 4 Körperschall aufgrund der Messung 2015 (neuer Tunnel)

Die Messungen zeigten, dass die Vibrationen und der Körperschall im Wohnhaus tiefer lagen als die prognostizierten Werte. Sie zeigten aber auch, dass sich der Frequenzgehalt der Erschütterungen nach oben verschoben hat (siehe Bild 2). Beim alten Tunnel lagen die dominanten Frequenzen zwischen 40 und 63 Hz, beim neuen zwischen 40 und 125 Hz. Obwohl die Vibrationen sich nur um 40 % erhöht hatten, ergab sich zusammen mit der Frequenzverschiebung eine Verstärkung des Schallpegels um 12 dBA, was einer Zunahme um 400% entspricht (siehe Bild 3 und 4). Dieser Aspekt, d.h. die Frequenzverschiebung, wurde in der Prognose-Rechnung nicht berücksichtigt.

Schwingungen bei einer Druckmaschine

Ursprünglich war das Erdgeschoss im neuerstellten Gebäude als Ausstellungsraum für Autos gedacht. Leider fiel der vorgesehene Mieter kurzfristig aus und ein neuer Mieter musste gefunden werden und den hatte man zum Glück in der Form eines Druckereibetriebes gefunden. In diesem Moment machte sich niemand grosse Gedanken über Schwingungen. Hauptsache war, die freie Fläche war vermietet. Dafür war die Überraschung umso grösser als die Druckmaschine (Bild 1) ihren Betrieb aufnehmen sollte. Die Geschossdecke vibrierte recht unangenehm und im ganzen Gebäude konnten Vibrationen verspürt werden.



Bild 1 Schwingungsmessung bei der neuinstallierten Druckmaschine

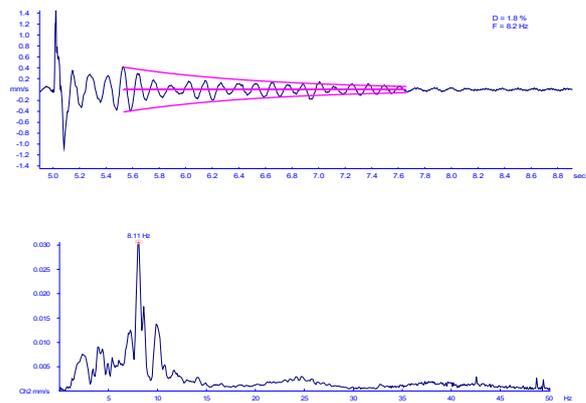


Bild 2 Schwingungsaufzeichnung und Amplitudenspektrum bei Impulsanregung

Als erstes wurden die dynamischen Eigenschaften der Geschossdecke untersucht. Zu diesem Zweck wurde mittels Impulsanregung ein Ausschwingversuch durchgeführt. Die Eigenfrequenz der Decke betrug 8.2 Hz, die Dämpfung 1.8 % (Bild 2). Die Druckmaschine war auf eine Produktion von 14'500 Blatt pro Stunde eingestellt. Dies ergibt 4 kurzzeitige Stösse pro Sekunde. Damit erhält man eine Hauptanregung von 4 Hz aber auch alle höheren Mehrfachen davon, d.h. 8 Hz, 12 Hz usw. Und da die zweite Ordnung mit 8 Hz mit der Eigenfrequenz der Geschossdecke zusammenfiel ergaben sich Resonanzschwingungen.

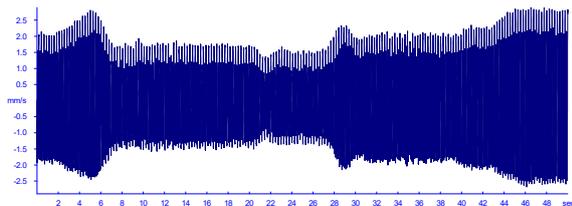


Bild 3 Typische Aufzeichnung der Vertikalschwingung

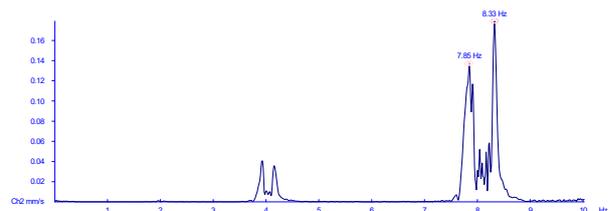


Bild 4 Amplitudenspektrum von Bild 3

Bild 3 zeigt eine Aufzeichnung von 50 Sekunden Dauer. Wie man anhand des Amplitudenspektrums in Bild 4 erkennt wurde in diesem Zeitabschnitt die Leistung von 14'000 Blatt auf 15'000 Blatt erhöht. Dies entspricht einer Frequenzspanne von 3.89 bis 4.17 Blatt pro Sekunde. Die maximale Schwinggeschwindigkeit beträgt 2.89 mm/s, die maximale Beschleunigung 0.175 m/s^2 und die maximale Wegamplitude $60 \text{ } \mu\text{m/s}$. Für die Geschossdecke aus Stahlbeton sind solche Schwingungen keine Gefährdung. Probleme entstehen beim Arbeiten bei solch starken Schwingungen. Eventuell beeinträchtigen sie auch die einwandfreie Funktion der Maschine. Eine einfache Lösung des Problems wäre die Erhöhung der Maschinenleistung gewesen. Damit wäre die Maschine ausserhalb des Resonanzbereiches gewesen. Aber damit war der Betreiber der Druckmaschine nicht einverstanden.

Eigentumswohnungen neben Industriegebäude

Der Mühlenbetrieb stand seit Jahrzehnten inmitten der Industriezone. Doch die Zeiten ändern sich. Industrien verschwinden und anstelle der Industriegebäude werden – da sich das Stadtzentrum mittlerweile ins Industriegebäude ausgedehnt hat – Wohngebäude mit Luxus-Eigentumswohnung erstellt. Nur der Mühlenbetrieb bleibt und produziert weiter, denn er war ja zuerst hier.



Bild 1 Luxus-Eigentumswohnung



Bild 2 Mahlwerk eines Mühlenbetriebes

Die Platzverhältnisse waren eng. Das neue 5-geschossige Wohngebäude musste unmittelbar an den Mühlenbetrieb angebaut werden. Der beigezogene Spezialist stellte sicher, dass sich die Gebäude in keinem Punkt berührten, indem er eine 10 cm dicke Trennschicht zwischen die beiden Gebäude einplante.

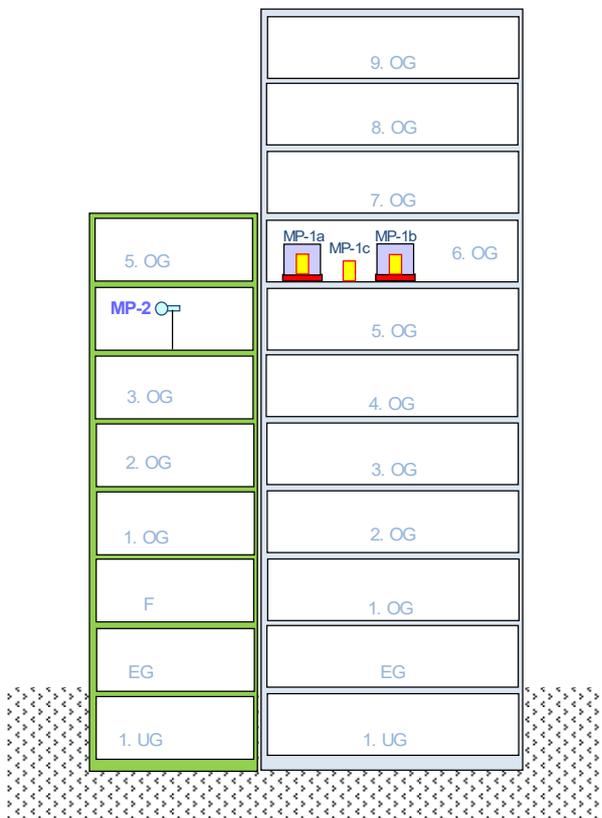


Bild 3 Schnitt durch die beiden Gebäude

Trotzdem wurden die Bewohner der Eigentumswohnungen nicht ganz glücklich. Man hatte mit Dreifachverglasung alles unternommen, um den Aussenschall draussen zu halten. Dafür hörte man den vom Mühlenbetrieb erzeugte Körperschall von 30 dBA umso besser. Und zwar Tag und Nacht.

Die Trennung zwischen den Gebäuden war perfekt ausgeführt worden. Somit konnte die Erschütterungsübertragung nur über den Baugrund erfolgen. Und dort konnte man natürlich nichts mehr ändern. Somit blieb nichts anderes übrig als die Maschinen zu identifizieren, die den grössten Beitrag an den störenden Körperschall liefern und diese elastisch zu lagern.

Mit grossem Aufwand konnte schliesslich der Körperschall auf 23 dBA reduziert werden. Die vollständige Ruhe, wie man sie sich für eine Luxus-Eigentumswohnung erträumt, konnte allerdings nicht erreicht werden. Dies wäre nur mit einer elastischen Lagerung des Wohngebäudes erreicht worden.

Shredder-Anlage

Das Problem schien unlösbar. Die Shredder-Anlage war speziell auf weichen Federn gelagert worden und doch beschwerte sich der Nachbar in 60 m Entfernung über störende Erschütterungen, die zum Teil 4 mm/s erreichten. Ein erstes Ingenieurbüro kam nach umfangreichen Messungen zum Schluss, dass die Lüftungsanlage daran schuld sei. Dies schien dem Besitzer der Shredder-Anlage doch nicht sehr plausibel, sodass ein zweiter Spezialist beigezogen wurde. Die Lösung musste rasch gefunden werden, denn es drohte ein Betriebsstopp.



Bild 1 Shredder-Anlage

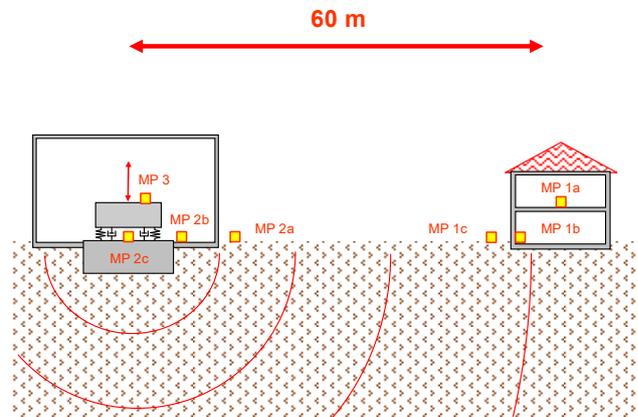


Bild 2 Messkette zwischen Shredder-Anlage und Wohngebäude

Durch eine systematische Messung mit Sensoren auf dem gesamten Ausbreitungsweg zwischen der Shredder-Anlage und dem Einfamilienhaus (Bild 2) konnte festgestellt werden, dass an sich alles seine physikalische Richtigkeit hatte. Die Erschütterungen nahmen exponentiell ab mit einem Exponenten von 1.5, wie es sich gehört. Und zwar sowohl für den ruhigen Normalbetrieb als auch für die immer wieder auftretenden Impulse (siehe Bild 3). Aber diese Impulse konnte niemand erklären. Auch der herbeigerufene Hersteller der Anlage nicht.

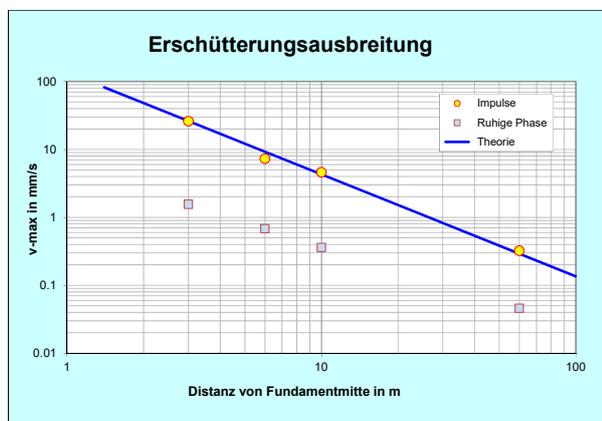


Bild 3 Erschütterungsausbreitung für Impulse und für ruhige Phase

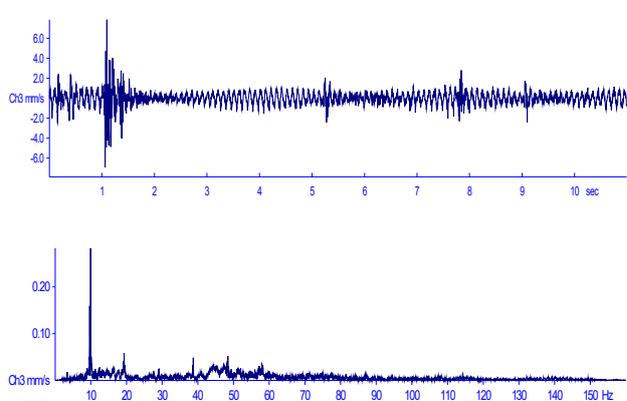


Bild 4 Schwingungsverlauf und Amplitudenspektrum auf Shredder-Fundament

Ein Augenschein unter der Shredder-Anlage zeigte dann, dass das Fördersieb zwischendurch immer wieder mit voller Wucht auf dem Hallenboden aufschlug, da die Federn falsch bemessen waren. Und da es unter der Shredder-Anlage dunkel, nass und schmutzig war, hatte sich niemand die Mühe genommen dort nachzusehen. Mit neuen Federelementen war ein grosser Teil der Impulse weg, aber noch nicht alle. Ein zweiter Augenschein unter der Anlage mit gleichzeitiger Verfolgung der Vibrationen auf dem Bildschirm ergab, dass bei einem Federpaket der Shredder-Anlage eine Feder gebrochen war, denn es knackte immer wieder ganz bedrohlich. Erst das Ersetzen aller Federn mit wesentlich stärkeren Federpaketen brachte den gewünschten Erfolg.